

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK GÜRÜLTÜ ENGELİ TASARIMI İÇİN KARAR
DESTEK ARACI GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR YÖNTEM VE
UYGULAMASI

Ferhan HASMADEN

DOKTORA TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Fiziği Programı

Danışman

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK

Eş Danışman

Prof. Dr. Neşe YÜĞRÜK AKDAĞ

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK GÜRÜLTÜ ENGELİ TASARIMI İÇİN KARAR
DESTEK ARACI GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR YÖNTEM VE
UYGULAMASI**

Ferhan HASMADEN tarafından hazırlanan tez çalışması 10.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Fiziği Programı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Neşe YÜGRÜK AKDAĞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Aslıhan ÜNLÜ TAVİL, Üye
Özyeğin Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşe ERDEM AKNESİL, Üye
Altınbaş Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Nuri İLGÜREL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Suzi Dilara MANGAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK ve eş danışmanım Prof. Dr. Neşe YÜĞRÜK AKDAĞ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Fotovoltaik Gürültü Engeli Tasarımı İçin Karar Destek Aracı Geliştirilmesine Yönelik Bir Yöntem Ve Uygulaması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ferhan HASMADEN



Güneşim kızıma
ve
Sessizliğim dedeme

TEŞEKKÜR

Ders sürecim, tez konumun belirlenmesi ve tez çalışmamın her aşamasında görüşleriyle ufkumu açan, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, bilgileriyle yönlendiren, değerli katkılarıyla çalışmamı zenginleştiren, SoundPLAN yazılımı kullanım imkanı sunan tez danışmanlarım Prof. Dr. Gülay Zorer Gedik ve Prof. Dr. Neşe Yüğrük Akdağ'a minnettarım. Değerli hocalarımla uzmanlıklarının yanı sıra, özverili tutumları, yüreklendirici yaklaşımları ve her daim nazik mizaçları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izlemelerimde, görüşleriyle paha biçilemez katkılar sağlayan değerli hocalarımla Prof. Dr. Aslıhan Ünlü Tavit ve Doç. Dr. Mehmet Nuri İlgürel'e,

Tez savunmamda yaptıkları değerli katkılar için Prof. Dr. Ayşe Erdem Aknesil ve Dr. Öğr. Üyesi Suzi Dilara Mangan'a,

Güneş'i daha önce farketmediğim bir şekilde görmemi ve tasarım parametreleriyle ilişkisini öğrenmemi sağlayan Prof. Dr. Müjgan Şerefhanoglu Sözen başta olmak üzere; yapı fiziği ve tasarım ara kesitinde yer alan konuları derinlemesine öğrenmemi, içselleştirmemi sağlayan Yapı Fiziği Kürsüsü hocalarıma ve Yapı Fiziği programında hayatıma giren değerli arkadaşlarıma,

Çalışmamın daha iyi bir noktaya gelmesinde motivasyon sağlayan değerli hocalarımla Doç. Dr. Özlem Belir, Dr. Öğr. Üyesi Arsal Arısal, Dr. Öğr. Üyesi Candan Durak Ayla, değerli arkadaşım Öğr. Gör. Anday Türkmen'e ve Gedik Üniversitesi'nde yollarımın kesiştiği tüm arkadaşlarıma,

Tez çalışmamda yer alan engel alternatiflerinin statik hesaplamalarında çok kısa bir sürede yardımcı olan, sorularımı içtenlikle cevaplayan İnşaat Mühendisi Arda Cemre Kanat'a ve Serdar Özbay'a,

Doktora eğitimimin başlangıcından nihayete erene kadar yanımda olan ve tüm duygularımı paylaştığım değerli arkadaşlarımla Dr. Öğr. Üyesi Bestem Esi'ye, Arş.

Gör. Uğur Eren Yasak'a ve Arş. Gör. Ayça Büyükçınar'a ve sevgili ablam Melahat Şahin İkisivri'ye,

Maddi ve manevi desteğini bir an olsun benden eksik etmeyen, hedeflerime ulaşmamda cesaret veren sevgili anneme, babama ve her dönüm noktamda duygularımı içtenlikle paylaşan sevgili kardeşim Nagehan Korkmaz'a,

En içten teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Bu satırları okuyamayacak olması içimi sızlatsa da, eğitime verdiği önem ile lisans eğitimimi ve sonrasında açılan yolları Dedem Hasan Hüseyin Korkmaz'a borçlu olduğumu herkese söylemek ve hiç unutmamak için yazmak istiyorum. Eğitim hayatım, yaşanır kıldığı çocukluğum ve bulunduğu çevrenin ilerisinde vizyonu için en kıymetlim, canım dedeme minnet doluyum.

Doktora eğitiminin zorlu sürecinde, varlığından güç aldığım sevgili eşim ve en büyük şansım Sinan Hasmeden'e; her zor anımda yanımda olduğu için, umudumu yitirdiğim anlarda dahi beni yüreklendirdiği için, problem yaşadığım her soruna çözüm bulduğu için, bana yıllar boyu çalışmam için gerekli zaman ve mekanı yarattığı için, çalıştığım zamanlarda kızımızla en iyi şekilde ilgilendiği için, sabrını ve neşesini hiç kaybetmediği için, duygularımı tüm içtenliğiyle paylaştığı, sayısız yardımları ve birlikte yürüdüğümüz keyifli yol için teşekkürü bir borç bilirim.

İçimdeki azmi borçlu olduğum; yaşamımıza girişle beni dönüştüren, dünyamı aydınlatan, hayat görüşümün oluşmasında dönüm noktam olan canım kızım Şebnem'e, neşesi, resimleri, mektupları, sabır ve olgunluğu, farklı bakış açıları için çok teşekkür ederim.

Ferhan HASMADEN

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xv
SİMGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xx
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	6
1.3 Hipotez.....	6
1.4 Araştırma Soruları	8
1.5 Tezin Kapsamı	9
2 LİTERATÜR TARAMASI	13
2.1 FVGE Tasarımına İlişkin Faktörlerin Literatür Taraması	14
2.1.1. Tasarıma Yönelik Parametrelerin Ele Alındığı Çalışmalar.....	14
2.1.2 İşletime Yönelik Parametrelerin Ele Alındığı Çalışmalar.....	24
2.1.3 Performans Göstergelerine Yönelik Parametrelerin Ele Alındığı Çalışmalar	29
2.1.4 Değerlendirme.....	38
2.2 Dünyadan FVGE Uygulamaları	38
2.2.1 Değerlendirme.....	45
3 OPTİMUM FVGE TASARIMINA YÖNELİK BİR YAKLAŞIM	46
3.1 Yaklaşımın amacı.....	46
3.2 Yaklaşımın Kapsamı.....	47
3.3 Yaklaşımın Yöntemi	47
4 KEŞFEDİCİ ALAN ÇALIŞMASI	52
4.1 Metodoloji Kurma.....	52
4.1.1 Alana İlişkin Veriler.....	53
4.1.2 FVGE Alternatifleri.....	61
4.2 Parametrik Çalışma	64
4.2.1 Güneş Modelinin ve Gürültü Haritalarının Oluşturulması	64

4.3 Performans Analizi	72
4.3.1 Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi	72
4.3.2 ÇKKV ile Optimum FVGE Seçiminin Yapılması	87
4.4 Değerlendirme	90
4.4.1 Korelasyon Analizi	91
4.4.2 Tasarım Önerileri	93
5 KARAR DESTEK ARACININ GELİŞTİRİLMESİ	95
5.1 Metodoloji Kurma	100
5.1.1 FVGE Veritabanının Geliştirilmesi	100
5.2 Parametrik Çalışma	103
5.2.1 Güneş Enerjisi Modülünün Geliştirilmesi	103
5.2.2 Gürültü Denetimi Modülünün Geliştirilmesi	125
5.3 Performans Analizi	133
5.3.1 Kriterleri Ağırlıklandırma Şemasının Geliştirilmesi	134
5.3.2 ÇKKV ile Optimum FVGE Seçiminin Yapılması	143
5.4 Değerlendirme	144
5.4.1 Ekonomik Analiz Modülünün Geliştirilmesi	145
5.4.2 Performans Sıralaması	162
6 FVGE KARAR DESTEK ARACI UYGULAMASI	164
6.1 Metodoloji Kurma	165
6.2 Parametrik Çalışma	166
6.2.1 Güneş Enerjisi Modülü Girdileri	166
6.2.2 Gürültü Denetimi Modülü Girdileri	167
6.2.3 Mevcut Durum Özelliklerinin Hesaplanması	168
6.2.4 Performans Hesaplamalarının Başlatılması	169
6.3 Performans Analizi	170
6.4 Değerlendirme	173
6.4.1 Bulguların Değerlendirilmesi	178
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	181
7.1 Bulgular	184
7.2 Yaygın Etki	186
7.3 Özgün Değer	189
7.4 Çalışmanın Sınırlılıkları ve Gelecekteki Çalışmalar	190

KAYNAKÇA	192
A DÜNYADAN FVGE UYGULAMALARI	213
B KEŞFEDİCİ ALAN ÇALIŞMASINDA MODELLENEN 1K VE 2K ENGELLERİN GÜNEŞ ENERJİSİ PERFORMANSLARI	219
C GÜNEŞ IŞINIMININ YAPISI VE IŞINIM TAHMİNLERİ HESAPLAMALARINA YÖNELİK LİTERATÜR TARAMASI	224
D GÜNEŞİN KONUMUNUN BELİRLENMESİNE YÖNELİK GÜNEŞ AÇILARININ HESAPLAMALARI	230
E EĞİMLİ BİR YÜZEYDEKİ TOPLAM GÜNEŞ IŞINIMININ HESAPLANMASI	233
F GÜNEŞ ENERJİSİ YAZILIMLARINA YÖNELİK LİTERATÜR TARAMASI ÖZETİ	238
G ŞEHİRLERİN AYLIK ORTALAMA IŞINIM VERİLERİ VE GÜN DOĞUMU-GÜN BATIMI SAATLERİ	240
H GÜNEŞ ENERJİSİ MODÜLÜNÜN HESAPLAMA TABLOSU	241
İ KARAR DESTEK ARACI VERİTABANINA KAYITLI FVGE ALTERNATİFLERİNDEN BAZILARININ KESİT GÜRÜLTÜ HARİTASI	245
J ALANLARIN GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİ DÜZEYİNİ VE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELLERİNİ DEĞERLENDİREN İNDEKSLER	246
K ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME , TOPSIS METODU	247
L FOTOVOLTAİK SİSTEM BİLEŞENLERİNİN BİRİM MALİYETLERİ	249
M ÖRNEK FVGE ALTERNATİFİNİN DESTEK STRÜKTÜRÜNÜN STATİK ANALİZİ	250
N FVGE VERİTABANI ALTERNATİFLERİNİN DESTEK STRÜKTÜRLERİNİN METRAJİ	252
O GÜRÜLTÜ ENGELİ MALZEME TIPLERİNE GÖRE GÜRÜLTÜ ENGELİ PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ VE BİRİM MALİYETLERİ	265
P EKONOMİK PERFORMANS GÖSTERGELERİ	267
Q GÜRÜLTÜ RAHATSIZLIĞININ PARASAL DEĞERE ÇEVİRİLMESİNE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR	269
R AÇIKLAYICI ALAN ÇALIŞMASININ FVGE ARACI İLE YAPILAN HESAPLAMA ÇIKTILARI	271
S ÇEVRESEL VE EKONOMİK PERFORMANS AÇISINDAN OPTIMUM FVGE ALTERNATİFİNİN 25 YILLIK FAYDA/MALİYET ANALİZİ	276
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	279

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 İsviçre'de uygulanan ilk FVGE kurulumu (1989) [33]	3
Şekil 1.2 Türkiye'de kaynağa göre enerji temin oranları (2019) [35]	4
Şekil 1.3 Tez akış şeması	12
Şekil 2.1 Literatür taramasının organizasyonu.....	13
Şekil 2.2 FVGE kesit örnekleri [42].....	14
Şekil 2.3 A27 otoyolunda yer alan FVGE'nin alt dizisinin yol işaretleri tarafından gölgelenmesi [60]	17
Şekil 2.4 Eğimin bir fonksiyonu olarak yıllık ışınım ve azimut açıları	18
Şekil 2.5 Dikey gürültü engeline kısa yan kenarlar eklenerek kırınım yüzeyinin artırılması [63]	22
Şekil 2.6 Rijkswaterstaat tarafından geliştirilen, Modüler Gürültü Engelleri Yapılandırma ve Uygulama Kılavuzu tasarım yaklaşımı.....	23
Şekil 2.7 Almanya Münsingen'de yer alan FVGE uygulamasının bitkiler nedeniyle gölgelenmesi	26
Şekil 2.8 Gürültü engellerinin etkisini değerlendirme-hoşnutsuzluk (yararsızlık) fonksiyonu [129].....	37
Şekil 2.9 Farklı FVGE strüktürlerinin şematik eskizleri	40
Şekil 2.10 FVGE için düzenlenen yarışmada Almanya'da uygulanan kurulumlar,1996	41
Şekil 2.11 İtalya Cittadella'da geliştirilen güneş enerjili ses panelleri [136]	42
Şekil 2.12 Hollanda Den Bosch'ta, fotovoltaik gürültü engeli test kurulumunun prototipi	44
Şekil 2.13 Rolling Solar Fotovoltaik entegre edilen gürültü engelinin ilk kısmının kurulumu [140]	44
Şekil 3.1 Yaklaşımın akış diyagramı.....	51
Şekil 4.1 Keşfedici alan çalışması akış şeması	53
Şekil 4.2 Devlet yolları hacim haritası, birinci bölge [142]	54
Şekil 4.3 Çalışma alanının Google Earth görünümü.....	54
Şekil 4.4 Çalışma alanının havadan görünümü	55
Şekil 4.5 Çalışma alanının güncel hali hazır haritası.....	56
Şekil 4.6 Çalışma alanının aylık ortalama ışınım verileri.....	57
Şekil 4.7 Çift Kırıklı FVGE alternatiflerinin türetilmesine yönelik akış şeması	63

Şekil 4.8 Çalışma alanının PVsyst'te oluşturulan 3B modeli	65
Şekil 4.9 Mevcut durumun ızgara gürültü haritası (Lgün)	67
Şekil 4.10 Mevcut durumun cephe gürültü haritası	71
Şekil 4.11 FVGE alternatiflerinin elektrik enerjisi üretimleri.....	73
Şekil 4.12 $h=2$ m ve $d=5$ m alternatifi için minimum (a) ve maksimum (b) eğim açıları için güneş ufukları	74
Şekil 4.13 $h=2$ m ve $d=5$ m alternatiflerinin aylara göre performans oranı-sıcaklık ilişkisi	75
Şekil 4.14 FVGE alternatiflerinin PO ve gölgeleme kaybı ilişkisi	76
Şekil 4.15 FVGE alternatiflerinin neden olduğu, bitişik bloklardaki ışınım kaybı	77
Şekil 4.16 FVGE alternatiflerinin gürültü denetimi verimliliği	79
Şekil 4.17 En yakın bloğun güneydoğu cephesinin kat düzeylerine göre FVGE alternatiflerinin gürültü denetimi verimliliği	82
Şekil 4.18 FVGE alternatiflerinin, engelden farklı uzaklıklardaki bloklarda gürültü düzeylerine etkisi	83
Şekil 4.19 Cephe yönlerine göre FVGE alternatiflerinin gürültü düzeylerine etkisi ...	84
Şekil 4.20 FVGE Alternatiflerinin kriterlere göre performans göstergeleri	86
Şekil 4. 21 Çevresel etkisini değerlendirme için gürültü engelinin faydasızlık işlevleri [129]	89
Şekil 4.22 Mevcut durum kesit gürültü haritası (üst) ve optimum FVGE alternatifinin kesit gürültü haritası	90
Şekil 4.23 FVGE alternatif tiplerinin farklı kat düzeylerinde ortalama gürültü azaltımı	93
Şekil 5.1 Araç şeması.....	97
Şekil 5.2 Aracın çalışma prensibi	98
Şekil 5.3 FVGE karar destek aracının arayüzü	99
Şekil 5.4 Gürültü engeliyle sağlanan gürültü azaltımının yükseklikle değişimi [165]	101
Şekil 5.5 FVGE alternatiflerinin kod sistematığı.....	103
Şekil 5.6 Güneş enerjisi modülünün çalışma prensibi	104
Şekil 5.7 Güneş enerjisi modülünün çalışma prensibi	107
Şekil 5.8 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) [20]	111
Şekil 5.9 İstanbul için azimut ve panel eğim açısına göre nMBE değerleri	114
Şekil 5.10 Ankara için azimut ve panel eğim açısına göre nMBE değerleri.....	114
Şekil 5.11 Antalya için azimut ve panel eğim açısına göre nMBE değerleri.....	114

Şekil 5.12	İstanbul için aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri.....	115
Şekil 5.13	Ankara için aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri	115
Şekil 5.14	Antalya için aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri	115
Şekil 5.15	Yolun karşısındaki binaların, güneş panelleri üzerindeki gölge oranını belirleyen hesaplama şeması	119
Şekil 5.16	Modül verimliliği ve modülün birim maliyeti ilişkisi.....	122
Şekil 5.17	FVGE karar destek aracının ara yüzü ve güneş enerjisi modülünün girdi tablosu	124
Şekil 5.18	Gürültü denetimi modülünün çalışma prensibi	125
Şekil 5.19	Kaynak-alıcı arasındaki mesafe ve H/W ilişkisine göre ses basınç düzeyindeki artış grafiği [192]	127
Şekil 5.20	Alıcı noktalar ile gürültü engelinin modellendiği alanın kesit görüntüsü (Autocad)	129
Şekil 5.21	İstanbul için aylara göre rüzgar hızı değerleri (mph) ve rüzgar yönleri (Climate Consultant)	129
Şekil 5.22	SoundPLAN yazılımına tanımlanan hakim rüzgar yönü ve rüzgar hızı ...	130
Şekil 5.23	FVGE karar destek aracının ara yüzü ve gürültü denetimi modülünün girdi tablosu	133
Şekil 5.24	Performans analizi bölümünün çalışma prensibi	134
Şekil 5.25	Engel yüksekliğinin bitişik bloklarda sebep olduğu ışınım kaybı.....	141
Şekil 5.26	FVGE karar destek aracının yere özgü kriter ağırlıkları bölümü	143
Şekil 5.27	FVGE karar destek aracının kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları bölümü ...	143
Şekil 5.28	TOPSIS metodu ile belirlenen optimum FVGE alternatifinin gürültü kesit haritası	144
Şekil 5.29	Değerlendirme modülünün çalışma prensibi	145
Şekil 5.30	Çalışma kapsamında ele alınan FVGE kesiti	146
Şekil 5.31	Tek kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 2 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri	151
Şekil 5.32	Tek kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 3 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri	151
Şekil 5.33	Çift kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 2 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri	152
Şekil 5.34	Çift kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 3 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri	152
Şekil 5.35	Prefabrikte/Öngerilmeli beton paneller için yaşam döngüsü modeli (50 yıllık hizmet ömrü varsayımı için) (ICC= ilk inşa maliyeti, G=Grafiti kaldırma, Engel yüzey alanının %1'i; PR=Panel değiştirme, Engel	

uzunluğunun %1'i; BP=Engel boyama, Engel alanının %1'i, D=Bertaraf).	154
Şekil 5.36 Modül verimliliği %20 olan FVGE alternatiflerinin aylara göre elektrik enerjisi üretim miktarları.....	158
Şekil 5.37 Modül verimliliği %15 olan FVGE alternatiflerinin aylara göre elektrik enerjisi üretim miktarları.....	159
Şekil 5.38 FVGE karar destek aracı arayüzünün performans çıktıları bölümü	163
Şekil 6.1 Açıklayıcı alan çalışmasının yapıldığı alanın güncel hali hazır haritası	165
Şekil 6.2 İstanbul ili için kullanıcı tanımlı azimut açısına göre hesaplanan dönemsel optimum eğim açılarını gösteren hesaplama tablosu	166
Şekil 6.3 FVGE karar destek aracı arayüzünün kullanıcı tanımlı girdi tablosu.....	168
Şekil 6.4 FVGE karar destek aracı arayüzünün mevcut durum tablosu	169
Şekil 6.5 FVGE karar destek aracı arayüzünün hesaplama tablosu.....	170
Şekil 6.6 FVGE karar destek aracı arayüzünün yere özgü kriter ağırlıkları tablosu .	171
Şekil 6.7 FVGE karar destek aracı arayüzünün, yere özgü kriter ağırlıkları ile teknik performans açısından optimum FVGE seçiminin gürültü haritasının gösterildiği bölüm.....	172
Şekil 6.8 FVGE karar destek aracı arayüzünün kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları tablosu	172
Şekil 6.9 FVGE karar destek aracı arayüzünün, kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları optimum FVGE seçiminin gürültü haritasının gösterildiği bölüm.....	173
Şekil 6.10 FVGE karar destek aracı arayüzünün, yere özgü kriter ağırlıkları ile optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm	174
Şekil 6.11 FVGE karar destek aracı arayüzünün, kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları ile optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm	175
Şekil 6.12 FVGE karar destek aracı arayüzünün, çevresel performans açısından optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm	177
Şekil 6.13 FVGE karar destek aracı arayüzünün, ekonomik performans açısından optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm	178

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Tez çalışması süresince araştırılması gereken sorular.....	8
Tablo 2.1 İstanbul ili, Güney ve Güneydoğu yönü için dönemsel periyotlara göre optimum eğim açıları	16
Tablo 2.2 Malzeme tiplerine göre gürültü engeli performans ölçütleri [72].....	20
Tablo 2.3 FVGE performansını etkileyen faktörler ve performans göstergeleri.....	39
Tablo 4.1 Çalışma alanının genel verileri.....	55
Tablo 4.2 Çalışma alanının iklim ve ışınım verileri	58
Tablo 4.3 Şile otoyolunun trafik hacim verileri.....	59
Tablo 4.4 Şile Otoyolu araç sayımı verileri ve İBB sensör verileri karşılaştırması	59
Tablo 4.5 .Tek kırıklı FVGE alternatiflerinin tasarım aşaması	62
Tablo 4.6 Çift kırıklı engel tasarımının 1. aşaması	62
Tablo 4.7 Çift kırıklı engel tasarımının 2. aşaması	64
Tablo 4.8 Gürültü ölçüm sonuçları ve hesaplama istatistikleri	69
Tablo 4.9 Çift kırıklı FVGE alternatifleri tasarımının 2. Aşaması (hatırlatma tablosu)	85
Tablo 4.10 Kriter ağırlıklandırma aşamaları	89
Tablo 4.11 Tasarım değişkenleri ve performans göstergeleri korelasyon matrisi.....	91
Tablo 5.1 İstanbul ili için farklı zaman periyotları ve azimut açılarına göre optimum eğim açıları	100
Tablo 5.2 Geliştirilen aracın veritabanına kaydedilen FVGE alternatiflerinin tasarım değişkenleri boyutları	102
Tablo 5.3. Eğimli yüzeylerdeki ışınımı hesaplayan transpozisyon modelleri tahmin performanslarının literatür çalışmalarının özeti.....	105
Tablo 5.4 Aracın azimut ve eğim açılarına göre istatistiksel hata göstergeleri.....	113
Tablo 5.5 Aracın, aylara göre istatistiksel hata göstergeleri	117
Tablo 5.6 Bina yüksekliği ve yol genişliği değişkenlerine göre H/W oranları	128
Tablo 5.7 Karayolu çevresel gürültü sınır değerleri [194].....	131
Tablo 5.8 Gürültü denetimine ilişkin veri ve kabuller	132
Tablo 5.9 Akustik ortam kalite sınıfları ve kriter ağırlıkları.....	137
Tablo 5.10 Güneş enerjisi uygunluk indeksinin, alt kriter ağırlıkları ile atanan dereceleri [204]	138
Tablo 5.11 Bina tiplerinin IEQ indekslerine göre fiziksel çevre faktörlerinin kriter ağırlıkları.....	140

Tablo 5.12 Güneş ışığı kaybı ve güneş enerjisi kriterlerinin önceliklendirilmesi	142
Tablo 5.13 Kriter ağırlıkları arasındaki farkın önem derecesi karşılığı	142
Tablo 5.14 GYİH 2021 Değerleri [206] ve oran tablosu.....	148
Tablo 5.15 Gürültü engeli işletme maliyeti işlem sıklığı ve birim maliyeti	155
Tablo 5.16 %2,5 indirgeme oranı doğrultusunda yıllara göre CO ₂ sosyal maliyeti..	156
Tablo 5.17 Düzey 1 ile 4 arası kamusal elektrikli araç şarj tesislerinin özeti	158
Tablo 5.18 Karayolu gürültüsü fayda maliyeti için önerilen ekonomik değer tablosu	161
Tablo 5.19 Yıllara göre öngörülen enflasyon oranları	162
Tablo 6.1 25 yıllık FVGE maliyetleri ile FV sistemin hariç tutulduğu maliyet analizlerinin karşılaştırması.....	180
Tablo 7.1 FVGE karar destek aracı girdileri ve çıktıları	187

KISALTMALAR

FHWA	Amerikan Federal Karayolları İdaresi
AHP	Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)
SPBT	Basit geri ödeme süresi
BGKKHY	Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik
EPA	Çevre Koruma Ajansı
ÇGDYY	Çevresel Gürültünün Denetimi ve Yönetimi Yönetmeliği
2K	Çift Kırınımlı Engel
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
F/M	Fayda / Maliyet oranı
FVGE	Fotovoltaik Gürültü Engeli
FV	Fotovoltaik
GYİH	Gayrisafi Yurtiçi Hasıla
IRR	İç karlılık oranı
IEQ	İç Ortam Kalitesi (Indoor Environmental Quality)
DPBT	İndirgenmiş geri ödeme süresi
WTA	Kabul Etme İstekliliği (Willingness to Accept)
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking)
NBD	Net bugünkü değer
WTP	Ödeme İstekliliği (Willingness to Pay)
LCOE	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
1K	Tek Kırınımlı Engel
TLCC	Toplam yaşam döngüsü maliyeti
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)

SİMGE LİSTESİ

n_i	Yerleşimin toplam nüfusu
n	Yerleşimdeki bina adedi
s	Hesaplanan binanın kat adedi
b	Kattaki daire adedi
p_{sb}	Dairedeki kişi sayısı
E_{grid}	Şebekeye Verilen Elektrik Enerjisi Miktarı
$1R$	Keşfedici alan çalışmasında yerleşimin ilk sırasındaki bloklar
ALL	Keşfedici alan çalışmasında yerleşimdeki tüm bloklar
G_{POA}	Modül Yüzeyindeki Küresel Işınım
Shd_{Loss}	Yakın Kütlelerden Kaynaklanan Gölgeleme Kaybı
Ill_{Loss}	Engele Bitişik Bloğun Cephesindeki Işınım Kaybı
ΔL	Gürültü Azaltımı, dBA
Y_f	Nihai Verim
Y_r	Referans Verim
P_{PV}	Fotovoltaik Sistemin Nominal Gücü
E_{AC}	Günlük Toplam Elektrik Üretimi
E_{DC}	FV Dizisi Elektrik Çıktısı
G_{stc}	Referans Işınım (1000 W/m ²)
CF	Kapasite Faktörü
n_{pv}	Fotovoltaik Sistemin verimliliği
A_{PV}	Toplam modül yüzeyi alanı
$n_{kirlenme}$	Kirlenmeden kaynaklanan verimlilik kaybı
$n_{yansima}$	Yansımadan kaynaklanan verimlilik kaybı
L	Yol genişliği
H	Yolun karşısında, gölgelemeye sebep olacak binaların ortalama yüksekliği
L_M	Güneş modüllerinin yatay izdüşümü
X_b	Modülün gölgelenen bölümü
X_M	Modülün genişliği
α	Güneş yükseklik açısı
β	Modülün eğim açısı
h	Gürültü engeli dikey bölümü yüksekliği
W	Yolun genişliği
n_M	Modül Verimliliği
n_T	sıcaklığa bağlı modül verimliliği
n_{kablo}	Kablo verimliliği
n_{MPPT}	Maksimum güç noktası izleme kayıpları verimliliği
n_{inv}	Evirici (inverter) verimliliği
n_{MM}	Modül uyumsuzluğu kayıpları verimliliği
γ	Sıcaklık katsayısı
T_c	Hücre Sıcaklığı
T_a	Ortam Sıcaklığı
$NOCT$	Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı
G	Modül yüzeyindeki net günlük solar ışınım (1 kWh/m ² /gün)

% A	Rahatsız Kişi Yüzdesi
%HA	Aşırı Rahatsız Kişi Yüzdesi
SSI	Güneş Enerjisi Alan Uygunluk İndeksi
TNEM	Trafik gürültüsü değerlendirme modeli, toplam gürültü kirliliği miktarı, dB(A)
ATNEM	Kişi başına gürültü kirliliği indeksi
m	Gürültü kirliliği hesaplanan alanine bölümlendiği parka sayısı
ΔLA_i	Standartta belirtilen limiti aşan gürültü düzeyi değeri
n_{pi}	Her bir parçadaki, gürültüye maruz kalan kişi miktarı
AC_w	İklim için ağırlıklı katsayı
$A_1 F_w$	Küresel güneş ışınımı için ağırlıklı katsayı
$A_1 G$	Küresel güneş ışınımı sınıfı derecesi
$A_2 F_w$	Güneşlenme süresinin ağırlıklı katsayısı
$A_2 G$	Güneşlenme süresi sınıfının derecesi
$A_3 F_w$	Hava sıcaklığının ağırlıklı katsayısı
$A_3 G$	Hava sıcaklığı sınıfının derecesi
$A_4 F_w$	Bağıl nemin ağırlıklı katsayısı
$A_4 G$	Bağıl nem sınıfının derecesi
BC_w	Orografinin ağırlıklı katsayısı
$B_1 F_w$	Eğim için ağırlıklı katsayı
$B_1 G$	Eğim sınıfı derecesi
$B_2 F_w$	Yön için ağırlıklı katsayı
$B_2 G$	Yön sınıfı derecesi
CC_w	Vejetasyon için ağırlıklı katsayı
$C_1 F_w$	Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü ağırlıklı katsayı
$C_1 G$	Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü sınıfı derecesi
SSI	Güneş Enerjisi Alan Uygunluk İndeksi
$CW_{güneş}$	Güneş enerjisi kriter ağırlığı
C_c	Yatırım maliyeti
C_0	İşletim maliyeti
n	Sistemin yaşam ömrü, yıl sayısı
$C_{M\&R}$	Bakım ve onarım maliyeti
C_E	Enerji maliyeti
$C_{diğer}$	Diğer maliyetler (evirici, kimyasal, batarya vb.)
ICC	İlk inşaa maliyeti
B_{CO_2}	Önlenen CO ₂ emisyonunun faydası (€/yıl)
$E_{l_{prod,t}}$	Üretilen elektrik enerjisi miktarı (kWh/yıl)
AV_{CO_2}	Önlenen CO ₂ emisyonu miktarı (Ton/kWh)
Val_{CO_2}	Önlenen CO ₂ emisyonu değeri (€/ton CO ₂)

Fotovoltaik Gürültü Engeli Tasarımı İçin Karar Destek Aracı Geliştirilmesine Yönelik Bir Yöntem Ve Uygulaması

Ferhan KORKMAZ HASMADEN

Mimarlık Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK

Eş Danışman: Prof. Dr. Neşe YÜĞRÜK AKDAĞ

Güneş enerjisinin temininde büyük alanlara duyulan gereksinim; dünya nüfusunda devam eden artışın gıda ve enerji üzerinde yarattığı baskı ile ele alındığında, güneş enerjisinin temininde ek alan gerektirmeyen çözümler önem arz etmektedir. Bu çözümlere örnek olarak; gürültü engellerinin fotovoltaik sistemler için bir alt strüktür olarak değerlendirildiği Fotovoltaik Gürültü Engelleri (FVGE) verilebilir. Bu uygulama ile strüktür ve araziye ikinci bir fonksiyon yüklenerek, gürültüye karşı geliştirilen çözüm ile yenilenebilir enerji üretimi birleştirilir. Fotovoltaik paneller ile üretilen enerjinin, elektrikli araçlarda kullanılması, ulaştırma endüstrisinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını önleyebilir.

Bu çalışmada, FVGE planlamasında, tasarımcıya rehberlik edecek bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda, günümüze kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak, FVGE sistemler teknik, ekonomik, çevresel

performans açısından aynı anda incelenmiştir. Çalışmada, farklı parametrelerin birlikte değerlendirildiği kompleks biçimleniş sürecinin tüm performans ölçütlerine etkisinin detaylı bir şekilde hesaplandığı Excel tabanlı karar destek aracının tasarlanması çalışmaya özgün değer sağlamaktadır.

Çalışma; keşfedici alan çalışması, karar destek aracının geliştirilmesi ve karar destek aracının uygulanması olmak üzere 3 temel aşamaya sahiptir.

Keşfedici alan çalışmasında, tasarım parametrelerinin FVGE performansına etkileri mevcut bir konut yerleşiminde araştırılıp keşfedilmiştir. Güneş enerjisi performansı PVsyst yazılımı ile, gürültü denetimi performansı ise SoundPLAN yazılımı ile analiz edilmiştir.

Karar destek aracı geliştirilirken, yazılımlar bünyesinde yapılan hesaplamalar, sayısal modellere ve kayıtlı verilere dönüştürülmüştür. Alana ilişkin öncelikler kriter ağırlıklandırma şemaları ile belirlenmiş, optimum performans gösteren alternatifler tanımlanmış ve fayda/maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Karar destek aracının gerçek bir kentsel alanda uygulanması ile araç kullanımı tanıtılmıştır. Yere özgü veya kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları ile teknik, ekonomik ve çevresel açıdan optimum FVGE alternatifleri belirlenmiştir.

Maliyet analizleri sonucunda, fotovoltaik sistem entegrasyonunun gürültü engeline dayalı ilk yatırım ve işletme maliyetini artırdığını; ancak, sağladığı yüksek net güncel değer ile yatırımın kendini geri ödeme süresini 11 ila 13 yıl kısalttığı görülmüştür. Geliştirilen aracın, etkin FVGE planlama sürecine pozitif katkı sağlayacağı açıktır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistem, gürültü engeli, karar destek aracı.

A Method to Develop A Decision Support Tool For Photovoltaic Noise Barrier Design and Application

Ferhan KORKMAZ HASMADEN

Department of Architecture

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK

Co-supervisor: Prof. Dr. Neşe YÜĞRÜK AKDAĞ

The need for large areas in the supply of solar energy by contradicting with the pressure of increasing world population on food and energy demand, solutions which do not require additional space are crucial in providing solar energy. As an example of these solutions; Photovoltaic Noise Barriers (PVNB) can be given, where noise barriers are considered as a substructure for photovoltaic systems. With this application, by introducing a second function in structure and land, it is aimed to combine the solution for noise and generation of renewable energy. Using the energy produced by photovoltaic panels in electric vehicles can prevent greenhouse gas emissions from the transportation industry.

In this study, it is aimed to create an approach that will guide the designer in PVNB planning. PVNB systems have been examined simultaneously in terms of technical, economic and environmental performance, unlike the studies carried out until today. In the study, the design of the Excel-based decision support tool, in which different parameters are evaluated together with the effect of the

complex formation process, detailed calculation of all performance criteria provides unique value to the study.

This study, consists of 3 main stages: the exploratory case study, development of the decision support tool and implementation of the decision support tool.

In an exploratory field study, the effects of design parameters on PVNB performance were investigated and discovered in an existing residential area. Solar energy performance of PVNB alternatives was analyzed with PVsyst, and noise control performance was analyzed with SoundPLAN software.

In development of decision support tool section, the calculations made within the software were converted into numerical models and recorded data. Priorities related to the area were determined by criterion weighting schemes, optimum alternatives were defined and cost/benefit analyzes were carried out.

With the objective and subjective criteria weighting schemes to determine the priorities in the field, optimum choices were made in terms of technical, economic and environmental aspects, and cost/benefit analyzes were conveyed.

Tool usage is introduced with the application of the decision support tool in a real urban area. With site-specific or user-defined criteria weights, optimum PVNB alternatives were determined in terms of technical, economic and environmental aspects.

As a result of the cost analysis, it was concluded that the integration of the photovoltaic system increased the initial investment and operating costs based on the noise barrier; however, it has been observed that the high net current value shortens the payback period of the investment by 11 to 13 years. It is clear that the developed tool will contribute positively to the effective PVNB planning process.

Keywords: Photovoltaic system, noise barrier, decision support tool.

1.1 Literatür Özeti

Kentlerdeki kontrolsüz nüfus artışına paralel olarak gerçekleşen, ulaşım arterlerinin tasarımına odaklı plansız ve düzensiz kentleşme Türkiye'deki gürültü kirliliğini artırmaktadır. Maruz kalınan gürültünün süresi ve gürültü şiddeti, kişilerin sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sebep olur. Fizyolojik ve psikolojik etkiler olarak sınıflandırılan etkiler, kişilerin çalışma performansını ve yaşam kalitesini etkiler.

Kent içerisinde bulunan en etkili gürültü kaynaklarından birisi ulaşımdır [1]–[3]. Trafik gürültüsü günün her saatinde var olan, zamana bağlı olarak artan ve azalan bir kirlilik unsurudur. Çevresel gürültü önemli bir çevre sorunudur ve karayolu trafiği gürültü kirliliğinin en önemli kaynağıdır [4]. Genel olarak, trafik gürültüsünün araçlardan kaynaklanan akustik spektrumu çoklu frekanslardan oluşur ve çoğunun spektrumu frekans aralığında 80 Hz-2500 Hz arasına düşer [5]. Bu aralıktaki sesler insan kulağı tarafından kolayca duyulabilir ve büyük rahatsızlığa neden olabilir. Bu durum kısa dönemde; uyku bozuklukları, stres ve rahatsızlık, uzun dönemde ise hipertansiyon ve kalp rahatsızlıklarına sebep olur [6], [7]. Bu nedenle gürültü azaltımı halk sağlığı açısından önemli bir endişedir.

Genel olarak gürültünün ve enerjinin doğrudan ilişkisi olmamakla birlikte, ulaşımın enerji tüketimi üzerindeki payı büyüktür. Nitekim, ulaşım sektörü dünyadaki toplam enerjinin %29'unu tüketmekte ve karayolu taşımacılığı, ulaşım sektörü tarafından kullanılan enerjinin %89'unu oluşturmaktadır. [8], [9]. Küresel olarak kentsel hareketlilikteki artışın 2050'de, 2015'e göre %95 daha yüksek olacağı öngörülmektedir [10]. Şubat 2021 verilerine göre mevcut durum ulusal boyutta incelendiğinde, Türkiye'deki motorlu araç sayısının 24 milyonu aştığı ve bir önceki yılın Şubat ayına göre %42,8 artış gösterdiği görülmüştür [11].

Fosil yakıt kullanımına dayalı ulaşım sistemi sonucunda, atmosfere karbondioksit (CO_2), karbon monoksit (CO) ve nitrojen oksitler ($NO_x = NO_2 + NO$) ile birincil partikül madde (PM), kükürt dioksit (SO_2) ve yakıt ve yanma sürecine bağlı olarak diğer bileşikler salınır. Karbondioksit emisyonları, gezegen üzerindeki ışımsal etkileri ve iklim değişikliğindeki rolleri nedeniyle öncelikli bir endişe kaynağı olurken, diğer emisyonlar bozulmuş hava kalitesi yoluyla insan sağlığını etkiler [12]. Dolayısıyla ulaşımın enerji tüketimi ile ilişkisinin yanı sıra, çevre ve gürültü kirliliği açısından da farklı boyutları vardır. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, Avrupa'nın batı kesiminde her yıl en az 1 milyon yaşam, trafik gürültüsünden kaynaklanan sakatlık veya hastalıklardan dolayı kaybedilmektedir [13]. Dünya nüfusunun yaklaşık %55'i şehirlerde yaşamakta ve şehirler küresel birincil enerji talebinin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır [14]. Sonuç olarak, kentsel alanlarda, karayolu trafiğinin enerji ve gürültü kirliliği üzerindeki etkisini hafifletecek uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılması, dekarbonizasyonun yanında enerji temin güvenliği ve sürdürülebilirlik konusunda da önem arz etmektedir. Sera gazı azaltım politikalarının teşvik ettiği yenilenebilir kaynaklar arasında güneş enerjisi, teknik olarak tüm küresel enerji talebini aşan bir kaynak potansiyeline sahiptir [15].

36° - 42° Kuzey enlemleri arasında yer alan Türkiye, coğrafi konumundan dolayı, güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir ülkedir [16]–[19]. Yıllık ortalama güneşlenme süresi 2640 saattir ve bu miktar, günde ortalama 7,2 saatlik güneşlenme süresine karşılık gelmektedir [20]. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları içinde erişilebilir en yüksek potansiyelini güneşten elektrik enerjisi üretimi oluşturmaktadır [21].

Güneş enerjisi teknolojileri, bir arazi miktarı üzerinde üretilebilecek maksimum güç miktarını ifade eden 'güç yoğunluğu' kavramının mevcut şartlarda düşük olması nedeniyle, fosil kaynaklara nispeten düşük verimli kabul edilirler [22]. Güneş enerjisinin temininde ek alan gerektirmeyen çözümler önem arz etmektedir. Bu çözümlere örnek olarak; FV sistemlerin farklı yenilenebilir enerji

teknolojiler ile 'müşterek alan' (mutual land) üzerinde uygulandığı hibrit sistemler, [23]–[27], binaya entegre fotovoltaik sistemler [28]–[30], agrovoltaik sistemler [31], düşük arazi kalitesine sahip alanlara (kahverengi alanlar) uygulanan FV sistemler [32] verilebilir. Yol kenarı gibi düşük arazi kalitesine sahip alanlara inşa edilen gürültü engellerine entegre fotovoltaik sistem çözümleri de arazi kullanımını minimize etmektedir [33]. Fotovoltaik sistemlerin gürültü engelleri üzerine uygulanması, büyük ölçekli fotovoltaik sistem kurulumları için ekonomik yollardan biri olmakla birlikte çevreyi gürültü kirliliğinden korurken elektrik üretimi gibi ek faydalar da sağlamaktadır.

İlk fotovoltaik gürültü engelinin kurulumu 1989 yılında İsviçre'de gerçekleşmiştir (bkz. Şekil 1.1) ve 2010 yılında Avrupa'da 7 MWp işletim kapasitesine ulaşmıştır [33]. İsviçre'nin ardından, Avusturya, Almanya ve Hollanda'da FVGE sisteminin ilk örnekleri yapılmıştır.

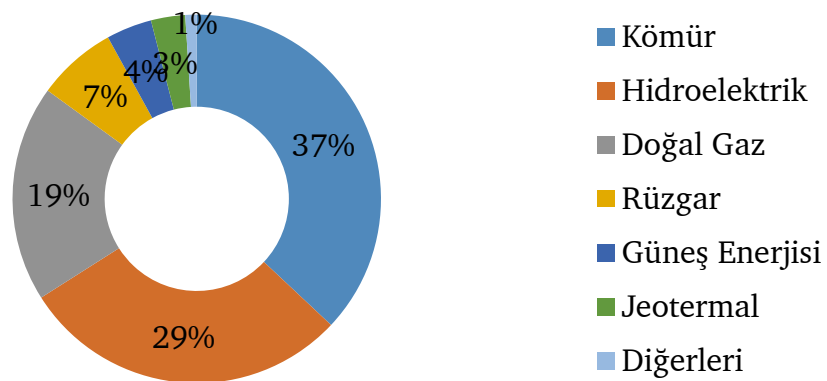


Şekil 1.1 İsviçre'de uygulanan ilk FVGE kurulumu (1989) [33]

Bu tez çalışmasına yol açan problem, iki bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen yenilenebilir enerji talebi ile, ikinci bileşen gürültü kirliliği ile ilgilidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç, talep artışının yanı sıra fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin olumsuz sonuçlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, gelecek yıllarda enerji talebiyle birlikte karayolu altyapısına olan talep de artacaktır. Özellikle petrol ve doğal gaz olmak üzere ithalata olan büyük bağımlılığı nedeniyle, Türkiye, enerji stratejisinin temel direklerinden biri olarak

enerji arz güvenliğine öncelik vermiştir. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının genişletilmesini teşvik etmeye devam etmeyi ve 2017-27 döneminde 10 GW kapasiteli güneş ve rüzgar santrallerinin devreye girmesini hedeflemektedir [34].

Uluslararası Enerji ajansı (İEA) 2021 raporuna göre, Türkiye'nin yenilenebilir elektrik enerjisi üretiminin son 10 yılda neredeyse üç katına çıktığı ve toplam elektrik üretimindeki payının 2019'da %44'e ulaştığı belirtilmiştir [35]. Böylelikle, Türkiye için 11. Kalkınma Planında, 2019-2023 kapsamında yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin %38,8'lik hedefi aşılmıştır [36]. Enerji kaynağına göre temin oranları Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Kaynağa göre, hidroelektrik enerji yenilenebilir enerji olarak tanımlanarak oranlara dahil edilmiştir. Hidroelektrik için, literatürde rapor edilen çevresel etkiler genellikle biyolojik çeşitliliğin sınırlanması, fauna ve flora üzerindeki etkiler, tarihi kalıntıların tahribatı ve görsel etkilerle ilişkilendirilmiştir [37]. Bir hidroelektrik santralının çevresel etkisinin değerlendirildiği çalışmada, çevreye yaptığı baskının, bazı durumlarda telafi edilemeyecek seviyelere ulaştığı aktarılmıştır [38]. Bu yönüyle değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji kaynağı olarak; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerjiye dayalı enerji temininin %14 olduğu görülmüştür.



Şekil 1.2 Türkiye'de kaynağa göre enerji temin oranları (2019) [35]

Fotovoltaik gürültü engeli (FVGE) uygulamaları, gürültü engellerinin fotovoltaik sistemler için bir alt yapı olarak değerlendirildiği, ses azaltım hedeflerinin

yanında elektrik üretimi sağlandığı sistemlerdir. Bu uygulama ile strüktür ve araziye ikinci bir fonksiyon yüklenerek, malzeme ve arazi tasarrufunun yanında; gürültüye karşı geliştirilen çözüm ile yenilenebilir enerji üretiminin birleştirilmesi amaçlanmaktadır. Yol kenarı gibi düşük arazi kalitesindeki alanlarda hem yenilenebilir enerji üretimi hem de söz konusu bölgelerde bulunan konut sakinlerinin işitsel konforu sağlanır. Böylece, güneş enerjisinin en büyük dezavantajı olan, temininde büyük alanlara gereksinim duyulması bu teknoloji ile aşılabılır.

FVGE sistemleri, enerji ihtiyacı yüksek olan yoğun nüfuslu kentsel alanlarda sınırlı güneş kaynakları sorununu ele almak için alternatif bir çözüm olarak hizmet edebilir [39]. FVGE sisteminin avantajları aşağıda aktarılmıştır [33];

- Arazi kaynaklarının çifte kullanımı; Yerleşik bir alanda bir demiryolu veya karayolu altyapısı boyunca uzanan arazi şeridi, gürültü koruması ve ayrıca elektrik enerjisi üretmek için FV modüllerinin yerleştirilmesi için kullanılabilir.
- Yüksek potansiyel; Fotovoltaik gürültü engelleri için, özellikle elektrik enerjisi kullanımının yüksek olduğu yoğun nüfuslu ve sanayileşmiş bölgelerde yüksek bir potansiyel vardır.
- Toplu prefabrikasyon; Fotovoltaik gürültü engellerinin, mekanik ve elektrik prefabrikasyonu, ulaşım altyapısı boyunca inşa edilen şebekeye bağlı FV tesislerinin çoğunda kullanımını kolaylaştırır.
- Kamu mülkiyeti; Gürültüden korunmayı içeren bir otoyol projesi genellikle bir kamu projesidir ve ek FV santrali bir bütün olarak finansman planına, planlama ve inşaat sürecine dahil edilebilir.
- Kolay erişim; Mevcut yollar, FVGE sistemlerinin inşası ve bakımı için kullanılabilir. Genel karayolu veya demiryolu bakımı için uygun nakliye araçları zaten mevcuttur.
- Potansiyel; Mevcut ve planlanan gürültü engelleri dikkate alındığında, üretim kapasitesi, ulaşım sisteminin topolojisi ve ilgili bölge için

meteorolojik veriler doğrultusunda, akustik konforun yanında elektrik üretimi için büyük bir potansiyel sunar.

1.2 Tezin Amacı

Fotovoltaik sistemlerle bütünleşik tasarlanan gürültü engellerine yönelik, Avrupa ülkeleri başta olmak üzere çeşitli ülkelerde sistemlerin getirileri ve potansiyellerine yönelik önemli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar, ülke ölçeğinde FVGE potansiyelini belirlemeye veya kısıtlı bir alan için uygulama prensiplerini ve sonuçlarını ortaya koymaya yöneliktir. Çevresel ve ekonomik etkilerin biçimlenişle birlikte ele alındığı araştırmalar sınırlıdır.

FVGE sistemleri, enerji tüketimi, gürültü kirliliği ve arazi kısıtı gibi birden fazla zorluğa hitap eden birleşik bir çözüm sunar. Tez çalışması ile, farklı disiplinler tarafından değerlendirilen teknolojilerin bütüncül bir tasarım yaklaşımı ile ele alınarak, farklı fiziksel çevre bileşenlerine sahip alanlarda uygulanabilirliğinde kullanıcı odaklı tasarım destek aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Tasarım destek aracının, gürültü engeline gereksinim duyulan bir alanda, engel tasarımının güneş enerjisi ile birlikte değerlendirilerek, ses azaltımı ve elektrik üretimi potansiyeli hakkında tasarımcıya rehberlik etmesi hedeflenmektedir.

Faydaların (ekonomik, çevresel, sosyal) görünür kılınarak, kentsel alanlarda güneş enerjisi kullanımını yaygınlaştırma ve gürültü engeli uygulama potansiyelini artırarak trafik gürültüsüne maruz kalan nüfusu azaltmak hedeflenmiştir. Ayrıca fotovoltaik modüller ile üretilen enerjinin, elektrikli araçlarda kullanımı, ulaşımda fosil yakıt payını düşürerek, Türkiye'nin sera gazı azaltım hedeflerine katkı sağlayacaktır. Engel tiplerinin performansına yönelik olarak elde edilen sonuçların, tasarımcıların kolayca yararlanabilmesine olanak sağlayacak biçimde, excel tabanlı bir araç yardımı ile ortaya konması hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Kentsel hareketlilikteki artış, ulaşım kaynaklı enerji tüketimini ve gürültü kirliliğini artırdığı için, bina yerleşimlerinin FVGE tasarım önerileri ile ele

alınması gereklidir. FVGE uygulamaları, ulaşım altyapısının kenarına uygulanarak, elektrikli araç kullanımını kolaylaştırır ve gürültüye maruz kalan nüfus oranını azaltır. Ancak, güneş enerjisi ve gürültü denetimi analizlerinin, disiplinler arası bir yaklaşım gerektirmesi temel zorluktur. FVGE sistemlerin, erken tasarım aşamasında alana özgü öncelikler doğrultusunda teknik, ekonomik ve çevresel performans açısından değerlendirildiği bir yaklaşım gereklidir.

FVGE sistemlerin güneş enerjisi ve gürültü denetimi performansı, tasarım parametrelerine bağlıdır. Form değişkenlerinin, performans göstergelerinin yanı sıra strüktürlerin maruz kaldığı yükleri de etkileyerek, yapım maliyeti açısından belirleyici olduğu öngörülmektedir. FVGE strüktürlerin, engele yakın bloklarda gölgeleme yaratarak cephede gün ışığı kaybı yarattığı da göz önüne alınmalıdır.

Gürültü engellerine FV sistemlerin entegrasyonu, ilk yatırım maliyetini artırsa da, güneş enerjisi fayda maliyetlerinin dahil edilmesiyle, genel sistemin yaşam döngüsünün sonundaki net bugünkü değerinin gürültü engeline göre yüksek olacağı öngörülmektedir. Bu durumun, yatırımın geri ödeme süresini azaltacağı ve FVGE'yi uygulanabilir hale getireceği düşünülmektedir.

Gürültü denetimi ve güneş enerjisi, konumsal olgular olduğu için, her proje için farklı teknik çözümler gerekmesi, hem proje maliyetini artırır hem de kent sakinlerinin parçalı ve dağınık bir yol görüntüsüne maruz kalmasına sebep olur. Dolayısıyla farklı alan ihtiyaçları için, aynı boyutlara sahip panellerle farklı kesitler sağlayan modüler yapım yaklaşımı gereklidir.

Çalışmanın alt amaçlarından olan, kriter ağırlıklandırma; teknik, çevresel ve ekonomik performans arasındaki denge üzerinde belirleyici niteliğe sahiptir. Bu nedenle; teknik, çevresel ve ekonomik performans göstergeleri kendi birimleri ile bütünleşik olarak değerlendirilmeli ve uygulayıcının/karar vericinin öncelikleri göz önünde bulundurulmalıdır. FVGE'nin teknik performansı, alanın güneş enerjisi ve gürültü denetimi özelliklerine göre belirlendiğinden, alanın önceliklerinin objektif olarak değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir.

1.4 Araştırma Soruları

Çalışmanın genel araştırma sorusu; “FVGE tasarımında, akustik ve enerji performansı arasındaki denge, teknik, çevresel ve ekonomik açıdan nasıl sağlanmalıdır?” olarak ortaya konmuştur. Bu soruya yanıt aramaya yönelik çalışma süresince araştırılan diğer alt sorular Tablo 1.1’de sıralanmaktadır:

Tablo 1.1 Tez çalışması süresince araştırılması gereken sorular

No	Araştırma Sorusu	Araştırma Metodu
1	FVGE performansında etkili çevresel faktörler nelerdir?	Literatür Taraması
2	FVGE performansına etki eden tasarım kararları nedir?	Literatür Taraması
3	FVGE performansını etkileyen işletim kararları nedir?	Literatür Taraması
4	Strüktürlerin teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal performans göstergeleri nedir?	Literatür Taraması
5	FVGE tasarımında ideal yaklaşımın özellikleri nasıl olmalıdır?	Keşfedici alan çalışması
6	Optimum FVGE seçimini belirleyen anahtar kararlar nedir?	Keşfedici alan çalışması
7	Eğimli yüzeylerdeki güneş ışınımı hesaplama adımları ne olmalıdır?	Karar-destek aracının geliştirilmesi
8	FV sistemine paralel kütlelerin gölgeleme miktarı nasıl tahmin edilir?	Karar-destek aracının geliştirilmesi
9	FVGE kesitlerinin gürültü denetimi çıktılarına etkisi nedir?	Karar-destek aracının geliştirilmesi
10	FVGE kesitinin belirlenmesinde, gürültü denetimi ve güneş enerjisi performansı arasındaki önceliklendirme nasıl yapılmalıdır?	Karar-destek aracının geliştirilmesi
11	FVGE karar destek aracı nasıl kullanılmaktadır?	Açıklayıcı alan çalışması
12	Çevresel koşullar, kullanıcı tercihleri ve tasarım parametreleri seçimi nasıl etkiler?	Açıklayıcı alan çalışması
13	FVGE karar destek aracının güçlü yönleri, sunduğu olanaklar ve sınırlılıkları nedir?	Çalışma sonuçlarının incelenmesi

1.5 Tezin Kapsamı

Tez kapsamında, FVGE tasarım süreci için gerekliliğine inanılan ve disiplinlerarası bir değerlendirme sunan yaklaşım geliştirilmiştir.

Fotovoltaik sistemlerin ve gürültü engellerinin; tasarım, modelleme ve analizlerinin aynı anda yapıldığı yazılım bulunmamaktadır. Bu durum, farklı disiplinlerin çatısı altında değerlendirilen FVGE sistemlerin; performans değerlendirmelerini, çevresel etkilerini ve fayda/maliyet analizlerini güçleştirmektedir. Tez kapsamında geliştirilen aracın, parametre tanımlamaya uygun ve çeşitli performans ölçütlerine göre değerlendirme yaparak tasarım kararlarına destek olması hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda, sistemin çevresel koşullar dahilinde kullanıcı tercihleriyle tekno-ekonomik değerlendirmesine olanak tanıyan akış diyagramlarına dayalı excel tabanlı bir sayısal hesaplama modeli geliştirilmiştir.

Tezde izlenen adımlar ve akış şeması Şekil 1.3'de verilmiştir.

- 1. Giriş;** Problemin tanımlandığı giriş bölümünde, kentlerdeki karayolu kullanımına bağlı gürültü sorunu ve enerji tüketiminin etkilerinden bahsedilerek çözüm önerileri araştırılmıştır. Kahverengi alanlara yönelik çözüm önerilerinden fotovoltaik gürültü engellerine yönelik araştırma soruları doğrultusunda tezin amacı ve hipotez tanımlanmıştır.
- 2. Literatür Taraması;** FVGE teknolojisini oluşturan güneş enerjisi ve gürültü denetimi sistemlerinin performanslarına etki eden faktörler ve performans göstergeleri araştırılmıştır. FVGE tasarım kriterleri araştırılarak, her iki sistem açısından optimum performans sağlayan kesit literatür taraması doğrultusunda belirlenmiştir. Ayrıca, uluslararası FVGE uygulama örneklerine yer verilmiştir.
- 3. Optimum FVGE Tasarımına Yönelik Bir Yaklaşım;** FVGE tasarımına yönelik yaklaşımın adımları ve temel ilkeleri belirlenmiştir.
- 4. Keşfedici Alan Çalışması;** Yaklaşımın ilk döngüsünde, keşfedici alan çalışması yapılmıştır. İlk olarak, hem yoğun karayolu trafik gürültüsüne

maruz kalan hem de güneş enerjisi potansiyeline sahip bir alan belirlenmiştir. Literatür taraması doğrultusunda tek kırıklı ve çift kırıklı engel alternatifleri planlanmıştır.

Alana ait iklim, ışınım, çevre ve trafik verileri elde edilmiştir. Veriler ve FVGE alternatifleri güneş enerjisi modelinin oluşturulduğu PVsyst yazılımına ve gürültü haritalarının oluşturulduğu SoundPLAN yazılımına aktararak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Alternatiflerin güneş enerjisi, gürültü denetimi ve konutlardaki günışığı kaybı performansları, çok kriterli karar verme (ÇKKV) analizlerinden TOPSIS metodu ile karşılaştırılarak optimum seçim belirlenmiştir. Son olarak, korelasyon analizi ile tasarım değişkenlerinin birbiri ile ilişkisi irdelenerek bulgular ve öneriler elde edilmiştir.

5. Karar Destek Aracının Geliştirilmesi; Bu bölüm, keşifsel alan çalışmasının sistematik bir çerçeveye oturtulması ve her alanda hesaplamayı sağlayan bir araca dönüştürülmesine odaklanır.

İlk olarak, keşfedici alan çalışmasının bulguları ve önerileri doğrultusunda FVGE veritabanı oluşturulmuştur.

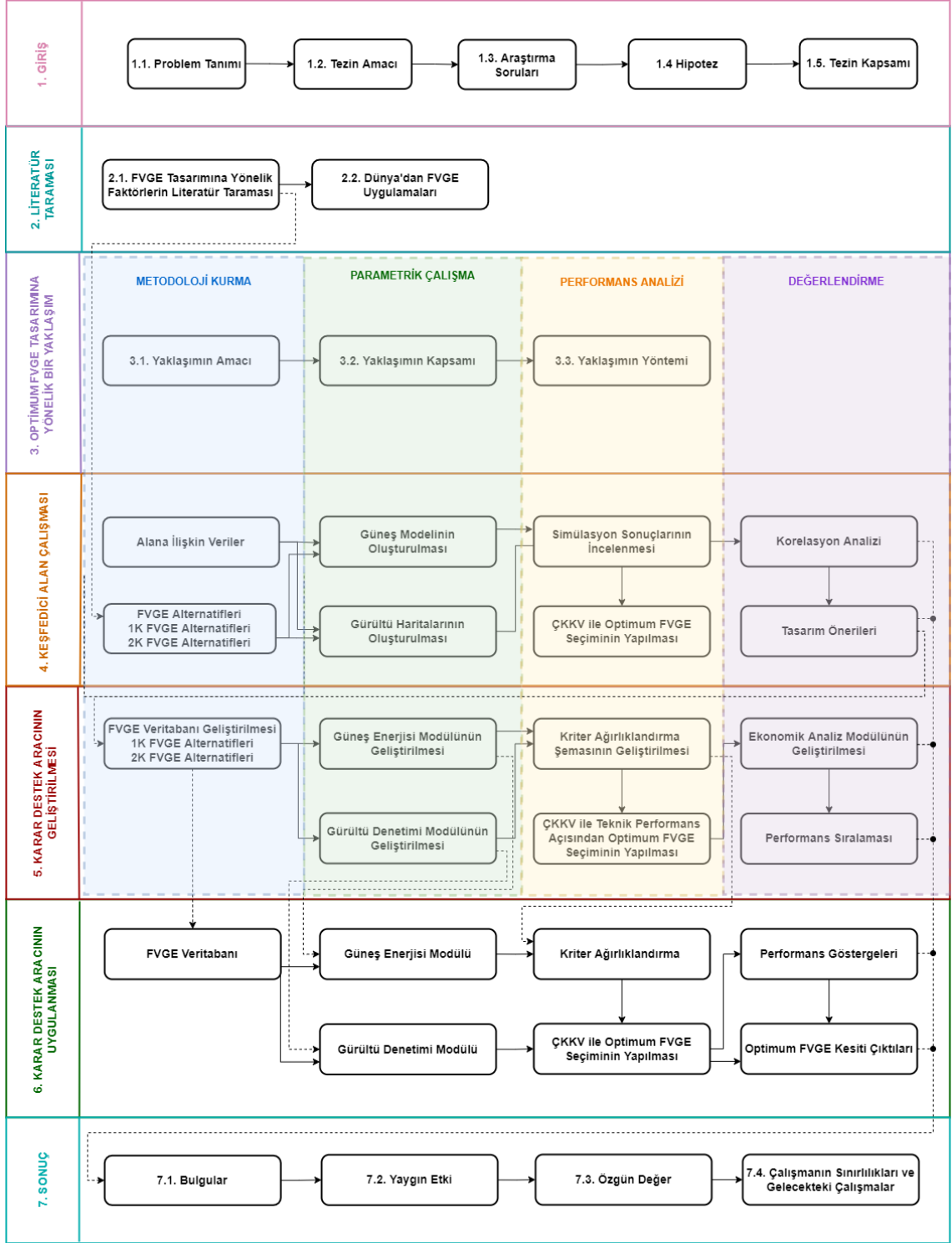
Simülasyon basamağında, güneş enerjisi ve gürültü denetimi performanslarının hesaplanmasına yönelik iki ayrı modül tasarlanmıştır. Güneş enerjisi modülü, farklı azimut ve eğim açılarının hesaplanmasına olanak tanıyan, sistemin gölgelenme oranını da hesaba katan Perez modeline dayalı bir hesaplama prosedürü sunar. Gürültü denetimi modülü ise, FVGE alternatiflerinin, gürültü haritalama yazılımı hesaplama sonuçlarının kayıtlı değerlerini sunar. Bu değerler, alanın özelliklerine, bina tipine ve değerlendirilen zaman aralığına göre filtrelenerek kullanıcıya sunulur.

Karar basamağında, keşfedici alan çalışmasında kullanılan doğrudan derecelendirme tekniğinden farklı olarak, alan önceliklerine dayalı indeksleri kullanan bir kriter ağırlıklandırma şeması geliştirilmiştir. Böylece, güneş enerjisi, gürültü denetimi ve günışığı kaybı her alan

özelinde yeniden objektif olarak değerlendirilerek TOPSIS metodu ile teknik performans açısından optimum seçim yapılır.

Analiz basamağında ise, maliyet analizlerine yönelik kararlar tanımlanarak çevresel ve ekonomik açıdan FVGE performans sıralaması ile optimum seçim yapılır.

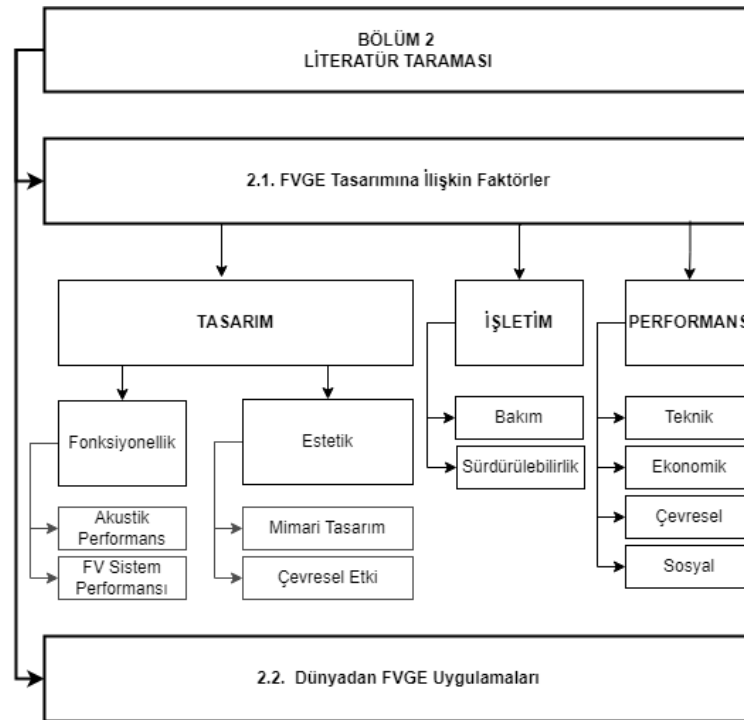
- 6. Yaklaşımın Uygulanması;** Bu bölümde, geliştirilen FVGE karar destek aracı gerçek bir alanda uygulanmıştır. Çalışma için İstanbul'da bir alan belirlenerek, gürültü düzeyi ve çevre verileri araca tanımlanmıştır. Alan için optimum FVGE kesiti belirlenerek, seçimin teknik, çevresel ve ekonomik performansı incelenmiştir.
- 7. Sonuç ve Öneriler;** Alan çalışmaları ve tüm adımlar nihayetinde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Çalışmanın özgün değeri ve yaygın etkisine yer verilmiştir. Çalışmanın sınırlılıkları irdelenerek gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler yapılmıştır.



Şekil 1.3 Tez akış şeması

FVGE tasarım parametrelerinin tanımlanması ve analizi, bu bağlamda uygun ve uygulanabilir projelerin tasarım ve seçimini yönlendirmek için gereklidir. FVGE strüktürlerinin ana işlevleri, alıcıları karayolu trafiğinden kaynaklanan aşırı gürültüden korumak ve elektrik enerjisi üretmektir. FVGE tasarımlarının detaylı tasarımında birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Öncelikle, ana fonksiyonlarını yerine getirebilecek performans kriterlerini (akustik performans ve enerji performansı) sağlamalıdır. FVGE'nin bütünlük performansı, sistemlerin kalitesinin yanında işletim ve maliyet konularına ilişkin birçok faktörün kombinasyonudur. Engelin yaşam ömrü boyunca optimum performansı gösterebilmesi, yapısal bütünlüğünü koruması ve diğer konularda yeni sorunlara neden olmaması gibi faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekir.

FVGE teknolojisinin tasarımına yönelik literatür taraması; FVGE tasarımına ilişkin faktörler ve Dünya'dan FVGE uygulamaları olmak üzere 2 bölümde ele alınmıştır. Bölümün organizasyonunu gösteren şema Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Literatür taramasının organizasyonu

2.1 FVGE Tasarımına İlişkin Faktörlerin Literatür Taraması

FVGE teknolojisinin tasarımına yönelik literatür taraması; tasarım aşaması, işletim aşaması ve performans göstergeleri başlıklarında gruplandırılmıştır.

2.1.1. Tasarıma Yönelik Parametrelerin Ele Alındığı Çalışmalar

FVGE tasarım parametreleri, performansa etki eden fonksiyonel parametreler ve estetik parametreler olmak üzere gruplandırılarak aktarılmıştır.

2.1.1.1 Fonksiyonellik

FVGE strüktürleri, ana işlevi olan gürültü azaltımı ve güneş enerjisi konularında performans hedeflerini sağlamalıdır. FV dizisinin kurulu gücünün yerinde kontrolüne yönelik IEC 61829 standardı, ses engellerinin akustik performans ölçümlemesi için EN 1793 standardı olmasına rağmen, tüm sistemi kapsayan bir standart bulunmamaktadır [40], [41]. Bu nedenle FV sistem performansına ve gürültü denetimi performansına ilişkin parametreler ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan literatür taramasından sonra ortak parametreler belirlenmiştir.

Fotovoltaik sistem performansında, engelin formu hem güneş enerjisi hem gürültü denetimi performansı açısından belirleyicidir. Elektrik verimi söz konusu olduğunda, modülün yüksekliği, eğimi ve yönü FVGE formunun önemli parametrelerindedir. FVGE engel kesitlerine örnekler Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 FVGE kesit örnekleri [42]

Kentsel alanda planlanan fotovoltaik sistemlerde, modüllerin montaj yüksekliğini olabildiğince artırmak gölgeleme riskini azaltsa da, yüksek gürültü engelleri estetik, statik ve ekonomik nedenlerle kullanışlı değildir [43]. Dikey bir engele,

ekstra kenarlar eklenmesinin, daha yüksek bir gürültü engeline ve yutucu yüzeylere ihtiyaç duyulmadan ses geçiş kaybını artırdığı görülmüştür [44], [45].

Güneş enerjisi ve gürültü denetiminin birlikte ele alındığı hibrit çözümlerde, fotovoltaik paneller, maksimum güç elde etmek için gürültü engeline bir eğim açısı oluşturacak şekilde yerleştirilmelidir. FV yüzeylerinin eğim açısı; engellerin akustik performansı, strüktürel tahditleri, enerji tüketim profili, iklim verileri ve gölgelenme durumuna göre belirlenmelidir. Fotovoltaik sistemde üretilen enerji ağırlıklı olarak, modüllerin yüzeyine gelen güneş ışınımı miktarından etkilenir [46]. Bir güneş modülüne çeşitli zaman aralıklarında gelen güneş enerjisi miktarı, yerel ışınım değerleri, modülün yönelimi, eğimi ve zemin yansıma özellikleri dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Güneş panellerinin yüzeyine ulaşan ışınım miktarını etkileyen önemli bir parametre de panelin yönelimi ve eğim açısıdır. FVGE sistemin azimut açısını belirleyen yolun yönelimi sabit ve değiştirilemez olduğundan, tasarım aşamasında panel eğim açısı dikkatle ele alınmalıdır. Bir sistemin optimum eğim açısı yerel iklim şartlarına, enlemine ve kullanım periyoduna göre değişir [47].

Fotovoltaik modüllerin sabit olduğu sistemlerde, sisteme yıl boyu maksimum ışınım sağlayan açı optimum eğim olarak tanımlanır. Bir bölgeye ait optimum eğim açısı, eğimli yüzeylerde ölçülen küresel güneş ışınımı verilerine dayanmaktadır. Belirli bir alan için optimum eğim açısı, yerinde ölçüm yoluyla, simülasyonlarla veya matematiksel hesaplamalarla saptanabilir. Tablo 2.1 İstanbul ili azimut 0° (güney yönü) ve azimut -30° (güney doğu yönü) için, aylık, mevsimlik, 6 aylık veya yıllık periyotlarda saptanan optimum eğim açılarını göstermektedir.

Fotovoltaik sistemin enerjisini maksimize etmenin en iyi yolu güneş takip sistemleri olsa da, izleme sisteminin maliyeti ve enerjiye ihtiyaç duyması gibi nedenlerle her zaman uygulanabilir değildir. Bu nedenle güneş panellerini optimum bir eğim açısında tasarlamak ve zaman zaman eğimi düzeltmek daha uygulanabilir bir yoldur [48].

Tablo 2.1 İstanbul ili, Güney ve Güneydoğu yönü için dönemsel periyotlara göre optimum eğim açıları

Kaynak	Dönem	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A
[47] Az: 0°	Ay	58°	50°	37°	21°	8°	0°	3°	16°	34°	48°	57°	59°
	Mevs.	55,67°		22,00°			6,33°			46,33°			55,6°
	Yıl	32,6°											
[49] Az: -30°	Ay	53°	45°	34°	27°	14°	8°	15°	21°	33°	45°	55°	58°
	Mevs.	51°		25°			15°			43°			51°
	6-Ay	45°		19°						45°			
	Yıl	31°											
[50] Az: 0°	Yıl	61°	51°	37°	21°	6°	1°	2°	16°	34°	48°	60°	62°
[51] Az: 0°	Yıl	26° - 30°											
[52] Az: 0°	Yıl	36°											
[53] Az: 0°	Yıl	31°											

FVGE sisteminin uygulandığı farklı lokasyonlarda, modüllerin eğim açısı incelenmiştir. Optimum eğim açısının ortalama 40° olduğu Avrupa’da, mevcut eğimli FVGE sistemler incelendiğinde, uygulamaların eğim açılarının 45° ve 50° aralığında olduğu görülmektedir [54], [55]. Wadhawan ve Pearce, FVGE sistemlerinin kirlenme kayıpları ve strüktürel maliyetlerini diğer sistem parametreleri ile birlikte değerlendirildiğinde, optimal olmayan yönelimlerin de büyük oranda üretim potansiyeli sunduğunu vurgular [56]. Almanya’da uygulanan FVGE sistemlerinin yıllık üretim verileri incelendiğinde, hava akımı sağlanan ve gölgeleme kaybı az olan dike yakın eğime sahip panellerin, optimum eğime göre konumlananlardan daha iyi performans gösterebileceği görülmüştür [33]. Vallati vd. bina ortalama yüksekliği düşük olduğunda (3-6 m) T şekilli engel ile, bina ortalama yüksekliği daha fazla olduğunda (6-15 m) ise 60° eğimli kırınım yüzeyine sahip gürültü engeli ile gürültü denetimi ve güneş enerjisi performansı açısından en iyi sonucu elde etmiştir [57]. İtalya’da A22 Brennero otoyolunun kenarında farklı eğimlere sahip iki kırınım yüzeyinden oluşan

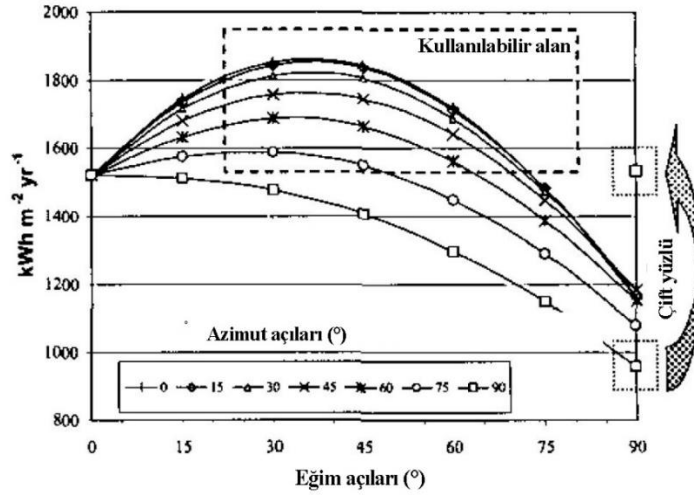
fotovoltaik gürültü engelini, kırınım yüzeylerinden biri optimum eğim açısına (35°) sahipken, diğeri dike yakın (60°) açıda tasarlanmıştır [58].

Optimum eğim belirlenirken yaygın olarak benimsenen trigonometrik algoritma, güneş modülünde gölgeye sebep olan herhangi bir engelin olmadığını varsaymaktadır. Optimum eğim açısının hesaplanmasında, enlem ve hava durumu gibi faktörler dikkate alınsa da, kent içindeki bir uygulamada çevredeki engellerden etkilendiği için gölgeleme ve gökyüzü engelleme etkileri de dikkate alınmalıdır [59]. Bu nedenle, fotovoltaik gürültü engeli strüktürünün konumlanacağı alan çevresi ile birlikte modellenerek, optik kayıplar sonrasında panel yüzeyleri üzerinde maksimum etkili ışınımı sağlayan eğim açısı belirlenmelidir. Tasarım aşamasında öngörülemeyen gölgelemeye ilişkin bir örnek Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 A27 otoyolunda yer alan FVGE'nin alt dizisinin yol işaretleri tarafından gölgenmesi [60]

Sistemin optimum eğimini belirleyen diğ er bir önemli husus ise; eğimli modül yüzeylerinin üzerinde partikül birikmesidir. Modüller; toz, kir, kar vb. birikmesini önleyecek ölçüde yüksek seçilmelidir [42]. Kar birikmesini önlemek için, yüzeylerin 45° veya daha dik olması tavsiye edilir [61]. Bellucci vd. İtalya'da otoyol kenarlarındaki fotovoltaik gürültü engellerinin potansiyelini araştırdığı çalışmada, panel eğimi ve ışınımına göre belirlenen kurulumun uygunluğunu gösteren bir metod geliştirmiştir. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi, panel yüzeyinde toz birikimini engelleyen 25° eğim açısı ve küresel yatay ışınım değerleri uygunluk sınırlarıdır [62]. Sistemin verimi geometrik konfigürasyona sahip engeller ile artırılabilir.



Şekil 2.4 Eğimin bir fonksiyonu olarak yıllık ışıma ve azimut açıları

Fotovoltaik sistem parametreleri aşağıdaki maddelerde özetlenmiştir [42];

- Fotovoltaik sistemlerin, modüllerde güç ve uyumsuzluk kayıplarına sebep olan; ağaç, sokak lambası, bina veya çıkıntılı yapı parçaları gibi öğelerle gölgelenmesi önlenmelidir.
- Modüllerin eğim açısı; gürültü azaltımı için strüktürel sınırlar, enerji ihtiyacı ve toz birikmesine önleme arasındaki denge gözetilerek belirlenmelidir.
- Gürültü engelini yönü, yolun yönü ve alıcı konfigürasyonuna göre belirlendiği için, yönelimin azimut açısından farklı olduğu durumlarda, çok-yönlü veya esnek montaj sistemleri kullanılabilir.
- Fotovoltaik sistemin dönüştürme verimliliğini önemli oranda etkilediği için, hücrelerdeki sıcaklık artışını azaltarak FV performansını iyileştiren termal tasarımlar yapılmalıdır.
- Evirici (inverter) girişi ile fotovoltaik sistem çıkış verimlerindeki dalgalanmalar arasında iyi bir eşleşme sağlanmalıdır.

Gürültü engelini performansı, öncelikle engelin konumuna bağlıdır. Bir gürültü engelini olması durumunda, alıcı konumundaki kaynak gürültüsü; ses engelini üst kenarından kırılan dalgalar ve engelden geçen dalgalar olmak üzere iki ses yolundan kaynaklanır. Böylece alıcı, geçen ve kırınım ile iletilen gürültüye maruz kalır. Geçen gürültü yalnızca engel malzemesinin özelliklerine ve yüzeydeki

boşluk/delik miktarına bağılyken, kırılan gürültü engelin konumuna, şekline ve boyutlarına bağılıdır [63].

Trafik gürültüsü, gürültü engelinden alıcılara; kütle titreşimi yolu ile, geçirgenlik ile ve açıklıklar ile olmak üzere 3 farklı yolla geçebilir [64]. Engelin kaynak yönündeki ve alıcı yönündeki enerji oranlarının dB cinsinden ifade edilen ortak logaritmasına geçiş kaybı (transmission loss, TL) denir. Bir engelin iletim kaybı, malzemesine (esas olarak ağırlığına) ve gürültü kaynağının spektrumuna bağılıdır.

Yol kenarında yer alan gürültü engelleri, çevresel etki değerlendirme ve gürültü etkisi değerlendirme çalışmalarında kabaca yansıtıcı ve yutucu olarak kategorize edilebilir [63]. Yansıtıcı malzemeye sahip engellerle gürültü azaltımı, ses dalgasının doğrudan yolun karşısına yansıtılarak engellenmesiyle sağlanır. Bu kullanım, yolun karşısındaki alanlarda gürültü düzeyini; engel yüksekliğine, yol genişliğine, yolun karşısındaki binanın yapısına bağılı olarak artırabilir. Açık konut yerleşim alanlarında, ses dalgalarının engelden yansımından kaynaklanan artış, başlangıç gürültü düzeyinin 1–3 dB üzerinde olabilir. Gürültü düzeyinde 3 dB'lik bir artış, trafik hacminin iki katına çıkmasına eşdeğerdir [65]. Beton, plastik, şeffaf malzeme, metal, tuğla ve yığıma bloklar gibi yapı malzemeleri, sesi yansıtıcı özelliklere sahiptir. Fotovoltaik modüller de, ses yansıtıcı malzeme kategorisindedir. Yutucu bileşenler ise sesin çoklu yansımalarını azaltmak için engel başlığının kenarlarına ve engelin dikey kısımlarına uygulanır [66]. Gaz beton, çimentolu ahşap, saf olmayan metaller, seramikler ve kompozit (delikli plastik, ahşap, beton ile mineral lifler) yutucu gürültü engeli malzemelerine örnektir. Araştırmalar, yol kenarında birbirine paralel engeller olması durumunda, yutucu malzeme eklenmesinin yansıtıcı özelliğe sahip gürültü engellerine kıyasla 4 dBA'ya kadar ek gürültü azaltımı sağladığını göstermiştir [67].

Karayolu gürültüsünü azaltan engellerin akustik performansına yönelik gereklilikler EN 1793 standardında yer almaktadır [68]. Bir engelin akustik performansı, ses yansıtıcılığı/yutuculuğu ve ses yalıtımı parametreleri ile ölçülür.

Engellerin gürültü azaltımı etkinliği ise, ekleme kaybı (insertion loss, IL) parametresi ile ifade edilir. Yutuculuğu 10 dB'den fazla olan gürültü panellerinin yutuculuğunun iyi olduğu kabul edilir [69]. Bir gürültü engeli tarafından sağlanan ses yalıtımının yeterli olabilmesi için, kesitin kütle ağırlığının minimum 20 kg/m² olması gerekmektedir [70]. Ekleme kaybının ise, bir alıcıda gürültü düzeyinin yarıya düşmesine eşdeğer olan 10 dB(A)'ya yaklaşan bir değere ulaşması istenir [71]. Gürültü engellerinin malzeme tiplerine göre performans göstergeleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir [72].

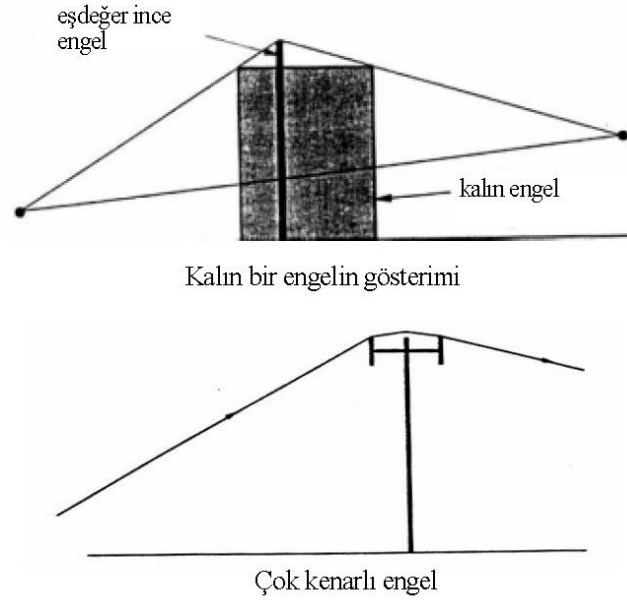
Tablo 2.2 Malzeme tiplerine göre gürültü engeli performans ölçütleri [72]

Gürültü Duvarı Performans Ölçütü	Beton	Metal		Ahşap	
		Alüminyum	Çelik	Kereste	Söğüt
Tek Sayılı Yutuculuk Göstergesi (dB)	4	8		8	
Tek Sayılı Yalıtım Göstergesi (dB)	24	15		24	
Ekleme Kaybı (dB(A))	18	19		13	
Yüzey Yoğunluğu (kg/m ²)	150-250	5-20	5-10	<20	<5

Akustik kısa devreler yaratan açıklıkların, deliklerin veya yarıklardan ses geçişinin engellenebilmesi için FV modüller arasındaki açıklıkların dikkatli bir tasarımla minimize edilmesi gerekir.

Akustik işlevin sağlanması için engel geometrisi önemlidir. Kaynak ve alıcı arasındaki kırınım yolu yükseklikle alakalı olduğundan, engelin konumu, yüksekliği ve genişliği üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır [73]. Engel, gürültü kaynağı ve alıcılar arasındaki görüş hattını kesecek konumda ve yükseklikte olmalıdır [72]. Gürültü engeli yüksekliğini minimumda tutarak akustik gölge bölgesindeki verimliliği artırmak, çalışmaların odağındadır. Yüksek engeller; estetik, statik ve ekonomik nedenlerle kullanışlı değildir [43]. Dikey bir engele, ekstra kenarlar eklenmesinin, daha yüksek bir gürültü engeline ve yutucu yüzeylere ihtiyaç duyulmadan ses geçiş kaybını artırdığı görülmüştür [44], [45]. Fotovoltaik modüller ses yansımaya sebep olduğundan, ses

emilimini sağlamak için kaset veya zikzak tasarımlar uygulanmalıdır [74]. Uygun engel yüksekliğini koruma problemi, birçok yazar tarafından engelin üzerine Y, T, ok, silindir gibi farklı şekillere sahip bir eleman eklenerek deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır [75]–[79]. Gürültüyü azaltmada keskin kenarlı olan formların, köşeli ve kavisli şekle sahip engellerden daha etkili olduğu görülmüştür [63]. İç açıları 90°den büyük olan kama veya dairesel şekillerin en az etkili olduğu belirtilmiştir [63]. Kırık kenarın gürültü kaynağına yaklaştığı T şekilli engel tasarımlarının gürültü azaltımında etkili olduğu [75], [80] ve engelinin üst kısmının eğimi 120° olduğunda, düşük frekanslı sesin azaltılmasında en etkili çözüm olduğu belirlenmiştir [81]. Birden fazla panel inşasının ve gürültü duvarı kalınlığının artırılmasının yüksek maliyeti nedeniyle, engelle kısa yan kenarlar eklenerek kırınım yüzeyleri artırılabilir (bkz. Şekil 2.5). Ho vd. ve Shao vd. rastgele kenarlı biçimlerdeki gürültü engellerinin, düz gürültü engellerine göre, özellikle yüksek frekanslı seslerde, önemli ölçüde daha fazla gürültü azaltımı yarattığını saptamıştır [82], [83]. Sayısal yöntemler kullanılarak incelenen ekstra kırınım yüzeylerine sahip çeşitli ağaç dallı gürültü engellerinin, engel yüksekliğinde bir artış olmadan gürültü azaltımında yaklaşık 5 dB(A) değerinde azaltım sağladığı tespit edilmiştir [84], [85]. 2 veya daha fazla kırınım yüzeyi içeren engellerin daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır [86], [63]. Çoklu kırınım yüzeylerinin kullanılması durumunda, yüzeylerin yutucu değil rijit olduğu durumda etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır [87].



Şekil 2.5 Dikey gürültü engeline kısa yan kenarlar eklenerek kırınım yüzeyinin artırılması [63]

2.1.1.2 Estetik

- **Mimari Tasarım**

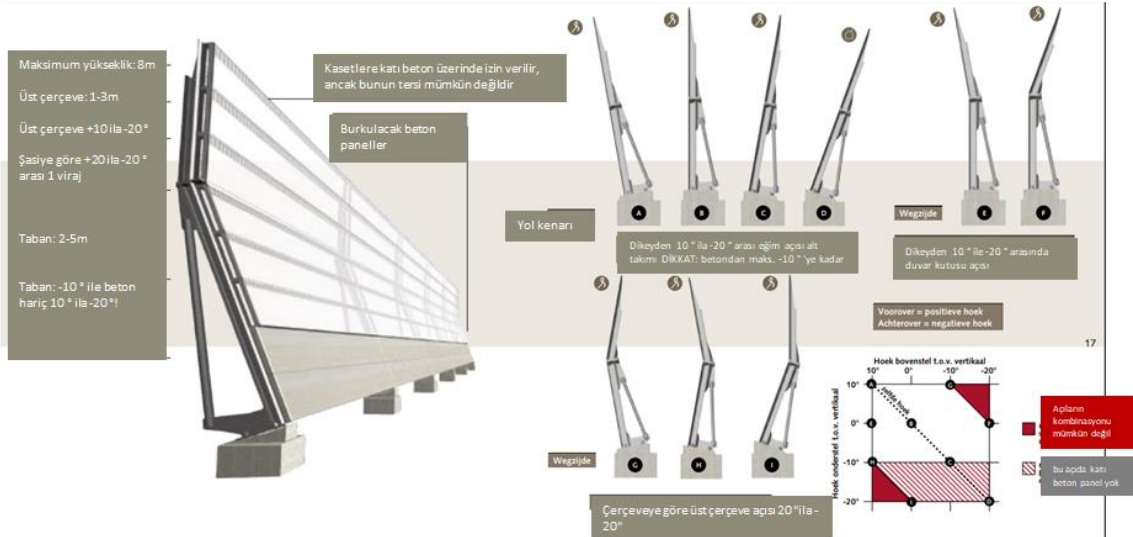
Gürültü engellerinin doğrusal yapısı nedeniyle, estetik kriterler göz önünde bulundurulmadığında monoton bir görünüm ve duvar etkisi yaratır. Yüzeyin dokusu ve rengi, bileşenlerin bölümlenmesi, eğrisellik gibi yaklaşımlarla doğrusal formun masif etkisi kırılabilir.

Gürültü engellerinin genel görünümü; ritim, orantı, düzen, uyum ve kontrast gibi mimari kavramların uygulanmasıyla iyileştirilebilir. Özellikle kentsel alanlarda çok uzun engellerin gerekli olduğu yerlerde oluşan monolitik etki, farklı malzemelerin kombinasyonu kullanılarak parçalanabilir. Örneğin, opak ve şeffaf panellerin kombinasyonu, tasarımda renk varyasyonları veya keskin kenarlarda vejetasyon kullanımı ile estetik çözümler sağlanabilir [63].

Genel bir kural olarak, gürültü engellerinin yerel özelliklerle uyumluluğu da mutlaka dikkate alınmalıdır. Bölge sakinlerinin, çevresiyle doğal bir ilişkisi olan ve yakın çevrenin görünümüyle uyumlu olan engelleri kabul etme eğilimi yüksektir. Kentsel bağlamda, mimaride belirli bir malzeme veya stilin

yaygınlığı gibi öğelerle, engel tasarımı çevreden bir şeyler yakalamalıdır [63]. Tarihi merkezlere veya anıtlara yakın bir yere kurulacağı zaman, fotovoltaik sistemlerin entegrasyonu çevresel bağlamda daha dikkatli düşünülmelidir [42].

Kentin farklı noktalarında gerçekleştirilen projeler için her projede farklı bir çözüm kullanılması, parçalı ve dağınık bir yol gürültüsüne yol açar. Rijkswaterstaat tarafından geliştirilen, Modüler Gürültü Engelleri Yapılandırma ve Uygulama Kılavuzu, akustik ve yapım hususları konusunda sunduğu sistematik tasarım yaklaşımı ile, engellerin bir karayolu boyunca kurulumuna dahil olan herkese, yapılabilecek seçeneklerle ilgili olarak bilgilendirme sağlar (Şekil 2.6) [88].



Şekil 2.6 Rijkswaterstaat tarafından geliştirilen, Modüler Gürültü Engelleri Yapılandırma ve Uygulama Kılavuzu tasarım yaklaşımı

- **Çevresel Etki**

Gürültü engelleri, hem yolu kullanan sürücüler için hem de engele yakın binalarda yaşayan bölge sakinleri üzerinde bir etki yaratır.

Sürücü tarafından ele alındığında, sürücü kısa bir süre için uzun bir engelle karşılaşır ve tasarımı eğik bir açıyla görür. Ayrıca araç hızı ve sürüş dikkati nedeniyle çok sınırlı miktarda görsel bilgiyi özümser. Yüksekliği 3 metreden yüksek olan engeller, yer işaretlerini gizlediği gibi sürücü dikkatini dağıtabilecek görsel dağınıklığı da gizleyebilir. Hollanda'daki sürücüler

üzerinde yapılan araştırmalarda, 30 saniye boyunca değişmeyen görüşün monotonluk yarattığı saptanmıştır. Bu, yolun akış hızına bağlı olmak üzere her 800 metrede bir değişiklik yapılması gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle, uzun engellere ihtiyaç duyulan kentsel alanlarda, engeller monotonluğu önleyecek şekilde tasarlanmalıdır [63].

Engele bitişik binalarda yaşayan sakinler tarafından ele alındığında ise, yüksek engeller görüş ve manzara kaybı yaratmakla birlikte mekanlarda gün işığı kaybına sebep olur. Bu durum, sürücülerin kısa bir süre uzun bir engelle karşılaşması deneyiminin aksine bina kullanıcıları için süreklidir [63]. Tasarımcı, bu potansiyel müdahaleyi en aza indiren malzeme kullanımını veya bu hoşnutsuzluğa sakinlerin toleransını artıran estetik yaklaşımları dikkate almalıdır. Örneğin, şeffaf gürültü engelleri, hem bitişik bloklardaki gün işığı kaybını azaltır hem de sürücülerin rota boyunca buldukları konumları anlamalarına yardımcı olan görsel yer işaretlerini görmelerini sağlar.

2.1.2 İşletime Yönelik Parametrelerin Ele Alındığı alışmalar

FVGE'nin niteliksel özellikleri, enerji ve akustik performansının yanı sıra; güvenlik, dayanıklılık (strüktürel dayanım, çevresel dayanım) ve bakım kolaylığı parametrelerine de bağlıdır.

2.1.2.1 Bakım

FVGE projeleri, engel geometrisi, malzeme ve detaylandırma açısından minimum bakım gerektirecek şekilde tasarlanmalıdır. Elektrik sistemi tasarımında, bileşen sayısını azaltmak faydalı bir yaklaşımdır. şartname, tasarım ve kurulum süreçlerindeki aksaklıklar güvenlik zaafiyeti yaratabilir. Bakım personelleri, hem olağan hem de olağanüstü bakım prosedürleri konusunda özel olarak eğitilmelidir.

Modül, evirici ve diğer bileşenlerin bakımı düzenli yapılmalı, onarılmalı ve gereken durumlarda gürültü engelini tahrip etmeden sökölüp değiştirilmelidir. Sistem bileşenlerinin gürültü engeli ile kalıcı bağlantısı hırsızlıkları önlese de,

bakım ve onarımları zorlaştırmaktadır. Bakım süresince, minimum trafik tıkanıklığı yaratacak bir bakım programı düzenlenmelidir [42].

Fotovoltaik modüller en az 20 yıl garantili olmakla birlikte 25-30 yıl çalışması beklenir. Ancak eviricilerin ömrü doğru bakımla birlikte 20 yıldan fazla değildir. Eviriciler takılıp çıkarılsa dahi, tesis için yeniden kablolama gerekebilir. Dolayısıyla, kurulumun ömrü sona ermeden evirici değişimi olası olmadığı için, garanti süresi uzun evirici kullanılmalıdır.

Karayolu altyapısına yakın fotovoltaik paneller söz konusu olduğunda, panellerin kirlenmesi ve buna bağlı olarak verimliliğin düşmesi sık yaşanan bir problemdir. Araçların motordaki yanma nedeniyle partikül madde yaydığı bilinmektedir. Ayrıca frenlerin sürtünmesi, lastiklerden ve yol yüzeyinden ayrılan parçalar oluşturur. Bu kirliliğin, her gün geçen araçlar nedeniyle çatılara entegre fotovoltaik sistemlere kıyasla, FVGE sistemlerde çok daha yüksek olduğu görülmüştür [89]. Yüzeylerde biriken toz/kir/parçacık miktarı, modülün konumu, hava parametreleri (rüzgar ve yağış), kirlilik, eğim açısı ve yüzey pürüzlülüğü gibi çeşitli çevresel ve teknik faktöre bağlı karmaşık bir olgudur [90].

Hollanda'da A9-otoyolunun kenarında yer alan fotovoltaik gürültü engelinin trafikten kaynaklanan kirlenme miktarının araştırıldığı çalışmada, modül verimlilikleri temizlikten önce ve sonra olmak üzere not edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, referans hücrelerde toz/kir birikmesine bağlı ışınım kaybının %8 olduğu görülmüştür. Kirlenme etkisi sadece referans hücrelerle sınırlandırılmayıp tüm modülü etkilediğinde ışınım kaybının daha fazla olacağı öngörülmüştür [91]. Bu çalışma ile, trafikten kaynaklanan ek kirlilik olduğu sonucuna varılsa da, Betcke vd.'nin çalışması aksi yöndedir. İsviçre A27-otoyolu kenarındaki fotovoltaik gürültü engelinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kirlenmeye bağlı olarak dizi verimliliğinde önemli bir bozulma gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır [60].

Fotovoltaik sistemlerde kirlenme etkisinin araştırıldığı çalışmalar, güneş panellerinin eğim açısının artmasıyla toz birikiminin kademeli olarak azaldığını

ve eğim açısı 90° olduğunda minimum olacağını göstermiştir [92], [93]. Çeşitli fotovoltaik panel eğim açıları ve parçacık boyutuna göre yüzeylerdeki toz biriktirme oranının araştırıldığı diğer bir araştırmada ise en yüksek oranların sırasıyla; 25° (%14,28), 40° (13,53), 140° (%6,79) ve 155° (%9,78)'de olduğu saptanmıştır. 90° 'den küçük açılar rüzgar yönünü, 90° 'den büyük açılar ise rüzgarın geliş yönünün tersini ifade etmektedir [94]. Bellucci vd.'nin İtalya'nın karayolu kenarındaki fotovoltaik gürültü engelli potansiyelini araştırdığı çalışmada, 25° nin altındaki açı değerlerinin, panel yüzeyinde otoyoldan kaynaklanan toz birikimini artırdığı gözlenmiştir [62].

Fotovoltaik sistemlerin işletimi süresince, modül yüzeyinde gölgelemeye sebep olabilecek vejetasyon da düzenli olarak takip edilmeli ve bakımı sağlanmalıdır [55]. Vejetasyonun modül yüzeyinde gölgelemeye sebep olduğu duruma bir örnek Şekil 2.7'da gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Almanya Münsingen'de yer alan FVGE uygulamasının bitkiler nedeniyle gölgelenmesi

Periyodik bakım ve temizlik prosedürünün haricinde, olağanüstü durumlarda da onarım ve değiştirme gerekebilir. Araçların, araçlardan fırlayan parçaların, sıçrayan taşların engele çarpmasından kaynaklanan panel hasarı nedeniyle FVGE yapısının cam veya pleksiglas plakalarının değiştirilmesi gerekir [74]. Çarpmanın yanı sıra yangın, hırsızlık, vandalizm gibi nedenler de FVGE'nin yapısal bütünlüğünü bozar ve bakım gerektirir.

Gürültü engelinin bakımında; engelinin hizmet ömrü, engelin ekleme kaybında veya görünümünde fark edilebilir bir değişiklik olmaksızın sorunsuz performans

sağladığı dönemin uzunluğu önemlidir. Engellerin bakım prosedürü ve sıklığı, engel malzemesine, strüktürel tasarımına, yüzey dokusuna ve rengine, farklı malzemeler arasındaki uyuma (büzüşme/genleşme vb.), hava koşullarına ve iklim etkilerine bağlı olarak düzenlenmelidir. Minimum bakımla uzun bir hizmet ömrü hedeflenmelidir [72].

Modüler gürültü engelleri, sınırlı sayıda standartlaştırılmış bileşenin farklı birleşimlerine olanak tanır. Bu anlamda modüler engel tasarımları, kurulum ve bakım açısından hızlı ve uygun maliyetli olmasının yanı sıra, insanlar üzerinde güvenliğe elverişli bir düzen ve uyum duygusu yaratır [63].

Toprak sedler haricindeki tüm engellerin, araç çarpması veya sıçrayan taşların darbesi nedeniyle, her 10 yılda bir engelin %1'lik uzunluğunun değiştirilmesi gerektiği kabul edilmiştir [95]. Toprak sedler dışında farklı malzeme tipine sahip tüm engellerin, her 5 yılda bir engelin yüzey alanının %1'lik kısmında periyodik grafiti temizliği tavsiye edilmiştir. Çelik dikmelere sahip engellerin, dikmelerinin 10 yıllık aralıklarla boyanması ile 50 yıl hizmet ömrü sağlanabilmektedir. 50 yıl hizmet ömrü olduğu kabul edilen toprak engellerde sadece biçme, peyzaj çalışmaları ve arazi bakımı şeklinde yıllık bakım önerilmektedir [96].

Yutucu malzeme kullanımı, yansıtıcı özelliğe sahip engellere kıyasla daha fazla bakım ve daha sık değiştirme gerektirir. Yutucu yüzeyin tıkanması sonucu malzemenin ses yutma kapasitesinin azalması, engelin akustik performansını olumsuz etkiler. Egzoz emisyonlarından kaynaklanan kirletici partiküller, araçlardan sıçrayan çamurlu su, kar yığınlarının engele doğru yığılması, yük araçlarından dökülebilecek kirletici malzemeler, sarmaşık tipi bitkilerin kaplamayı örtmesi gibi nedenlerle yutucu yüzey tıkanabilir. Yutucu kaplamaların tıkanıklık temizliği vakumlu süpürgelerle yılda 2 kez yapılmalıdır [97].

2.1.2.2 Sürdürülebilirlik

Dış ortam koşullarına uzun süre maruz kalmaya karşı temel dayanımın sağlanması hususu, fotovoltaik sistemlerde ve gürültü engeli sistemlerinde

ortaktır. Bu dayanım strüktürel dayanım ve çevresel dayanıklılık olarak incelenebilir.

Fiziksel çevre ögelerinin azami koşullarında dahi mekanik stabiliteyi garanti eden bir tasarım yapılmalıdır. FVGE yapılarının yapısal direnci, strüktürün sürdürülebilirliği noktasında kritiktir; ancak, mekanik performans şartnameleri her iki sistem için ayrı ayrı standartlarda ele alınmaktadır. Gürültü engelleri EN 1794 standardına, fotovoltaik modüller ise EN 16215 standardına tabidir ve ilgili standartlar arasında uyumsuz alanlar vardır. Örneğin, EN 16215 standardında FV modülleri için dolu tanesi (7,53 g, 23 m/s) için yapılan darbe testi, EN 1794 standardında 30 Nm enerjili çekiç darbeleriyle yapılan test ile karşılaştırılmaz [42].

FVGE yapılarının, rüzgar, kar ve buzdan kaynaklanan statik ve dinamik yüklere dayanımı EN 1794'te belirtilen sınır değerleri sağlamalıdır. Minimum yük değeri (2,5 kPa) fotovoltaik panellerin tasarım yükü ile tutarlı olsa da, EN 16215 standardında rüzgar ve araç hızları hesaba katılmadığı için ek boyutlandırma kodları gerekir [42].

Çevresel etkiler altında sistemlerde bozulma iki şekilde meydana gelir: tersinir ve geri döndürülemez. Sistemin kirlenmesi, tersine çevrilebilir bozulmaya bir örnektir. Kentsel ortamlarda, fotovoltaik yüzeylerdeki kirlilik etkisi nedeniyle güç çıkışındaki ortalama azalmanın %10'da doygun olduğu görülse de, olumsuz eğim açıları ve belirli çevresel koşulların modülde %25 güç kaybına sebep olabileceği gözlenmiştir [91]. Diğer yandan, fotovoltaik sistemlerin elektriksel bozulması ise geri dönüşü olmayan bozulmaya örnektir ve tüm modüllerde yılda ortalama %0,5 bozulma gerçekleşir [98]. Yüksek sıcaklığa sahip ve nem oranı yüksek bölgelerde aşırı koşullar nedeniyle korozyon olabilir ve modül bozulması gerçekleşebilir [42].

FVGE'nin uzun hizmet ömrünün sağlanması için tasarımının, güvenlik çitleri, korkuluklar, yol işaretleri, aydınlatma sütunları ve drenaj kanalları gibi unsurlarla da koordineli olarak yapılması büyük öneme sahiptir. Elektriksel sistemin, temas halinde olabilecek kimse için tehlike oluşturmamasına azami

önem gösterilmelidir. Ekipman ve çevresi, dahili arızalardan ve harici nedenlerden kaynaklanan yangın tehlikesine karşı korunmalıdır. FV panellerin yoldan görünmesi 7/24 sosyal kontrol sağlasa da, panellerin etrafına çit uygulaması hem korunmasını sağlar hem de çalınmasını zorlaştırır [89].

Yeni teknolojilerin kamuya açık alanlarda kullanılması, hırsızlık ve vandalizm gibi güvenlik risklerini de beraberinde getirir. Fotovoltaik sistem bileşenlerinin yüksek ilk yatırım maliyeti, sistemi hırsızlık olayları için çekici hale getirir. Ayrıca geniş görünür yüzeyler, vandalizm olayları için hedef haline gelebilir. Bu risklere karşı, fotovoltaik sistem bileşenlerini kolay erişilemeyecek yükseklikte monte etmek veya direkt gürültü engeline entegre etmek faydalı olacaktır. Ayrıca, sadece FVGE sistemlerinde kullanılacak özel aletler gerektiren perçin ve vidalar aracılığıyla entegrasyon yapılmalıdır. FV bileşenlerin tek modül boyutları, renkleri veya sonraki izinsiz kullanımlarda tanınabilmesini sağlayacak belirli kod ve işaretlerle kolay tanınabilir hale getirmek, hırsızlığı önlemede etkili bir yaklaşımdır. Ayrıca, çok özel voltajların kullanılması, günlük uygulamada veya başka kullanımlarda modülleri işe yaramaz hale getirecektir [42].

2.1.3 Performans Göstergelerine Yönelik Parametrelerin Ele Alındığı Çalışmalar

2.1.3.1 Teknik Performans

FVGE teknolojisi, dünyada 64 milyon km'den fazla karayolu bulunduğundan, güneş enerjisi açısından önemli bir yayılma potansiyeline sahip olsa da, henüz yeterince yaygınlık kazanmamıştır [99]. Farklı tipteki gürültü engelleri, FV modüllerin güneş enerjisini hasat edebileceği verimliliği kısıtlayan yüzey yapısı, alan, yön ve eğim açısından farklı fiziksel özelliklere sahiptir [100].

FVGE sistemlerin performansını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar; fotovoltaik sistemi ve gürültü engelini oluşturan bileşenler, bileşenlerin etkileşimi, çevresel faktörler ve tasarım olarak özetlenebilir [101]. Sistemin performansını belirleyen faktörler, değiştirilebilir olanlar ve değiştirilemez olanlar olarak kategorize edilir. Değiştirilemez olanlar ağırlıklı olarak çevresel faktörlerdir. FV sistemler için iklim, ışınım ve çevre verileri (güneş ışınımı, yön,

rüzgar akımları, yağış miktarı, toz özellikleri, sıcaklık ve nem) ve gürültü denetimi için trafik hacmine ve çevreye ilişkin veriler (araç hacmi, büyük araç oranı, araç hızları, yol yüzeyi özellikleri, engelin konumu) olarak özetlenebilir. Değiştirilebilir özellikler ise kurulum tasarımlarıdır (kapasite, panel eğimi, modül özellikleri, sistem bileşenleri) [102]. Çalışma alanına bağlı değiştirilemez özellikler çevre ve coğrafik konuma bağlıyken; ekipman, tasarım, kurulum ve bakım kriterleri değiştirilebilir niteliktedir.

Yol yönü, FVGE uygulamaları için belirleyicidir ve Kuzey Yarımküre’de güney yönüne bakan fotovoltaik sistemler maksimum verim sağlar. Her iki yüzünün de elektrik ürettiği çift yözlü FV uygulamaları doğu/batı yönünde yerleştirilir. Çift yözlü prototiplerin yıllık ışınımının, teorik olarak güney yönüne bakan FVGE örneğinin yıllık ışınım miktarının %108’i olduğu görülmüştür [103]. Çift yözlü fotovoltaik sistemin alan testleri İsviçre’de konumlanan 10 kWp kapasiteli kurulumda yapıldığında %10 daha az üretim yaptığı gözlenmiştir Üretimdeki düşüşün nedenleri; otoyol boyunca uzanan FVGE kurulumunun bir eğri üzerine monte edilmesi, eviricinin yanlış boyutlandırılması ve FV modül verimliliğinin teoriden daha düşük olmasından kaynaklandığı çıkarımları yapılmıştır [104].

Nitelikli bir FVGE’nin teknik özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir [42];

- Beklenen güç ve enerjiyi sağlamak için uygun ölçülerde boyutlandırılmalı ve optimum yöneline sahip olmalıdır.
- Yakın çevreden kaynaklanan gölgeleme minimum olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.
- Geçerli imar ve elektrik kodlarına uygun olarak kurulum yapılmalıdır.
- Güneş ışığına ve hava koşullarına dayanıklı malzeme kullanılmalıdır.
- Kablolama, aşırı akım korumaları, anahtarlar ve dönüştürücüler boyunca elektrik kaybı minimum olacak şekilde kurulum sağlanmalıdır.
- Şok tehlikesi riskini ve uyarıcı dalgalanmaların etkilerini azaltmak için sistem uygun şekilde topraklanmalıdır.
- Kabul edilen prosedürler izlenerek kamu hizmeti şirketi ile ara bağlantı sağlanmalıdır.

- Elektrik enerjisi hizmet kalitesinde sağlanmalıdır.

2.1.3.2 Ekonomik Performans

FVGE sistemleri, elektrik üretimi ve akustik konfor gibi kazanımlar sağlasa da, strüktürün ekonomik olarak uygulanabilir olması gerekir. Dolayısıyla uygulamanın en önemli kısmı mali yönüdür.

FV sistemlerden üretilen elektrik maliyeti; yatırım maliyeti, FV sistemin yaşam ömrü, bakım maliyeti, sermaye ve elektrik üretimi için enflasyon oranı parametrelerine bağlıdır [105]. Gürültü engellerinin maliyeti ise engelin malzemesine bağlıdır. Gürültü engelleri doğal (toprak gürültü engeli) ve yapay (ahşap, çelik, alüminyum, akrilik, cam, beton veya kompozit) olabilir. Gürültü engelleri genel olarak, başlık, gövde kısmı, zemin, temel ve destek strüktürlerinden oluşur [106]. Malzemenin ardından engele ilişkin, yükseklik, uzunluk ve yapım tekniği gibi parametreler gürültü engeli maliyetinde belirleyicidir [107].

FVGE sistemleri için, güneş panellerinin entegrasyonu ile inşa ve bakım sürecinde ek maliyet endişesi, uygulamanın önündeki temel engellerdir. Almanya'da yapılan bir uygulamanın sonuçlarında, FVGE bakımının, FV sistem içermeyen bir gürültü engelinden sadece %15 daha fazla ek maliyet gerektirdiği görülmüştür [74].

Güç tesislerinin maliyet analizleri çoğunlukla, düzeylendirilmiş elektrik maliyetleri, indirgenmiş ilk yatırım maliyeti, yıllık işletim ve bakım maliyeti kalemleri üzerinden elektrik üretiminin yakıt ücretine dayandırılarak karşılaştırılır. Ancak, kirletici emisyonlarının sağlık ve çevre maliyetleri güç ve yakıt maliyetlerine dahil edilmez. Dolayısıyla, nihai tüketiciler satın aldıkları hizmetin tüm maliyeti ile yüzleşmezler [108].

Gürültü engeli kırım kenarı sayısını artırmak akustik konforu artırsa da, engel üzerindeki rüzgar yükünü de artırmaktadır. Ancak, aynı akustik faydayı elde etmek için engelin yüksekliğini artırma durumunda oluşacak maliyetten daha az olduğu vurgulanmıştır [63]. Engellerin mutlaka sabit yükseklikte olması yerine,

gürültüye duyarlı alıcıların çevresinde yüksekliği artırırken kalan alanlarda azaltmak maliyetin optimize edilmesini sağlayabilir.

İplik (2019) Çevresel gürültü düzeyinin, ÇGDYY'deki limit değeri aşması nedeniyle önerilen gürültü engeli maliyeti ile, hacimlerdeki gürültü düzeyinin Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (BGKKHY) 'deki limit değeri aşması nedeniyle önerilen yapı kabuğundaki gürültü denetimi maliyetini karşılaştırmıştır. Araştırma sonucunda, yapı kabuğunda denetim maliyetinin gürültü engelene göre 1,73 kat daha yüksek olduğu görülmüştür [109].

Schepper vd. (2012), gürültü engelini ekonomik faydasını hesaplarken gürültü düzeyindeki değişikliğin konut fiyatına yansıtacağı görüşünü temel alan gürültü duyarlılığı amortisman endeksi (Noise Sensitivity Depreciation Index, NSDI) değerini kullanmıştır. Çalışma sonucunda, güneş panellerinin ömrünün 25 yıl olacağı varsayıldığında, net bugünkü değerinin %100 pozitif olacağı, yani karlı bir yatırım olacağı görülmüştür. Ayrıca, NSDI değerindeki farkın gürültü engelini karlılığını belirlemede çok önemli olduğu vurgulanmıştır [110].

2.1.3.3 Çevresel Performans

FVGE sistemleri, ulaşım için kullanılan altyapıya entegre edilir. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arazi kullanımına dayalı olduğu için, bütünüyle yenilenebilir enerji arzına geçiş, çeşitli enerji kaynakları için bir rekabet ortamı yaratır.

FVGE sistemlerindeki güneş enerjisi kullanımı, fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan sera gazı emisyonlarını (CO₂, N₂O, CH₄ vb.) azaltır ve toksik gaz emisyonlarını (SO₂, partiküller) önler ve sürdürülebilir kalkınmaya önemli bir katkı sağlar.

FV sistemlerin, işletimi sırasında karbon emisyonu söz konusu değildir; ancak, üretim, ulaşım, kurulum ve bertaraf süreçlerinde sera gazı salınımı gerçekleşir. FV sistemler için alan gereksinimleri geleneksel sistemlere kıyasla daha fazla olsa da, gürültü alanına entegrasyonu ek alan gerektirmeyen bir çözümdür ve çevresel etkisini azaltır. Güneş enerjisi kullanımının, insan sağlığı, yaban hayatı,

yer altı suyu, toprak, iklim ve toprak kullanımı üzerinde 32 çevresel etkisi tanımlanmıştır. Ancak bu etkilerin 22 adedi düşük düzeyli, 4 adedi orta düzeyli olarak sınıflandırılmıştır [111].

Fotovoltaik sistemlerin iklim ve hava kirliliğine ilişkin çevresel etkileri; kirletici salınımları, su tüketimi ve albedo etkisidir. Fotovoltaik sistemlerden kaynaklanan karbondioksit emisyonu 14-73 g CO₂-eq/kWh değerindedir ve petrol kullanımından kaynaklanan emisyonlardan (742 g CO₂-eq/kWh) 10-53 kat daha düşüktür [111]. Tüm yaşam döngüsündeki ortalama su tüketimleri karşılaştırıldığında ise; fotovoltaik sistemlerde tüketilen su oranının (330 L/MWh), petrolden (3220 L/MWh) neredeyse 10 kat daha az olduğu görülmüştür [112]. Albedo (yüzeylerin yansıtıcılığı) etkisi değerlendirildiğinde, güneş panelleri 0,18 ila 0,23 arasında değişen albedo değerleri ile oldukça düşük bir yansıtıcılığa sahiptir. Bu nedenle, paneller güneş ışığının çoğunu ısıya dönüştürür ve iklim üzerinde bir etkiye sahip olur. Nemet (2009), bu albedo etkisinin FV kullanımıyla ilişkili sera gazı emisyonlarındaki önemli azalmaya kıyasla önemsiz olduğunu ortaya koymuştur [113].

Fotovoltaik sistemler, çevrede görsel ve akustik etki de yaratabilir. Güneş sistemlerinde gürültü kirliliği; tesisler arasındaki güç yoğunlukları farkından, hareketli ve dönen parçalar içermesinden ve kurulum aşamasında ağır makine ve araçlara ihtiyaç duyulmasından kaynaklanır [114]. FV sisteminin sabit olması ve final ürünün bölgede akustik konforu sağlamaya yönelik olması akustik kirlilik etkisini azaltır. FV sistemlerin görsel kirliliği, yoğunlukla FV projesinin büyüklüğüne bağlı olarak tanımlanır. Ek olarak, tarihi lokasyonlara yakın alanlarda FV kullanımı ziyaretçileri endüstriyel alanlarla karşılaştırdığı için turistik alanlar için en büyük endişelerden biridir. FV tesislerini konut alanlarından uzağa planlamak, FV panelleri bina cephelerine entegre etmek görsel kirliliği önlemek için önerilen seçeneklerdir [111]. Ayrıca, fotovoltaik yüzeylerden güneş ışığı yansımaları sürücüler üzerinde rahatsızlık yaratabilir.

Fotovoltaik sistemlerin olumsuz çevresel etkileri optimize edilmiş tasarım, yeni malzemelerin geliştirilmesi, tehlikeli maddelerin salınımının en aza indirilmesi,

mümkün olduğunca geri dönüştürülmesi ve dikkatli yer seçimi kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilir [111].

Güneş enerjisi üretiminden kaynaklanan en büyük sorunlardan biri, ömürlerinin sonunda güneş panellerinden üretilen muazzam miktarda tehlikeli ve zararlı elektronik atıktır [115]. Dolayısıyla, güneş pillerinin ömürlerinin sonunda uygun şekilde bertaraf edilmesine yönelik metodoloji geliştirilmesi, eylem planı yapılması ve yeterli kapasitede tesis ayrılması çevresel açıdan kritik öneme sahiptir.

Hammadde aşamasından atık yönetim sürecine kadar fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü karbon ayak izi (26-60 gCO₂/kWh); petrol kaynaklı enerji üretiminin karbon ayakizinden (778 gCO₂/kWh) 13 ila 30 kat, kömür kaynaklı enerji üretiminin karbon ayakizinden ise 12 ila 40 (740-1050 gCO₂/kWh) kat daha düşüktür [116].

Gürültü engelleri trafikten kaynaklanan gürültü düzeyini azaltmasının yanı sıra ulaşımdan kaynaklanan hava kirleticilerin hareketini de etkiler. Kirleticiler engelle karşılaştığında, kirli hava akışının yukarı doğru sapmasına ve kirleticinin görünür salım yüksekliğinin artmasına neden olur [117]. Bowker vd. yaptığı deneysel çalışmada, gürültü engellerinin kirleticilerinin dağılımını değişen rüzgar ve topoğrafik koşullar altında incelemiştir. Gürültü engelini, hava dağılımını 3 şekilde etkilediği (engel boyunca yükselme, engelin alt kısımlarında devirdaim oluşturma ve yükselen havanın diğer engellerle karşılaştığında dağılması gözlenmiştir. Oluşan devirdaim boşluğunun 3 ila 12 m duvar yüksekliği arasında uzanabileceğini ve önemli oranda daha düşük kirletici konsantrasyonlarına (yol kenarından %0 ila %80 arasında daha düşük) sahip olduğu aktarılmıştır [118]. Bu çalışmalara ek olarak, Solar Otoyol Projesi (Solar Highways), çift yüzlü FV çözümlerinin gürültü engellerine entegrasyonunun teknik fizibilitesini, çevresel, finansal ve sosyal faydalarını araştırmıştır. Uygulamanın gözlemlenmesi aşamasında hava kalitesi de incelenmiştir. Engelin hemen arkasındaki 18 nokta için hava kalitesi üzerindeki etkiler hesaplanmıştır. Engelsiz durum ile engelin olduğu durum karşılaştırıldığında, PM10

konsantrasyonlarının 0,01 ila 0,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (yıllık ortalama), NO_2 konsantrasyonlarında 0,00 ila 0,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $\text{PM}_{2,5}$ konsantrasyonunda 0,00 ila 0,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında bir azalma görülmüştür [119].

2.1.3.4 Sosyal Performans

FVGE strüktürleri, elektrik üretiminin yanında gürültü azaltımı için inşa edilen yapılar olsa da peyzajın ve muhitin bir parçası haline gelir. Peyzaj, kültürel ve çevresel boyutuyla ele alınır. Peyzajı oluşturan ögeler, estetik ve kültürel değerlerle birlikte daha fazla biyolojik çeşitliliği korumalıdır. Bu bağlamda peyzaj sosyo-ekolojik etkiler bağlamında da değerlendirilir [120].

Çevrenin bir parçası olarak gürültü engelleri, hem yolu kullanan sürücüler hem de yol kenarında yaşayan bölge sakinleri için bir etki nedeni olabilir [121]. Yapılan bazı çalışmalarla, engelin bitişiğinde yaşayan bölge sakinlerinin çoğunun, engelin faydalarının dezavantajlarından çok daha ağır bastığını düşündüğü görülmüştür [122]. Ancak yerleşim sakinlerinin, görüş kısıtlaması, hapsolmuşluk hissi, hava dolaşımı kaybı, gün ışığı kaybı ve engelin yetersiz bakımı gibi olumsuz görüşlerinin gözlemlendiği çalışmalar da vardır [121], [123], [124].

Fotovoltaik sistem ve gürültü engelini entegre kullanan FVGE sistemlerinin sosyal etkileri için iki sistem ayrı ayrı ele alınarak aktarılmıştır.

Güneş enerjisi santrallerinin en önemli sosyal etkisi, halk tarafından kabul görmesi, istihdam yaratılması, bölgenin ilerlemesi ve gelir durumlarına yansımaları, iyileştirilmiş hava kalitesi ve sağlık faydalarıdır [125]. Sosyo-ekonomik faydalar ise; bölgesel ve ulusal enerji bağımsızlığının artması, iş fırsatlarının artması, enerji arzını çeşitlendirmesi ve güvence altına alınması, enerji piyasalarının özerkleşmesi ve gelişmekte olan ülkelerde kırsal elektrifikasyonu teşvik edebilmesidir [114].

Fotovoltaik sistemler bölge için istihdam ve zenginlik yaratır. Güneş modüllerinin ve sistem bileşenlerinin tamamı ithal edilse dahi, yerel olarak

sistemlerin satışı, kurulumu ve bakımı için gerekli, önemli sayıda istihdam yaratılmaktadır [126]

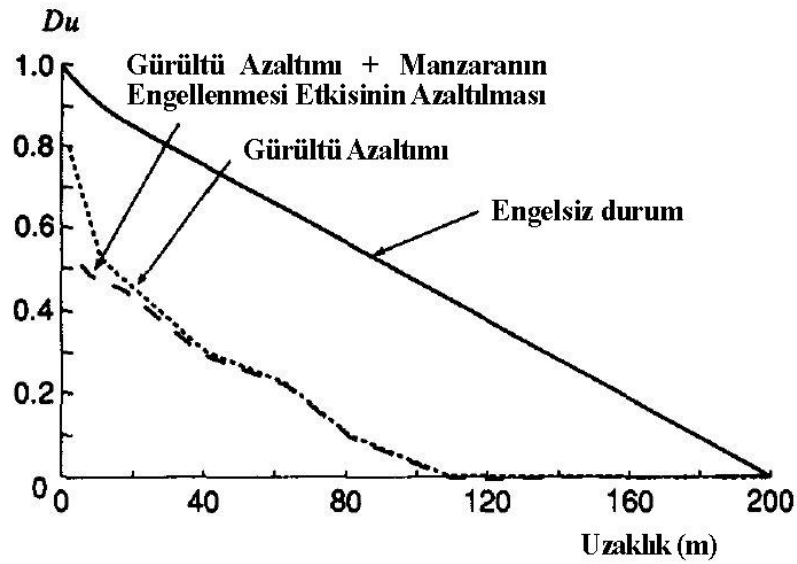
Güneş enerjisi santrallerinin kurulmasında ana sorun arazi edinimidir. Kırsal alanlarda kurulan büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri, çevredeki topluluklarla çatışmaya neden olabilecek derecede önemli miktarda arazi gerektirir ve su kullanımında değişim yaratır. Bu toplulukları, güneş enerjisi santrallerinin geliştirilmesi ve işletilmesine dahil etmemek, toplulukların yaygın bir endişesidir [115]. Arazi edinimi sorunlarının, projeye göre değişmekle birlikte, santral kurulum süresinin 4 ila 9 katı fazla süreye mal olduğu belirtilmiştir [127]. FVGE engelleri, gürültü engellerine entegre edildiği ve ek alan gerektirmediği için bu dezavantaj önlenmektedir.

Gürültü engellerinin sosyal faydası oldukça belirgindir. Engele bitişik bölge sakinleri gürültü kirliliğinden daha az etkilenir. Aşırı gürültüye maruz kalan sakinler; rahatsızlık (annoyance), uyku bozukluğu gibi sosyo-spsikolojik tepkilerin yanında yüksek tansiyon, kalp hastalığı gibi fiziksel tepkiler verirler. Bu sağlık sorunları, tıbbi bakım maliyetleri ve çalışma saatlerinde düşük performans dahil olmak üzere sosyal maliyetler anlamına gelir [128].

Engelin yakınında oturanların çoğu, engelin faydalarının dezavantajlarından çok daha fazla olduğunu düşünmektedir. Engelin yakınında oturan sakinler, evdeki iletişimin daha kolay olduğunu, uyku koşullarının daha nitelikli hale geldiğini, iç mekanların daha rahatlatıcı hissettirdiğini, pencerelerin daha sık açıldığını ve yaz aylarında avluların daha sık kullanıldığını bildirmiştir. Bunlara ek olarak artan mahremiyet, daha temiz hava, daha iyi manzara ve sağlıklı çimenler gibi dolaylı faydalardan da bahsedilmiştir. Alınan olumsuz tepkiler; görüş kısıtlanması, hapsolmuşlük hissi, hava sirkülasyonu kaybı, gün ışığı kaybı ve engelin yetersiz bakımı olarak sıralanmıştır [121].

Tamura vd. (1994) her bir kirliliğin fiziksel/biyolojik olarak ele alınmasına ek olarak bölge sakinlerinin tercihlerinin araştırmaya dahil edildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmaya göre, bir alana 3 m yüksekliğinde bir gürültü engeli inşa etmenin, çevresel etkilerin azaltılması (gürültü azaltımı ve NO₂ miktarındaki

düşüş) ile manzaranın engellenmesi arasındaki dengeleme eğrisi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekildeki düz çizgi, önlemin olmadığı durumdaki ortalama yararsızlık fonksiyonunu ifade eder. Noktalı çizgi çevresel etkilerin azalmasını ve manzaranın engellenmesinin etkisinin dikkate alındığı yararsızlık fonksiyonunu göstermektedir. Kesik çizgi ise, çevresel etkilerin azalması ve manzaranın engellenmesi etkisine ek olarak bu tıkanıklık etkisini azaltmak için engelin önüne ağaç dikimi gibi gerekli önlemlerin alındığı durumu temsil eder [129]. Gürültü engelinin varlığı, herhangi bir önlem olmadığı duruma göre hoşnutsuzluğu belirgin ölçüde düşürür ve gürültüden olumsuz etkilenen alan miktarını azaltır. Gürültü engelinin önüne ağaç dikimi gerçekleştiğinde ise, sadece gürültü engelinin olduğu duruma göre sakinlerdeki hoşnutsuzluğu azalttığı görülmüştür.



Şekil 2.8 Gürültü engellerinin etkisini değerlendirme-hoşnutsuzluk (yararsızlık) fonksiyonu [129]

Fotovoltaik sistemler ve gürültü engellerinin ortak faydası hava kalitesini iyileştirmeleridir. Fosil kaynaklardan ve karayolu ulaşımından kaynaklanan toksik gazlar ve partiküller, iklim değişikliğinin yanı sıra insan sağlığını da etkiler. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) araştırmasına göre, 2019’da dünya nüfusunun %99’u DSÖ hava kalitesi kılavuz seviyelerinin karşılanmadığı yerlerde yaşamaktadır ve hava kirliliğinin 2016’da 4,2 milyon erken ölüme neden olduğu tahmin edilmiştir [130].

2.1.4 Değerlendirme

FVGE performansını etkileyen faktörler ve performans göstergeleri, Tablo 2.3'de özetlenmiştir. Tabloda gösterilen, konumsal özellikler yere özgüdür ve değiştirilemez niteliktedir. Gürültü denetimi performansı, güneş enerjisi performansı ve çevresel etki olmak üzere her üç performans göstergesini de etkileyen parametreler kırmızı bir çerçeve ile vurgulanmıştır. Engel yüksekliği, engel uzunluğu, kırınım kenarının eğim açısı ve kırınım yüzeyi boyutları gibi değişkenler engel tasarımı ile ilgilidir. Bu çalışmada, ortak tasarım değişkenlerinin performans göstergeleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır.

2.2 Dünyadan FVGE Uygulamaları

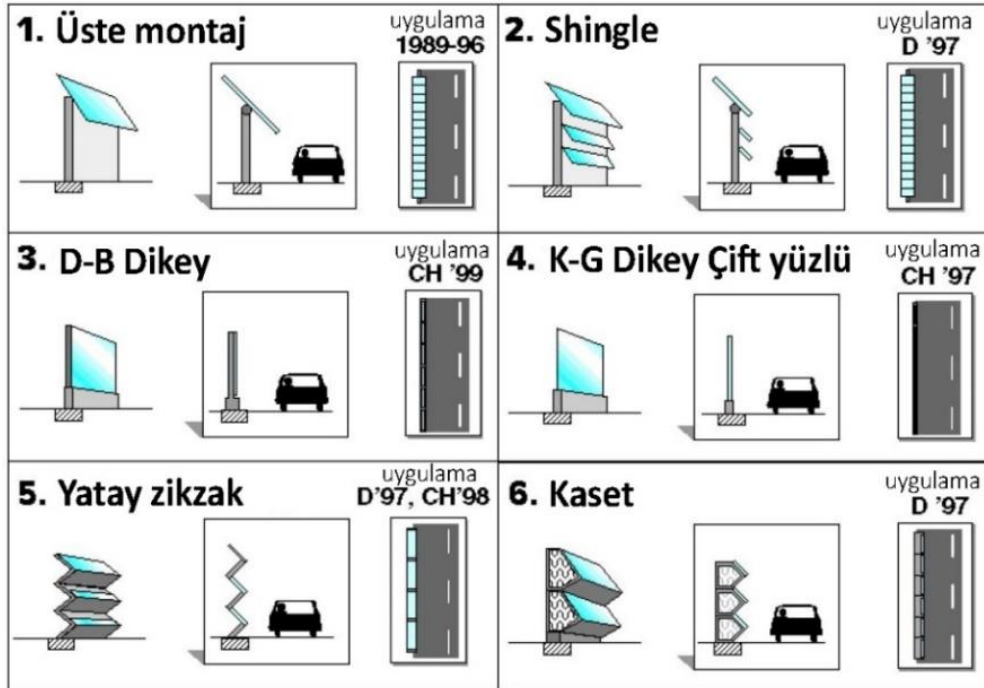
Fotovoltaik gürültü engellerinin ilk uygulaması 1989'da İsviçre'de gerçekleştirilmiştir ve 2010 yılında Avrupa'da 7 MWp işletim kapasitesine ulaşmıştır. İsviçre'nin ardından, Avusturya, Almanya ve Hollanda'da FVGE sisteminin ilk örnekleri yapılmıştır. İlk FVGE örnekleri (1-11) ile birlikte dünyadan bazı belgelendirilmiş uygulamalar ve özellikleri Ek A'da yer alan Tablo A.1'de gösterilmiştir [33], [131], [60], [132]. Şekil A.1 ve Şekil A.28 arasında bazı projelerin görsellerine yer verilmiştir. Tablolarda, Şekil A.10 hariç, sadece karayolu FVGE projeleri yer almaktadır.

İsviçre'de 1989'da inşa edilen ilk FVGE tesisi orijinal FV modülleri ile birlikte 2017 yılına kadar işletimde kalmıştır. 2005 yılında eviriciler ve çalınan FV modülleri değiştirilmiştir. 2016 yılındaki verimi, başlangıç yılına göre %40 azalmıştır. 28 yıllık işletim sürecinin enerji değerlendirmesi ve analizleri tasarımcıları Thomas Vontobel ve Thomas Nordmann tarafından detaylı olarak incelenmiştir [133].

Tablo 2.3 FVGE performansını etkileyen faktörler ve performans göstergeleri

		Gürültü Denetimi Performansı	Güneş Enerjisi Performansı	Çevresel Etki
Konumsal Özellikler	Araç Hacmi			
	Büyük Araç Oranı			
	Araç Hızları			
	Yol Yüzeyi Özellikleri			
	Engel-Yol -Alıcı Mesafeleri			
	Küresel Güneş Işınımı			
	Hava Sıcaklığı			
	Bağıl Nem Oranı			
	Yağış Miktarı			
	Rüzgar Akımları			
	Bakı/Yön			
	Toz Özellikleri			
	Teknik Performans	form	Engel Uzunluğu	
Engel Yüksekliği				
Kırınım Yüzeyi Açısı				
Kırınım Yüzeyi Boyutları				
işletim		FV panel tipi		
		FV Sistem Bileşenleri		
		Bakım		
		Malzeme		
		Standartlar		
		Dayanım		
Çevresel Performans	Güvenlik			
	Arazi Kullanımı			
	Hava Kirliliği			
	İklim Değişikliği			
	Görsel Etki			
Ekonomik Performans	Akustik Etki			
	Bölgesel Ekonomi			
	Enerjide Dışa Bağımlılık			
	Elektrik Satışı			
	Yapı Kabuğundan Tasarruf			
	Gayrimenkul Değeri			
Sosyal Performans	Sağlık Maliyeti			
	İstihdam			
	İnsan Sağlığı			
	Arazi ve Kaynak Korunumu			
	Çevresel Farkındalık			
Yaşam Kalitesi				

1995’de 6 farklı ülkeden 6 ortakla başlayan ve 1999’da finalize edilen “Elektrik Üretimi Ve Pazar Payı İçin FV Gürültü Engeli Teknolojisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi (Evaluation Of The Potential Of PV Noise Barrier Technology For Electricity Production And Market Share, Thermie B)” projesi demiryolları ve karayolları boyunca mevcut ve planlanan gürültü engellerinin analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmanın metodolojik yaklaşımı kapsamında; Almanya, İtalya, Fransa, Birleşik Krallık için 1’e 1° ve Hollanda ile İsviçre için 0,5’e 0,5° ile boylam ve enlemler boyunca bir ızgara oluşturulmuştur. Her bir derece için yolların ve rayların uzunluğu ve yönü kayıt altına alınmış ve yönlerine göre gruplandırılmıştır. Kurulu FV gücü ve üretilen elektrik; teorik potansiyel, teknik potansiyel, Avrupa potansiyelinden türetilen kısa vadeli potansiyel, tahmini potansiyel olmak üzere farklı boyutlarıyla değerlendirilmiştir [54] Bu projede, FVGE strüktürlerinin alternatif şematik eskizleri gruplandırılmıştır (Şekil 2.9). Bu proje ile, FVGE’nin Avrupa potansiyelinin gürültü engeli talebine paralel olarak Almanya ve Hollanda’da yüksek, İtalya’da düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 2.9 Farklı FVGE strüktürlerinin şematik eskizleri

1996 yılında Almanya ve İsviçre’de gürültü engeli tasarımcıları, fotovoltaik sistem tedarikçileri için bir yarışma düzenlemiştir. Bu yarışmanın sonucunda

Almanya’da ve İsviçre’de 3 adet 10 kWp kapasiteli FVGE tesisi inşa edilmiştir. Ek-A’da yer alan Tablo A.1’de (12-17) bu tesislerin 2 yıllık gözlem çıktıları gösterilmiştir. Almanya’daki kurulumlar Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Karayolu ve demiryolu için tasarlanan tüm tesisler, gürültü denetimi ve fotovoltaik teknolojisinin yenilikçi bir prototipidir. Protoiplerin testleri ISO 10847:1997 (Akustik – Gürültü Engeli Tiplerinin Ekleme Kayıplarının Yerinde Belirlenmesi) standardı izlenerek yapılmıştır. Kaset, shingle, zikzak ve çift yüzlü FVGE tasarımları uygulanmış ve sonuçları gözlenmiştir. Yarışma ve Thermie B projesi sonucunda varılan tasarıma yönelik sonuçlar aşağıdaki gibidir;

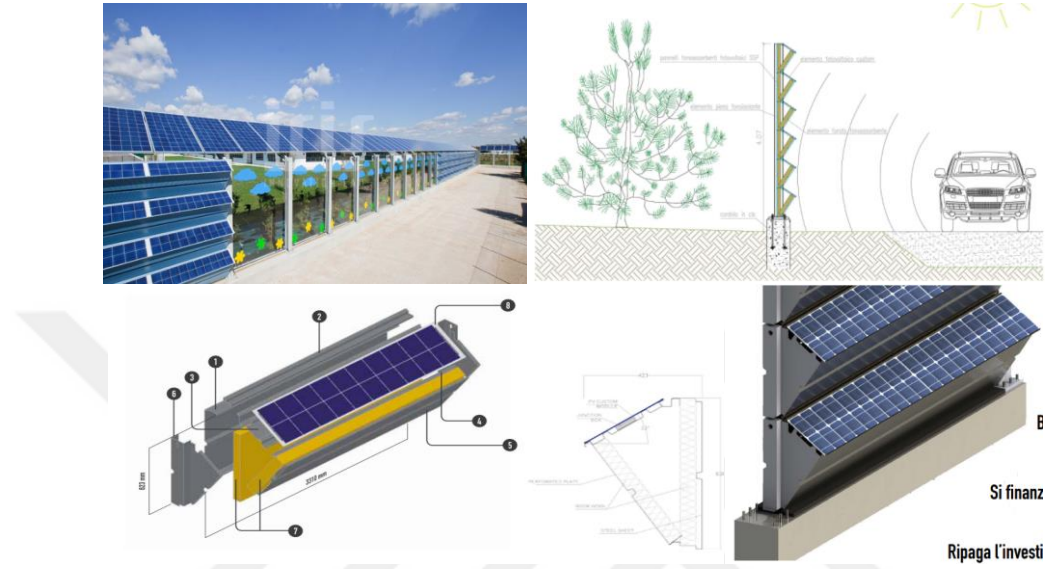
- FV sistemin yüzeyi ses yansıması için kullanılabilirken, ses yutuculuğunun istendiği durumlarda kaset veya zikzak modeller uygulanabilir. Katmanlı ve zikzak modellerde, modüllerin konumlandırılması kısmi gölgelemeyi engelleyecek şekilde ve modüllerin yeterli soğumasını sağlayacak şekilde olmalıdır.
- Modül performansının, otoyoldaki araçlardan kaynaklanan kirlilik nedeniyle olumsuz etkilenmemesi için modüller, çok alçakta ve yol yüzeyine yakın konumlandırılmamalıdır.
- Gürültü azaltımı testleri sonuçlarına göre; zikzak, kaset ve shingle konfigürasyonları sırasıyla 14 dBA, 11 dBA ve 13 dBA ekleme kaybı sağlamıştır [134]. Pratikte gerçekçi limit 15 dBA olarak belirtilmiştir [135].



Şekil 2.10 FVGE için düzenlenen yarışmada Almanya’da uygulanan kurulumlar,1996

2013 yılında İtalya’nın Cittadella kentinde, fotovoltaik gürültü engelleri ile hem bir okul kompleksinin gürültü sorunu çözülmüştür hem de üretilen enerji okul

için kullanılmıştır. Peyzaj ile uyumlu bir giriş sağlayan engel tasarımı opak ve şeffaf levhalardan oluşmaktadır. Fotovoltaik panellerin gürültü engeline entegre edildiği uygulama, 33° sabit eğimli modüler bir panel geometrisine sahiptir (Şekil 2.11). Aynı modüler sistem Borgo Valsugana, Oppeano ve Lodi kentlerinde de uygulanmıştır [136]. (bkz. Şekil A.21 ve A.27).

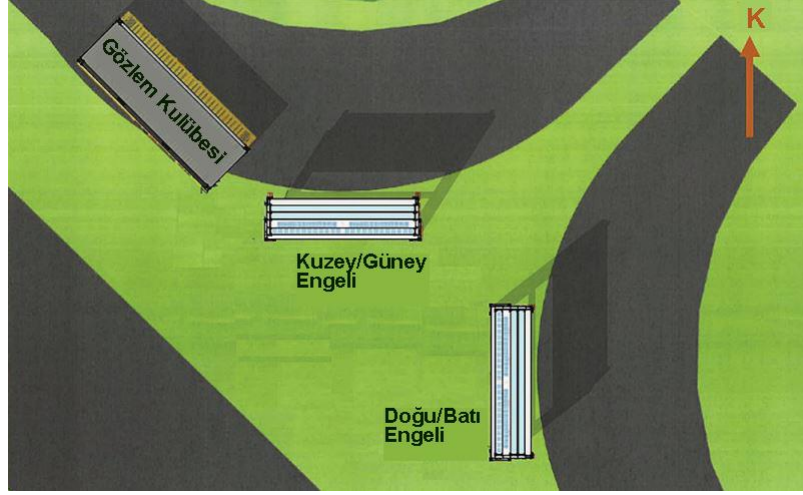


Şekil 2.11 İtalya Cittadella'da geliştirilen güneş enerjili ses panelleri [136]

2014-2020 yılları arasında, Hollanda Altyapı ve Su Yönetimi Bakanlığı (Rijkswaterstaat), Hollanda Uygulamalı Fizik Araştırmaları Organizasyonu (The Netherlands Organisation for applied scientific research, TNO) ve Güneş Enerjisi Uygulama Merkezi (Solar Energy Application Centre, SEAC) kurumlarının ortağı olduğu Güneş Enerjili Otoyollar (Solar Highways) projesi, bu teknoloji için önemli yapıtaşlarından biridir. Avrupa Komisyonu tarafından LIFE+ programı kapsamında hibe alan girişim, gürültü engellerine entegre edilmiş güneş panelleri ile hem trafik gürültüsü kontrolünü sağlayan hem de enerji üreten bir gürültü engeli tanıtım projesidir. Proje kapsamında çift taraflı güneş pilleri içeren yapı elemanlarından yapılmış bir gürültü engelinin teknik fizibilitesini, çevresel, sosyal ve finansal faydalarını göstermek hedeflenmiştir. Çift yüzlü FVGE'lerin akustik faydası alan büyüklüğü üzerinden değerlendirilmiştir [132]. Bitişik bloklarda yaşayan nüfusun gürültüye maruziyet oranlarındaki ve rahatsızlık düzeylerindeki değişim nicelleştirilmemiştir.

Solar Highways projesi sonucunda, 2018'de Hollanda Uden yakınlarında 5 m yüksekliğinde 400 m uzunluğunda entegre çift yüzeyli FV hücrelere sahip gürültü engeli faaliyete geçmiştir. İzleme sonuçlarına göre, yıllık üretilen elektrik miktarı 190 ila 215 MWh arasındadır. Bu miktar, 63 ila 72 tipik Hollanda hanesinin elektrik tüketimine eşdeğer düzeydedir. Tahmini 30 yıllık yaşam ömrü boyunca 2520 ila 2850 ton arasında karbondioksit emisyonunu önleyeceği tahmin edilmiştir [119]. Ayrıca araştırma, engellerin arkasındaki hava kalitesi üzerinde de olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir. [137]. Enerji üretiminin yanı sıra, bakımı gerçekleştirmenin farklı yollarının da etkisi test edilmiştir. Çift yüzeyli bu uygulamada, modüllerin temizlenmesinin daha yüksek enerji üretimine yol açmadığı sonucuna varıldı. Bu nedenle, enerji performansını maksimize etmek açısından modüllerin temizlenmemesi tavsiye edilir [119].

2016'da Hollanda'da SONOB programı kapsamında, FV alanını maksimize eden ve performansı gölgelemeye toleranslı yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemin (luminescent solar concentrator, LSC) entegre olduğu 2 adet gürültü engeli prototipi üretilmiş ve çerçeveye yakın kısımların gözlemleri yapılmıştır. Her biri 5 m² olan 4 modülden oluşan strüktürlerden biri Kuzey/Güney, diğeri Doğu/Batı yönelimine sahip olacak şekilde yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 2.12). Modüllerden ikisinde, 8 mm cam katmanın içine silikon fotovoltaik hücreleri entegre edilmiştir. Diğer 2 modül ise kırmızı ve turuncu renkli LSC şeklindedir. Kuzey/Güney yönelimine sahip prototipin Doğu/Batı yönüne sahip olandan daha az gölgelemeye maruz kaldığı görülmüştür [138]. Daha sonra aynı prototipe farklı fotovoltaik modül tipleri entegre edilerek elektrik üretimleri incelenmiştir. Simülasyonlar ve deneysel çalışma, daha iyi boya çözünürlüğü ve daha uygun çerçeve geometrisi ile güç çıkışında 6-9 katlık bir artış sağlanabileceğini ve potansiyel olarak kısa bir geri ödeme süresi sağlayacağını göstermiştir [139]. İlk fazı tamamlanan bu projenin, istenilen herhangi bir renkte üretilerek estetik gereksinimleri sağlaması, bulutlu hava koşullarında dahi çalışması, minimum gölgeleme sağlayan çerçeve düzeni gibi avantajları ile daha büyük ölçekli uygulanması hedeflenmektedir.



Şekil 2.12 Hollanda Den Bosch'ta, fotovoltaik gürültü engeli test kurulumunun prototipi

Belçikalı araştırma ortaklarının işbirliği olan EnergyVille'in; enerji etkin, karbon-nötr ve sürdürülebilir bir kentsel çevreye geçişte kamu ve özel sektör paydaşlarını desteklemek için geliştirdiği projelerden biri de ulaşım altyapılarına güneş panellerini entegre etmek üzerinedir. Rollin Solar isimli bu projede araştırmacılar, 13 m uzunluğunda ve 5 m yüksekliğinde bir gürültü engeli test düzeneğinde, güneş panellerinin şeffaf olmayan yüzeylere entegrasyonunu araştırmıştır (bkz. Şekil 2.13) [140].



Şekil 2.13 Rolling Solar Fotovoltaik entegre edilen gürültü engelinin ilk kısmının kurulumu [140]

2.2.1 Değerlendirme

Fotovoltaik gürültü engellerine yönelik uluslararası literatürde çalışmalar ve farklı ülkelerde uygulamalar olmasına rağmen Türkiye’de gerçekleştirilmiş ayrıntılı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Daha önceki uygulamalar ve çalışmalar incelendiğinde, yapılan araştırmaların kısıtlı bir bölgede ve aynı sınır koşullar içinde gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu çalışma, kent ölçeğinde farklı çevresel koşullara uyarlanabilir bir karar destek aracını sunmaktadır. Ayrıca çalışma, fotovoltaik gürültü engelinin uygulanmasının planlandığı noktalarda, engel tasarımına yönelik bir rehber niteliğindedir.

Literatürde, fotovoltaik gürültü engellerinin formuna yönelik çalışmalar bulunsa da, çeşitli performans ölçütlerini bütünlük değerlendiren çalışmalar sınırlıdır. Çalışmalarda genellikle, gürültü denetimi veya güneş enerjisi performanslarından biri ön planda tutulmaktadır. Bu çalışmada, her iki fiziksel çevre faktörünü kapsamlı performans ölçütleri doğrultusunda ele alarak, yere özgü karar parametrelerinin ağırlıklarını değiştiren bir yaklaşım geliştirilmiştir.

FVGE sistemlerin; teknik, ekonomik, çevresel ve statik performans açısından aynı anda incelendiği çalışmaya rastlanmamıştır. Özellikle, FVGE’lere yönelik yapım standardı olmadığı için, alternatiflerin statik analizinin ve yapım maliyetinin, tasarım parametreleriyle ilişkilendirilmesi açısından bu çalışma yol gösterici niteliğe sahiptir. Çalışma, farklı parametrelerin birlikte değerlendirildiği kompleks biçimleniş sürecinin tüm performans ölçütlerine etkisini detaylı bir şekilde sunar.

Bu araştırmanın ana odak noktası, fotovoltaik gürültü engelleri olmakla birlikte, ayrıca yol kenarındaki eğimli yüzeylerdeki ışınım tahmini ve alanların fiziksel çevre faktörlerine göre önceliklendirilmesine yönelik araştırmacılar tarafından kullanılabilir şemalar sunmaktadır.

Bu tezin sonuçları, FVGE Tasarım parametrelerinin, güneş enerjisi ve gürültü denetimi performansına etkilerinin öngörülebilmesi konusunda fikir edinilmesine yardımcı olabilir. FVGE elemanlarının planlama ve tasarım süreçlerinde, karar vericilere yol göstereceği düşünülmektedir.

OPTİMUM FVGE TASARIMINA YÖNELİK BİR YAKLAŞIM

3.1 Yaklaşımın amacı

Güneş enerjisi ve gürültü denetimi gibi farklı disiplinlerin ele alındığı hibrit teknolojilerin performansı teknik, çevresel ve ekonomik boyutu ile birlikte değerlendirilmelidir. Bu tez çalışmasının ilk aşamasında, FVGE alternatiflerinin teknik performans ve yapıları çevre ile ilişkisi, birbirinden bağımsız yazılımlarla birden fazla analiz birimi üzerinden değerlendirilmektedir. Fotovoltaik sistemlerin enerji değerlendirmesi, sistemin güç çıktısını maksimum üretim miktarı ile kıyaslayan çeşitli performans göstergeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gürültü engelinin akustik performansı ise, limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı nokta sayısı ve rahatsız olan kişi sayısı ile belirlenmektedir. Çevresel performansı, fotovoltaik sistemden üretilen elektrik enerjisinin, aynı miktarda üretilen enerji için tüketilen fosil yakıtın çevreye etkisi ile değerlendirilmektedir. Ekonomik faydası ise; inşa, işletme ve fayda maliyetlerinin birlikte ele alındığı finansal performans göstergelerine göre ölçümlenmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen yaklaşımla, farklı disiplinler tarafından değerlendirilen teknolojilerin erken tasarım aşamalarında bütüncül olarak ele alınarak, farklı fiziksel çevre bileşenlerine sahip alanlarda uygulanabilirliğinde, kullanıcı odaklı tasarım destek aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Alana özgü öncelikler veya kullanıcı tercihleri doğrultusunda, optimum FVGE alternatifini belirleyerek, ekonomik ve çevresel performans göstergelerini hesaplayan excel tabanlı bir hesaplama aracı planlamak amaçlanmıştır. Söz konusu araç ile; FVGE uygulama potansiyelini artırmak, faydalarını (ekonomik ve çevresel) görünür kılmak, kentsel alanlarda güneş enerjisi kullanım kararını yaygınlaştırmak ve trafik gürültüsüne maruz kalan nüfusu azaltma yolunu kolaylaştırmak amaçlanmıştır.

3.2 Yaklaşımın Kapsamı

Bu çalışmada kapsam, güneş enerjisi potansiyeli yüksek ve trafik yoğunluğu fazla olan otoyol kenarında konumlanması öngörülen optimum FVGE performansına sahip alternatifin belirlenmesine yöneliktir. Bir tasarım destek modeli sunan ve bu modeli bir araca dönüştüren bu çalışma; FVGE tasarım sürecini güneş enerjisi, gürültü denetimi ve çevresel etki ekseninde fizisel çevre ile ilişkisi bağlamında ele alır.

Araştırmanın coğrafi bölge olarak kapsamını, güneş enerjisi kabulleri belirler. Türkiye için oluşturulmuş güneş enerjisi potansiyel atlası skalasında yer alan 9 bölge farklı güneş ışıınımı kazanç potansiyellerine sahiptir. Zaman kısıtlılığı ve veri elde etme süreci göz önünde bulundurularak çalışma İstanbul ili ile sınırlandırılmıştır. İstanbul'a ait, ışıınım, hava sıcaklığı ve rüzgar verileri kullanılmıştır.

Karar destek aracının gürültü denetimi değerlendirmesine yönelik kapsamı L-kesite sahip tek ve çift kırıklı engel alternatiflerinin gürültü azaltım performansı ile sınırlandırılmıştır. Engel alternatiflerinin gürültü haritası çıktıları farklı özelliklere sahip alanlar için gündüz, akşam, gece gürültü göstergesi sınır değerleri kapsamında kullanıcı odaklı değerlendirme sunabilmektedir.

3.3 Yaklaşımın Yöntemi

Bu tez çalışmasında izlenen araştırma yaklaşımı, temel felsefesi açısından uygulamalı ve amacı açısından keşfedicidir. Nicel yöntemlere dayanan deneysel araştırmalar yapılmıştır.

Deneysel araştırma yöntemlerinden olan alan çalışmaları, yerel bir bağlama dayanan ve araştırmanın gerçek dünyaya uygulanabilirliği ile ilgilenen çalışmalardır. Literatürde alan çalışmaları; keşfedici, betimleyici ve açıklayıcı olmak üzere üç farklı şekilde ele alınır [141]. Açıklayıcı alan çalışmaları, değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri inceleyerek açıklamaya çalışan araştırmalardır. Betimleyici alan çalışmaları, konuların betimlemesi ve tasvirini elde etmeyi amaçlar. Keşfedici veya keşifsel vaka analizi olarak da tanımlanan

araştırma tipinde ise, konu ile ilgili bilginin kısıtlı olduğu ve araştırma problemlerinin net bir şekilde oluşturulamadığı durumlar değerlendirilir. İlk varsayımlara dayalı keşifsel alan çalışması, analiz birimleri arasındaki ilişkilerin gözlemlenmesini sağlayarak daha yapılandırılmış araçların geliştirilmesi için bir temel olarak görülmüştür.

FVGE teknolojisi yeni bir konu olmamasına rağmen, fiziksel çevre ve tekil yapı arasında teorik olarak kurulmuş çok sayıda ilişkiyi detaylandıran ve ekonomik, çevresel ve teknik performans açısından bütüncül olarak değerlendiren çalışma sınırlılığı nedeniyle keşifsel alan çalışması yöntemi ile araştırılmıştır. Ayrıca, bu tür tasarım tabanlı araştırma süreçlerinde, bağımlı ve bağımsız değişkenlere bağlı tahmin edilemez sonuçların doğası nedeniyle keşifsel alan çalışmasının araştırmaya en uygun yöntem olduğu görülmüştür.

Çalışma, doğrusal bir akışı izleyen 3 ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm keşifsel, ikincisi geliştirme, sonuncusu ise açıklayıcıdır. Bu kapsamda izlenen yaklaşım Şekil 3.1’de gösterilmiştir ve ana adımları aşağıda özetlenmiştir;

- 1. Keşifsel Alan Çalışması;** FVGE sistem parametrelerinin ve performans göstergelerinin; girdilerle olan ilişkisini, gerçek bir alanda ampirik olarak incelemeyi ve belirlemeyi amaçlamıştır.

Metodoloji kurma bölümünde; literatür taraması doğrultusunda, güneş enerjisi ve gürültü denetimi performansını maksimize eden L kesitli form belirlenerek, tek kırıklı (1K) ve çift kırıklı (2K) FVGE alternatifleri planlanmış ve alan çalışmasının yapıldığı yerleşim belirlenmiştir.

Parametrik çalışma bölümünde; planlanan FVGE alternatiflerinin, güneş enerjisi ve gürültü denetimi performansı çıktıları hesaplanmıştır. Güneş enerjisi performansı için PVsyst 6.7.7. yazılımı kullanılmıştır. FVGE’nin planlandığı alan yakın çevresi ile modellenerek, FV sistem girdileri tanımlanmıştır. Hesaplama sonucunda; üretilen elektrik enerjisi, performans oranı, gölgeleme kaybı çıktıları elde edilmiştir. Ayrıca, FVGE’nin zemin kat cephesinde sebep olduğu ışınım kaybı da PVsyst 6.7.7 ile hesaplanmıştır. Gürültü denetimi performansı için SoundPLAN 7.2. yazılımı kullanılmıştır.

Gürültü çevresi modellenerek, gürültü haritaları alanda yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır. FVGE alternatifleri modellenerek, gürültü denetimi performansı, limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı nokta sayısı ile temsil edilmiştir.

Performans analizi bölümünde; tek kırıklı (1K) ve çift kırıklı (2K) engellerin, güneş enerjisi, gürültü denetimi ve çevresel etki performans göstergeleri ayrı ayrı yorumlanmıştır. Çift kırıklı FVGE'ler, doğrudan atanan kriter ağırlıkları doğrultusunda TOPSIS metodu ile sıralanarak optimum FVGE belirlenmiştir.

Değerlendirme Bölümünde; FVGE alternatiflerinin performans çıktıları ve tasarım parametreleri, korelasyon analizi ile incelenmiştir. Çıkarımlar doğrultusunda, tasarım önerileri getirilmiştir.

2. Karar Destek Aracının Geliştirilmesi; FVGE tasarım parametreleri ve çevresel veriler sistematize edilerek, güneş enerjisi ve gürültü denetimini bütünlük değerlendiren bir araç geliştirilmiştir.

Metodoloji Kurma bölümünde; keşfedici alan çalışmalarının tasarım önerileri doğrultusunda, tek kırıklı (1K) ve çift kırıklı (2K) olmak üzere toplam 252 alternatiften oluşan FVGE veritabanı geliştirilmiştir.

Parametrik çalışma bölümünde; yazılımlar bünyesinde yapılan hesaplamalar, sayısal modellere ve kayıtlı verilere dönüştürülmüştür. Güneş enerjisi için; Perez modeline dayalı hesaplama modeli excel tabanlı araca tanımlanarak, ışınım tahmini ve elektrik üretimi hesaplama çerçevesi oluşturulmuştur. Gürültü denetimi için, farazi bir kentsel alanda 252 FVGE alternatifi modellenmiş ve alıcı noktalardaki gürültü azaltımı çıktıları excel tabanlı araca kaydedilmiştir.

Performans analizi bölümünde; gürültü denetimi, güneş enerjisi ve gün ışığı kaybı performans çıktılarının, alandaki önceliklerini belirlemeye yönelik objektif (yere özgü) ve subjektif (kullanıcı tanımlı) kriter ağırlıklandırma şemaları geliştirilmiştir. Teknik performans açısından optimum FVGE'yi belirlemeye yönelik TOPSIS metodu hesaplama adımları araca tanımlanmıştır.

Değerlendirme bölümünde; FVGE tasarım parametreleri ve strüktürel tahditler doğrultusunda inşa ve işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Performans göstergelerine dayalı fayda/maliyet analizleri yapılmıştır.

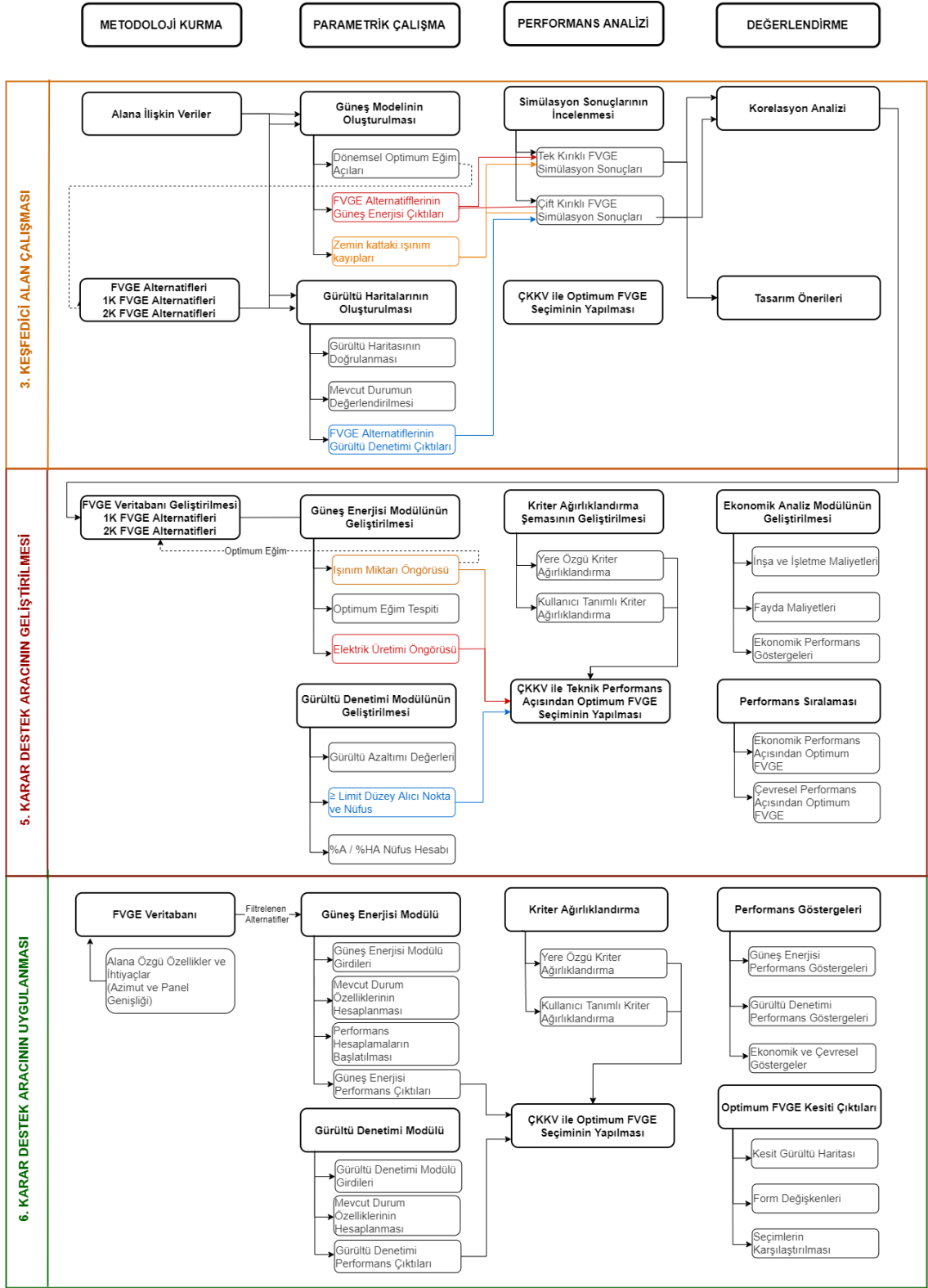
3. Karar Destek Aracının Uygulanması; Bu bölümde, karar destek aracı, gerçek bir alanda uygulanmaktadır.

Metodoloji kurma bölümünde; alan özellikleri doğrultusunda modül parametreleri (yön ve panel genişliği) araca tanımlanarak, alternatifler filtrelenmiştir.

Parametrik çalışma bölümünde; filtrelenen FVGE alternatiflerinin performansları, alan girdileri doğrultusunda, gürültü denetimi ve güneş enerjisi modülünde tanımlanarak mevcut durum değerlendirilmiştir.

Performans analizi bölümünde; kullanıcı tarafından seçilen yere özgü veya kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları, performans göstergelerine tanımlanarak, teknik performans açısından optimum FVGE belirlenmiştir.

Değerlendirme bölümünde; fayda/maliyet analizleri doğrultusunda, ekonomik ve çevresel açıdan optimum FVGE alternatiflerini belirlemeye yönelik performans sıralaması yapılmıştır. Tüm optimum seçimlerin teknik, ekonomik ve çevresel performans göstergelerinin çıktıları yorumlanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Alan çalışması bulguları değerlendirilmiştir.



Şekil 3.1 Yaklaşımın akış diyagramı

Bu bölümde, FVGE tasarım parametrelerinin performansa etkilerini, belirli bir alanın çevresel koşulları dahilinde derinlemesine araştırmak ve keşfetmek amaçlanmıştır. Bu bölüm; metodoloji kurma, parametrik çalışma, performans analizi ve değerlendirme olmak üzere 4 alt bölümden oluşmaktadır.

Metodoloji kurma bölümünde, çalışmanın yapıldığı alan belirlenerek konuma ilişkin veri ve kabuller yapılmıştır. Literatür taramasında elde edilen, gürültü engelinin formuna ilişkin bulgular doğrultusunda L-kesitli tek kırıklı (1K) ve çift kırıklı (2K) FVGE alternatifleri planlanmıştır.

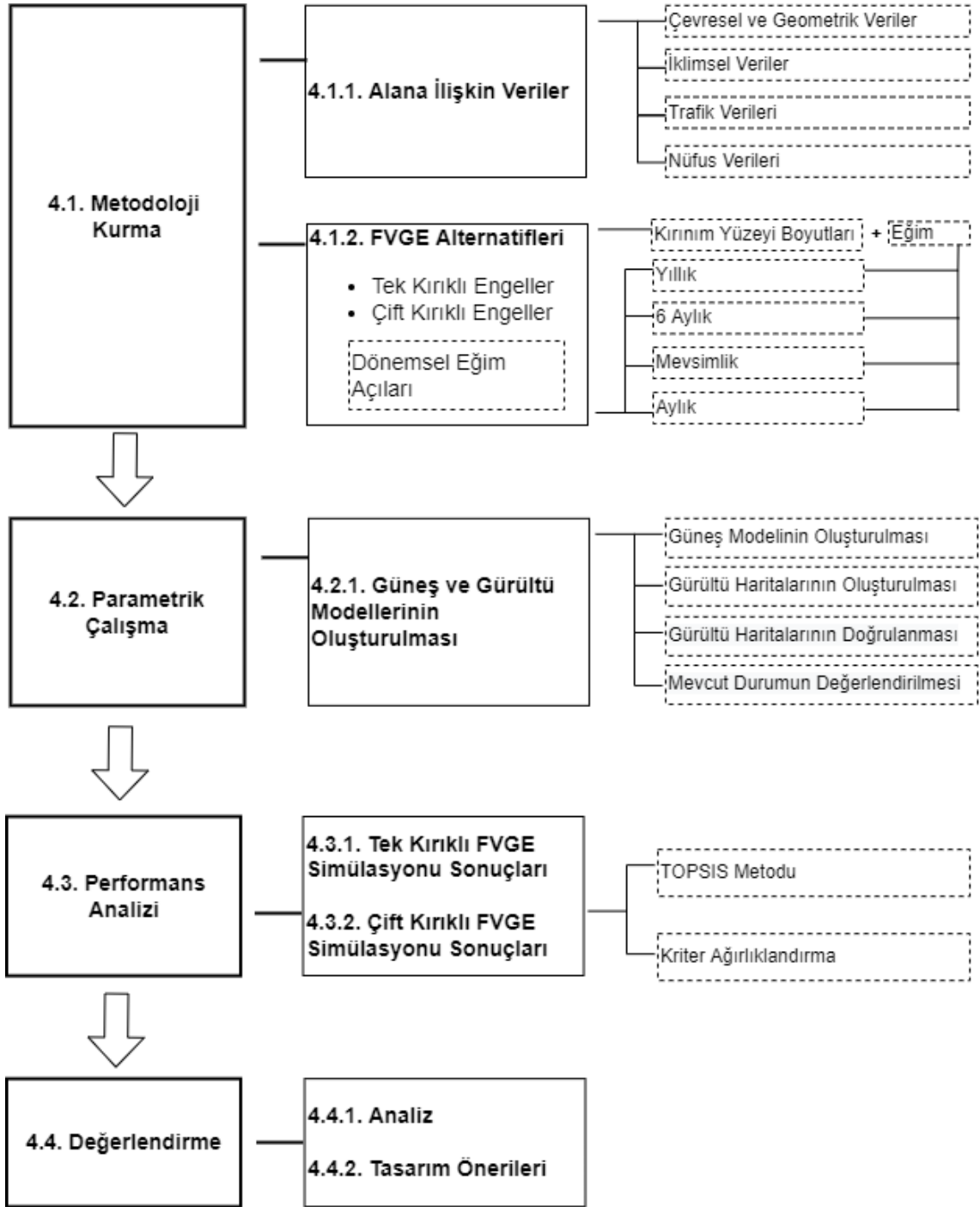
Parametrik çalışma bölümünde, geliştirilen FVGE alternatiflerinin güneş enerjisi performansı PVsyst yazılımında, gürültü denetimi performansı ise SoundPLAN yazılımında modellenerek performans göstergeleri elde edilmiştir.

Performans analizi bölümünde, 1K ve 2K FVGE alternatiflerinin simülasyon sonuçları irdelenmiştir. Performans göstergeleri doğrultusunda çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS metodu ile optimum teknik performansı gösteren engel alternatifi belirlenmiştir.

Değerlendirme ise, korelasyon analizi ile birlikte sonuçların incelenerek tasarım önerilerine dönüştürüldüğü bölümdür.

4.1 Metodoloji Kurma

Alan çalışması olarak, hem güneş enerjisi potansiyeli yüksek hem de limit değer üzerinde gürültü düzeylerinin gözlemlendiği bir konum belirlenmiştir. Bu kapsamda, İstanbul ilinde, yoğun taşıt trafiğine sahip karayolu kenarında limit değerlerin üzerinde gürültüye maruz kalan mevcut bir konut yerleşimi ele alınmıştır. Alan çalışmasının akış diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Keşfedici alan çalışması akış şeması

4.1.1 Alana İlişkin Veriler

Alan çalışması kapsamında, İstanbul Anadolu Yakası'nda Şile Otoyolu'nun Kuzeydoğusunda yer alan mevcut bir konut yerleşimi ele alınmıştır.

Bu çalışma, güneş potansiyeli yüksek, karayolunun yoğun trafiği olan ve aşırı yol gürültüsünden etkilenen bir toplu konut alanında gerçekleştirilmiştir. Otoyol,



Şekil 4.4 Çalışma alanının havadan görünümü

Tablo 4.1 Çalışma alanının genel verileri

Enlem	41.02° Kuzey
Boylam	29.22° Doğu
Yükseklik	108 metre
Azimut Açısı	-30° (KKD)
Yerleşimin Taban Alanı	72.000 m ²
Toplam İnşaat Alanı	10.000 m ²
Otoyol	41m genişlik, 8 şerit

4.1.1.1 Çevresel ve Geometrik Veriler

Çalışmanın gerçekleştirildiği yaklaşık 450.000 m² büyüklüğündeki alanın çevresel özelliklerini (bina işlevi, bina kat adedi, yollar, topoğrafya verileri vb.) gösteren 1:1000 ölçekli hali hazır haritalar Çekmeköy Belediyesi'nden DXF formatında alınmıştır (Şekil 4.5). Harita, güneş enerjisinin simüle edildiği PVsyst 6.7.7. ve gürültü denetimi performansının analiz edildiği SoundPLAN 7.2. yazılımına aktarılarak, alanın üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. SoundPLAN, her bir koordinat için arazi noktaları ile gerçek haritayı DXF formatında içe aktardıktan sonra, yükseklik verilerinden sayısal yer modelini (digital ground model, DGM) hesaplamıştır. Kat sayısı belediye haritaları baz

alınarak modellenmiş ve arazi verileri doğrultusunda yazılımda kat yüksekliği 3 metre olarak atanmıştır. Seçilen alan içerisinde, 2, 5 ve 9 katlı olmak üzere toplam 26 adet blok vardır.

Otoyol mevcut yerleşimin güney doğusundadır. Engelin tasarlandığı, otoyol ve yerleşimin arakesiti -30° azimut açısına sahiptir.

Mevcut durumda yerleşimin sınırında bulunan bahçe duvarının yüksekliği, topoğrafik şartlara göre 1,80 ile 2,50 m arasında değişmektedir. Doğrulama kısmında bahçe duvarı dikkate alınmış olup, engel tiplerinin gürültü denetimi açısından analiz edildiği aşamada, değerlendirmenin daha anlaşılır olabilmesi için bahçe duvarının olmadığı durum, temel durum olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.5 Çalışma alanının güncel hali hazır haritası

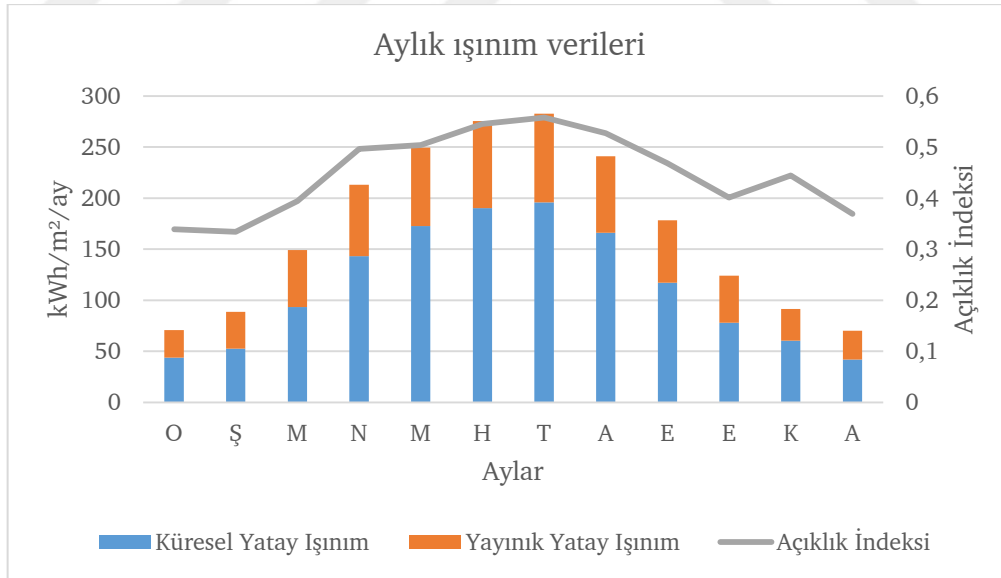
4.1.1.2 İklimsel Veriler

FVGE alternatiflerinin fotovoltaik üretim potansiyeli, güneş enerjisi simülasyon yazılımlarından PVsyst 6.7.7. ile simüle edilmiştir. Tahmin araçlarıyla ilgili literatür taraması, PVsyst yazılımının gerçek verilere en yakın çıktılara sahip olduğunu göstermektedir [143], [144]. PVsyst, bir fotovoltaik sistemin tasarım, boyutlandırma ve veri analizi ihtiyaçlarını karşılar. PVsyst tarafından sunulan iki transpozisyon modelinden biri olan Perez modeli, eğik bir yüzeyde gelen

ışınımın tahmini için kullanılmıştır. Hava durumu verilerinin kaynağı olarak Meteororm veritabanı kullanılmıştır.

Öncelikle, çalışma alanı için konum ve hava durumu dosyaları yazılıma tanımlanmıştır. Seçilen saha 41.02 K enlemi ve 29.22 Doğu boylamında olup, deniz seviyesinden ortalama 108 m yükseklikindedir. Sentetik saatlik oluşturulan hava durumu verileri interaktif haritadan konum seçilerek otomatik olarak yazılıma yüklenmiştir. Şekil 4.6, alan çalışması için aylık ortalama küresel yatay ışınım, yayınlık yatay ışınım ve açıklık indeksi değerlerini göstermektedir. Tablo 4.2, alanın aylık meteorolojik verilerini göstermektedir.

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi; küresel yatay ışınım değeri 56,6 W/m² ile 259,9 W/m² arasında, yayınlık yatay ışınım değeri ise 34,4 W/m² ile 120,3 W/m² arasında değişmektedir. Küresel yatay ışınım miktarı yazın maksimum değere ulaşırken, kışın daha düşük değerlere sahiptir. Küresel ışınım içinde yayınlık ışınımın en büyük payına sahip ay %60,78 ile Aralık, en düşük paya sahip ay ise %44,02 ile Haziran ayıdır. Yayınlık yatay ışınımın, küresel yatay ışınımına oranı ile açıklık indeksi arasında negatif bir korelasyon vardır.



Şekil 4.6 Çalışma alanının aylık ortalama ışınım verileri

Tablo 4.2 Çalışma alanının iklim ve ışınım verileri

Aylar	Küresel Yatay Işınım kWh/m ² /ay	Yatay Yayınık Işınım kWh/m ² /ay	Sıcaklık °C	Rüzgar Hızı m/s	Yoğunluk [-]	Bağıl Nem %
Ocak	43.7	27.1	6.2	4.40	3.091	75.7
Şubat	52.7	36.0	6.2	4.50	3.481	75.4
Mart	93.3	55.7	8.9	4.20	4.046	71.9
Nisan	143.1	70.1	12.3	3.79	4.703	69.1
Mayıs	172.5	77.0	17.7	3.70	4.012	66.2
Haziran	190.2	85.2	22.6	3.90	3.681	60.4
Temmuz	195.9	86.8	26	4.29	3.684	58.1
Ağustos	166.1	74.7	26	4.40	3.745	60.9
Eylül	117.2	61.2	20.9	3.90	3.668	68.1
Ekim	78.1	46	16.9	3.79	3.499	73.5
Kasım	60.3	31.2	11.6	3.90	3.192	77.0
Aralık	42.1	27.9	8.0	4.40	3.115	74.0
Yıllık	1355.2	678.9	15.3	4.1	3.660	69.2

İstanbul'un iklimi, yazları sıcak-kuru, ilkbahar ılık, kışları soğuk ve karlı, sonbahar ise ılık-nemlidir. Temmuz - Ağustos yaz dönemi, Aralık - Şubat ise kış dönemidir. Maksimum küresel yatay ışınım seviyesi döneminde, sıcaklık en yüksek seviyeye ulaşır. Rüzgar hızı değerleri aylık periyotlar için küçük farklılıklar göstermektedir.

4.1.1.3 Trafik Verileri

Konut grubunun konumlandığı otoyolun trafik hacmiyle ilgili yıllık veriler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Trafik Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Araç sayısı ve araç hızlarının şerit bazında bilgilerini içeren 551 numaralı sensör verilerine göre, 31.05.2018-31.05.2019 tarihleri arasında Şile Otoyolu'ndan toplam 34.946.809 araç geçmiştir. Tablo 4.3'de gündüz, akşam ve gece zaman aralıklarında otoyolu kullanan araç sayısı, araçların hızları ve oranları verilmiştir. Otoyoldaki trafik hacmi aylık ve günlük olarak önemli ölçüde farklılıklar göstermemektedir. Gündüz 5.445 araç/saat ortalama trafik hacmine sahip olan

otoyol, 95.744 taşıt/gün ile Karayolları Genel Müdürlüğü trafik hacim skalasında, en yüksek yoğunluğa sahip otoyollardan biridir.

Tablo 4.3 Şile otoyolunun trafik hacim verileri

	Gündüz <i>07:00-19:00</i>		Akşam <i>19:00-23:00</i>		Gece <i>23:00-07:00</i>	
Toplam Araç (yıl)	23.852.818		6.823.254		4.270.737	
Büyük Araç (yıl)	3.031.978		670.207		491.535	
Trafik Sayım Değeri (araç/saat)	5446		4673		1462	
Ağır Taşıt Oranı	%12,7		%9,8		%11,5	
Hafif Taşıt (Araç/saat)	4754		4215		1294	
Ağır Taşıt (taşıt/saat)	692		458		168	
Hız (km/sa)	Ağır	72	Ağır	70	Ağır	84
	Hafif	75	Hafif	78	Hafif	81

Sensör verilerini doğrulamak amacıyla, manuel araç sayım yöntemi kullanılmıştır. 13 Mayıs 2019 tarihinde, trafiğin yoğun olmadığı 15:00 – 16:00 saatleri arasında, otoyol üzerinde yer alan üst geçitte sayım gerçekleştirilmiştir. Sayım süresi 5 dakika olmak üzere, 5 dakika aralıklarla 3 sayım yapılmıştır. Tablo 4.4’de gösterilen sayım sonuçları ile sensör verileri doğrulanmıştır.

Tablo 4.4 Şile Otoyolu araç sayımı verileri ve İBB sensör verileri karşılaştırması

	SAYIM				İBB TRAFİK VERİLERİ
	Sayım 1	Sayım 2	Sayım 3	Sayım Ortalaması	
	Ölçüm Saati <i>15:23-15:28</i>	Ölçüm Saati <i>15:32-15:37</i>	Ölçüm Saati <i>15:42-15:47</i>		
Ağır Araç Sayısı/5 dakika	100	100	129	110	57
Hafif Araç Sayısı/5 dakika	343	300	322	322	396
Toplam Araç Sayısı/5 dakika	443	400	451	431	453
Büyük Araç Oranı (%)	22,6	25	28,6	25,4	12,6
Toplam Araç/saat	5316	4800	5412	5176	5445
Toplam Araç/gün (12 saat)	63792	57600	64944	62112	65340
Toplam Araç/yıl	23284080	21024000	23704560	22670880	23849100

Büyük araç oranındaki farkın yüksek olmasının sebebi, gözlemcilerin büyük araç algısı ve tanımlamalarından kaynaklanabileceği olarak yorumlanmıştır. Araç sayımı ve sensör verileri saatlik, günlük ve yıllık periyotlarda yakın sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, gürültü haritası modellemesinde sensör verileri kullanılmıştır.

4.1.1.4 Nüfus Verileri

Hali hazır haritalar nüfus verileri içermediğinden, dairelerin oda sayılarına göre konut bloklarının toplam kullanıcı sayısı hesaplanarak yazılıma aktarılmıştır. Gürültüden etkilenen nüfus oranını belirlerken, güvenilir bir değerlendirme yapabilmek için, dairelerin tam kapasite kullanıldığı ve boş daire olmadığı kabul edilmiştir.

Alan çalışmasının yapıldığı mevcut konut grubunun içerisinde 26 adet blok vardır. Bu bloklardan biri 2 katlı (sosyal tesis), 4 tanesi 9 katlı (konut, C blok, 1+1 ve 2+1 daireler), 6 tanesi 5 katlıdır (konut, A Blok, 4+1 daireler) ve 15 tanesi 5 katlıdır (konut, B Blok, 3+1 daireler). A blokta her bir daire sakini sayısının 6, B blokta her bir daire sakini sayısının 5, C blokta 2+1 dairelerin 3 ve 1+1 dairelerin 2 kişilik olduğu kabul edilmiştir. Yerleşimin toplam nüfusu, (4.1) ile hesaplanarak 1480 olarak belirlenmiştir.

$$n_i = \sum_{i=1}^n s b p_{sb} \quad (4.1)$$

n_i : Yerleşimin toplam nüfusu

n : Yerleşimdeki bina adedi

s : Hesaplanan binanın kat adedi

b : Kattaki daire adedi

p_{sb} : Dairedeki kişi sayısı

4.1.2 FVGE Alternatifleri

Çalışmanın ilk aşamasında, 1K ve 2K engel tasarım değişkenlerinin, FVGE performansına etkisi incelenmiştir. Literatür taramasında belirtildiği gibi; gürültü denetimi, güneş enerjisi ve çevresel etki açısından performansa etki eden ortak tasarım değişkenleri engel uzunluğu, engel yüksekliği, kırınım yüzeyi açısı ve kırınım yüzeyi genişliğidir. Gürültü engelinin, Şekil 4.3'de görülen vaziyet planındaki 2 tali yolun arasında uzandığı ve 590 m sabit uzunlukta olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle tek kırıklı ve çift kırıklı engellerde engel uzunluğu 590 metre olarak modellenmiştir.

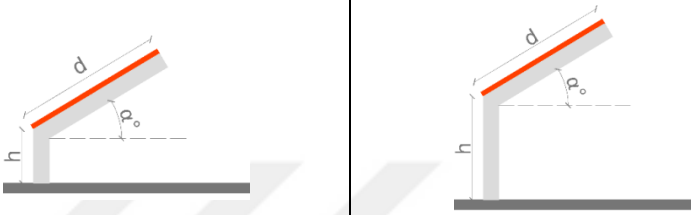
4.1.2.1 Tek Kırıklı FVGE Alternatifleri

Tablo 4.5'te FVGE şematik kesiti gösterilmiştir ve ortak tasarım değişkenlerinden; engel yüksekliği, engel başlığı genişliği ve başlık eğimi değiştirilerek FVGE tasarım alternatifleri hazırlanmıştır. -30° azimuta sahip alan için; aylık, mevsimlik, 6 aylık ve yıllık periyotlar için optimum eğim açıları PVsyst yazılımının "Optimizasyon Aracı (Optimization Tool)" modülü ile hesaplanarak tespit edilmiştir. Engel başlığının eğimi, alan için belirlenen dönemsel optimum eğim açıları ile modellenmiştir. Dönemsel periyotlara göre alan için belirlenen optimum eğim açıları Tablo 4.5'de gösterilmiştir. 25° 'nin altındaki açı değerleri, panel yüzeyinde otoyoldan kaynaklanan toz birikimini artırması nedeniyle hesaplamalara dahil edilmemiştir [94].

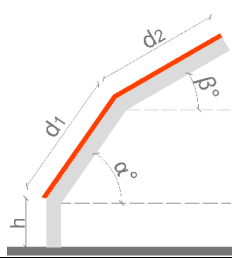
4.1.2.2 Çift Kırıklı FVGE Alternatifleri

Çift kırıklı engel alternatifleri tasarlanırken, tasarım değişkenlerinin farklı kombinasyonları ve performansa etkileri 2 aşamalı olarak değerlendirilmiştir. İlk aşamada, açının güneş enerjisi performansına etkisi değerlendirilerek açılarının çift kırıklı engelde kullanımı araştırılmıştır. Tablo 4.6'da gösterilen değişkenlerin dahil edildiği 300 engel tasarımının güneş enerjisi çıktıları incelenerek, Ek B'de yer alan Tablo B.1'de verilen yazılım çıktıları doğrultusunda 2. aşamadaki engel alternatifleri oluşturulmuştur.

Tablo 4.5 .Tek kırıklı FVGE alternatiflerinin tasarım aşaması

Optimum Eğim Açılarının Belirlenmesi													Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmu	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Şubat	
	Aylık (Opt. Eğim, °)													34	27	14	8	15	21	33	45	55	58	53	45
	Mevsimlik (Opt. Eğim, °)													25			15			43			51		
	6 Aylık (Opt. Eğim, °)													19						45					
	Yıllık (Opt. Eğim, °)													31											
Şematik Kesitler																									
Engel Yüksekliği	h=1 m												h= 2 m												
Alternatif No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
Kırınım Yüzeyi Eğimi (°)	α °	27	31	33	34	43	45	51	53	55	58	27	31	33	34	43	45	51	53	55	58				
Kırınım Yüzeyi Genişliği (m)	d	2						2																	
	d	3						3																	
	d	4						4																	
	d	5						5																	

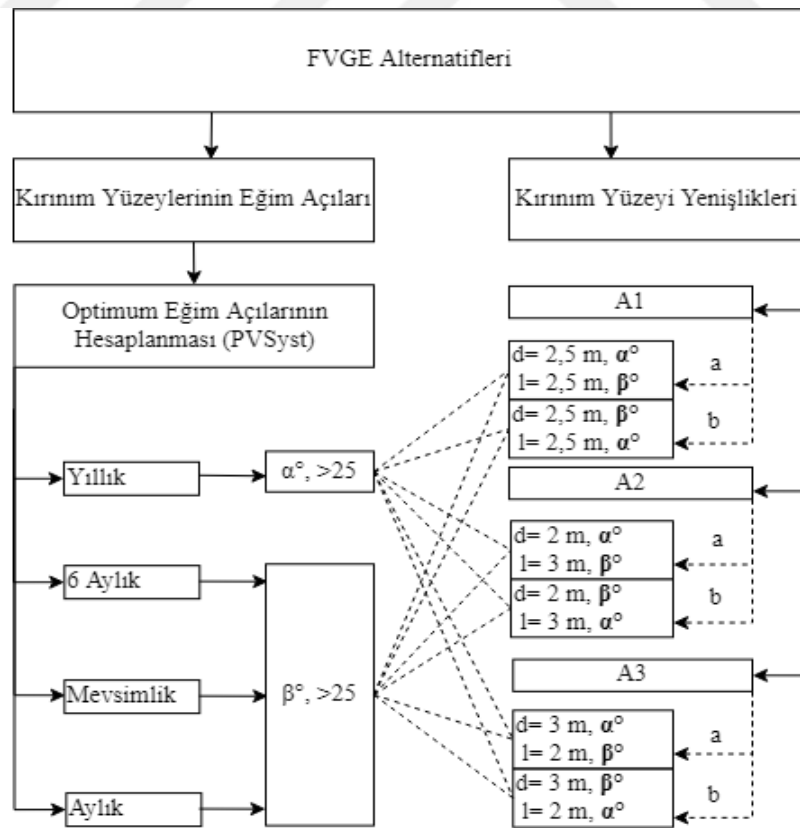
Tablo 4.6 Çift kırıklı engel tasarımının 1. aşaması

Şematik Çizim																							
Kırınım Yüzeyleri, Eğim Açılıarı		α (°)	27	31	33	34	43	45	51	53	55	58	β (°)	27	31	33	34	43	45	51	53	55	58
Analiz Grupları, Kırınım Yüzeyi Boyutları	A1	d_1 (m)	1						1														
		d_2 (m)	1						1														
	A2	d_1 (m)	2						1														
		d_2 (m)	1						1														
	A3	d_1 (m)	1						1														
		d_2 (m)	2						2														

Açıların, güneş enerjisi performansına etkisinin araştırdığı ilk analiz grubu bulguları doğrultusunda, aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır;


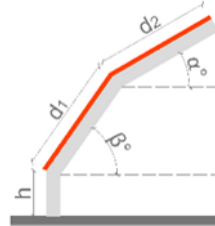
- Daha geniş olan kırınım yüzeyinin, yıllık optimum eğim açısında tasarlanması sistemin toplam enerji üretimini artırır.
- Yıllık optimum eğim açısına sahip kırınım yüzeyinin, ikinci kırıkta tasarlanması, sistem yüksekliğine bağlı gölgelemeyi azalttığı için toplam enerji üretimini artırır.

İkinci aşamada, kırınım yüzeyi boyutlarının hem gürültü denetimi hem güneş enerjisi performansına etkisi araştırılmıştır. Bulgular sonucunda, Şekil 4.7’de yer alan akış diyagramı izlenerek, toplam kırınım yüzeyi genişliği sabit ve 5 m olan 60 FVGE alternatifi türetilmiştir. Türetilen alternatiflerin, analiz grupları ve tasarım değişkenlerinin büyüklükleri Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Bu alternatifler, simülasyonlara aktarılarak çıktıları incelenmiştir. Kırınım yüzeylerinden geniş ve dar, dike ve yataya yakın kırınım yüzeylerinin yola göre konumunun performans üzerine etkisi detaylı değerlendirilerek tasarım önerileri ortaya konmuştur.



Şekil 4.7 Çift Kırıklı FVGE alternatiflerinin türetilmesine yönelik akış şeması

Tablo 4.7 Çift kırıklı engel tasarımının 2. aşaması

Şematik Kesit																						
Engel Tipi		Engel Tipi: A										Engel Tipi: B										
Alternatif No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Kır. Yüzeyi Eğim	α (°)	31										31										
	Açıları	β (°)	27	31	33	34	43	45	51	53	55	58	27	31	33	34	43	45	51	53	55	58
Analiz Grupları, Kırınım Yüzeyi Boyutları	A1	d_1 (m)	2,5										2,5									
		d_2 (m)	2,5										2,5									
	A2	d_1 (m)	2										2									
		d_2 (m)	3										3									
	A3	d_1 (m)	3										3									
		d_2 (m)	2										2									

4.2 Parametrik Çalışma

Bu bölümde, tasarlanan FVGE alternatiflerinin güneş enerjisi performansı PVsyst yazılımında, gürültü denetimi performansı SoundPLAN yazılımında analiz edilmiştir. Alanın güneş ve gürültü modelleri ilgili yazılımlarda oluşturularak, her bir alternatifin performans göstergesi çıktıları elde edilmiştir.

4.2.1 Güneş Modelinin ve Gürültü Haritalarının Oluşturulması

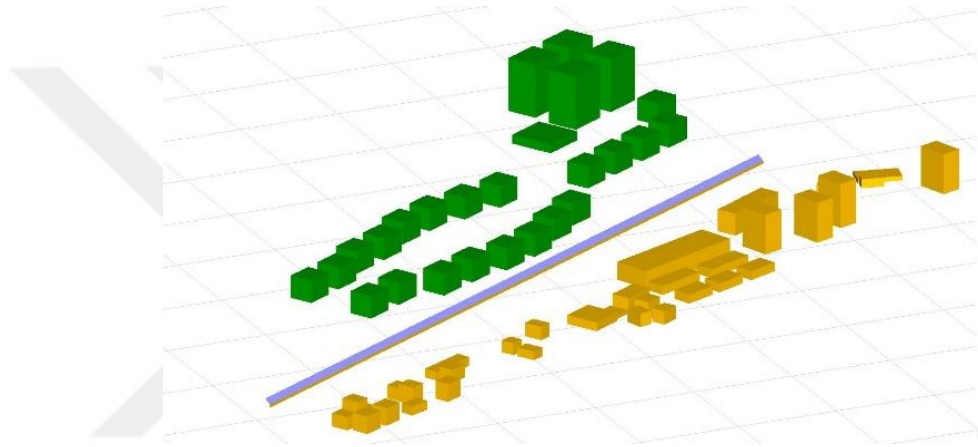
Bu bölümde, alan çalışmasının mevcut verileri doğrultusunda, PVsyst yazılımında alanın güneş modeli, SoundPLAN yazılımında ise alanın gürültü modeli oluşturulmuştur.

4.2.1.1 Alanın Güneş Modelinin Oluşturulması

Yerel belediye tarafından sağlanan, alanın haritası PVsyst yazılımına aktarılmış ve çevresel özellikler modellenmiştir. Yapı blokları, kat sayısı, kat yüksekliği, binalar arasındaki mesafeler ve azimut açısı mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir şekilde modellenmiştir. Şekil 4.8, çalışmanın 3 boyutlu modelini

göstermektedir. Yeşil bloklar, çalışma alanını temsil ederken, sarı olanlar fotovoltaik alanda gölgelenmeye neden olan yakın çevredeki blokları temsil etmektedir.

PVsyst 6.7.7'nin yakın gölgeleme modülü ile yakın çevrenin ayrıntılı üç boyutlu tanımı yapılmıştır. FV alanına görünür gölgeler yaratan ve sistem performansı üzerinde en güçlü etkiye sahip olan yakın nesnelere neden olduğu gölgeleme kayıpları bu adımla tespit edilmiştir. Bu karmaşık işlem, sistemin enerji çıkışı ile ilgili daha gerçekçi tahminler elde etmek için özellikle kent içi güneş enerjisi tasarımlarında kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.8 Çalışma alanının PVsyst'te oluşturulan 3B modeli

4.2.1.2 Alanın Gürültü Haritalarının Oluşturulması

Çalışmanın gerçekleştirildiği yaklaşık 450.000 m² büyüklüğündeki alanın mevcut trafik gürültüsünü gösteren gürültü haritaları, SoundPLAN 7.2 (Braunstein + Berndt GmbH) simülasyon programında oluşturulmuştur. Hali hazır haritalar ve İstanbul'un yıllık ortalama iklim verileri SoundPLAN programına DXF formatında aktarılmıştır. Sırasıyla hakim ve ikincil rüzgar yönü, KKD ve GGB; yıllık ortalama sıcaklık 13,9°C; ortalama bağıl nem değeri %71,5 olarak tanımlanmıştır [145]. Daha sonra bina sakini sayıları ve gürültü kaynakları tanımlanmıştır.

Gürültü haritalarının oluşturulmasında, 2002/49/EC sayılı Avrupa Birliği Direktifi ve Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği kapsamında, NMPB-Routes-96 hesaplama yönteminin kullanılması önerilmektedir [146], [147]. Yöntem, Guide de Bruit kılavuzuna dayanmaktadır

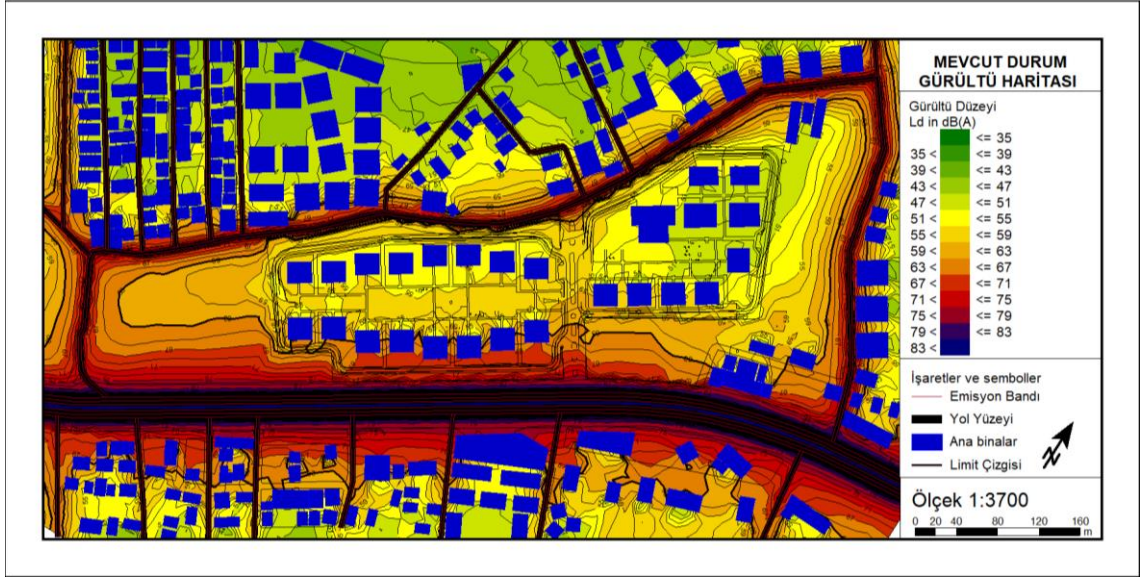
ve ISO 9613 standardında önerildiği gibi meteorolojik koşulları da dikkate almaktadır [148], [149].

Yol eğimi %0 olarak, 3,5 m şerit genişliğine sahip RQ33 tipi yol detayı ile yazılıma tanımlanmıştır. Yol yüzeyi kaplama tipi olarak yumuşak asfalt kaplama (smooth asphalt, concrete or mastic) kullanılmıştır. Avrupa Birliği Çevresel Gürültü Direktifi'ne göre (Directive 2002/49/EC), binalar ve yakın çevresinde gürültüye maruz kalma ile ilgili gürültü haritalamasında değerlendirme noktaları $4,0 \pm 0,2$ m yükseklikte ve gürültüye maruziyeti en yüksek olan cephede olmalıdır [146]. Ancak, aynı direktifin, EK 1 bölümü, belirli konutlar üzerindeki gürültü etkisini azaltmak amacıyla yerel önlemlerin tasarımında farklı yüksekliklerin tercih edilebileceğini; yine de, zeminden yüksekliğin 1,5 m'den daha az olmaması gerektiğini belirtir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında, cephe gürültü düzeyinin yanı sıra, engellerin açık alandaki gürültüye etkisi de değerlendirildiği için, değerlendirme yüksekliği olarak, kulağın da ortalama yüksekliği olarak kabul edilen 1,5 m belirlenmiştir [150].

Gürültü haritaları hazırlanırken, ızgara aralıklarının kentsel alanlarda 10 m'den fazla olmaması, hatta 5 m aralıkların daha iyi olduğu tavsiye edilir [151]. Bu çalışmada, değerlendirme için ızgara aralığı 5 x 5 m olarak belirlenmiştir. Karayolu ve iklimsel verilere göre alan çalışmasında gürültü denetimi ve güneş potansiyelinin birlikte değerlendirilebilmesi için, analizler gündüz gürültü göstergesi Lgündüz (07:00-19:00) zaman aralığında yapılmıştır. Akşam ve gece saatlerinde, fotovoltaik sistem aktif olmadığı için Lakşam (19:00-23:00) ve Lgece (23:00-07:00) gürültü haritaları oluşturulmamıştır.

4.2.1.3 Gürültü Haritalarının Doğrulanması

Çalışmada, mevcut alanın akustik durum gözlemleri ve akustik simülasyonları yapılmıştır. Izgara gürültü haritası, cephe gürültü haritası ve kesit gürültü haritası analizleri SoundPLAN 7.2 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut durum ızgara gürültü haritası Şekil 4.9'da görülmektedir. SoundPLAN yazılımının hassasiyeti literatürdeki birçok çalışma ile doğrulanmıştır [150], [152], [153].



Şekil 4.9 Mevcut durumun ızgara gürültü haritası (Lgün)

Simülasyonda oluşturulan gürültü haritalarını doğrulamak için en uygun yöntem, mevcut gürültü ölçümlerini yapmaktır. Farklı gürültü kaynaklarından (hafif ve ağır araçlar, yavaş ve hızlı araçlar), farklı yerlerde çok sayıda bağımsız gürültü düzeyi, gözlemlenen trafik gürültüsünün oluşturulmasına katkıda bulunur. Endüstri, bölge sakinleri, hayvanlar vb. tarafından üretilen gürültü, analiz altındaki trafik gürültüsüne eklenir [154]. Alıcı noktaların ölçüm verileri ve simülasyon sonuçları arasındaki fark ve standart sapma belirsizlik göstergesi olarak adlandırılır. Belirlenen miktarların güvenilirliğinin bir niceliği olarak tanımlanan belirsizlik aralığı veya doğrulama eşiği, bazı deneysel çalışmalarda saptanmıştır.

Maruyama vd. gözlemlerine göre, araç sayısı 170'i aştığında, belirsizlik göstergesi (ΔLA_{eqT}) ölçüm zamanından bağımsız olarak ± 1 olarak tanımlanır [155]. Bazı çalışmalarda ise, ölçüm verileri ve simülasyon sonuçları kıyaslandığında, doğrulama eşiği genellikle ± 3 dB ve ± 5 dB arasında belirlenir [156]–[160]. Bu aralık, kontrollü koşullarda gürültü düzeyindeki 3 dB farkın ortalama bir insan tarafından algılanabilirliği ve 5 dB farkın günlük arka plan seviyesindeki algılanabilir varyasyona karşılık geldiği psikoakustik çalışmalarla ilişkili olabilir [161], [162]. Bir gürültü ölçümünün yapısındaki belirsizliğin dikkate alındığı doğrulama prosedürü, modelin en doğru biçimde temsil

edilmesini sağlar [163]. Stratejik Gürültü Haritalaması ve Gürültü Maruziyetine İlişkin Verilerin Üretimi İçin İyi Uygulama Kılavuzuna (Good Practice Guide For Strategic Noise Mapping And The Production Of Associated Data On Noise Exposure, WG-AEN 2007) göre, gerçek ölçüm sonuçları ile model tarafından sunulan rakamlar arasındaki fark, 300 m mesafede 1 dB'yi geçmemelidir [151]. Gürültü haritalarının gerçek verileri yansıtabilmesi için, çalışma alanının topoğrafyası, binaların biçimsel ve boyutsal özellikleri, zemin örtüsü tipi ve gürültü kaynaklarının özellikleri (araç yoğunluğu, ağır araçların oranı vb.) parametreler simülasyon yazılımında mevcut duruma en yakın şekilde tanımlanmalıdır.

Alanda yapılan gürültü düzeyi ölçümleri, ISO 1996-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir [164]. Ölçümler Bruel&Kajer Tip 2236 ses düzeyi ölçer kullanılarak A frekans aralığında iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, herhangi bir yüzey yansımaları önlemek için binalardan en az 2m uzakta, bir mikrofon ön camı ile zemin seviyesinden 1.5m yükseklikte yapılmıştır. A-ağırlıklı eşdeğer sürekli ses basınç düzeyi (LAeq) ölçümleri, yol kenarı ölçüm noktasında, yağışsız bir hafta içi gününde, gündüz, akşam ve gece olmak üzere yoğun saatlerde 3 kez yapılmıştır. Ölçülen 1 saatlik eşdeğer sürekli ses basıncı düzeyleri (Leq) gündüz için 78,1 dBA, akşam için 77,1 dBA ve gece için 79,3 dBA olarak kaydedilmiştir. Karayolu trafik gürültü göstergeleri olan Lgündüz, Laksam ve Lgece arasındaki düşük varyans katsayısı (%1,5) nedeniyle gündüz periyodu için doğrulama ve gürültü haritası üretimi yapılmıştır. Daha sonra Şekil 4.3'de gösterilen 12 ölçüm noktasında, hafta içi bir gün 07:00-10:00, 12:00-15:00 ve 16:00-19:00 saatleri arasında (sırasıyla işe gitme, öğle yemeği molası ve işten dönüş saatleri) üç kez gündüz ölçümleri yapılmıştır. Hava koşullarında stabiliteyi sağlamak için tüm ölçümlerin aynı gün içinde en yoğun saat periyotlarında gerçekleştirilebilmesi için ölçüm süresi 15 dakika olarak belirlenmiştir. Her nokta için 15 dakikalık ölçüm sonuçları ve simülasyon çıktıları Tablo 4.8'de verilmiştir.

Ölçüm ve hesaplama çıktıları değerlendirilirken, trafiğin stokastik özelliklerinden kaynaklanan belirsizlik göz önünde bulundurulmuştur. WG-AEN, gürültü modelleme prosedüründeki belirsizliğin yanı sıra gürültü haritalama sonuçlarına

yönelik toleransı belirtir [151]. Gerçek ölçüm sonuçları ile model tarafından bildirilen hesaplama çıktıları arasındaki fark, WG-AEN'e göre kaynaktan 300 m'de 1 dB, kaynaktan 600 m'de 3 dB ve kaynaktan 2.000–3.000 m'de 10 dB'yi geçmemelidir.

Tablo 4.8 Gürültü ölçüm sonuçları ve hesaplama istatistikleri

Ölçüm Noktaları	Otoyola Uzaklık (m)	Ölçüm 1, LAeq (07:00-10:00)	Ölçüm 2, LAeq (12:00-15:00)	Ölçüm 3, LAeq (16:00-19:00)	Ölçümlerin Ortalaması	Hesaplama LAeq	Fark
1	35	64,7	64,5	65,1	64,76	64,8	+0,03
2	20	67,1	67	67,4	67,16	67,1	-0,07
3	40	61,8	61,6	62	61,80	61,3	-0,50
4	95	55	54,7	55,2	54,96	54,1	-0,87
5	110	55,5	54,8	55,6	55,30	52,1	-3,20
6	98	56,4	56	56,7	56,36	55,6	-0,77
7	70	58	57,6	57,9	57,83	58,7	-0,87
8	115	55,2	54,8	55,4	55,13	51,1	-4,03
9	200	49,5	49	49,7	49,4	46	-3,40
10	134	51,5	51,2	51,6	51,43	49,4	-2,03
11	77	57,1	57	57,4	57,16	56	-1,17
12	2	78,1	77,8	78,3	78,06	77,8	-0,27
Standart Sapma		7,81	7,88	7,85	7,84	8,82	1,54

Ölçüm ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın ilk nedeni, simülasyon programı model giriş sürecidir. WG-AEN'ye göre gürültü modelleme tekniği, ölçüm bulguları ile simülasyon programı sonuçları arasında küçük farklılıklara neden olur. Seçilen bina yükseklikleri verileri için doğruluk tolerans aralığı 1 dB'dir. Modelde referans olarak tanımlanan düzgün asfalt için 0 dBA olarak belirtilen tolerans ile karşılaştırıldığında, arazi kullanım haritalarına göre zemin yüzey tipi için bir düzeltme yapılması gerekmektedir. Çünkü, zeminin akustik özelliklerini belirlemeye yönelik ölçümler yapılmamıştır. Bu yaklaşım, akustik belirsizlikte 1 dBA'lık bir artışa neden olabilir. Sonuç olarak, gürültü modelleme

prosedürü nedeniyle, gürültü haritalama simülasyon sonuçlarında 2 dB'den fazla makul bir fark tolere edilebilir.

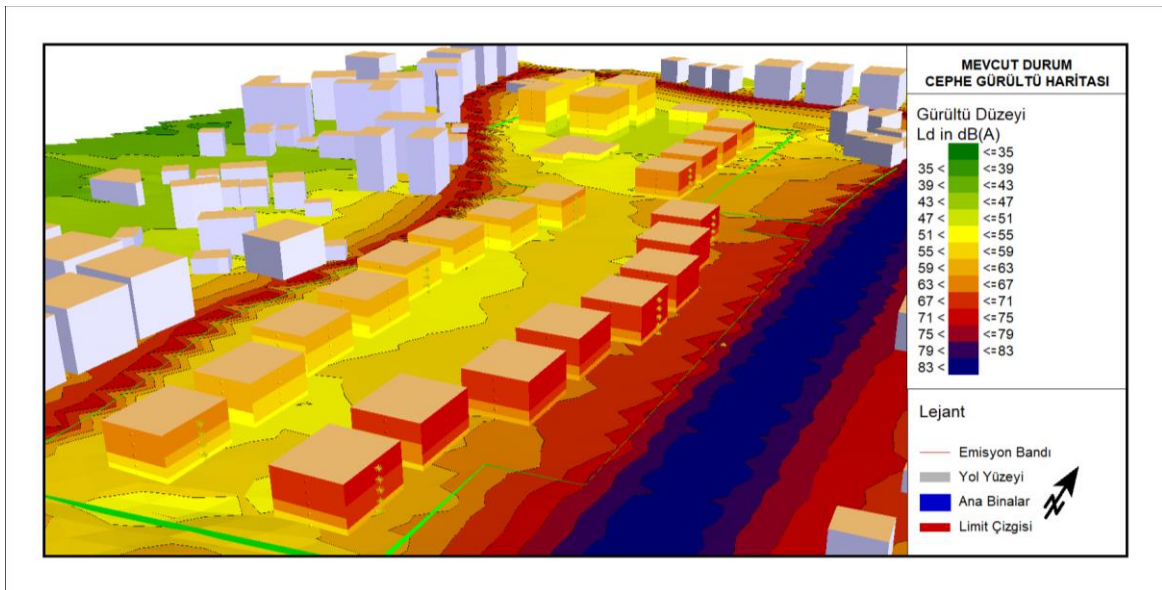
Ölçüm noktalarından 1, 2, 3 ve 7 numaralı noktalar; karayolu ile aralarında başka bir yapı bulunmamakta ve karayoluna olan mesafeleri diğerlerine göre nispeten daha azdır. Trafik gürültüsünün baskın olduğu bu 4 ölçüm noktasında ölçüm ve model sonuçları arasındaki farkın kabul edilebilir aralıkta olduğu (± 1 dBA) Tablo 4.8'te görülmektedir. Ancak yerleşimin bahçesinde bulunan su ögeleri, çocuk oyun alanı, inşaat faaliyetleri gibi müdahale edilemeyen ve arka plan gürültüsünü etkileyen gürültü kaynakları nedeniyle bazı noktaların tolere edilebilir aralığın üzerinde gürültü düzeyi farkına sahip olduğu görülmüştür.

Tolerans aralığı ve arka plan gürültüleri göz önünde bulundurulduğunda, oluşturulan gürültü haritalarının gerçek alan özelliklerini yansıttığı ve değerlendirmelerin bu haritalar üzerinden yapılabileceği kabul edilmiştir.

İlgili Avrupa Direktifi (2002/49 / EC) ile uyumlu olarak, Türkiye'de Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (ÇGDYY) yürürlüktedir. Çalışmanın yapıldığı alan, 'ticari yapılar ile gürültüye hassas kullanımların birlikte bulunduğu alanlardan konutların yoğun olarak bulunduğu alanlar' kapsamındadır. Çalışma kapsamında analizler gündüz gürültü göstergesi olan Lgündüz (07:00-19:00) değerlerine göre yapılmıştır. Yönetmeliğe göre gündüz zaman aralığında gürültü düzeyi 63 dB (A) limit değerini aşmamalıdır.

Şekil 4.10'da, cephelerin gündüz zaman aralığında maruz kaldığı gürültü düzeyi gösterilmiştir. Cephe gürültü haritası hazırlanırken, blokların her katında cephelerin merkezinde bulunan bir alıcı nokta için hesaplamalar yapılmıştır. Toplu konut alanında, cephe gürültü haritası için tanımlanan toplam 580 adet alıcı nokta vardır. Bloklardan, yol ile arasında başka bir bina kütlesi engel oluşturmayan ilk sıradaki 12 blokta ise toplam 240 adet alıcı vardır. Cephe gürültü haritasının hesaplama sonuçları 2 farklı bağlamda değerlendirilerek aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır;

- Toplu konut alanında bulunan bütün cephelerin %24'ü; ilk sıradaki konutlar ele alındığında ise cephelerin %55'i limit değerin üzerinde gürültüye maruz kalmıştır.
- Bütün blokların otoyola bakan Güneydoğu cepheleri dikkate alındığında cephelerin %39'unun; ilk sıradaki cephelerin %88'inin işitsel konforu limit değerin üzerindedir. Güneydoğu cephesi, blokların mekan organizasyonunda yatma birimlerini barındırdığı için gürültü denetimi önem kazanmaktadır.
- Yerleşimdeki nüfus dağılımına göre gürültü düzeyleri analiz edildiğinde; toplam kişi sayısının %14'ü; ilk sırada yer alan bloklardaki kişi sayısının ise %31'i limit değerin üzerinde gürültüye maruz kalmaktadır.
- Açık alanda kabul edilebilir gürültü düzeyi 55 dBA konfor sınır değeri olarak kullanıldığından, yerleşim alanının %44'ü limit değerin üzerinde gürültüye maruz kalmıştır.
- Gürültü düzeyi katlar bazında ilk sıradaki bloklarda değerlendirilmiştir. Blokların 1. katındaki alıcılar dikkate alındığında noktaların %12'si, blokların 5. katındaki alıcılar dikkate alındığında noktaların %73'ü işitsel konfor düzeyinin üzerinde gürültüye maruz kalmaktadır.



Şekil 4.10 Mevcut durumun cephe gürültü haritası

4.3 Performans Analizi

Bu bölümde, tek kırıklı ve çift kırıklı FVGE alternatifleri, güneş enerjisi performansı ve gürültü denetimi performansı açısından sırayla değerlendirilmektedir. İlk aşamada, tek ve çift kırıklı FVGE alternatiflerinin simülasyon sonuçları hem güneş enerjisi hem gürültü denetimi açısından incelenmiştir. İkinci aşamada, çift kırıklı engellerin performans göstergeleri, inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar yöntemi olan TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği) ile sıralanarak optimum FVGE seçimi yapılmıştır.

4.3.1 Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Alt başlıklarda, tek kırıklı ve çift kırıklı FVGE alternatiflerinin güneş enerjisi ve gürültü denetimi performans çıktıları analiz edilerek performans göstergelerine ilişkin bulgular anlatılmıştır.

4.3.1.1. Tek Kırıklı FVGE Simülasyonu Sonuçları

Bu bölümde, tek kırıklı FVGE alternatiflerinin modellendiği PVsyst ve SoundPLAN yazılımlarının çıktıları güneş enerjisi ve gürültü denetimi açısından değerlendirilmiştir.

- **Güneş Enerjisi Performansına İlişkin Bulgular**

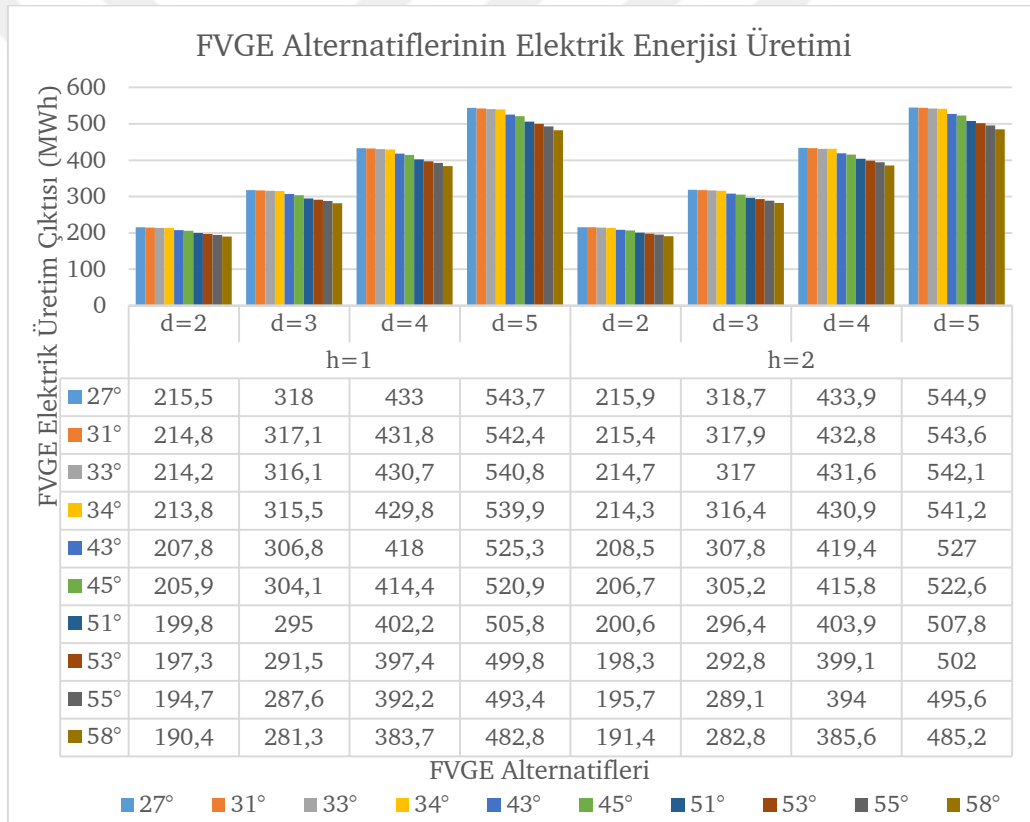
Çalışma kapsamında simüle edilen FVGE alternatiflerinin enerji performansı için alternatiflerin elektrik üretim çıktıları analiz edilmiştir. Şekil 4.11, farklı kapasite ve yüksekliklerdeki fotovoltaik sistemlerin elektrik enerjisi üretim miktarını göstermektedir. Yatay eksen, çalışma kapsamında modellenen FVGE alternatiflerini gösterir ve dikey eksen, alternatifler için fotovoltaik sistemin enerji çıktıları gösterir. Alan çalışması için grafik çıkarımları; genel, performans oranlarına gölgeleme kaybına göre değerlendirme ve sıcaklık ile aralarındaki ilişkilere göre değerlendirilmiştir.

Genel Değerlendirme; $h = 2$ m, $d = 5$ m ve 27° eğimli FVGE alternatifi maksimum, $h = 1$ m, $d = 2$ m ve 58° eğimli FVGE alternatifi minimum enerji üretimi potansiyeline sahiptir.

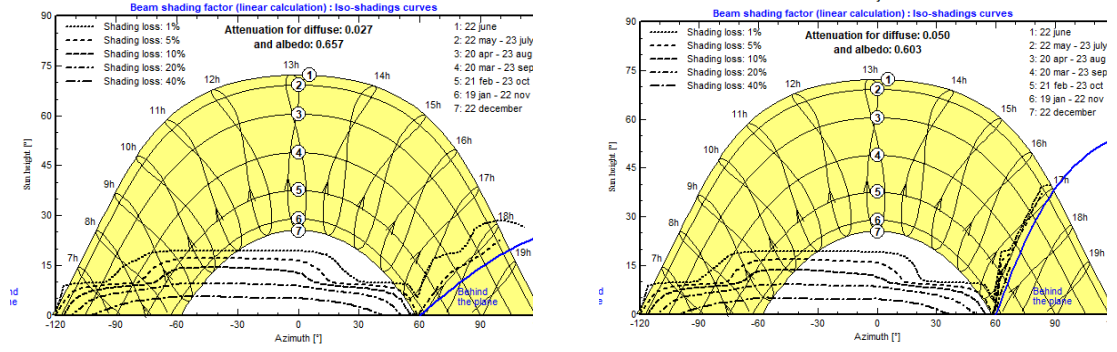
Güneş paneli sayısı ile paralel olarak kırınım yüzey genişliğinin artırılması sistemin enerji üretimini iyileştirir. 2 metre genişliğinde kırınım yüzeyli engellerin enerji üretim potansiyeli minimum, 5 metre genişliğinde kırınım yüzeyli engellerin enerji üretim potansiyeli maksimumdur.

Sistem, kırınım yüzeyinin eğim açısının artmasıyla elektrik üretiminde bir düşüş göstermektedir. 27° eğimli engel başlıkları maksimum enerji üretimini ortaya koyarken, 58° eğimli engeller minimum performansa sahiptir. Şekil 4.12, minimum (a) ve maksimum (b) eğimler için erişilebilir güneş ışığını göstermektedir.

Kırınım kenarı eğiminin artırılmasının, farklı kırınım yüzey genişlikleri için enerji üretimini ortalama %11 oranında azalttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.11 FVGE alternatiflerinin elektrik enerjisi üretimleri



(a)

(b)

Şekil 4.12 $h=2$ m ve $d=5$ m alternatifi için minimum (a) ve maksimum (b) eğim açıları için güneş ufukları

Performans oranlarına göre değerlendirme; Performans analizinde maksimum enerji üretimi ve nominal gücü 448 kWp olan alternatifi ($h=2$ m, $d=5$ m) tüm eğimler için simülasyon çıktıları değerlendirilmiştir. Tüm FVGE alternatiflerinin tasarım parametreleri ve aylık ortalama performans oranı ilişkisi Ek B'de yer alan Tablo B.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.13, alan çalışması için ortam sıcaklığını ve alternatiflerin aylara göre performans oranlarını (PO) göstermektedir. Soldaki dikey eksen performans oranlarını, yatay eksen ayları ve sağdaki dikey eksen sıcaklığı temsil eder. Grafiğe göre alan çalışması için yapılan çıkarımlar şu şekildedir;

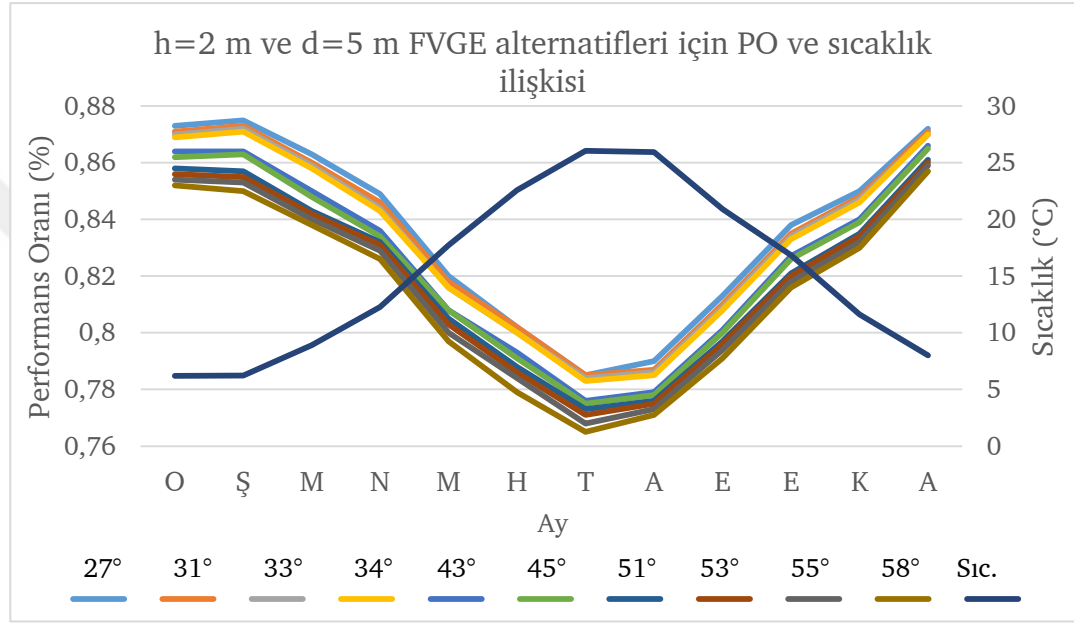
Farklı kırınım yüzeyi eğimine sahip engel alternatiflerinin aylık performans oranları arasında 27° eğimli engel en yüksek, 58° eğimli engel en düşük performans oranına sahiptir.

Tüm eğimlerin ortalama performans oranları aylara göre değerlendirildiğinde, en yüksek PO en düşük sıcaklık nedeniyle Aralık ayında, en düşük PO ise en yüksek sıcaklık nedeniyle Temmuz ayında görülmektedir.

Sistem, kışın yüksek PO, yazın ise düşük PO gösterir. PO, ortam sıcaklığı ile negatif bir korelasyona sahiptir. Ortam sıcaklığındaki artış güneş panellerinin verimini düşürdüğü için sıcaklık sistemin performansını olumsuz etkiler.

25°nin altındaki yataya yakın yaz mevsimi optimum eğimleri, simülasyonlarda yer almadığı için sistemin yaz dönemi performans oranı düşüktür.

Alternatiflerin performans oranlarının eğimlere göre minimum ve maksimum değerleri arasındaki değişim 58° eğimli alternatifte en yüksek, 31° eğimli panelde en düşük değişimdir. Alana özgü yıllık optimum eğim açısının kullanımı ile, daha kararlı bir sistem verimliliği sağlanır.



Şekil 4.13 h=2 m ve d=5 m alternatiflerinin aylara göre performans oranı-sıcaklık ilişkisi

Gölgeleme Kaybına Göre Değerlendirme; Enerji performans değerlendirmesinde, FV sistem modülleri üzerindeki gölgeleme kaybı da değerlendirilmiştir. Şekil 4.14, farklı boyutlardaki FVGE alternatiflerinin üst kırınım yüzeyi eğim açısına göre performans oranları ile sistemin gölgeleme kaybı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Soldaki dikey eksen performans oranını, yatay eksen FVGE alternatiflerinin kırınım yüzeylerinin eğim açısını, sağdaki dikey eksen ise, güneş panellerinde yakın çevreden kaynaklanan gölgeleme kaybı oranını göstermektedir. Alan çalışması için grafik çıkarımları şu şekildedir;

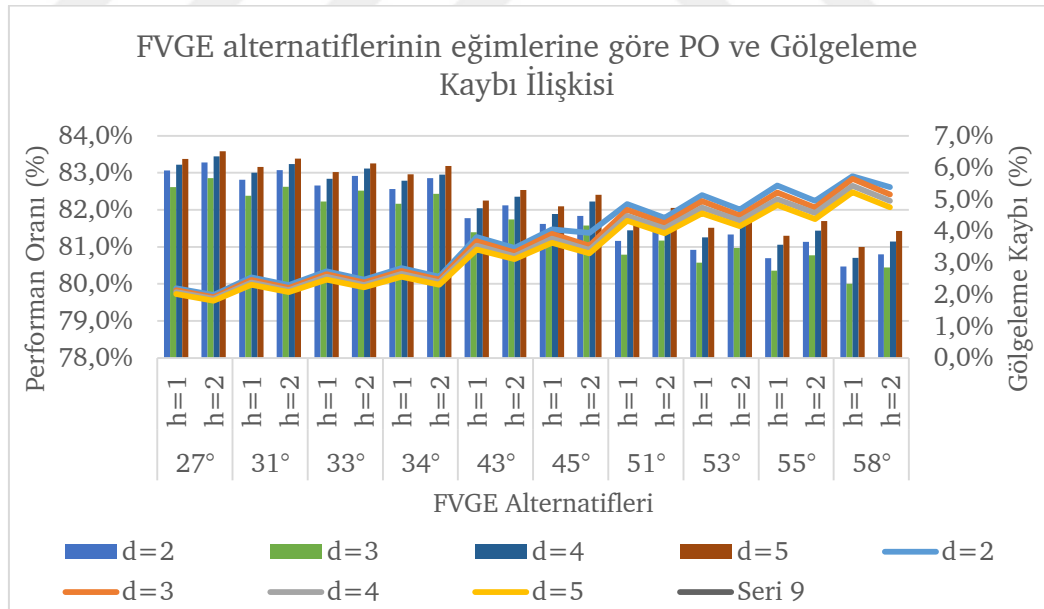
Gölgeleme kayıplarının değerlendirilmesinde 27° eğimli alternatifler en düşük gölgeleme kaybına, 58° eğimli alternatifler ise en yüksek gölgeleme kaybına sahiptir.

Farklı boyutlardaki FVGE alternatiflerinin performans oranlarının karşılaştırılmasında h=2 m ve d=5 m ebatlı alternatifler tüm eğim açıları için maksimum performans oranını göstermektedir.

Gölgeleme kaybı ve performans oranı, farklı eğimler için negatif bir korelasyona sahiptir.

h= 1 metre ve d= 2 metre olan engelin gölgeleme kaybı, tüm eğim açıları için diğer alternatiflere göre daha yüksektir. h= 2 metre ve d= 5 metre olan engelin gölgeleme kaybı, tüm eğim açıları için diğer alternatiflere göre daha düşüktür. İncelenen alanda daha büyük kırınım yüzeyleri sistemdeki gölgeleme oranını azaltmaktadır.

Dikey bölümünün yüksekliği daha fazla olan engel alternatifleri daha düşük gölgeleme kayıplarına sahiptir.



Şekil 4.14 FVGE alternatiflerinin PO ve gölgeleme kaybı ilişkisi

Bloklardaki ışınım kaybına göre değerlendirme; Otoyol tarafında olan konut cephelerinde, engellerin neden olduğu gün ışığı kaybının

değerlendirilmesinde, blokların sadece zemin katlarının engele dönük olan güneydoğu cephesi dikkate alınmıştır.

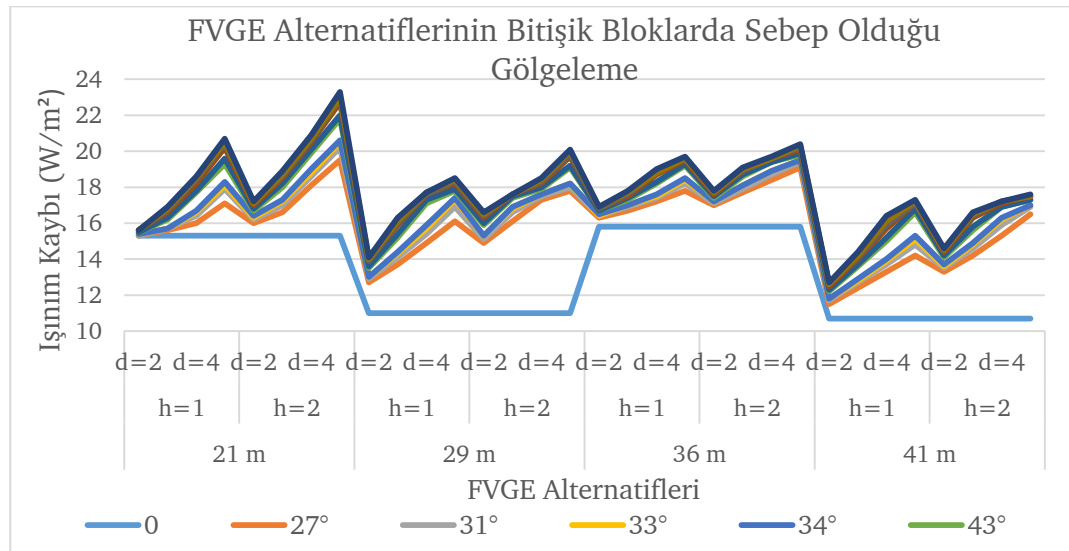
Engele bitişik blokların zemin kat yol cepheleri üzerindeki gölgeleme miktarlarının karşılaştırılmasında, engelin olmadığı durum “0” olarak ifade edilmiş ve temel durum olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.15, çalışma alanı için engele bitişik bloklarda FVGE alternatiflerinin neden olduğu ışınım kaybını göstermektedir. Grafiğe ilişkin yapılan çıkarımlar şu şekildedir;

FVGE kırınım yüzey genişliği ve eğim açısı arttıkça bloklardaki gölgeleme miktarı artar.

Daha yüksek FVGE alternatifleri bloklarda daha fazla ışınım kaybına neden olur.

FVGE'den kaynaklanan gölgeleme miktarı, engele 21 metre uzaklıktaki bloklarda maksimum, 41 metre uzaklıktaki bloklarda minimumdur.

Blokların zemin katındaki gölgeleme miktarı, çalışma alanındaki blokların göreceli konumlarından ve yolun karşısındaki binaların yüksekliğinden de etkilenmektedir. Bu durum, temel durum gölgeleme miktarında değişiklik yaratır. Bu nedenle grafik, engel ile bina arasındaki mesafenin gün ışığına etkisini göstermek için yetersizdir.



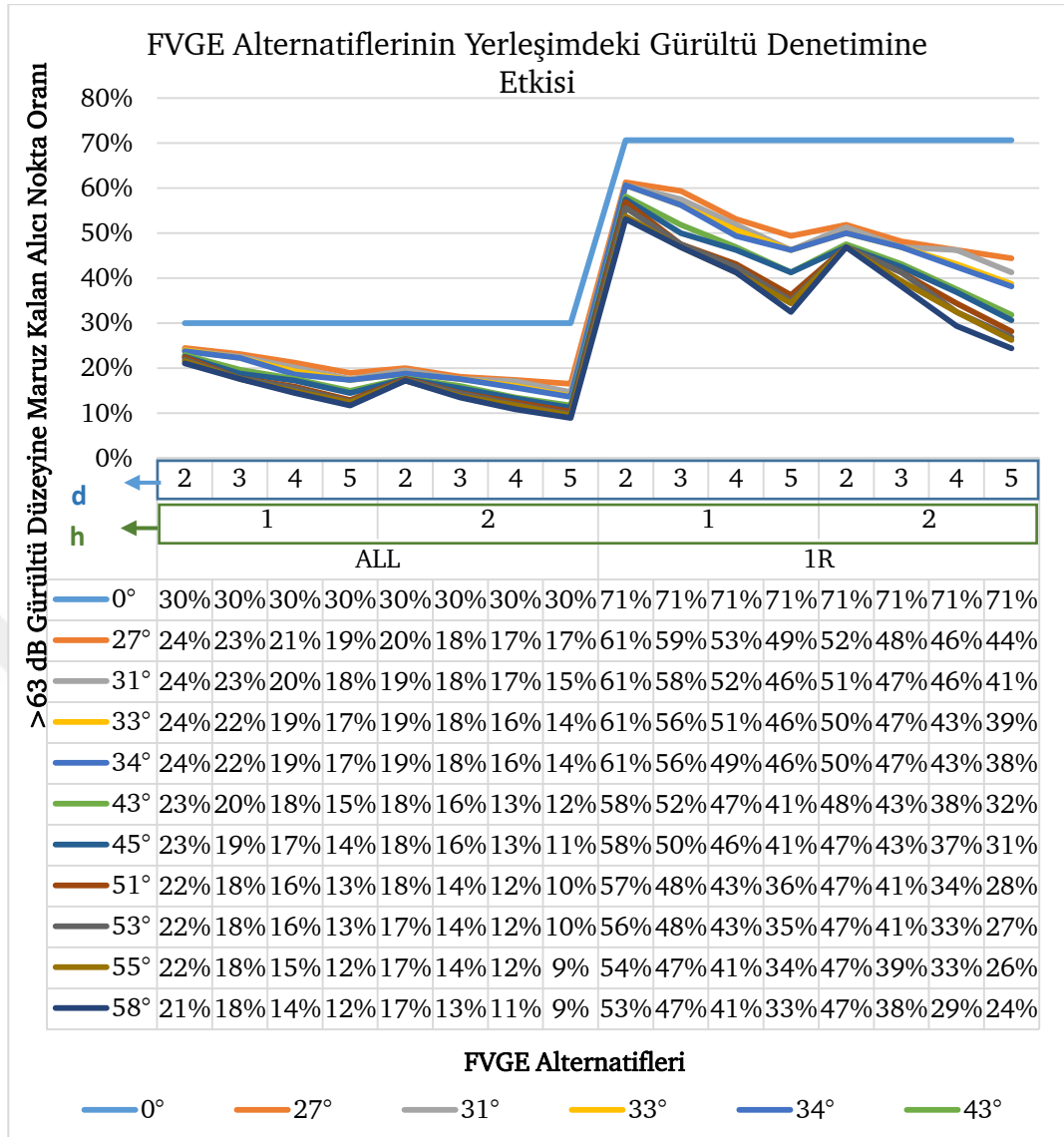
Şekil 4.15 FVGE alternatiflerinin neden olduğu, bitişik bloklardaki ışınım kaybı

- **Gürültü Denetimi Performansına İlişkin Bulgular**

Modellenen 80 FVGE alternatifinin, gürültü denetimi performans göstergesi üzerindeki etkileri yerleşim üzerinde detaylı olarak ele alınmıştır. Yerleşimdeki bloklar, gürültü kaynağı olan otoyola uzaklıklarına göre farklı düzeylerde etkilenirler. Değerlendirme; engel ile arasında herhangi bir kütle olmayan, trafik gürültüsünün baskın olduğu ilk sıradaki bloklar ve yerleşimdeki bütün bloklar olmak üzere 2 gruba ayrılmıştır. Grafiklerde, birinci sıradaki bloklar (first row buildings) “1R”, yerleşimdeki bütün bloklar ise “ALL” ile ifade edilmiştir. Şekil 4.3’de A1, A2, A3 ve B1 ile ifade edilen bloklar ilk sıradaki blok olarak ele alınmıştır. B2 blokları da ilk sırada olmasına rağmen, yol ile arasındaki başka kütleler olması ve engelin yeterli uzunlukta olmaması nedeniyle 1R bloklara dahil edilmemiştir.

Simülasyon verileri analiz edilirken, öncelikle genel bir değerlendirme yapılmıştır. Engel değişkenlerinin, yerleşimde sağlanan gürültü azaltımına etkisini daha ayrıntılı inceleyebilmek için, üç farklı çerçevede ele alınması uygun görülmüştür; (i) katlar, (ii) engele olan mesafeler, (iii) cephe yönleri.

Engel alternatiflerinin, tüm yerleşimde (ALL) ve ilk sıradaki bloklarda (1R), limit değer üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı nokta sayısına etkisi Şekil 4.16’daki grafikte gösterilmiştir. Grafiklerde yatay eksen de engel yüksekliği ve kırımım yüzeyinin genişliği gösterilmiştir. Grafikte dikey eksen, limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı nokta sayısının, toplam alıcı sayısına oranını ifade etmektedir. Gürültü düzeyine maruz kalan alıcı nokta sayısının küçük olması, engelin daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. Grafiğin altındaki renklerle gösterilen kırımım yüzeyi eğim açılarının, belirtilen boyutlarla birlikte gürültü denetimine etkisi araştırılmaktadır. Lejantta “0” ile ifade edilen mavi renkli çizgi, herhangi bir gürültü engeli olmadığı durumda, yerleşimde limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı nokta oranını ifade etmektedir. Grafikler ile ulaşılan sonuçlar aşağıda listelenmiştir;



Şekil 4.16 FVGE alternatiflerinin gürültü denetimi verimliliği

Genel Değerlendirme; “0” durumunda, tüm bloklardaki alıcı noktaların %30'u ve ön bloklardaki alıcı noktaların %71'i limit değerinin üzerindeki gürültü düzeyinden muzdariptir.

Kırınım kenarının genişliği ve kenarın eğim açısına paralel olarak gürültü engelini performansı artar.

Daha yüksek alternatifler, daha fazla alıcı noktada akustik konfor sağlar.

h=1 m, d=2 m ve 27° eğimli alternatif, gürültü azaltmada en düşük iyileştirmeyi sağlar. h= 2 m, d= 5 m ve 58° eğimli olan simülasyon alanında en yüksek iyileştirmeyi sağlar. Tüm bloklar değerlendirildiğinde,

minimum performansa sahip engel alternatifi alıcıların %24'ü ve maksimum performansa sahip engel alternatifi ile alıcıların %9'u limit değerin üzerinde gürültü düzeyine maruz kalmıştır. 1R blokları değerlendirildiğinde, minimum performanslı engel ile alıcı noktalarının %61'i ve maksimum performanslı engel ile alıcıların %24'ü mimit değerin üzerinde gürültüye maruz kalmaktadır.

Maksimum performansa sahip FVGE alternatifi, gürültü azaltımını tüm bloklarda %21, ilk sıra bloklarda ise %46 oranında iyileştirmektedir.

Daha dik ve daha geniş kırınım kenarlarına sahip engel alternatifleri, gürültü kontrolünde daha fazla iyileştirme sağlar. Örneğin tüm oturma blokları $h=2$ m engel alternatifi için değerlendirildiğinde 27° eğimli engelin kenar genişliğini 2 m'den 5 m'ye çıkarmak, performansını %17,2 artırmaktadır. 58° eğimli engelin kenar genişliği 2 m'den 5 m'ye çıkarıldığında, gürültü engeli %48 daha iyi performans gösterir.

Farklı kesitlere sahip FVGE alternatiflerinin aynı performansı gösterdiği durumlar vardır. Örneğin $h = 1$ m, $d = 5$ m ve 31° ve $h = 2$ m, $d = 3$ m ve 31° eğimli engel alternatifleri tüm bloklarda eşit akustik konfor sağlar. Bu, engellerin eşit veya benzer yükseklikteki olmalarından kaynaklanmaktadır.

Sonuçlar, 34° - 58° eğimli alternatiflerin 27° - 34° eğimli alternatiflere göre daha fazla iyileştirme sağladığını göstermektedir.

Katlara göre değerlendirme; FVGE alternatiflerinin katlara göre akustik konfor üzerindeki etkileri değerlendirilirken, karayoluna en yakın bloğun güneydoğu cephesindeki alıcıların gürültü düzeyleri analiz edilmiştir (bkz. Şekil 4.17). Dikey eksen gürültü düzeyini, yatay eksen ise engel alternatiflerini ifade etmektedir. Lejanttaki mavi çizgi, herhangi bir gürültü engeli olmadığı durumda, otoyola en yakın (karayoluna 21 m) bloğun güneydoğu tarafındaki katların gürültü düzeyidir. Değerlendirmede aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

“0” ile gösterilen temel durumda, 5. kat en fazla gürültüye maruz kalan kattır.

58° eğimli engel gürültü azaltımına en yüksek katkıyı sağlarken, 27° eğimli engel en düşük gürültü azaltımını sağlamıştır.

Gözlemler, kırınım kenarının genişliğinin ve yüksekliğinin üst katlarda gürültü azaltımını artırdığını göstermektedir.

Tüm FVGE alternatifleri 1. katta gürültü düzeyinin, 63 dBA'nın altına düşürmeyi başarmıştır. h= 2 m olan alternatiflerin çoğu 2. katta kabul edilebilir gürültü düzeylerini sağlamıştır. 3. katta, yalnızca daha geniş, daha yüksek ve daha dik olanlar limit gürültü değerini sağlamıştır. Ancak hiçbiri 4. ve 5. katlar için kabul edilebilir koşulları sağlayamamıştır.

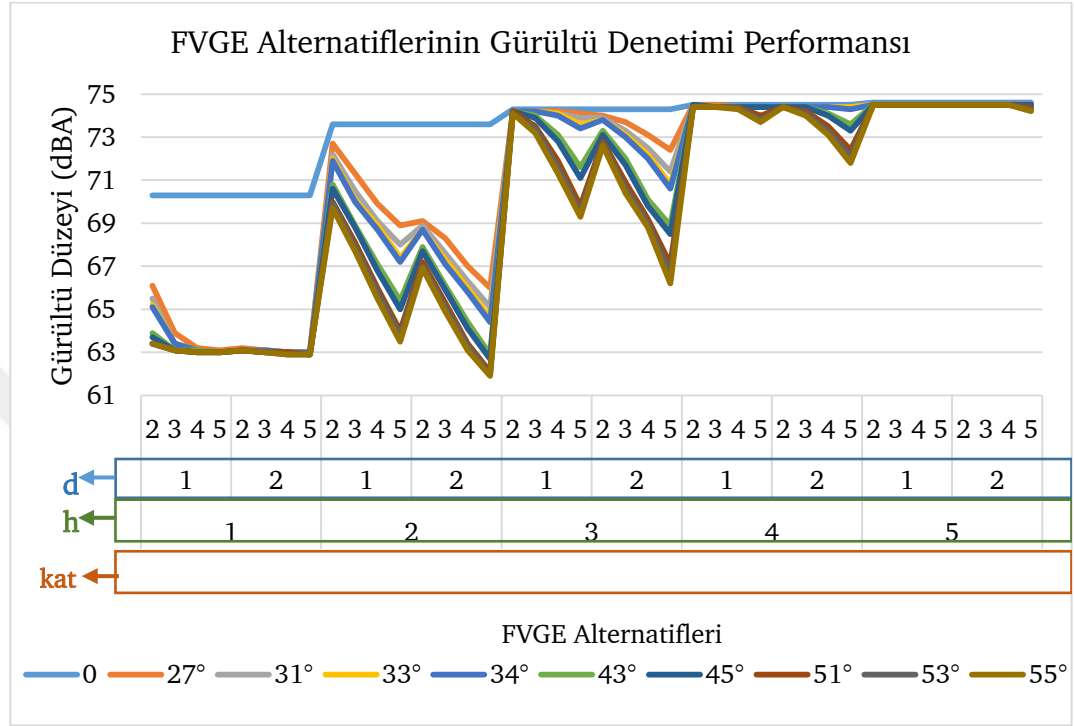
Gürültü düzeyindeki ± 3 dBA fark, insan kulağının algılayabildiği eşik değerdir. Bu kapsamda alternatifler; birinci katta %100, ikinci katta %92,5, üçüncü katta %31,25 ve dördüncü katta %1,25 oranında faydalı gürültü azaltımı sağlamıştır. Beşinci kattaki gürültü düzeyleri incelendiğinde hiçbir engel alternatifinin faydalı gürültü azaltımı sağlayamadığı görülmüştür.

Maksimum gürültü azaltımı sağlayan engel tipinin (h=2 m, d=5 m, 58° eğimli) katlara etkisi incelenmiştir. Engel tipi, gürültü düzeyini birinci katta 7,4 dBA, ikinci katta 11,9 dBA, üçüncü katta 8,6 dBA, dördüncü katta 3,3 dBA ve 5. katta 0,6 dBA gürültü azaltımı sağlamıştır.

FVGE alternatifleri en fazla iyileştirmeyi 1. katta, en az iyileştirmeyi 5. katta sağlamıştır.

Performansı en yüksek ve en düşük olan alternatiflerin etkileri karşılaştırılmıştır. h=1 m, d=2 m ve 27° eğimli engel, aşırı gürültü düzeyine maruz kalan alıcı miktarını 1. katta %65, 2. katta %17 oranında azaltmıştır. 3., 4. ve 5. katlarda herhangi bir iyileşme gözlemlenmemiştir. h=2 m, d=5 m ve 58° eğimli engel tipi 1. ve 2. katta %100, 3. katta %75, 4. katta %46 ve 5. katta %17 iyileştirme sağlamıştır.

Alçak yükseklik ve düşük genişlik alternatifleri de dahil olmak üzere hemen hemen tüm alternatifler 1. katta akustik konforu sağlamıştır. 2. ve sonraki katlarda yüksekliği az ve genişliği az olan engellerin gürültü denetimi etkinliği düşüktür.



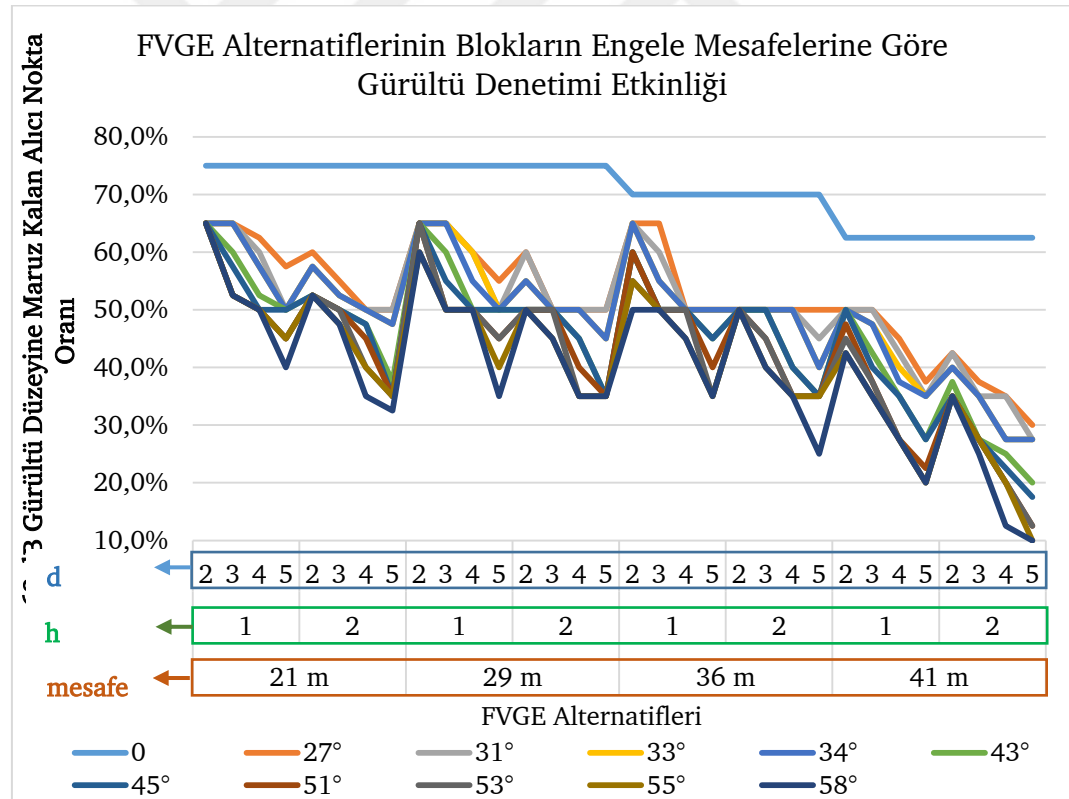
Şekil 4.17 En yakın bloğun güneydoğu cephesinin kat düzeylerine göre FVGE alternatiflerinin gürültü denetimi verimliliği

Yola mesafesine göre değerlendirme; FVGE alternatiflerinin karayolundan farklı uzaklıklardaki binalara etkisini gözlemlemek için, birinci sıra bloklarda, limit gürültü düzeyinin üzerinde sese maruz kalan alıcı sayısının toplam alıcı sayısına oranı analiz edilmiştir. Şekil 4.18, araştırma sonuçlarını göstermektedir. Gürültü engelinin olmadığı temel durum “0” ile gösterilen mavi çizgidir. Grafik aracılığıyla aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır; Temel durumda görüldüğü gibi, FVGE'ye 21 m ve 29 m mesafedeki bloklar maksimum gürültüye, 41 m mesafedeki bloklar ise en düşük gürültüye maruz kalmaktadır.

Daha yüksek dikey elemanlara, daha geniş kırınım yüzeylerine ve daha dik eğime sahip olan alternatifler, 21 m, 29 m ve 36 m mesafede olan bloklarda faydalı bir azaltım oranı sağlamıştır.

Temel durumda, engele 21 m, 29 m, 36 m ve 41 m mesafeli ilk sıradaki bloklarda, limit düzeyin üzerindeki alıcı noktaların, ilk sıradaki blokların toplam alıcı sayısına oranları sırasıyla %75, %75, %70 ve %62'dir. Maksimum gürültü azaltımı sağlayan engel alternatifi ($h=2$ m, $d=5$ m, 58°) ile aşırı gürültü düzeyinden etkilenen alıcıların oranları %32, %35, %25 ve %10'dur.

Gözlemler, oransal olarak incelendiğinde, en büyük iyileşmenin FVGE'ye en uzak bloklarda meydana geldiği yönündedir. Bunun nedeni, uzak bloklardaki gürültü düzeyinin gürültü kaynağına yakın olanlara göre daha düşük olması ve limit değerinin altına düşmenin daha kolay olmasıdır.



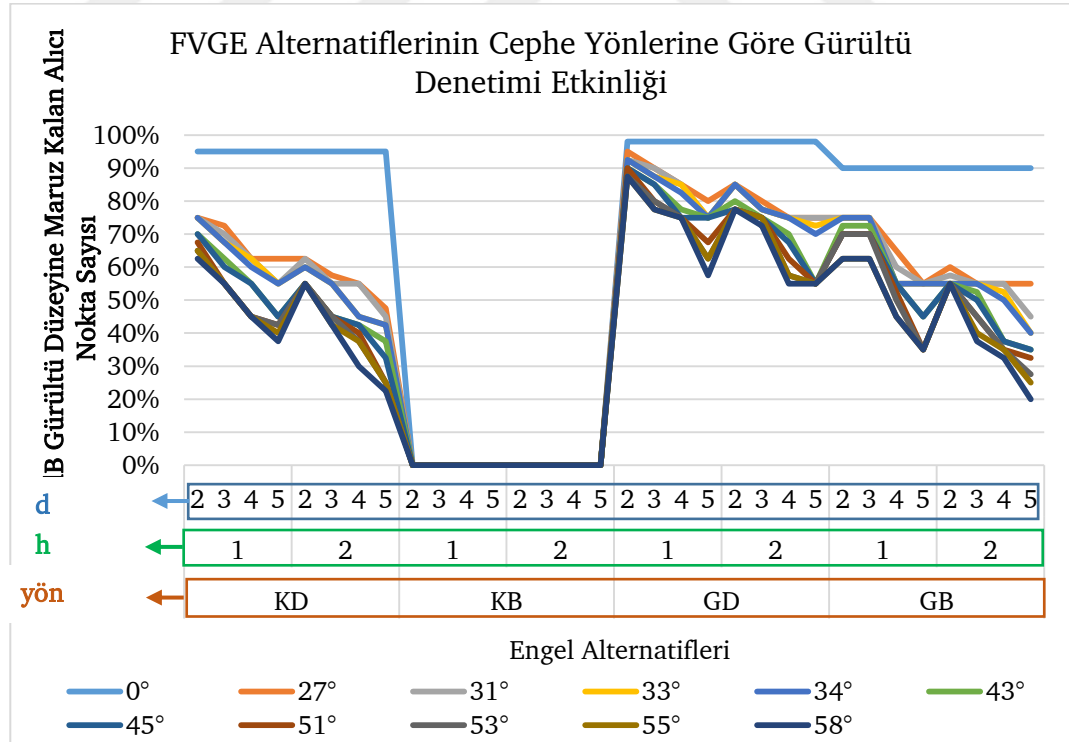
Şekil 4.18 FVGE alternatiflerinin, engelden farklı uzaklıklardaki bloklarda gürültü düzeylerine etkisi

Cephe yönlerine göre değerlendirme; FVGE alternatiflerinin cephe yönlerine etkisini gözlemek için, birinci sıradaki bloklar için gürültüye maruz kalan alıcı miktarının, toplam alıcı miktarına oranı analiz edilmiştir. Bu grupta trafik gürültüsünün baskın olduğu A1, A2, A3 ve B1 blokları dikkate alınmıştır. Şekil 4.19, analiz sonuçlarını gösterir. Kontrol engelinin olmadığı temel durum "0" ile gösterilen mavi çizgidir. Analiz sonuçları aşağıdaki gibidir;

Otoyola paralel olan güneydoğu cephesi maksimum düzeyde gürültüye maruz kalmaktadır.

Otoyola farklı mesafelerde bulunan tüm blokların kuzeybatı cephesi, konforlu ses ortamına sahiptir. Kuzeybatı cephesindeki alıcılar akustik gölge bölgesinde olduğundan sınır değeri aşmamıştır.

Maksimum gürültü azaltımı ($h=2$ m, $d=5$ m, 58°) sağlayan engel alternatifleri güneydoğu cephesinde %43 iyileştirme sağlar. Aynı alternatif, kuzeydoğu ve güneybatı cephelerinde ortalama %70'lik bir iyileştirme yaratır.



Şekil 4.19 Cephe yönlerine göre FVGE alternatiflerinin gürültü düzeylerine etkisi

4.3.1.2 Çift Kırıklı FVGE Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, öncelikle, çift kırıklı engellerin 1. aşamasında türetilen engel alternatiflerinin güneş enerjisi performansları incelenerek bulgular paylaşılmıştır. Daha sonra, çift kırıklı engellerin 2. Aşamasında türetilen FVGE alternatiflerinin; güneş enerjisi, gürültü denetimi ve ışınlım kaybı performans göstergeleri incelenerek TOPSIS metodu ile optimum seçim belirlenmiştir.

- İkinci Aşamada Tasarlanan Çift Kırıklı FVGE Alternatiflerinin Güneş Enerjisi ve Gürültü Denetimine İlişkin Bulgular

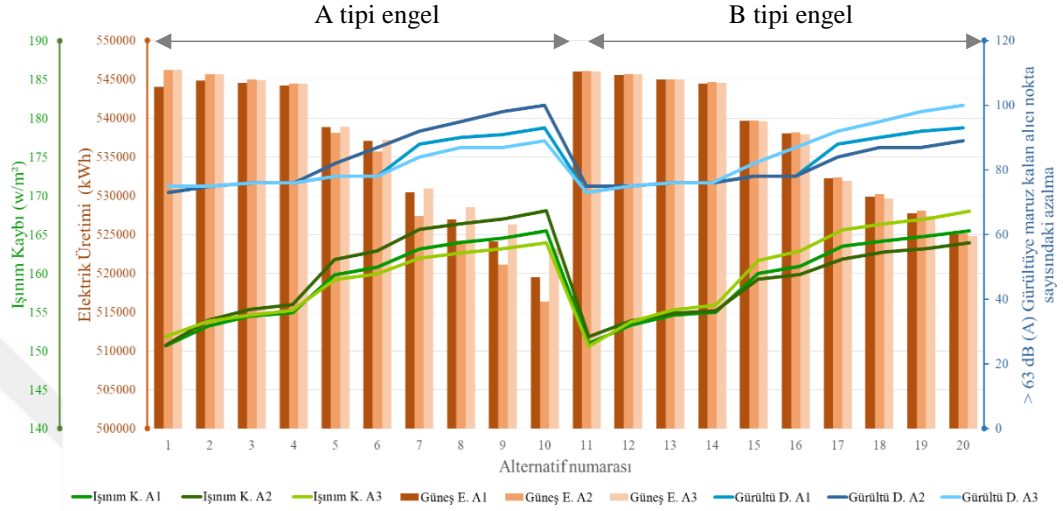
Şekil 4.20, analiz edilen çift kırıklı FVGE alternatiflerinin, kriterlere göre çıktılarını göstermektedir. Grafikte solda A tipi engelin, sağda B tipi engelin hesaplama çıktıları görselleştirilmiştir. A ve B tipi alternatiflerin şemaları, yorumlama kolaylığı sağlamak amacıyla Tablo 4.9'da tekrar gösterilmiştir.

Tablo 4.9 Çift kırıklı FVGE alternatifleri tasarımının 2. Aşaması (hatırlatma tablosu)

Şematik Çizim		Engel Tipi: A										Engel Tipi: B										
Alternatif No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Kır. Yüzeyi Eğim Açıları		31										31										
		α (°)										α (°)										
		β (°)										β (°)										
Analiz Grupları, Kırınım Yüzeyi Boyutları	A1	d_1	2,5 m										2,5 m									
		d_2	2,5 m										2,5 m									
	A2	d_1	2 m										2 m									
		d_2	3 m										3 m									
	A3	d_1	3 m										3 m									
		d_2	2 m										2 m									

Yatay eksen FVGE alternatiflerini, dikey eksenler performans kriterleri temsil eder. 'Gün ışığı kaybı' kriteri, birinci sıra blokların zemin katının ön cephesinde birim alan başına düşen ışınlım kaybını ifade eder. 'Elektrik

üretimi' kriteri, fotovoltaik sistemden yıllık enerji üretim miktarını ifade eder ve yüksek üretim engelin performansını artırır. 63 dBA'nın üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı noktalarının sayısının azalması kriteri, gürültü engelinden olumlu etkilenen alıcı noktalarının sayısını ifade eder ve karar vermede maksimum olması hedeflenir.



Şekil 4.20 FVGE Alternatiflerinin kriterlere göre performans göstergeleri

Örneğin 10 numara ile gösterilen FVGE alternatifi ile, daha fazla alıcı nokta gürültü denetiminden olumlu etkilenirken, enerji üretimi ve gün ışığı kaybı açısından olumsuz performans göstermektedir. Birden fazla kriter olduğu için, optimum seçimi yapabilmek için çok kriterli karar verme analizi gerekir. Grafik çıkarımları aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

A3-analiz grubundan ilk alternatif, enerji üretimi açısından en iyi performansı gösterir. Engel başlığının ilk büyük kenarı yıllık optimum eğim açısına (31°) ve diğer kenarı 27°'lik bir açığa sahiptir. Aynı analiz grubunun ikinci alternatifinde her iki kenar optimum eğim açısına sahip olmasına rağmen enerji üretim potansiyeli daha düşüktür. Bunun nedeni, yolun karşı tarafındaki binaların neden olduğu gölgeleme kaybıdır. Kent içi fotovoltaik kurulumların, optimum eğimden daha düşük olan yataya yakın panel eğim açıları, gölgeleme kaybını azalttığı için elektrik üretimini artırabilir.

A tipi ve B tipi alternatiflerin güneş enerjisi üretim kriterleri açısından karşılaştırılmasında, aynı açılar için B tipi alternatifler A tipi alternatiflere

göre daha yüksek performans göstermiştir. Bu, yıllık optimum eğim açısına sahip kenarın daha yüksekte konumlanmasının, kent içi uygulamalarda gölgeleme kaybını azaltmasıyla ilgilidir.

A tipi alternatifler enerji üretimi açısından incelendiğinde, A3 analiz grubunun performans göstergesi diğer analiz gruplarına göre daha yüksektir. Çünkü A3-analiz grubunda yıllık optimum eğim açısı (31°) daha geniş olan bir kenara tanımlanmıştır. B tipi alternatifler incelendiğinde aynı durum A2 analiz grubunda da görülmektedir.

Gürültü kontrolü açısından A2-analiz grubunda 10. alternatif ve A3-analiz grubunda 20. alternatif en yüksek performansı göstermektedir. Her iki FVGE tipinin yüksekliği eşittir. Daha geniş olan kenarı dike yakın açıyla planlamak, gürültü kontrol verimliliğini artırmaktadır.

Kenarların eğim açısı, güneş enerjisi üretimi ve konutlarda gün ışığı potansiyeli ile negatif, gürültü kontrolü ile pozitif korelasyona sahiptir. Artan panel eğimi, fotovoltaik sistemin performans oranını düşürürken, yıllık optimum eğim açısına sahip panellerde enerji üretimi yüksektir. Benzer bir durum, konutların zemin katlarındaki günışığı kaybında da gözlenmiştir. Yüksek eğim açıları cephedeki güneş ışınımını azaltmaktadır. Binalarda minimum gün ışığı kaybına neden olan FVGE formu, A2-analiz grubunda yer alan 1. alternatiftir. Uzun kenarın yataya yakın açısı cephedeki gölgelenme miktarını azaltmıştır.

4.3.2 ÇKKV ile Optimum FVGE Seçiminin Yapılması

Çalışmanın sonuçlanmasında en önemli konu, optimum performansı gösteren engel alternatifini belirlemektir. Engel kırımın yüzeyi boyutları ve dönemsel optimum eğim açıları ile 60 farklı kesite sahip engel alternatifi türetilmiştir. Fotovoltaik panellerin performans göstergesi olan enerji üretimi ve gürültü engellerinin performans göstergesi olan limit değerinin üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı nokta sayısı ana kriterlerdir. Ayrıca engelin, bitişindeki binalarda sebep olduğu ışık kaybı da çevresel etki kriteri olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Alternatifler enerji üretim miktarı, etkilenen bölge sakini ve gölgeleme

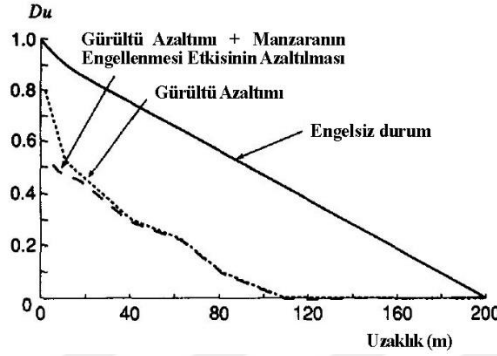
kaybı gibi nicel faktörlere göre değerlendirilmiştir. Faktörlerin ağırlıkları doğrudan puanlama metodu ile belirlenerek, inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar metodu TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) ile analiz edilmiştir.

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri, karar vericilerin çeşitli inşaat problemleri için en sürdürülebilir alternatifi seçmelerine yardımcı olacak güçlü bir araç olarak sunulmaktadır. ÇKKV yöntemleri, bir ürün, sorun veya hizmetin farklı kriterlerini göz önünde bulundurarak alternatifler arasından en uygun olanın seçilmesini sağlar. Her bir kriterin ağırlıklandırılması gibi maliyet-fayda analizinde yapılamayacak bir yöntem avantajına sahiptirler. ÇKKV yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri TOPSIS yöntemidir. Kullanım kolaylığı, programlanabilir olması ve alternatiflerin göreceli performansını basit bir matematiksel formda ölçebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. TOPSIS yönteminde en çok tercih edilen alternatif, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözümden en uzak alternatif olmalıdır.

TOPSIS metodunda, kriterlerin ağırlıklandırılması optimum seçim üzerinde belirleyici role sahiptir. Bu çalışmada, kriterlerin ağırlıklandırılmasında izlenen yol aşağıdaki gibidir;

1. Fotovoltaik gürültü engellerinin değerlendirilmesinde ana kriterler olan güneş enerjisinden elektrik üretimi ve gürültü denetiminden faydalanan bölge sakini kriterlerinin eşit ağırlığa sahip olduğu kabul edilmiştir.
2. Gölgeleme kaybının ağırlığının belirlenmesinde, kamu projelerinin Çevresel Etki Değerlendirmesinde, her bir kirliliğin fiziksel/biyolojik olarak ele alınmasına ek olarak bölge sakinlerinin tercihlerinin araştırmaya dahil edildiği, Tamura vd. tarafından yapılan bir çalışma temel alınmıştır [129]. Bir alana 3 m yüksekliğinde bir gürültü engeli inşa etmenin, çevresel etkilerin azaltılması (gürültü azaltımı ve NO₂ miktarındaki düşüş) ile manzaranın engellenmesi arasındaki dengeleme eğrisi Şekil 4. 21'de gösterilmiştir. Şekildeki düz çizgi, önlemin olmadığı durumdaki ortalama yararsızlık fonksiyonunu ifade eder. Noktalı çizgi çevresel etkilerin

azalmasının ve manzaranın engellenmesinin etkisinin dikkate alındığı hoşnutsuzluk fonksiyonunu göstermektedir. Kesik çizgi ise, çevresel etkilerin azalması ve manzaranın engellenmesi etkisine ek olarak bu tıkanıklık etkisini azaltmak için engelin önüne ağaç dikimi gibi gerekli önlemlerin alındığı durumu temsil eder [129].



Şekil 4. 21 Çevresel etkisini değerlendirme için gürültü engelinin faydasızlık işlevleri [129]

Alan çalışmasında, ilk sıra blokların karayoluna uzaklığı 21 ile 70 m arasında değişmektedir. Şekil 4. 21'deki grafiğe göre her bir yapı bloğunun yararlılık fonksiyonu belirlenmiş ve daha sonra hesaplanan ortalama değerler, Tablo 4.10'da sütun 1'e eklenmiştir.

3. Görelî önem ağırlıklarının toplamı 1 olacak şekilde normalize edilerek Tablo 4.10'de III numaralı sütuna yazılmıştır.

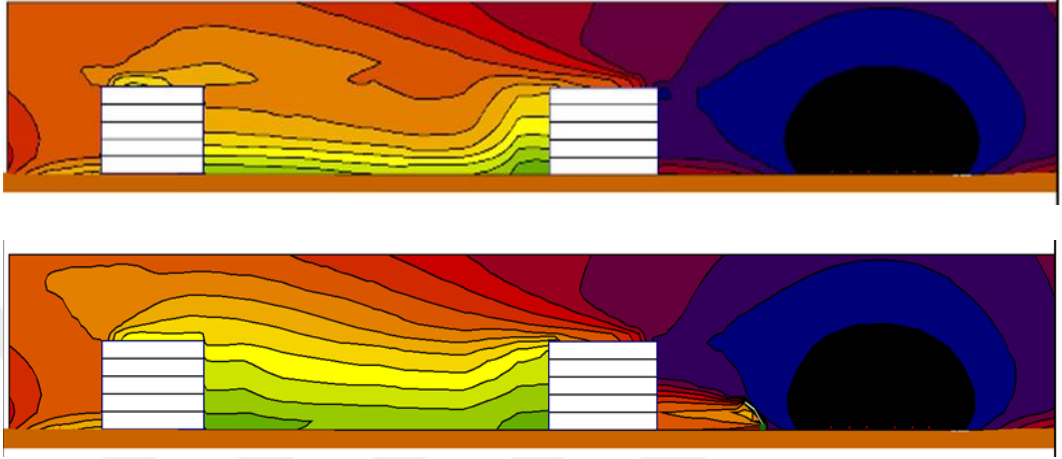
Tablo 4.10 Kriter ağırlıklandırma aşamaları

	I	II	III
	Doğrudan Puanlama Ağırlıkları	Normalizasyon	Normalize Ağırlıkları
Elektrik Üretimi (kWh)	1	1 / 2,28	0,44
Etkilenen Alıcı Nokta Sayısı	1	1 / 2,28	0,44
Gölgeleme Kaybı (W/m ²)	0,28	0,28 / 2,28	0,12
	Toplam = 2,28		

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmaktadır;

- Yapılan değerlendirmeler sonucunda optimum gürültü engeli A3 analiz grubundan 20 numaralı alternatif olarak belirlenmiştir. En iyi alternatifin

ilk kırınım yüzeyi 3m ve 58° açığa sahip, ikinci kırınım yüzeyi ise 2 m ve 31° açığa sahiptir. Mevcut durum kesit gürültü haritası ve optimum FVGE alternatifinin kesit gürültü haritası Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Optimum FVGE’nin 3 boyutlu modelleri Ek B’de yer alan şekillerde gösterilmiştir (bkz. Şekil B.1 – Şekil B.6).



Şekil 4.22 Mevcut durum kesit gürültü haritası (üst) ve optimum FVGE alternatifinin kesit gürültü haritası

- TOPSIS tarafından belirlenen en iyi alternatif, gürültü kontrolü açısından da en iyi performansa sahiptir. Bu durum, gürültü kontrolü ve güneş kriterlerinin ağırlıkları eşit olmasına rağmen gürültü kontrolünün daha belirleyici olduğunu göstermektedir ve gürültü kontrol kriterinin daha yüksek varyans katsayısı ile açıklanabilir. Elektrik üretimindeki değişim daha küçük bir aralıkta olduğu için sonuçlara etkisi gürültü kontrolüne göre daha azdır.

4.4 Değerlendirme

Çevresel koşullar, FVGE tasarım alternatifleri ve performans çıktılarının arasındaki ilişki bu bölümde incelenmiştir. Korelasyon analizi yapıldıktan sonra bulgular doğrultusunda FVGE tasarımına yönelik tasarım önerileri getirilmiştir.

4.4.1 Korelasyon Analizi

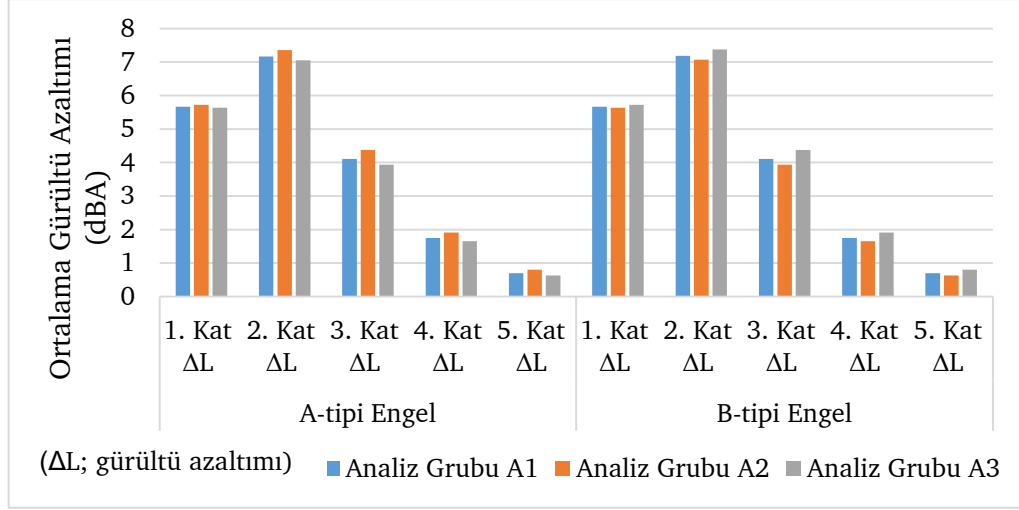
Gürültü kontrolü ve güneş enerjisi performans göstergeleri ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren özetleyici korelasyon matrisi Tablo 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11 Tasarım değişkenleri ve performans göstergeleri korelasyon matrisi

GÜRÜLTÜ DENETİMİ									
	d ₁ genişlik	d ₂ genişlik	d ₁ eğim	d ₂ eğim	Kat 1 Δ L	Kat 2 Δ L	Kat 3 Δ L	Kat 4 Δ L	Kat 5 Δ L
d ₁ genişlik	1	-1	0	0	5E-04	3E-17	2E-04	2E-16	2E-16
d ₂ genişlik	-1	1	0	0	-0	-0	-0	-0	-0
d ₁ eğim	0	0	1	-0,39	0,065	0,358	0,304	0,18	0,182
d ₂ eğim	0	0	-0,39	1	0,063	0,342	0,3	0,18	0,182
Kat 1 Δ L	5E-04	-0	0,065	0,063	1	0,076	-0,69	-0,73	-0,41
Kat 2 Δ L	3E-17	-0	0,358	0,342	0,076	1	0,349	-0,14	-0,33
Kat 3 Δ L	2E-04	-0	0,304	0,3	-0,69	0,349	1	0,834	0,59
Kat 4 Δ L	2E-16	-0	0,18	0,18	-0,73	-0,14	0,834	1	0,864
Kat 5 Δ L	2E-16	-0	0,182	0,182	-0,41	-0,33	0,59	0,864	1
GÜNEŞ ENERJİSİ									
	d ₁ genişlik	d ₂ genişlik	d ₁ eğim	d ₂ eğim	G _{POA}	E _{grid}	PR	Shd _{Loss}	Ill _{Loss}
d ₁ genişlik	1	-1	0	0	0	0,046	0,093	-0,039	-0,004
d ₂ genişlik	-1	1	0	0	0	-0,046	-0,093	0,039	0,004
d ₁ eğim	0	0	1	-0,39	-0,533	-0,411	-0,24	0,351	0,539
d ₂ eğim	0	0	-0,392	1	-0,533	-0,648	-0,75	0,701	0,531
G _{POA}	0	0	-0,533	-0,53	1	0,981	0,909	-0,956	-0,913
E _{grid}	0,046	-0,046	-0,411	-0,648	0,981	1	0,973	-0,992	-0,927
PR	0,093	-0,093	-0,246	-0,75	0,909	0,973	1	-0,984	-0,898
Shd _{Loss}	-0,039	0,039	0,351	0,701	-0,956	-0,992	-0,984	1	0,936
Ill _{Loss}	-0,004	0,004	0,539	0,531	-0,913	-0,927	-0,898	0,936	1

G_{POA}; Modül yüzeyindeki küresel ışınım
E_{grid}; Şebekeye verilen elektrik enerjisi miktarı
PO ; Performans oranı
ShdLoss; Yakın kütlelerden kaynaklanan gölgeleme kaybı
Ill. Loss; Engele bitişik bloğun cephesindeki ışınım kaybı
 Δ L; Gürültü azaltımı, dBA

- Engel başlığı eğimi ile 1. kat düzeyindeki gürültü azaltımı arasındaki ilişki zayıfken, eğimin artması en fazla 2. daha sonra 3. katta gürültü azaltımını artırır. 4. ve 5. katta eşit derecede gürültü azaltımı sağlar. Engelin ilk kırığının eğiminin artması, ikinci kırığın eğimine göre 2. kattaki gürültüyü nispeten daha fazla azaltır.
- Engel başlığının genişlikleri ile katlardaki gürültü düzeylerindeki düşüş arasında çok zayıf bir ilişki vardır.
- FVGE alternatiflerinin kırık genişliklerinin değişimi ile enerji üretim potansiyeli arasındaki ilişki çok zayıftır. Yola yakın olan yüzeyin genişliğinin artması, enerji üretimini ve performans oranını artırırken, üstte yer alan engel yüzeyinin genişlemesi performansa negatif etki etmektedir.
- Alternatiflerin kırıklarının eğimi ile enerji performansı arasında negatif ilişki vardır. Üstte yer alan kırığın eğiminin artması enerji üretimini daha büyük ölçüde negatif etkilemektedir. Benzer şekilde, kırığın eğimi ile performans oranı arasındaki negatif ilişki üstte yer alan kırığın eğiminde daha güçlüdür. Bu nedenle enerji üretimini ve performans oranını artırmak için yataya yakın açılar üstte konumlanmalıdır.
- Engel başlığının eğimlerinin artması, fotovoltaik sistemdeki gölgeleme kaybını artırmaktadır, yüzeye gelen güneş ışınımı miktarını azaltmaktadır. Alt yüzeydeki kırığın eğiminin artması gölgelemeyi hafif şekilde artırırken, üstte yer alan kırığın eğimi daha büyük ölçüde gölgeleme kaybını artırmaktadır.



Şekil 4.23 FVGE alternatif tiplerinin farklı kat düzeylerinde ortalama gürültü azaltımı

Şekil 4.23, engel tipi, analiz grubu, kat düzeyleri ile gürültü azaltım miktarlarının ortalamasını birlikte değerlendirir. Her iki engel grubu için de, engel alternatiflerinin 2. katta sağladığı gürültü azaltımı maksimumken, 5. katta minimum düzeydedir. Sonuçlar, A grubu ve B grubu engel alternatiflerinin gürültü azaltım miktarları arasında belirgin bir fark olmadığını göstermektedir. Kırık yüzeylerinden geniş olan değişken açığa sahip olduğunda, katlardaki gürültü azaltımının az da olsa daha fazla olduğu görülmüştür. Örnekleme gerekirse; 2. analiz grubunda 3 metre genişliğe sahip kırığın eğimi, A tipi engelde 27° ile 58° arasında değişmektedir ve ortalama gürültü azaltımı analiz grubu A3'ten çok hafif de olsa daha yüksektir. Bunun sebebi, toplam yüksekliği daha fazla olan engel gürültü denetimi açısından daha iyi performans göstermektedir. Engelin kırık yüzeylerinin genişlikleri ve eğimlerine göre engel grubu belirlenirken, katların akustik ortam niteliğinde çok yakın sonuçlar gösteren alternatifler arasında güneş enerjisini maksimize eden seçeneğin, FVGE sistemi açısından optimum performansını sağlayacağı öngörülmektedir.

4.4.2 Tasarım Önerileri

FVGE gereksinimi bölgeye özgü özelliklere göre değişir. Gölgeleme kaybı olmayan ve az katlı binalar için kullanımı öngörülebildiği gibi, çok katlı yapıların olduğu yüksek yoğunluğa sahip bir bölgede de planlanabilir. İhtiyaca göre

ölçeklenebilir ve modüler yapım kolaylığı sunabilmesi için yükseklik ve panel boyutlarının birer metre genişliğe sahip prefabrike elemanlarla yapılması planlanmıştır. Bu nedenle FVGE bileşenlerine ara ölçüler dahil edilmemiştir.

- Kırınım yüzeyi genişliği 2 m, 3 m, 4 m ve 5 m olarak boyutlandırılması, alana özgü ihtiyaçlar doğrultusunda elverişli bir planlama sağlar.
- Kentsel alanlarda fotovoltaik uygulamaları, yakın çevre ve gabarisi yüksek araçlar nedeniyle gölgelemeye maruz kalabilir. Ayrıca ulaşılabilir seviyedeki ekipmanlar vandalizm ve hırsızlık riskini artırabilir. Engel dikey bölümünün yüksekliğinin 2 metreden az olmaması önerilir.
- Güneş enerjisi ve gürültü denetimi arasında dengenin sağlanabilmesi için çift kırıklı engel kullanımlarında, yataya yakın olan optimum yıllık açının daha yüksekte konumlanması gölgeleme oranını azaltır. Ayrıca yola yakın kenarlar daha fazla kir kaybına maruz kalacağından, yola yakın olan kırınım yüzeyinin dik eğim açısı ile planlanması sistemin performansını olumlu yönde etkiler.
- Çift kırıklı engellerde daha geniş ve dike yakın olan kırınım yüzeyinin yola yakın yüzeyde kullanımı, hem yatay kırınım yüzeyinin daha yüksekte olmasını sağlayarak gölgelemeyi düşürür, hem de akustik gölge bölgesinin genişliğini artırır.

Fotovoltaik gürültü engeli uygulamalarında, gürültü denetimi ve güneş enerjisi performansını strüktürün erken tasarım aşamalarında bütünleşik değerlendiren bir karar destek aracına ihtiyaç vardır. Son 30 yılda, FVGE uygulamaları yapılmasına rağmen, tasarımı ekonomik, çevresel ve teknik yönlerden eş zamanlı değerlendiren kullanıma hazır uygulamalar bulunmamaktadır. Fotovoltaik sistemleri modellemek ve analiz etmek için farklı algoritmalar kullanan birçok yazılım vardır. Benzer şekilde, çeşitli gürültü kaynaklarından çevresel gürültü düzeylerini tahmin etmek için ses yayılımının simüle edildiği yazılımlar mevcuttur. Her bir araç, geliştirildiği görevlere bağlı olarak modellenen sistemin analizini belirli göstergeler dahilinde sağlar. FVGE tasarımında karşılaşılabilecek ana sorun, strüktürlerin güneş enerjisi ve gürültü denetimi performansının birlikte değerlendirilmesine izin veren bir yaklaşımın mevcut olmamasıdır. Ana kriterler dikkate alınarak, hibrit sistemin tüm bileşenlerinin harici bir program aracılığıyla değerlendirilmesi, her bir yazılımın kapalı yapısı nedeniyle zordur. Birlikte çalışabilirlik sorununun üstesinden gelmek için, kriterlerin müşterek değerlendirilmesine olanak tanıyan bir modelin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm, FVGE kesitine karar vermeyi kolaylaştırmayı amaçlayan, enerji ve akustik konfor odaklı Excel tabanlı bir araç sunmaktadır.

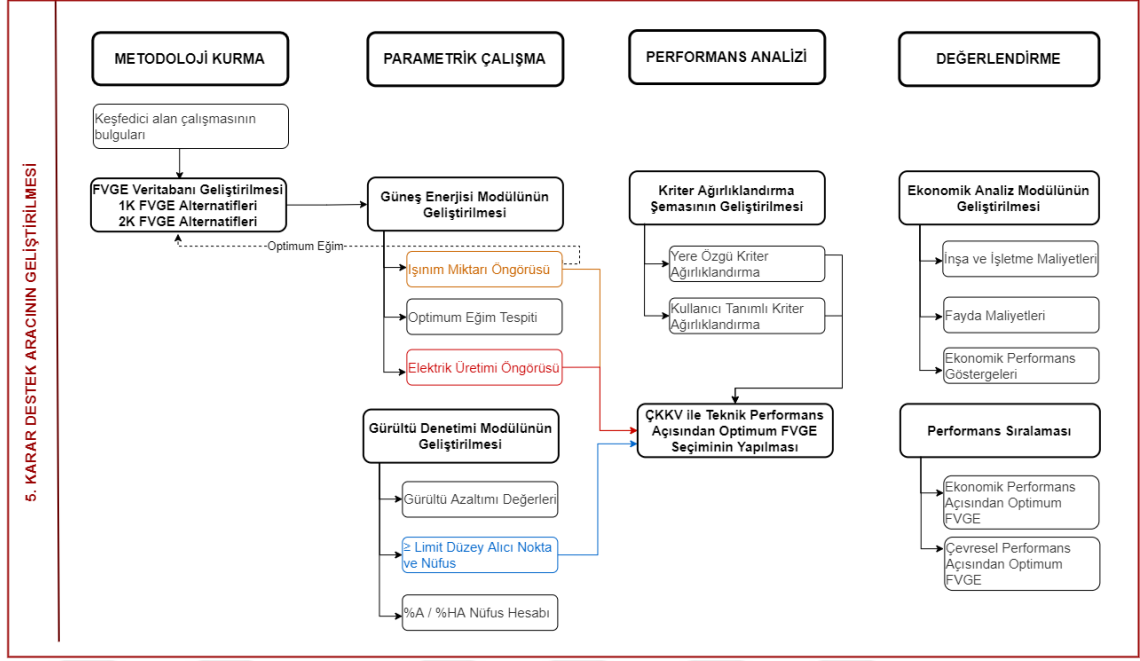
FVGE sistemleri için performans hedefleri; üreticiler, statik mühendisleri, mimarlar, kurulumu yapanlar, fotovoltaik sistem uzmanları, akustik mühendisleri, elektrik şirketleri, karayolu yönetim kurumları, devlet kurumları gibi bir çok farklı kurum ve profesyonelin söz sahibi olduğu kompleks bir süreçtir. FVGE yapım sürecinde rol alacak karar vericilerin, çevresel verileri gerçekçi tanımlayabilmesi ve performans çıktılarını yorumlayabilmesi için özellikle güneş enerjisi ve gürültü denetimi konularında bilgi, yetenek ve deneyime sahip olması avantaj sağlasa da, konu ile ilgili herhangi bir altyapıya

sahip olmayan karar vericilerin kullanımına olanak sağlaması ve konuya dair yeni bir vizyon kazandırması mümkündür.

Bu yönüyle; tasarım, planlama, fizibilite ve yapım süreçlerine farklı zamanlarda dahil olan mimarlar, mühendisler (yapısal, mekanik, elektrik), proje yöneticileri, kamu yatırımcısı ve özel yatırımcılar aracın hedef kitlesini oluşturan kullanıcı gruplarıdır.

“Fotovoltaik Gürültü Engeli Karar Destek Aracı”nın geliştirilmesi aşamasında, iklim ve çevresel şartlar dahilinde, güneş enerjisi verileri ve gürültü denetimi gereksinimi açısından yere özgü veya kullanıcı tanımlı en uygun çözümü belirlemek için geliştirilen model önerisi tanıtılmaktadır. Model, FVGE tasarımı alternatiflerinin; teknik, çevresel ve ekonomik performans ölçütlerine göre değerlendirilmesi temeline dayanmaktadır. İzlenen metodoloji, fotovoltaik gürültü engeli kurulumunun öngörüldüğü yerlerde yararlı olacak bir çerçeve sunar.

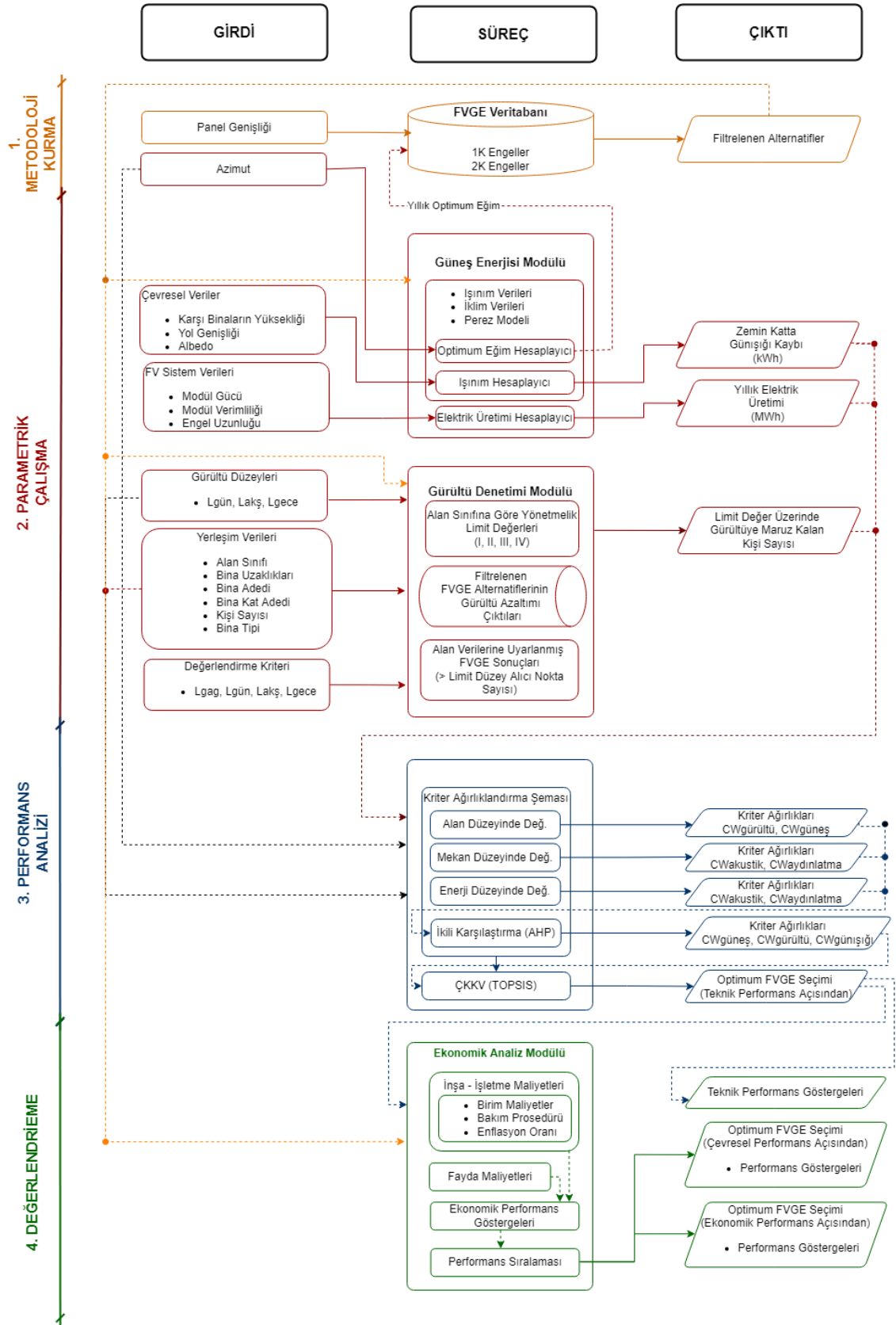
Araç geliştirilirken, keşfedici alan çalışması bulguları doğrultusunda, çift kırıklı gürültü engellerinin optimum tasarımına yönelik öneriler ortaya konarak, tek kırıklı ve çift kırıklı toplam 252 engel alternatifin türetildiği bir FVGE veritabanı oluşturulmuştur. Geliştirilen araç; veritabanı, alan verileri, güneş enerjisi ve gürültü denetimi performans kriterleri arasındaki karşılıklı ilişkilere dayanmaktadır. Aracın basitleştirilmiş şeması Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



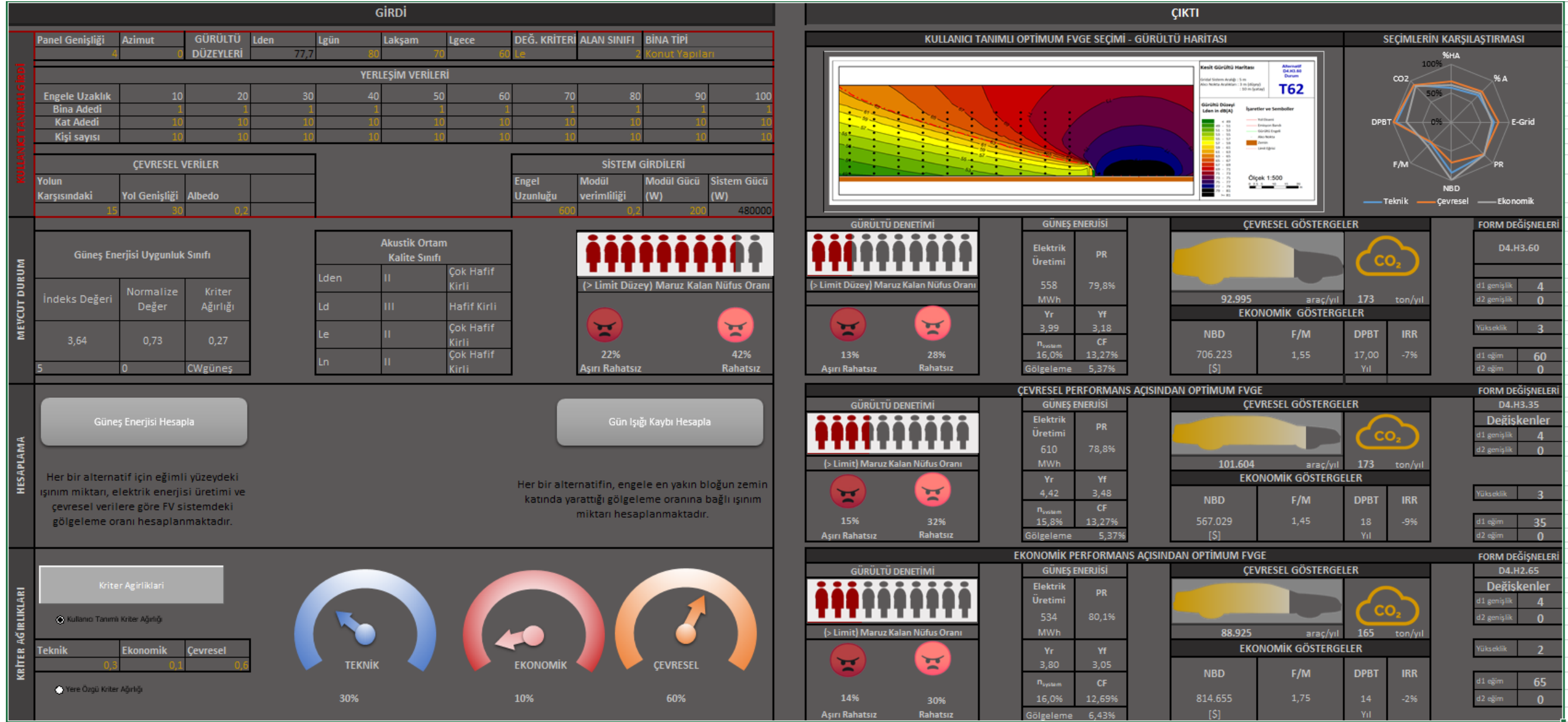
Şekil 5.1 Araç şeması

Araç geliştirme basamakları; metodoloji kurma, parametrik çalışma, performans analizi ve değerlendirme alt bölümlerinde anlatılmıştır. Parametrik çalışma bölümü, keşfedici alan çalışmasında yazılım araçlarıyla yapılan hesaplamaların, araca gömülü olarak yapılması hedefiyle geliştirilmiştir. Güneş enerjisi modülü ve gürültü denetimi modülü, harici simülatörlere gerek olmayacak şekilde geliştirilmiştir. Performans analizi bölümü, kullanıcı tanımlı ve yere özgü kriter ağırlıklandırma şeması ile optimum FVGE seçiminin çok kriterli karar verme metodu ile yapılmasına odaklanır. Değerlendirme bölümü ise, FVGE alternatiflerinin ekonomik analizine dayalı performans sıralamasının yapıldığı bir akış izler. Araç, alt başlıklarda detaylı olarak açıklanmıştır. Aracın çalışma prensibi ve arayüzü nihai ürün olsa da, alt bölümlerin takibini kolaylaştırmak amacıyla bölüm başında Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

Tez, fotovoltaik gürültü engelinin bütünleşik performansına odaklanan ve alan önceliklerine dayalı bir karar destek aracı önermektedir. Araç, İstanbul ilinde, ± 60 azimut arasında, olan alanları kapsar.



Şekil 5.2 Aracın çalışma prensibi



5.1 Metodoloji Kurma

Bu bölümde, keşfedici alan çalışmasının tasarım önerileri doğrultusunda, tek kırıklı ve çift kırıklı olmak üzere toplam 252 FVGE alternetifinin yer aldığı FVGE veritabanı geliştirilmiştir.

5.1.1 FVGE Veritabanının Geliştirilmesi

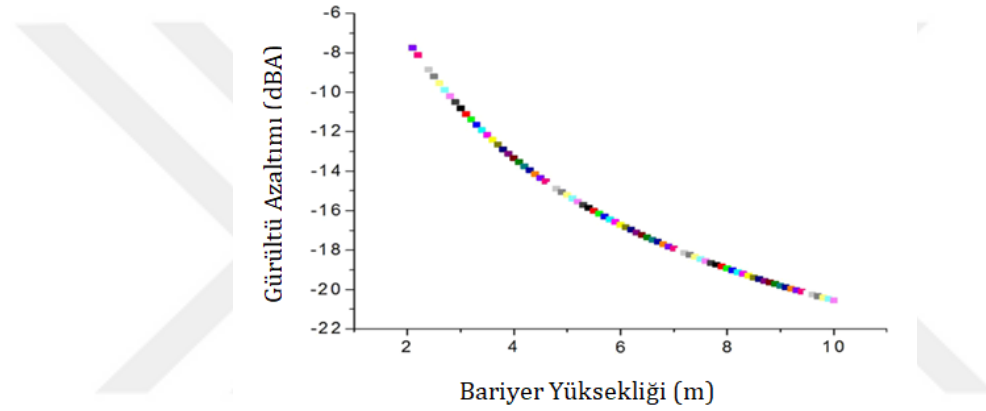
FVGE karar destek aracı; İstanbul ili için kullanılabilir olmak üzere geliştirilmiştir. Bunun için İstanbul'un, +60° ve -60° arasındaki azimut değerleri için belirli zaman periyotlarına göre optimum eğim açıları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 İstanbul ili için farklı zaman periyotları ve azimut açlarına göre optimum eğim açıları

Azimut (°)	0°				30°				60°			
	Aylık (°)	Mevsimlik (°)	6 Aylık (°)	Yıllık (°)	Aylık (°)	Mevsimlik (°)	6 Aylık (°)	Yıllık (°)	Aylık (°)	Mevsimlik (°)	6 Aylık (°)	Yıllık (°)
Eylül	40	46	49	34	37	44	46	32	31	37	39	26
Ekim	50	46	49	34	45	44	46	32	34	37	39	26
Kasım	57	46	49	34	60	44	46	32	57	37	39	26
Aralık	63	56	49	34	57	54	46	32	42	44	39	26
Ocak	57	56	49	34	59	54	46	32	54	44	39	26
Şubat	38	56	49	34	40	54	46	32	34	44	39	26
Mart	46	31	24	34	45	30	23	32	40	23	16	26
Nisan	30	31	24	34	29	30	23	32	22	23	16	26
Mayıs	16	31	24	34	15	30	23	32	10	23	16	26
Haziran	3	9	24	34	3	6	23	32	3	3	16	26
Temmuz	5	9	24	34	19	6	23	32	32	3	16	26
Ağustos	20	9	24	34	3	6	23	32	3	3	16	26

Fotovoltaik panel yüzeyindeki kirlenmeye bağlı ışınım kaybını artırdığı için, veritabanına 25°'den düşük eğimler dahil edilmemiştir. Tablo 5.1'e göre, optimum açılar 3° ile 64° arasında değişmektedir. Kırınım yüzeylerinden daha yüksekte konumlanan yüzeyin açısını belirleyecek olan yıllık optimum eğim açısı ise, 26° ile 34° arasında değişmektedir.

Eğimli yüzeylerdeki ışınım miktarını hesaplamaya yarayan fonksiyonlar, tez kapsamında geliştirilen FVGE karar destek aracı içinde gömülüdür. Böylece, tüm açların güneş enerjisi performansı araştırmaları için araç kullanılabilir. Ancak, farklı açlara, yüksekliklere ve genişliklere sahip gürültü engelleri için, alıcı noktalardaki gürültü azaltımı hesaplamaları SoundPLAN yazılımında yapıp veritabanına kaydedilmiştir. Her açı ile birlikte her tasarım değişkeninin kombinasyonu, binlerce simülasyon gerektirmektedir. Yüzeylerin 1°'lik eğim artışı, gürültü azaltımı performansına doğrudan etki eden engel yüksekliğini belirgin olarak etkilemez. Engel yüksekliği ve gürültü azaltımı arasındaki ilişki, Şekil 5.4'de gösterilmiştir [165].



Şekil 5.4 Gürültü engeliyle sağlanan gürültü azaltımının yükseklikle değişimi [165]

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi, alçak engellerde yüksekliğin artması, gürültü denetimi performansını, yüksek engellerde yüksekliğin artışına göre daha fazla etkilemektedir. Örneğin, 2 m yüksekliğe sahip bir engelin yüksekliğini 1 m artırmak, gürültü azaltımında 3,4 dBA ek azaltım sağlamaktadır. 5 m yüksekliğe sahip bir engelin yüksekliğini 1 m artırmak ise 1,4 dBA ek gürültü azaltımı sağlamaktadır.

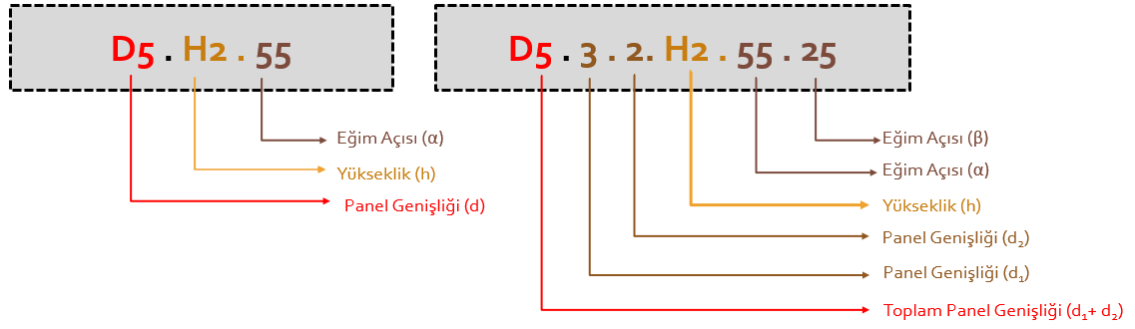
Veritabanında, engel başlığının en geniş boyutu (5 m), en küçük açısı (25°) ve en düşük engel yüksekliği (2 m) ile toplam yükseklik 4,1 m olmaktadır. 5 metre boyutunda bir panelin eğiminin 1° artırılması, yüksekliğini 8 cm artırmaktadır ve 4,1 m yükseklikte engelin gürültü azaltımını yaklaşık 0,2 dB artırmaktadır.

Grafik doğrultusunda, engel eğim açılarının 5°lik artışlarla modellenmesine karar verilmiştir. Ara değerler için, alta veya üste yuvarlanarak bulunan açının gürültü azaltım değeri dikkate alınmıştır. Bu sayede, gürültü azaltımı tahmini 0,5 dBA maksimum hata payı ile tüm açılar için uygulanabilmektedir. Veritabanına kaydedilen FVGE alternatiflerinin tasarım değişkenlerinin boyutları Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Geliştirilen aracın veritabanına kaydedilen FVGE alternatiflerinin tasarım değişkenleri boyutları

Şematik Kesit	Tek Kırıklı (1K) FVGE 72 Alternatif				Çift Kırıklı (2K) FVGE 180 Alternatif			
Genişlik, d (m)	d=2	d=3	d=4	d=5	d ₁ +d ₂ =2	d ₁ +d ₂ =3	d ₁ +d ₂ =4	d ₁ +d ₂ =5
					d ₁ = 1	d ₁ = 2	d ₁ = 3	d ₁ = 3
					d ₂ = 1	d ₂ = 1	d ₂ = 1	d ₂ = 2
							d ₁ = 2	d ₁ = 4
							d ₂ = 2	d ₂ = 1
Yük sek lik	h=2	h=2	h=2	h=2	h=2	h=2	h=2	h=2
	h=3	h=3	h=3	h=3	h=3	h=3	h=3	h=3
Eğim Açıları (°)	α= 25°	α= 25°	α= 25°	α= 25°	α= 45°	α= 45°	α= 45°	α= 45°
	α= 30°	α= 30°	α= 30°	α= 30°	α= 50°	α= 50°	α= 50°	α= 50°
	α= 35°	α= 35°	α= 35°	α= 35°	α= 55°	α= 55°	α= 55°	α= 55°
	α= 40°	α= 40°	α= 40°	α= 40°	α= 60°	α= 60°	α= 60°	α= 60°
	α= 45°	α= 45°	α= 45°	α= 45°	α= 65°	α= 65°	α= 65°	α= 65°
	α= 50°	α= 50°	α= 50°	α= 50°	β=25°	β=25°	β=25°	β=25°
	α= 55°	α= 55°	α= 55°	α= 55°	β=30°	β=30°	β=30°	β=30°
	α= 60°	α= 60°	α= 60°	α= 60°	β=35°	β=35°	β=35°	β=35°
	α= 65°	α= 65°	α= 65°	α= 65°				

Geliştirilen engel alternatiflerinin tanımlanmasını kolaylaştırabilmek ve form değişkenlerini kolay okuyabilmek için FVGE kodları Şekil 5.5’de yer alan biçimde sistematize edilmiştir.



Şekil 5.5 FVGE alternatiflerinin kod sistematığı

5.2 Parametrik Çalışma

Bu bölümde, çevresel veriler ve sistem girdileri doğrultusunda, FVGE veritabanında yer alan engel alternatiflerinin güneş enerjisi ve gürültü denetimi performanslarının hesaplanmasına yönelik adımlar anlatılmıştır.

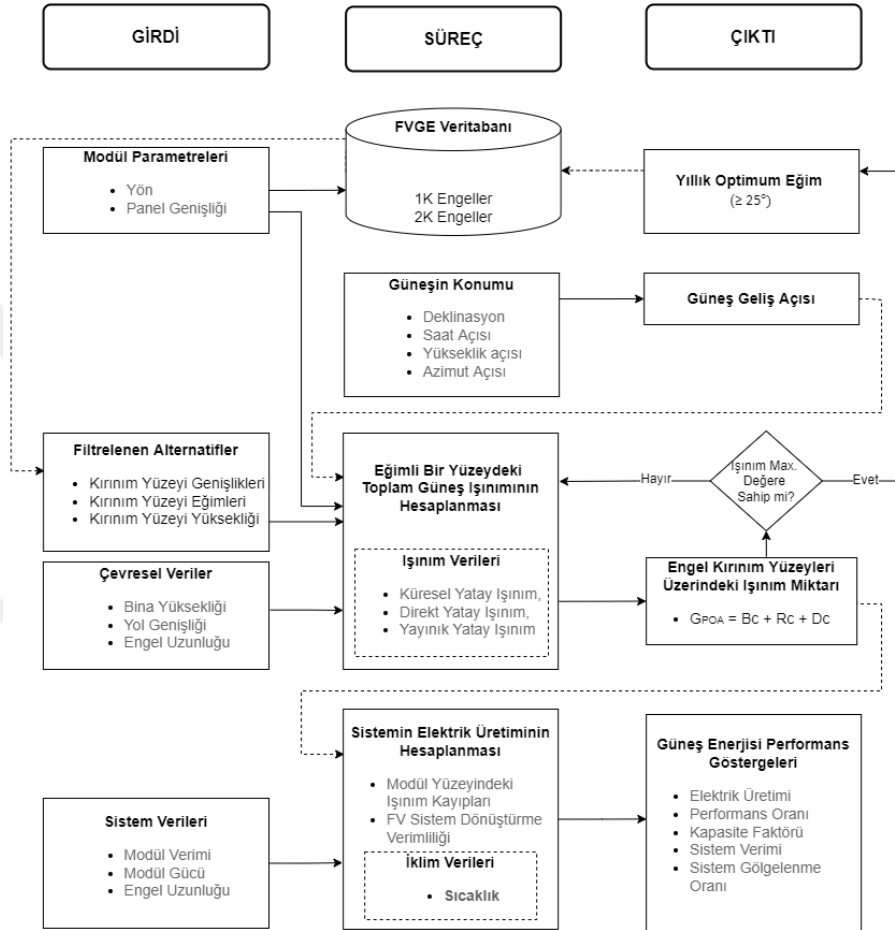
5.2.1 Güneş Enerjisi Modülünün Geliştirilmesi

Güneş enerjisi modülü, FVGE veritabanında yer alan engel alternatiflerinin güneş paneli yüzeylerindeki ışınım miktarını ve sistemlerin elektrik üretimini hesaplamak hedefine uygun olarak geliştirilmiştir. Konum verileri, çevresel veriler, modül parametreleri ve sistem verileri tanımlanarak, alternatiflerin güneş enerjisi performansı göstergelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu hedefe yönelik, en uygun güneş ışınımı tahmin modeli seçimi, literatür taraması ile yapılmıştır. Tahmin modelinin adımları detaylandırılarak eğimli bir yüzeydeki toplam ışınım miktarını hesaplama fonksiyonları Excel tabanlı araca aktarılmıştır. Model, gerçeğe en yakın sonuçlar veren bir yazılımın sonuçları ile, istatistiksel analiz metotları ile doğrulanmıştır. FV sistemdeki elektrik üretimi; modül yüzeyindeki ışınım kayıpları ve FV sistem dönüştürme verimliliği değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Modülün akış diyagramı Şekil 5.6'de gösterilmiştir.

5.2.1.1 Güneş Işınımı Tahmin Modelinin Seçimi

Mevcut yazılımlar bütünleşik değerlendirmeye imkan tanımadığı için, geliştirilen simülatör, bir dış gürültü engeli değerlendirme döngüsü ile kolayca arayüz oluşturabilmeye açık bir şekilde tasarlanmıştır. Güneş enerjisi kriterlerinin

değerlendirildiği bir araç geliştirilmiştir. Herhangi bir FV sistemin tasarımında, yüzeylerdeki güneş ışınımının tahmini ve sistemin çıkış enerjisi en kritik iki konudur. Sistemin çıkış enerjisi, yüzeye ulaşan ışınımın bir fonksiyonudur. Bu nedenle, yüzeylerdeki güneş ışınımının tahmini için geliştirilen araç tanıtılmadan önce güneş ışınımının yapısı ve hesaplamalarda kullanılan modeller ile ilgili bilgilere yönelik literatür taraması Ek C'de verilmiştir.



Şekil 5.6 Güneş enerjisi modülünün çalışma prensibi

Mevcut literatürde, eğimli bir yüzeydeki toplam güneş ışınımını farklı modellerle hesaplayan ve ölçümlerle doğrulayan çalışmalar gözden geçirilmiştir. Transpozisyon modellerinin ele alındığı literatür taramasının özeti Tablo 5.3'de gösterilmiştir. Tahmin modelinin performansı yönlere, yüzeylerin eğimine veya gök koşullarına göre değişebildiği için, çalışmalarda evrensel bir model önerilmemiştir. Ancak, istatistiksel modellere göre doğrulanan tüm çalışmalar, Perez modellerinin tahmin performansının en iyi olduğunu teyit etmiştir.

Tablo 5.3. Eğimli yüzeylerdeki ışınmı hesaplayan transpozisyon modelleri tahmin performanslarının literatür çalışmalarının özeti

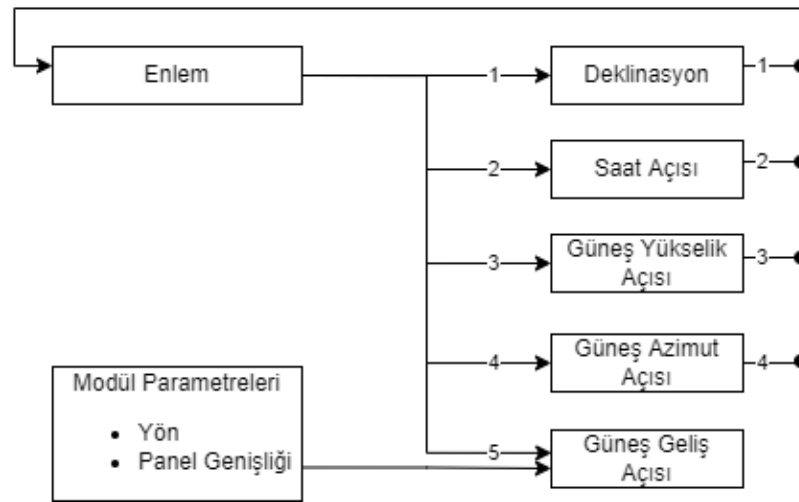
Referans	TRANPOZİSYON MODELLERİ		KONUM			TEST KOŞULLARI	DOĞRULAMA	SONUÇ
	İZOTROPİK	ANİZOTROPİK	E (°)	B (°)	Y (m)	(eğim °, azimut °)		
Demain vd., 2013 [166]	Liu-Jordan (1962) Korokanis (1986) Badescu (2002)	Bugler (1977) Ma-Iqbal (1983) Hay (1979) Skartveit-Olseth (1979) Muneer (1997) Willmot (1982) Gueymard (1987) Reindl et al. (1990) Temps-Coulson (1977) Klucher (1979) Perez et al. (1987)	Uccle, Brüksel 50.7 K	4.3 D	101	Gök Koşullarına Göre İncelenmiştir kapalı (kt; 0.0-0.2), bulutlu (kt; 0.2-0.4), kısmen bulutlu (0.4-0.6), kısmen açık (0.6-0.8), açık (0.8-1.0)	MBE MBE (%) RMSE RMSE (%) R ² Skewness Kurtosis	Gök koşullarına göre en iyi modeller; <ul style="list-style-type: none"> Bugler (1977); Tüm gök koşulları, açık ve kısmen açık Willmot (1982); Parçalı bulutlu ve bulutlu Perez et al. (1987); Kapalı
Yang, 2016 [167]	Liu-Jordan (1962) Korokanis (1986) Badescu (2002)	Temps-Coulson (1977) Bugler 1, 2 (1977) Klucher (1979) Steven and Unsworth 1 (1979) Steven and Unsworth 2,3,4 (1980) Hay and Davies 1 (1980) Hay and Davies 2 (1993) Willmot (1982) Perez 1,2 (1987) Perez 3,4 (1990) Skartveit-Olseth (1979) Gueymard (1987) Muneer 1 (1997) Muneer 2 (2004) Reindl et al. (1990) Olmo 1 (1999) Olmo 2 (Evseev and Kudish, 2009) Tian (2001)	Eugene 44.05 K	-127.07	150	(30 °, 180 °) (90 °, 180 °) (90 °, 0 °) Golden (40, 180 °) (90 °, 0 °) (90 °, 90 °) (90 °, 180 °) (90 °, 270 °) Oldenburg (45 °, 180 °) (45 °, 135 °) 53.15 K	nMBE % nRMSE % Doğrusal Sıralama Diebold–Mariano (DM) testi	<ul style="list-style-type: none"> nRMSE değerlerinin doğrusal sıralamasında en iyi sonuca sahip olan Perez modelini Muneer, Hay ve Gueymard takip etmektedir. Bu sonuç Hay and McKay (1988) tarafından yapılan çalışma sonuçlarına paraleldir. Modellerin hata oranları yüzeylerin eğim açlarına ve azimut açlarına göre değişmektedir. Her kombinasyon için Perez modellerinin doğruluğu kabul edilebilir bir sınırdadır.
Loutzenhiser vd. 2007 [168]	İsotropic (Duffie ve Beckman, 1991)	Klucher (1979) Hay and Davies 1 (1980) Reindl et al. (1990) Muneer 1 (1997) Perez 1 (1987) Perez 3 (1990)	Duebendorf, İsviçre 47.24 K	8.36	430	(90 °, 150 °) (Kampüste bir binanın güney-batı cephesinde) İnceleme Periyodu; Ekim (25 gün) İnceleme Periyodu; Mart/Nisan (25 gün)	MAD	<ul style="list-style-type: none"> İzotropik model, bu deneyler sırasında en kötü tahmin performansını gerçekleştirmiştir. Yayınık bileşenleri ölçmek için ampirik verilere dayanan Perez formülasyonu, çalışmadaki konum ve duvar yönü için en iyi sonuçları göstermiştir.
David vd. 2013 [169]		Hay and Davies 1 (1980) Skartveit-Olseth (1979) Gueymard (1987) Perez 3 (1990)	Reunion Island, Fransa 21.20	55.29	76	(20 °, 0 °) (20 °, 30 °) (20 °, 60 °) (20 °, 90 °) (20 °, - 30 °) (20 °, - 60 °) (20 °, - 90 °) (40 °, - 90 °) (40 °, - 60 °) (40 °, 0 °) (40 °, 30 °) (40 °, 60 °) (40 °, 90 °) (40 °, -30°)	RMSE, NRMSE, MAPE, BIC MBE	<ul style="list-style-type: none"> RMSE, NRMSE, MAPE, BIC değerleri 4 model için yakın sonuçlar gösterirken, Perez modelinin MBE sonuçları diğerlerinin yaklaşık yarısına denktir ve en iyi performansı gösteren model olarak belirlenmiştir.

5.2.1.1 Güneşin Konumunun Belirlenmesi

Güneş'in gökyüzündeki konumu yılın günlerine ve günün saatlerine göre değişkenlik gösterir. Güneş ve Dünya'nın hareketleri sistematiktir ve bu nedenle konumları öngörülebilir.

Güneş hareketi tanımlamalarında basitlik amacıyla, dünyayı sabit kabul ederek, güneşin sanal hareketinin orijini dünyaya sabitlenmiş bir koordinat sisteminde tarif eden Ptolemik model kullanılmıştır. Ptolemik anlamda güneş, gökküre üzerinde iki yönde hareket eder. Bu nedenle güneşin konumu, güneş yüksekliği ve güneş azimutu olmak üzere iki astronomik açı ile tanımlanabilir. [173].

Güneş ışınımının yoğunluğu, çalışılan alanın Dünya üzerindeki yerel düzleminde, gün boyunca değişen güneş yönünün bir fonksiyonudur. Bu nedenle, güneşin konumunun belirlenmesine ilişkin değişkenler, saatlik olarak hesaplanmalıdır. Güneşin, gökküre üzerindeki konumunun belirlenmesine yönelik adımlar Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Güneşin konumunun belirlenmesine yönelik güneş açılarının hesaplamaları Ek D'de detaylandırılmıştır.



Şekil 5.7 Güneş enerjisi modülünün çalışma prensibi

5.2.1.3 Eğimli Bir Yüzeydeki Toplam Güneş Işınımının Hesaplanması

Eğimli bir yüzey üzerindeki yayınık ışınımı yatay bir yüzeyde ölçülenle ilişkilendirmeye çalışan çok sayıda model arasından, literatür taraması yardımıyla Perez modelinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Belirli bir eğime sahip yüzeydeki toplam küresel ışınım; doğrudan ışınım, zeminden yansıyan ışınım ve gökyüzünden yüzeye ulaşan yayınlık ışınımın toplamıdır. Toplam güneş ışınımını hesaplamaya ilişkin, Perez modelini temel alan eşitlikler (5.1) ile (5.12) arasında özet olarak verilmiştir. Hesaplama adımları ve parlaklık için kullanılan katsayılar Ek E'de detaylandırılmıştır.

$$G_{POA} = Bc + Rc + Dc \quad (5.1)$$

$$Bc = Bh \times \cos(AOI) \quad (5.2)$$

$$Rc = Gh \times \rho \times \left(\frac{1 - \cos\theta T}{2} \right) \quad (5.3)$$

$$Dc = Dh \times \left[F1 \frac{a}{b} + F2 \sin\theta T + (1 - F1) \left(\frac{1 + \cos\theta T}{2} \right) \right] + \quad (5.4)$$

$$a = \max(0, \cos(AOI)) \quad (5.5)$$

$$b = \max(\cos(85^\circ), \cos(\theta z)) \quad (5.6)$$

$$F1 = \max\left[0, \left(f11 + f12 \Delta + f13 \frac{\pi \theta z}{180^\circ} \right) \right] \quad (5.7)$$

$$F2 = \left(f21 + f22 \Delta + f23 \frac{\pi \theta z}{180^\circ} \right) \quad (5.8)$$

$$\Delta = \frac{Dh \times AMa}{Ea} \quad (5.9)$$

$$AMa = \frac{1}{\cos(\theta z)} \quad (5.10)$$

$$Ea = Gsc \times \left(1 + 0,033 \times \left(\frac{360^\circ \times n}{365} \right) \right) \quad (5.11)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{(Dh + Bh)}{Dh} + k \times \theta z^3}{1 + k \times \theta z^3} \quad (5.12)$$

5.2.1.4 Güneş Enerjisi Performans Göstergeleri

Sistemin enerji performansı doğrudan elektrik üretim miktarına bağlıdır. FV sistemlerinin performans değerlendirmesi, aralıklı güneş ışınımı, sistem yönelimi, gölgeleme etkisi ve hava koşulları nedeniyle geleneksel yöntemlerden farklıdır [174]. Eğimli yüzeylerde güneş ışınımının gerçekçi tahmini, güvenilir değerlendirmeler için kritik öneme sahiptir

FV sistemlerin, enerji ve çevresel performansı doğrudan elektrik üretim miktarına bağlıdır. FVGE sistemlerin enerji performansı, farklı FV teknolojilerinin performansını ölçmek için ayrıntılı bir prosedüre sahip olan IEC 61724 standardına göre analiz edilmiştir [175]. Standartta belirtilen ve bu çalışmada ele alınan sistem performans göstergeleri (5.13), (5.14), (5.15), (5.16), (5.17) ve (5.18) yardımıyla hesaplanır.

Nihai Verim	kWh/kWp/gün veya saat/gün	$Y_f = E_{AC}/P_{PV}$	(5.13)
-------------	---------------------------	-----------------------	--------

Referans Verim	kWh/kWp/gün veya saat/gün	$Y_r = G_{POA}/G_{STC}$	(5.14)
----------------	---------------------------	-------------------------	--------

Dizi Verimi	%	$Y_A = E_{DC}/P_{PV}$	(5.15)
-------------	---	-----------------------	--------

Performans Oranı	%	$P_R = Y_f/Y_r$	(5.16)
------------------	---	-----------------	--------

Kapasite Faktörü	%	$CF = \frac{Y_f}{24} * 365$	(5.17)
------------------	---	-----------------------------	--------

Sistem Verimliliği	%	$n_{system} = \frac{E_{AC}}{G_{STC} * A}$	(5.18)
--------------------	---	---	--------

FV sistemin çevresel performansının değerlendirmesinde, fosil yakıtlarla eşdeğer enerji üretimine göre CO₂ azaltım miktarı hesaplanmaktadır. Güneş enerjisi santralleri net sıfır emisyonlu elektrik üretim sistemleri olarak kabul edilmez. Fotovoltaiklerden enerji üretimi sırasında zararlı gazların emisyonu salınmasa da, malzemelerin çıkarılması, işlenmesi ve bertarafı sırasında yayılırlar [176]. FV sistemi tarafından azaltılabilecek maksimum olası CO₂ emisyonu (5.19), (5.20) ve (5.21) ile hesaplanabilir [177]. Ancak, güneş enerjisi kurulumlarının nispeten düşük CO₂ içerdiği varsayıldığında, FV sisteminin yaşam döngüsü emisyonu dahil edilmemiştir.

$$\text{FV Tesisle Sağlanan CO}_2 \text{ Azaltımı} = \text{Yıllık Enerji Üretimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (5.19)$$

$$\text{FV Tesisten Salınan CO}_2 \text{ Emisyonu} = \text{Yıllık Enerji Üretimi} \times \text{kWh başına CO}_2 \quad (5.20)$$

$$\text{Net CO}_2 \text{ Azaltımı} = \text{FV ile Sağlanan CO}_2 \text{ Azaltımı} - \text{FV ile Salınan CO}_2 \text{ Emisyonu} \quad (5.21)$$

5.2.1.5 Güneş Işınımı Tahmin Aracının Doğrulanması

Önerilen model hesaplamalarının güvenilirliğinin doğrulanması için piyasada mevcut olan fotovoltaiik simülasyon yazılımlarından biri kullanılmıştır. Model çıktısı ve simülasyon sonucu RMSE, MBD, RMSE % ve MBD % istatistiksel değerlerine göre karşılaştırılmıştır.

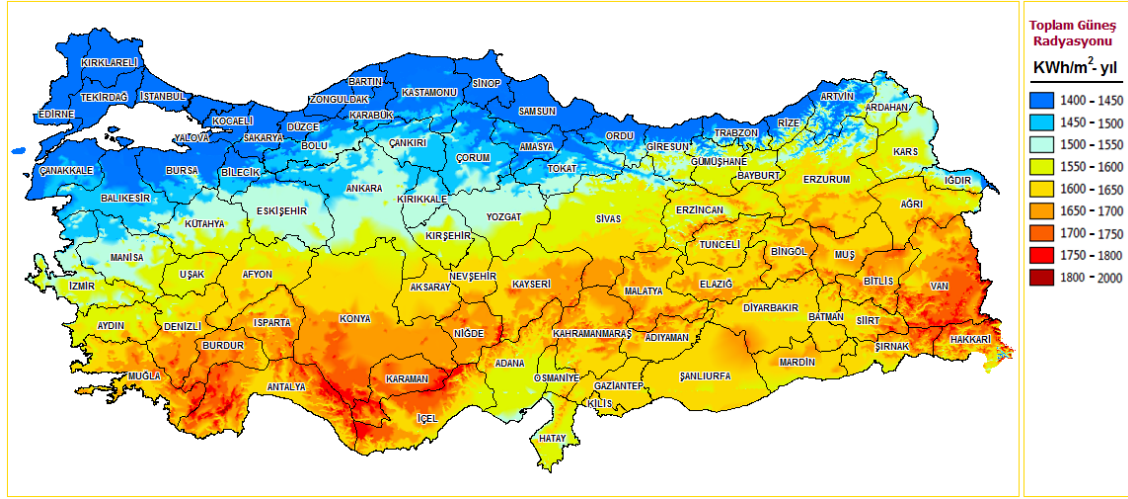
Doğrulamanın yapıldığı simülasyon aracının seçiminde, mevcut literatür incelenmiştir. İyimser ya da ihtiyatlı sonuçların yerine, gerçek verilere en yakın sonuçları veren PVSyst yazılımı tercih edilmiştir. Literatür taramasında incelenen çalışmalar ve sonuçları Ek F'de listelenmiştir.

PVSyst yazılımı, meteorolojik veri sağlayan 11 farklı veritabanına erişim sağlar. Veritabanları arasında Meteonorm, daha sağlam bir meteorolojik veri kaynağı olduğu ve küresel yatay ışınım (GHI) ile ilişkili belirsizliğin, Avrupa'daki diğer meteorolojik veri kaynaklarından daha az olduğu kabul edilir [178]. Meteonorm, güneş uygulamaları hesaplama prosedürlerini ve dünyada istenen herhangi bir yerin meteorolojik verilerinin bir kataloğunu içerir [179]. Meteonorm güneş ışınımı verileri, tüm dünyadaki 1325 gözlem istasyonundan, beş sabit uydudan ve 30 yıllık deneyimden elde edilmiştir [180]. Işınım verisine sahip istasyonların 23 adedi Türkiye'dedir. Meteonorm 7.2 veri setleri 2004 ile 2010 arasındaki verilerin ortalamasıdır. Meteonorm 7.2, mevcut PVSyst sürüm 6.7.7'de varsayılan iklim veri kaynağıdır.

Türkiye 9 farklı güneş enerjisi potansiyeline sahip bölge vardır. Güneş enerjisi potansiyel atlasının yer aldığı Şekil 5.8'e göre, farklı güneş potansiyellerine sahip bölgeleri temsilen 3 şehir belirlenmiştir. Şehirlerin, farklı iklim bölgelerinden, farklı enlemlerden ve karayolu gürültü sorununun yaygın olduğu illerden seçilmesi amaçlanmıştır. Bunun için 2019 TÜİK verilerinin illere göre trafiğe kayıtlı araç sayısı baz alınmıştır. 2019 Haziran ayı itibariyle, Türkiye'de trafiğe kayıtlı araç sayısının en fazla olduğu iller İstanbul, Ankara ve İzmir'dir. İzmir,

Ankara ile aynı enlemde ve Antalya ile aynı iklim bölgesindedir. Bu nedenle doğrulama kapsamında; İstanbul, Ankara ve Antalya pilot şehirler olarak belirlenmiştir.

Güneş sistemlerinin uzun dönemli performans tahminlerinde, yüzeylerdeki ışınımın doğru hesaplanması en önemli parametredir. Güneş'in konumu, ay ve günün saatine göre değişmektedir. Bu nedenle, değerlendirme aylık ortalama günlük verilere göre saatlik olarak yapılmıştır. Ek D 'de gösterildiği gibi, her ayın tavsiye edilen ortalama gününe ait 05:00-20:00 arasındaki saatlik; küresel yatay ışınım, yayınık yatay ısıtım ve direkt ışınım verileri Meteonorm veri tabanından alınmıştır. Şehirlerin, aylık ortalama günlük ışınım verileri ile gündeğümü ve günbatımı saatleri EK-G'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) [20]

Doğrulama aşamasında 2 farklı inceleme yapılmıştır. İlki için farklı azimut ve panel eğimleri için sonuçlar incelenmiştir (Tablo 5.4). Daha sonra ise, yılın aylarına göre doğrulama göstergeleri değerlendirilmiştir (Tablo 5.5).

0° Güney, 90° Batı, -90° Doğu yönünü ifade etmektedir. %MBE değerinin %10'u geçmemesi önerilmekte ve sıfıra yakın değerler aracın hassasiyetini göstermektedir. Azimut açısı ve panel eğim açısı arttıkça tahmin doğruluğunun düştüğü; ancak, yine de nMBE değerinin %5'i geçmediği ve kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.

Geliştirilen aracı doğrulamak için, ortalama hata sapması (Mean Bias Error, MBE) ve Kök ortalama kare hatası (Root Mean Square Error, RMSE) istatistiksel göstergeleri ile tahmin edilen ve yazılımla hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu göstergeler, Güneş ışınımı tahmin modellerinin doğruluğunun değerlendirilmesinde literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Göstergelerin matematiksel ifadeleri (5.22) ve (5.23)'te tanımlanmıştır;

$$MBE = \frac{Ci - Mi}{n} \quad (5.22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Ci - Mi)^2}{n}} \quad (5.23)$$

C_i , i . hesaplanan değer; M_i , i . ölçülen değer; n ise toplam gözlem sayısıdır. RMSE değerinin küçük olması modelin doğruluğunu gösterir. Pozitif MBE değerleri, hesaplanan değerlerin referans değerlerden yüksek tahmin yaptığını gösterirken, negatif MBE değerleri hesaplamaların referans değerden küçük olduğunu gösterir. RMSE ve MBE göstergeleri boyutsuz olmakla birlikte oransal ifadeleri de (5.24) ve (5.25) yardımıyla kullanılabilir;

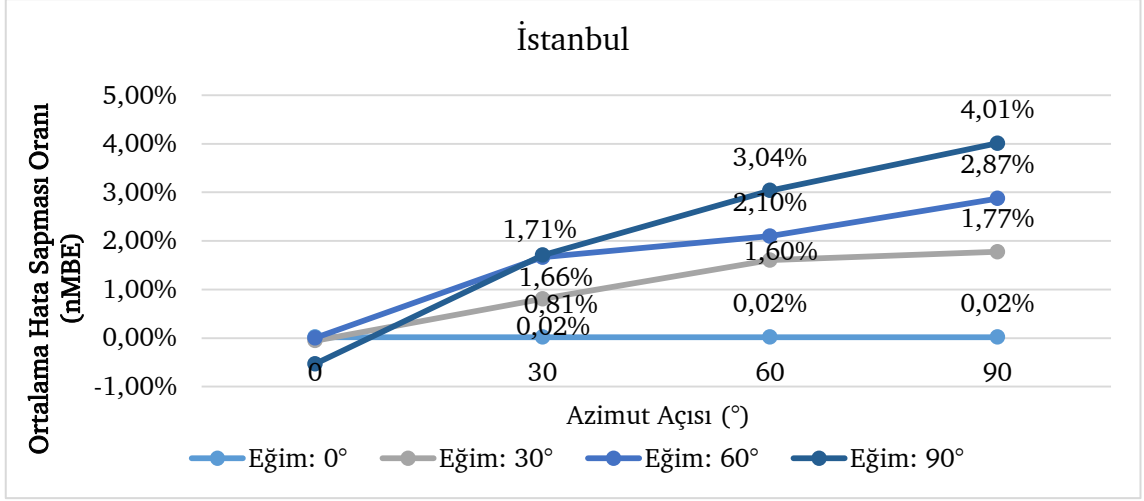
$$\% MBE = 100 \frac{MBE}{M} \quad (5.24)$$

$$\% RMSE = 100 \frac{RMSE}{M} \quad (5.25)$$

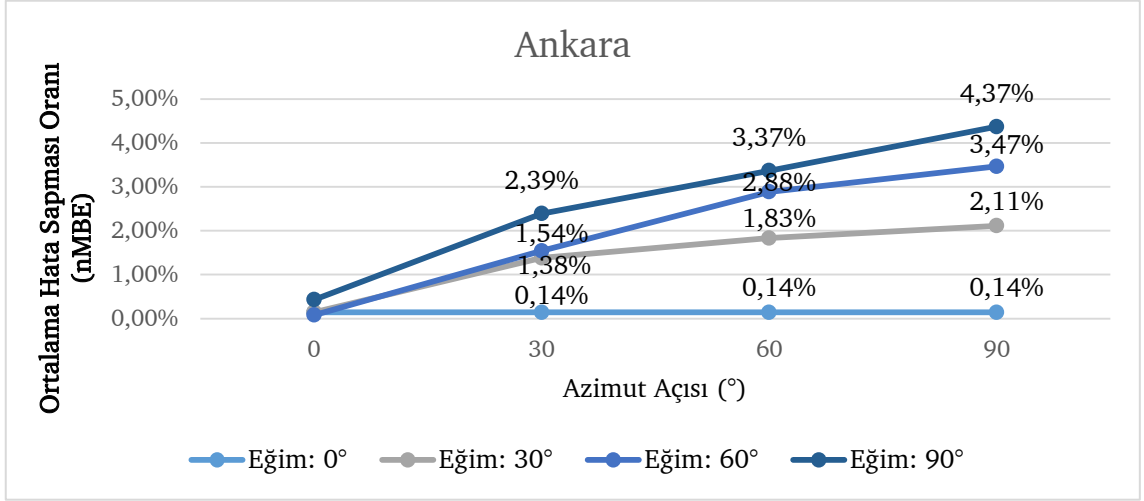
Eşitliklerde M ile ifade edilen referans değerlerinin ortalamasıdır. İllerin, azimut ve panel eğim açlarına göre grafikleri Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Şehirler için, aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri sırasıyla Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Aracın azimut ve eğim açlarına göre istatistiksel hata göstergeleri

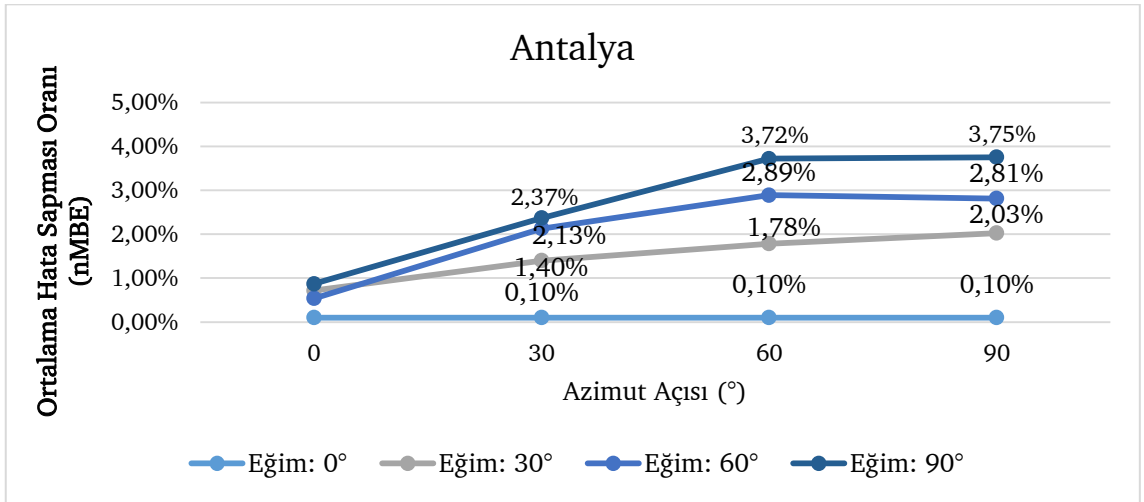
İl	Az. (°)	Gösterge	Eğim:0	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
İstanbul	0	MBE	0,0008	0,0142	0,0004	-0,0025	-0,0090	-0,0015	0,0001	-0,0140	0,0037	-0,0159
		RMSE	0,0009	0,0014	0,0019	0,0019	0,0033	0,0040	0,0034	0,0054	0,0041	0,0050
		nMBE	0,02%	0,34%	0,01%	-0,05%	-0,20%	-0,04%	0,00%	-0,37%	0,11%	-0,53%
		nRMSE	0,02%	0,03%	0,04%	0,04%	0,07%	0,09%	0,08%	0,14%	0,12%	0,17%
	30	MBE	0,0008	0,0115	0,0525	0,0360	0,0432	0,0575	0,0691	0,0402	0,0645	0,0525
		RMSE	0,0009	0,0013	0,0039	0,0040	0,0037	0,0062	0,0078	0,0052	0,0085	0,0051
		nMBE	0,02%	0,27%	1,19%	0,81%	0,97%	1,32%	1,66%	1,05%	1,84%	1,71%
		nRMSE	0,02%	0,03%	0,09%	0,09%	0,08%	0,14%	0,19%	0,14%	0,24%	0,17%
	60	MBE	0,0008	0,0311	0,0405	0,0676	0,0870	0,0781	0,0808	0,1059	0,0938	0,0901
		RMSE	0,0009	0,0020	0,0034	0,0075	0,0095	0,0102	0,0114	0,0146	0,0117	0,0107
		nMBE	0,02%	0,76%	0,97%	1,60%	2,08%	1,93%	2,10%	2,92%	2,84%	3,04%
		nRMSE	0,02%	0,05%	0,08%	0,18%	0,23%	0,25%	0,30%	0,40%	0,35%	0,36%
90	MBE	0,0008	0,0218	0,0550	0,0676	0,0881	0,0979	0,0955	0,1180	0,1059	0,1029	
	RMSE	0,0009	0,0011	0,0045	0,0068	0,0097	0,0132	0,0115	0,0171	0,0162	0,0150	
	nMBE	0,02%	0,55%	1,41%	1,77%	2,39%	2,77%	2,87%	3,78%	3,73%	4,01%	
	nRMSE	0,02%	0,03%	0,12%	0,18%	0,26%	0,37%	0,35%	0,55%	0,57%	0,58%	
Ankara	0	MBE	0,0066	0,0090	0,0023	0,0081	0,0102	0,0109	0,0042	0,0197	0,0089	0,0169
		RMSE	0,0012	0,0007	0,0030	0,0021	0,0043	0,0059	0,0074	0,0071	0,0078	0,0043
		nMBE	0,14%	0,18%	0,04%	0,15%	0,18%	0,20%	0,08%	0,40%	0,20%	0,43%
		nRMSE	0,03%	0,01%	0,06%	0,04%	0,08%	0,11%	0,14%	0,14%	0,17%	0,11%
	30	MBE	0,0066	0,0325	0,0526	0,0751	0,0662	0,0822	0,0792	0,0899	0,0999	0,0936
		RMSE	0,0012	0,0025	0,0051	0,0079	0,0080	0,0091	0,0103	0,0139	0,0125	0,0130
		nMBE	0,14%	0,65%	1,00%	1,38%	1,22%	1,53%	1,54%	1,86%	2,26%	2,39%
		nRMSE	0,03%	0,05%	0,10%	0,14%	0,15%	0,17%	0,20%	0,29%	0,28%	0,33%
	60	MBE	0,0066	0,0485	0,0630	0,0920	0,1093	0,1183	0,1339	0,1247	0,1473	0,1207
		RMSE	0,0012	0,0032	0,0061	0,0109	0,0141	0,0173	0,0211	0,0188	0,0247	0,0171
		nMBE	0,14%	1,00%	1,27%	1,83%	2,20%	2,44%	2,88%	2,87%	3,67%	3,37%
		nRMSE	0,03%	0,07%	0,12%	0,22%	0,28%	0,36%	0,46%	0,43%	0,62%	0,48%
90	MBE	0,0066	0,0486	0,0802	0,0932	0,1084	0,1341	0,1325	0,1434	0,1384	0,1288	
	RMSE	0,0012	0,0036	0,0076	0,0098	0,0130	0,0191	0,0201	0,0235	0,0214	0,0194	
	nMBE	0,14%	1,05%	1,77%	2,11%	2,55%	3,30%	3,47%	4,02%	4,24%	4,37%	
	nRMSE	0,03%	0,08%	0,17%	0,22%	0,31%	0,47%	0,53%	0,66%	0,65%	0,66%	
Aantalya	0	MBE	0,0053	0,0038	0,0094	0,0440	0,0415	0,0429	0,0307	0,0342	0,0432	0,0354
		RMSE	0,0012	0,0005	0,0011	0,0045	0,0041	0,0053	0,0021	0,0032	0,0034	0,0025
		nMBE	0,10%	0,07%	0,16%	0,72%	0,68%	0,72%	0,54%	0,65%	0,92%	0,87%
		nRMSE	0,02%	0,01%	0,02%	0,07%	0,07%	0,09%	0,04%	0,06%	0,07%	0,06%
	30	MBE	0,0053	0,0346	0,0521	0,0840	0,0894	0,0987	0,1182	0,1100	0,1092	0,0963
		RMSE	0,0012	0,0019	0,0042	0,0094	0,0113	0,0132	0,0171	0,0143	0,0167	0,0116
		nMBE	0,10%	0,62%	0,89%	1,40%	1,50%	1,69%	2,13%	2,14%	2,35%	2,37%
		nRMSE	0,02%	0,03%	0,07%	0,16%	0,19%	0,23%	0,31%	0,28%	0,36%	0,29%
	60	MBE	0,0053	0,0449	0,0647	0,0993	0,1133	0,1184	0,1459	0,1315	0,1363	0,1426
		RMSE	0,0012	0,0029	0,0059	0,0116	0,0157	0,0163	0,0252	0,0204	0,0215	0,0250
		nMBE	0,10%	0,83%	1,17%	1,78%	2,07%	2,23%	2,89%	2,80%	3,18%	3,72%
		nRMSE	0,02%	0,05%	0,11%	0,21%	0,29%	0,31%	0,50%	0,43%	0,50%	0,65%
90	MBE	0,0053	0,0482	0,0705	0,1005	0,1006	0,1320	0,1192	0,1377	0,1262	0,1220	
	RMSE	0,0012	0,0036	0,0067	0,0128	0,0135	0,0219	0,0195	0,0221	0,0200	0,0208	
	nMBE	0,10%	0,93%	1,38%	2,03%	2,12%	2,91%	2,81%	3,49%	3,51%	3,75%	
	nRMSE	0,02%	0,07%	0,13%	0,26%	0,28%	0,48%	0,46%	0,56%	0,56%	0,64%	



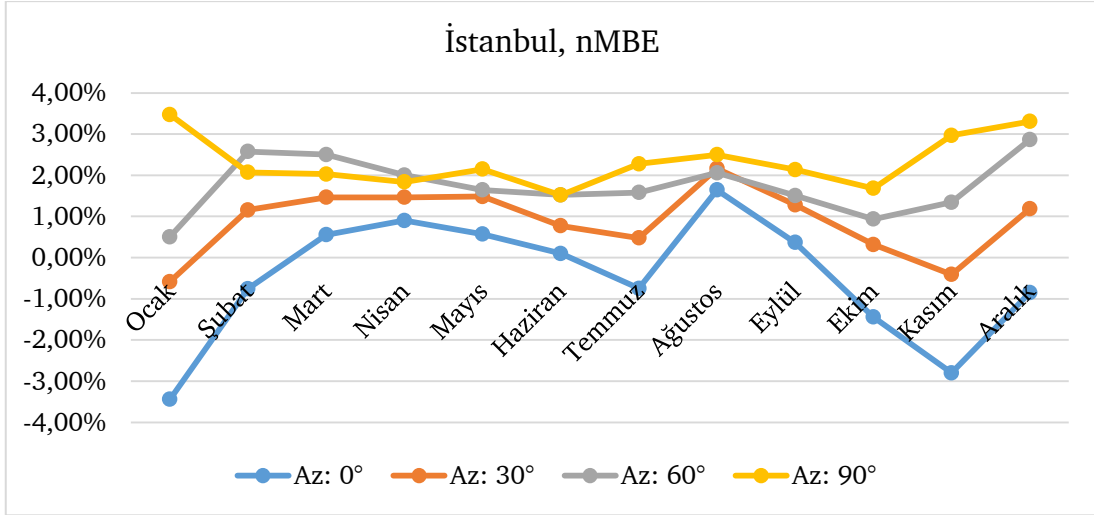
Şekil 5.9 İstanbul için azimut ve panel eğim açısına göre nMBE değerleri



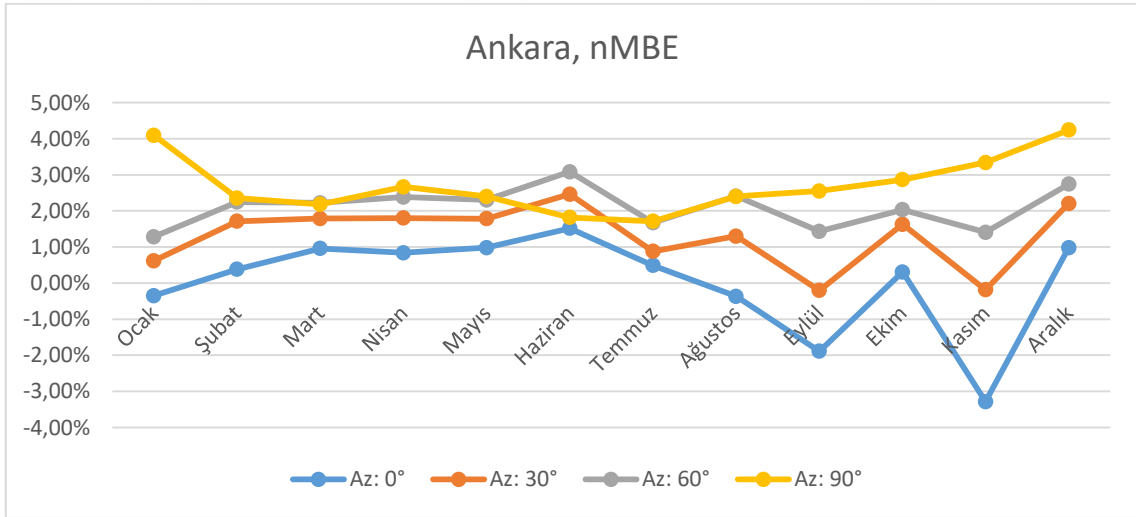
Şekil 5.10 Ankara için azimut ve panel eğim açısına göre nMBE değerleri



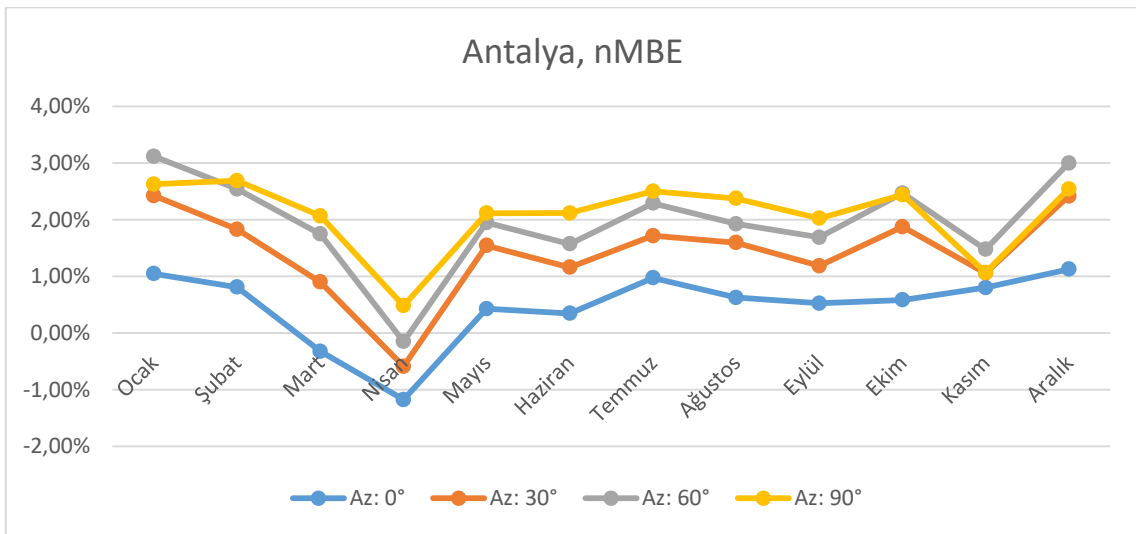
Şekil 5.11 Antalya için azimut ve panel eğim açısına göre nMBE değerleri



Şekil 5.12 İstanbul için aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri



Şekil 5.13 Ankara için aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri



Şekil 5.14 Antalya için aylara ve azimut açısına göre nMBE değerleri

Azimut açısı, panel eğimi, aylar ve şehirlere göre aracın istatistiksel hata göstergeleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Eğim ve azimut açısının değeri arttıkça, aracın hata oranı artmasına rağmen MBE oranı %5'i geçmediği için araç doğru kabul edilir.
- Araç ağırlıklı olarak, yüzeylerdeki güneş ışınımını PVsyst yazılımından yüksek tahmin etmektedir.
- Azimut ve eğimlere göre Tablo 5.4 incelendiğinde, sadece İstanbul ilinde ve 0° azimut açısına sahip yüzeylerde güneş ışınımı PVsyst'ten düşük tahmin edilmiştir.
- Tablo 5.5'de, aylara, azimut açısına ve şehirlere göre istatistiksel hata göstergeleri incelenmiştir. Toplam 576 verinin tahmin ve yazılım sonuçları karşılaştırılmıştır. Tahmin verilerinin %4,7'si PVsyst yazılımı sonuçlarından düşük çıkmıştır. Tabloda negatif değere sahip nMBE sonuçlarının %44'ü İstanbul'da, %33'ü Ankara'da ve %22'si Antalyada'dır. İstanbul ve Ankara'da negatif değere sahip nMBE değerlerinin biri hariç hepsi sonbahar ve kış aylarındadır. Antalya'da ise tüm negatif nMBE değerleri ilkbahar aylarındadır.
- Şehirlerin aylara göre hata oranları incelendiğinde; İstanbul'da en yüksek hata oranı Aralık'da, en düşük hata oranı Haziran'da görülmüştür. Ankara'da en yüksek hata oranı Aralık'da, en düşük hata oranı Temmuz'da görülmüştür. Antalya'da ise en yüksek hata oranı Ocak'da, en düşük hata oranı ise Nisan'da görülmüştür.
- Mevsimlere göre hata oranları incelendiğinde, tüm şehirlerde en yüksek hata oranı kış mevsiminde görülmüştür. En düşük hata oranlarına bakıldığında İstanbul'da Sonbahar mevsiminde, Ankara'da Yaz mevsiminde ve Antalya'da ilkbahar mevsiminde yazılıma en yakın tahminlerin yapıldığı görülmüştür.

Tablo 5.5 Aracın, aylara göre istatistiksel hata göstergeleri

İl	Az.	Gösterge	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
İstanbul	0°	MBE	-0,051	-0,011	0,034	0,057	0,036	0,003	-0,033	0,058	0,026	-0,06	-0,067	-0,022
		RMSE	0,004	0,001	0,003	0,004	0,003	8E-04	0,002	0,005	0,001	0,006	0,007	0,002
		nMBE	-3,44%	-0,75%	0,56%	0,90%	0,57%	0,10%	-0,75%	1,64%	0,37%	-1,44%	-2,80%	-0,85%
		nRMSE	0,28%	0,08%	0,05%	0,06%	0,04%	0,03%	0,04%	0,14%	0,01%	0,14%	0,29%	0,07%
	30°	MBE	-0,009	0,017	0,088	0,093	0,096	0,021	0,024	0,066	0,088	0,012	-0,011	0,027
		RMSE	7E-04	7E-04	0,01	0,011	0,013	0,002	0,002	0,006	0,009	6E-04	9E-04	0,002
		nMBE	-0,59%	1,16%	1,46%	1,46%	1,48%	0,77%	0,48%	2,16%	1,28%	0,32%	-0,41%	1,19%
		nRMSE	0,04%	0,05%	0,17%	0,17%	0,19%	0,06%	0,04%	0,18%	0,13%	0,02%	0,03%	0,07%
	60°	MBE	0,007	0,037	0,138	0,123	0,107	0,04	0,088	0,055	0,095	0,032	0,033	0,053
		RMSE	3E-04	0,002	0,024	0,018	0,016	0,003	0,013	0,004	0,01	0,002	0,003	0,004
		nMBE	0,50%	2,58%	2,50%	2,01%	1,64%	1,52%	1,58%	2,06%	1,51%	0,93%	1,34%	2,86%
		nRMSE	0,02%	0,14%	0,43%	0,29%	0,24%	0,11%	0,24%	0,15%	0,16%	0,06%	0,11%	0,20%
90°	MBE	0,042	0,026	0,094	0,102	0,135	0,04	0,13	0,061	0,116	0,048	0,062	0,047	
	RMSE	0,003	0,002	0,012	0,013	0,024	0,002	0,026	0,005	0,017	0,003	0,005	0,003	
	nMBE	3,47%	2,07%	2,03%	1,84%	2,15%	1,52%	2,28%	2,50%	2,13%	1,68%	2,97%	3,31%	
	nRMSE	0,24%	0,16%	0,27%	0,24%	0,38%	0,09%	0,45%	0,21%	0,31%	0,10%	0,24%	0,21%	
Ankara	0°	MBE	-0,007	0,027	0,059	0,047	0,062	0,039	0,033	-0,019	-0,079	0,019	-0,114	0,05
		RMSE	9E-04	0,002	0,006	0,003	0,005	0,003	0,002	9E-04	0,008	0,001	0,018	0,003
		nMBE	-0,35%	0,38%	0,96%	0,84%	0,98%	1,52%	0,49%	-0,37%	-1,89%	0,31%	-3,29%	0,98%
		nRMSE	0,04%	0,03%	0,09%	0,05%	0,08%	0,10%	0,03%	0,02%	0,20%	0,02%	0,50%	0,06%
	30°	MBE	0,013	0,11	0,104	0,094	0,115	0,059	0,061	0,068	-0,009	0,098	-0,007	0,104
		RMSE	0,018	0,159	0,162	0,097	0,155	0,047	0,047	0,057	0,013	0,115	0,007	0,124
		nMBE	0,62%	1,71%	1,79%	1,80%	1,78%	2,46%	0,88%	1,30%	-0,20%	1,63%	-0,18%	2,21%
		nRMSE	0,84%	2,47%	2,78%	1,86%	2,39%	1,97%	0,67%	1,08%	0,32%	1,90%	0,21%	2,62%
	60°	MBE	0,026	0,121	0,116	0,116	0,15	0,07	0,123	0,125	0,058	0,106	0,047	0,099
		RMSE	0,022	0,213	0,183	0,147	0,269	0,062	0,171	0,177	0,046	0,14	0,047	0,137
		nMBE	1,28%	2,25%	2,22%	2,38%	2,30%	3,08%	1,67%	2,41%	1,43%	2,03%	1,41%	2,74%
		nRMSE	1,07%	3,95%	3,51%	3,01%	4,12%	2,73%	2,33%	3,42%	1,15%	2,68%	1,40%	3,80%
90°	MBE	0,067	0,097	0,095	0,118	0,151	0,04	0,124	0,116	0,095	0,12	0,091	0,103	
	RMSE	0,065	0,13	0,117	0,154	0,286	0,026	0,182	0,185	0,115	0,175	0,109	0,121	
	nMBE	4,10%	2,36%	2,18%	2,67%	2,40%	1,82%	1,71%	2,40%	2,55%	2,87%	3,34%	4,24%	
	nRMSE	3,98%	3,16%	2,68%	3,48%	4,55%	1,18%	2,52%	3,81%	3,10%	4,21%	3,99%	4,98%	
Antalya	0°	MBE	0,049	0,051	-0,017	-0,039	0,025	0,02	0,061	0,04	0,035	0,034	0,036	0,054
		RMSE	0,004	0,004	8E-04	0,002	0,002	0,001	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002	0,005
		nMBE	1,05%	0,81%	-0,32%	-1,18%	0,43%	0,35%	0,97%	0,63%	0,52%	0,58%	0,80%	1,13%
		nRMSE	0,09%	0,06%	0,02%	0,07%	0,04%	0,02%	0,08%	0,05%	0,04%	0,03%	0,05%	0,10%
	30°	MBE	0,106	0,108	0,047	-0,019	0,095	0,07	0,112	0,104	0,078	0,104	0,041	0,111
		RMSE	0,016	0,015	0,003	9E-04	0,012	0,006	0,015	0,013	0,009	0,012	0,003	0,017
		nMBE	2,42%	1,83%	0,90%	-0,59%	1,54%	1,16%	1,72%	1,59%	1,18%	1,87%	1,06%	2,42%
		nRMSE	0,36%	0,25%	0,06%	0,03%	0,19%	0,10%	0,23%	0,20%	0,13%	0,22%	0,07%	0,38%
	60°	MBE	0,113	0,127	0,085	-0,005	0,122	0,099	0,156	0,124	0,106	0,121	0,046	0,11
		RMSE	0,017	0,019	0,009	7E-04	0,02	0,011	0,028	0,019	0,015	0,016	0,003	0,016
		nMBE	3,12%	2,54%	1,75%	-0,15%	1,95%	1,57%	2,29%	1,93%	1,69%	2,47%	1,48%	3,00%
		nRMSE	0,47%	0,37%	0,19%	0,02%	0,32%	0,18%	0,41%	0,30%	0,23%	0,34%	0,10%	0,44%
90°	MBE	0,07	0,105	0,087	0,016	0,129	0,134	0,169	0,144	0,114	0,097	0,024	0,065	
	RMSE	0,007	0,012	0,011	0,001	0,023	0,021	0,034	0,025	0,017	0,012	0,001	0,006	
	nMBE	2,63%	2,69%	2,07%	0,48%	2,11%	2,12%	2,50%	2,38%	2,02%	2,44%	1,07%	2,54%	
	nRMSE	0,28%	0,32%	0,27%	0,05%	0,37%	0,32%	0,50%	0,41%	0,31%	0,29%	0,06%	0,22%	

5.2.1.6 Sistemin Elektrik Üretimini Hesaplanması

Fotovoltaik sistemlerin performansı, sistem bileşenlerinin verimlilikleri, çevresel ve meteorolojik verilerle birlikte saatlik olarak, Schepel vd. çalışması doğrultusunda (5.26) yardımıyla hesaplanmıştır [181];

$$P_{PV} = G_{POA} \times n_{PV} \times A_{PV} \quad (5.26)$$

G_{POA} ; modül yüzeyine gelen ışınım miktarı, n_{PV} ; sistemin verimliliği, A_{PV} ; toplam modül yüzeyi alanıdır.

(5.27) doğrultusunda, fotovoltaik sistemin elektrik üretiminin hesaplanması, modül yüzeyindeki ışınım kayıpları ve dönüştürme verimliliği olmak üzere alt kısımlarda açıklanmıştır.

Modül yüzeyine gelen ışınım miktarını ifade eden teorik G_{POA} değeri, panellerin eğimi ve alanın azimut açısına göre Perez modeli doğrultusunda hesaplanmıştır. Ancak, modül yüzeyine çarpan ışınım; kirlenme, yansıma ve gölgeleme nedeniyle hücrelere ulaşmadan kayba uğramaktadır. Yüzeydeki ışınım miktarı hesaplandıktan sonra, (5.27)'de yer alan verim kayıpları çarpanları ile gerçek değer hesaplanır.

$$G_{POA} = G_{C-gelen} \times n_{kirlenme} \times n_{yansima} \quad (5.27)$$

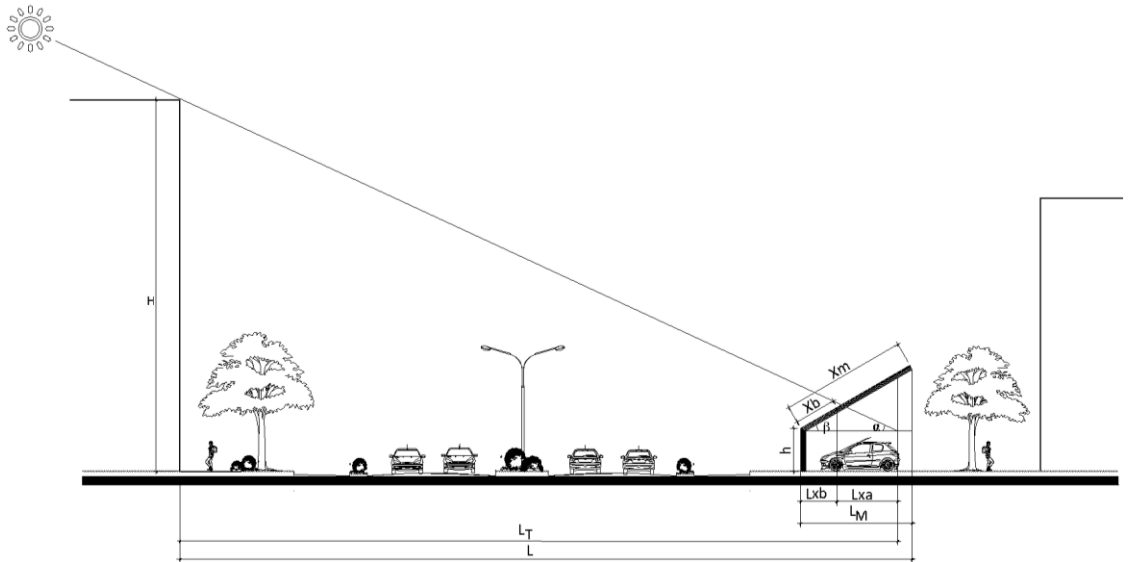
Kirlenme, panel yüzeyinde gelen güneş ışığının bir kısmını emen ve yansıtan toz birikmesidir. Kirlenmeden kaynaklanan verimlilik kaybı; havada bulunan toz miktarı ve yağış miktarının kirli bir modülün aralıklı temizliğini sağlayabilme becerisine bağlıdır [24].

Fotovoltaik sistemdeki toz etkisi, bölgenin iklimi ve panel eğimi başta olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Kirlenmeye bağlı ışınım kaybı, FV santralının konumuna bağlı olarak %1,5 ile %6,2 arasında değişmektedir. Erduman vd. tarafından İstanbul'da yapılan bir alan çalışmasında, fotovoltaik panel çıkış gücü periyodik aralıklarla ölçülerek kirlilik etkisi araştırılmıştır. Farklı zaman aralığı için sırasıyla 0.14 %/gün, 0.05 %/gün, 0.18 %/gün ve 0.12 %/gün değerleri elde edilmiştir [182]. Micheli vd. yıllık kirlenme kayıplarının %3 ile sınırlı

olduğunu belirtmiştir [183]. Bu çalışmada kirlenmeye bağlı ışınım kaybı yıllık %3 olarak hesaplara dahil edilmiştir.

Modelde, hesaplama dahil edilen ışınım kaybı güneş ışığının panel yüzeyinde yansımından kaynaklanır. Geliş etkisi (“incidence effect” veya “Incidence angle modifier”, IAM) terimi ile ifade edilen kayıp, STC performansının aksine, geliş açısı ile artan panel yüzeyi üzerindeki yansılardan kaynaklanmaktadır. Modelde, yıllık yansıma kaybının %4 olduğu sabit kayıp oranı hesaba dahil edilmiştir [184].

Modül yüzeyindeki gölgelemeye bağlı ışınım kaybının, modül yüzeyine gelen güneş ışığının çevredeki kütleler tarafından engellenmesinden kaynaklandığı kabul edilir. İstanbul’da herhangi bir alan için çevrimiçi gölgeleme miktarı hesaplanması çalışmanın çerçevesinde yer almayan yoğun bir hesaplama gerektirir. Alternatif bir yaklaşım olarak, Aronova vd. tarafından geliştirilen hesaplama algoritması, güneş ışınımı tahmin aracına entegre edilmiştir [185]. Gölgeleme etkisinin sistem performansı üzerindeki etkisinin tahmin edilmesinde, Şekil 5.15’de gösterilen parametrelerle aşağıdaki hesaplama şeması kullanılmıştır;



Şekil 5.15 Yolun karşısındaki binaların, güneş panelleri üzerindeki gölge oranını belirleyen hesaplama şeması

Şemada belirtilen semboller aşağıdaki gibidir;

- L Yol genişliği + FVGE genişliği
- H Yolun karşısında, gölgelemeye sebep olacak binaların ortalama yüksekliği
- L_M Güneş modüllerinin yatay izdüşümü
- X_b Modülün gölgelenen bölümü
- X_M Modülün genişliği
- α Güneş yükseklik açısı
- β Modülün eğim açısı
- h Gürültü engeli dikey bölümü yüksekliği

Gölgeleme oranı hesaplamasının yapılabilmesi için aşağıdaki parametreler kullanıcı tarafından araca tanımlanmalıdır;

- Engelin karşısındaki binaların ortalama yüksekliği (H),
- Yol genişliği (L),
- Tasarım alanının azimut değeri.

Engelin dikey bölümü yüksekliği, engel başlığı genişliği ve başlık eğimi parametreleri veritabanından filtrelenen alternatiflerden senkronize olarak alınmaktadır.

(5.28) yardımıyla, yılın her saati için gölgelenen kısım hesaplanır. L_{xb} , modülün gölgelenen kısmının yatay bir düzlemde izdüşümüdür ve (5.29) ile hesaplanır;

$$X_b = \frac{L_{xb}}{\cos\beta} \quad (1) \quad (5.28)$$

$$L_{xb} = \frac{\tan\alpha \times (L_M + L_T - L)}{\tan\alpha + \tan\beta} \quad (5.29)$$

Güneş modüllerinin yatay düzlemdeki izdüşümü, modülün boyutuna ve yatay eğim açısına bağlıdır ve (5.30) ile hesaplanır;

$$L_M = X_M \times \cos\beta \quad (3) \quad (5.30)$$

Aynı hesaplama adımları, engele bitişik olan yapı cephesinin zemin katındaki gün ışığı kaybının belirlenmesi için de kullanılmaktadır. Günışığı kaybı hesaplamalarında izlenen adımlar aşağıda açıklanmıştır;

- H ile ifade edilen girdi bölümüne, FVGE alternatiflerinin toplam yüksekliği araç tarafından senkronize olarak tanımlanır,
- Engel ve blok arasındaki mesafe kullanıcı girdilerinden çekilir,
- Cephedeki gölge miktarı hesaplandığı için, eğim bölümüne araç tarafından 90° tanımlanarak hesaplama yapılır.

FV sistemin verimliliği, modül verimliliği ve diğer sistem bileşenlerinin verimliliği olmak üzere iki ana faktörden etkilenir. Modül verimliliği, yüzeydeki ışınım kaybı ve STC performansının üzerindeki sıcaklıklardan dolayı düşer. Sistem verimliliği ise, modüller tarafından üretilen elektriğin taşınmasında ve dönüştürülmesinde kayıplara neden olan sistem bileşenlerinden etkilenmektedir [181]. Kayıpların kümülatif etkisini hesaplamak için (5.31)'deki verimlilik zinciri modeli uygulanmaktadır;

$$\eta_{PV} = \eta_T \times \eta_M \times \eta_{kablo} \times \eta_{MM} \times \eta_{MPPT} \times \eta_{inv} \quad (5.31)$$

η_T sıcaklığa bağlı modül verimliliğini temsil eder. Hesaplanmasında, sıcaklığa bağlı verim kaybının ışınım ile birlikte değerlendirildiği çalışma referans alınmıştır ve (5.32), (5.33) ve (5.34)'te gösterilen hesaplama adımları izlenmiştir [186].

$$\eta_T = 1 - \gamma (T_c - 25) \quad (5.32)$$

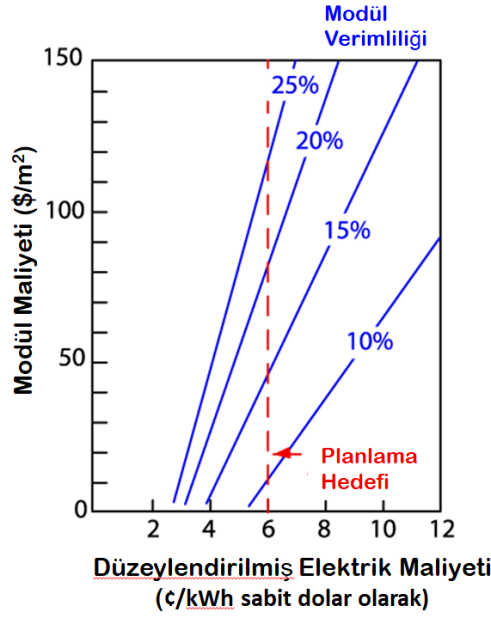
$$T_c = T_a + C_T G_{POA} \quad (5.33)$$

$$C_T = \frac{NOCT - 20}{0,8 \times G_{STC}} \quad (5.34)$$

γ (sıcaklık katsayısı) ve NOCT (Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı), teknik parametrelerdir ve modül üreticisi tarafından sağlanan verilerdir. Bu değerler, üretici firmaya ve modül teknolojisine göre değişmektedir. Verilerin temini sağlanamadığında ortalama değerlerle hesaplama yapılabilir. Bu çalışmada, genel bir değerlendirme yapabilmek için NOCT 48°C, γ ise -0,5%/°C olarak hesaplamaya dahil edilmiştir [187].

İstanbul ili için, her ayın tavsiye edilen ortalama gününe ait 05:00-20:00 arasındaki saatlik hava sıcaklıkları verileri Meteonorm veri tabanından alınarak hesaplama yapılmıştır.

η_M modül verimliliğini temsil eder. Modül teknolojisi, modül verimliliğini ve modülün birim maliyetini etkileyen temel parametredir. Sabit birim enerji maliyeti ve modül verimliliklerine göre birim maliyeti ilişkisi Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Laboratuvar koşullarında mevcut teknoloji ile %25 verimliliğe sahip güneş hücreleri üretmek mümkündür. Ancak, ticari olarak ve kitlesel üretimde yaygınlaşmamıştır. Bu nedenle, çalışma kapsamında %20 ve %15 verimliliğe sahip modül tipleri hesaplamalara dahil edilmiştir.



Şekil 5.16 Modül verimliliği ve modülün birim maliyeti ilişkisi

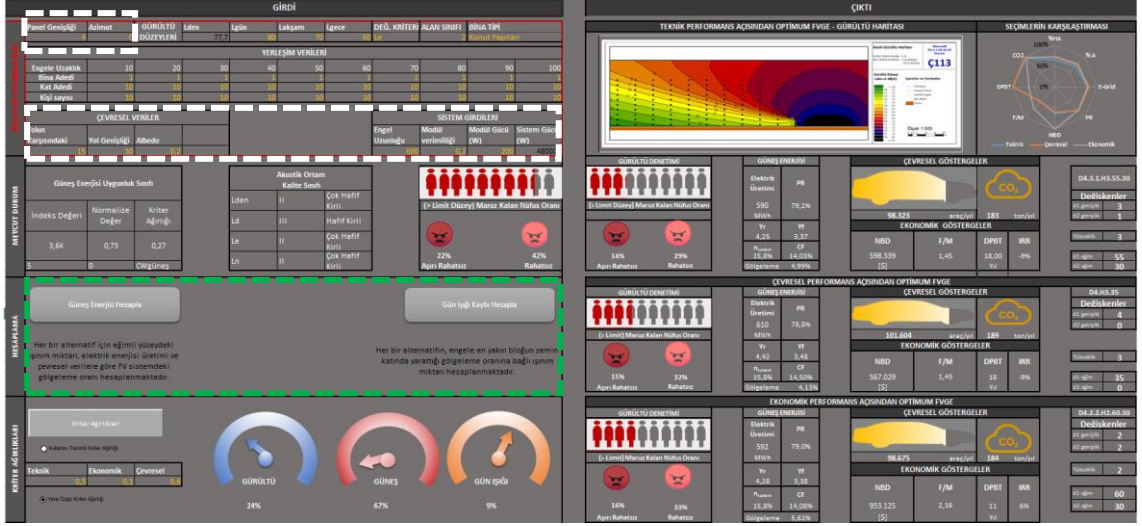
η_{kablo} , η_{MM} , η_{MMPPT} , η_{inv} sistem bileşenlerinin verimliliklerini temsil eder. Kablo kayıpları, modül uyumsuzluğu kayıpları ve maksimum güç noktası izleme kayıpları sistem bileşenleri kayıplarıdır. Çalışma kapsamında geliştirilen modelde, sistemde birkaç sabit verimlilik kaybı olduğu kabul edilmiştir.

η_{inv} , evirici (inverter) verimini ifade eder. Evirici, fotovoltaik sistemlerin performansını etkileyen kritik bir bileşendir. Evirici verimliliğini tanımlamak için genellikle 'pik verimlilik tanımı' kullanılsa da, ışıınım gün içinde değiştiği için ve evirici kısa bir süre maksimum verimde olduğu için inverterin gerçek performansını yansıtmaz. EN 50530 standardında "şebekeye bağlı fotovoltaik eviricilerin genel verimliliği", bir orta Avrupa ikliminin tüm bir yıllık enerji dağıtımını için ortalama ağırlıklı verimlilik olan Avrupa verimliliğini (European

Efficiency) hesaplama prosedürünü açıklar. Farklı özelliklere sahip 5 eviricinin; çeşitli iklim, ışınım değerleri ve sistem kapasitesine göre değerlendirildiği raporda, İstanbul'un iklimini temsil eden ılıman-kıyı ikliminde ağırlıklı inverter verimliliğinin %89,1 ve %97,7 arasında değiştiği görülmüştür [188]. Ağırlıklı evirici verimliliği için, bu sonuçların ortalaması olan %94 değeri kullanılmıştır.

η_{MM} , modül uyumsuzluğu kayıplarını temsil eder. Modül uyumsuzluğu kayıpları, bir dizideki modüller dizide güç kaybına yol açan farklı akımlar ürettiğinde meydana gelir. η_{kablo} , kablo kayıplarını temsil eder. Kablo kayıpları, kablonun elektriksel direncinden kaynaklanmaktadır. η_{MPPT} , maksimum güç noktası kaybı takibi kaybını temsil eder. MPPT kayıpları, fotovoltatik modüllerin münferit ışınım kayıpları nedeniyle sistemde birden fazla maksimum güç noktasının ortaya çıkması nedeniyle meydana gelmektedir. Bu çalışmada, modül uyumsuzluğu kayıplarının %1, kablolama kayıplarının %1 ve MPPT kayıplarının %1 olduğu kabul edilmiştir [184].

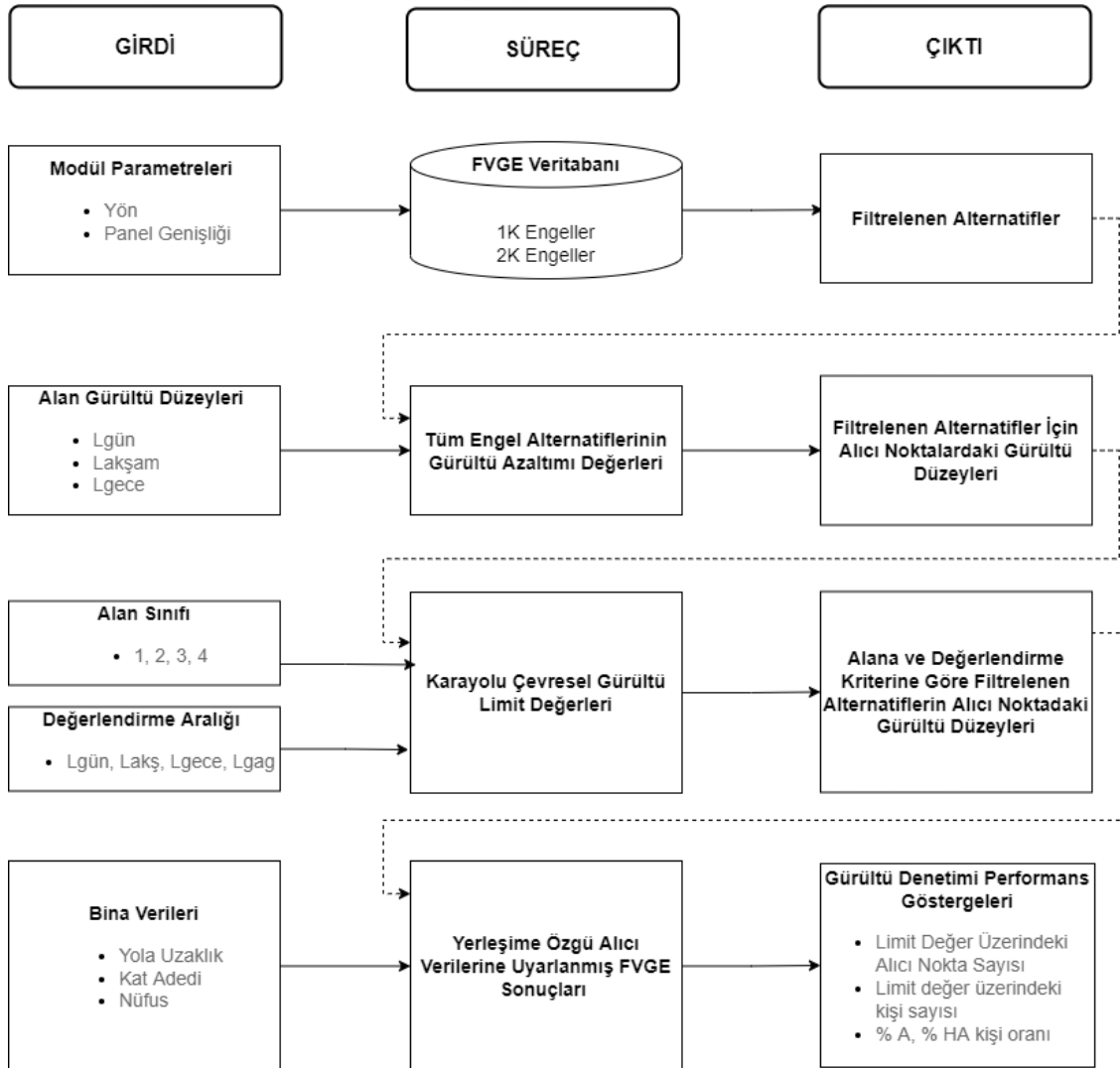
Geliştirilen güneş enerjisi modülünün kullanıcı ara yüzü Şekil 5.17'de, beyaz çerçeve ile işaretlenmiştir. Modül parametreleri (yön ve panel genişliği), çevresel veriler ve FV sistem verileri araç arayüzüne tanımlandıktan sonra hesaplama bölümünde bulunan 'Güneş Enerjisi Hesapla' ve 'Gün Işığı Kaybı Hesapla' butonlarına sırasıyla tıklanmalıdır. Bu butonlar, filtrelenen FVGE alternatiflerinin döngüsel güneş enerjisi hesaplamalarını Excel Macro'su ile başlatmaktadır. Hesaplama butonları Şekil 5.17'de yeşil çerçeve ile gösterilmiştir. Şekilde yer alan girdilere göre Ocak ayı için örnek bir hesaplama tablosu, Ek-H'de yer alan tabloda gösterilmiştir.



Şekil 5.17 FVGE karar destek aracının ara yüzü ve güneş enerjisi modülünün girdi tablosu

5.2.2 Gürültü Denetimi Modülünün Geliştirilmesi

Gürültü denetimi modülü, FVGE veritabanında yer alan engel alternatiflerinin, mevcut gürültü düzeylerine göre alıcı noktalardaki gürültü azaltımını belirlemek hedefine uygun olarak geliştirilmiştir. Bu hedef doğrultusunda, geliştirilen 252 adet engel alternatifinin modellendiği bir kentsel ortam kurgulanmıştır. Engel alternatifleri, SoundPLAN yazılımında oluşturulan kentsel ortamda modellenerek gürültü azaltımı çıktıları araca kaydedilmiştir. Gürültü düzeyleri, alan sınıfı ve yerleşim verileri gibi alana özgü değişkenlere göre kayıtlı veriler uyarlanarak değerlendirme kriterine dayalı gürültü denetimi performans göstergeleri elde edilmektedir. Modülün akış diyagramı Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 Gürültü denetimi modülünün çalışma prensibi

5.2.2.1 Gürültü Denetimine İlişkin Veri ve Kabuller

FVGE veritabanındaki engel alternatiflerinin, gürültü denetimine etkisini değerlendirmek için SoundPLAN 7.2 gürültü haritalama yazılımı aracılığıyla tek nokta gürültüleri hesaplanmış ve kesit gürültü haritaları oluşturulmuştur. FVGE alternatiflerinin modellendiği kentsel ortamın kurgulanmasında, karayolu, iklim, çevre ve alıcı noktalara ilişkin varsayımlar yapılmıştır.

Karayolunun özelliklerine ilişkin kabuller belirlenirken, ilk olarak, model için mevcut bir alan ve yol seçilmemiştir. Karayolu gürültü düzeyinin (1 metre uzaklıkta) gündüz zaman aralığında 80 dBA, akşam zaman aralığında 70 dBA ve gece zaman aralığında 60 dBA olmak üzere üç farklı düzeyde olduğu kabul edilmiştir. Trafik akımı sürekli akım olarak tanımlanmıştır. Çalışma çıktıları, engellerin alıcılarda sağladığı gürültü azaltımı üzerinden araca kaydedildiği için farklı zaman aralıkları için sadece bir gürültü düzeyi modellenmesi yapılmıştır.

ÇGDYY'nin eylem planları hazırlama esaslarında belirtildiği gibi, “yılda altı milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları” gürültü denetimi gerektirir. Fotovoltaik gürültü engelleri konumlandırılırken alanın; yoğun karayolu trafik gürültüsüne maruz kalması, güneş enerjisi potansiyeline sahip olması ve güneş panelleri üzerinde gölgelemeye bağlı üretim kaybının minimum olması için otoyolun yeterli genişlikte olması gerekmektedir.

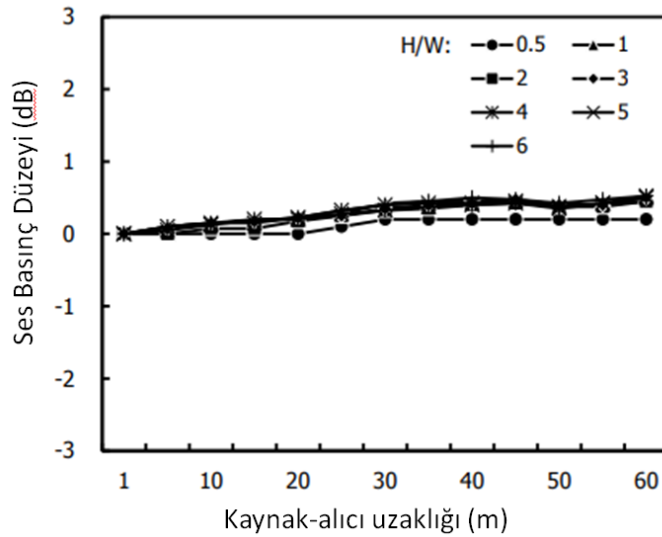
Trafik gürültüsüne maruz kalan otoyol genişliği ve engel karşısında bulunan binaların yüksekliklerinin, çalışma çıktılarına iki noktada etkisi vardır;

- Gürültünün yayılmasında, yansımadan dolayı engel alanındaki gürültü düzeyine katkısı,
- Fotovoltaik sistemin gölgelemeye bağlı ışınım miktarındaki kaybı.

Bu bölümde, gürültü denetimi etkisi kapsamında, yolun genişliği ve yol kenarındaki binaların yüksekliklerinin, engel alanındaki gürültü düzeyine katkısı araştırılmıştır. Bu doğrultuda, yüksek binaların çevrelediği kentsel ortamlardaki gürültünün yayılmasına ilişkin literatür taraması yapılmıştır. Bir sokak kanyonu, yatay ve dikey yüzeylerin birleşiminden oluşur ve bu nedenle bina yüksekliğinin

sokak genişliğine oranı, bir sokağın onu kullanan insanlar için ne kadar kapalı algılandığını belirler [19]. Sokak kanyonlarında yükseklik/genişlik oranının ses yayılımına etkisi üzerine yapılan çalışmalarda, değişen sokak genişlikleri ve değişen bina yüksekliklerinin kombinasyonları incelenmiştir [189]–[191]

Trafik gürültüsünün incelendiği 27 m genişlikteki yollarda, çizgisel kaynağın ses yayılımında farklı bina yüksekliği/yol genişliği (H/W) oranlarının ses yayılımı üzerinde önemli bir artış yaratmadığı ($<0,5$ dB), neredeyse sabit olduğu görülmüştür (Şekil 5.19). Noktasal gürültü kaynaklarında ise, H/W oranının ses yayılımı üzerindeki etkisinin yalnızca $H/W = 0,5-2$ aralığında kısmen önemli olduğunu ve bu arada, sokak genişliğindeki artışla etkinin azaldığını göstermektedir [192]. Başka bir deyişle, bina yüksekliğinin artması, daha geniş sokaklarda ses basınç düzeyine önemli bir katkı yaratmamaktadır.



Şekil 5.19 Kaynak-alıcı arasındaki mesafe ve H/W ilişkisine göre ses basınç düzeyindeki artış grafiği [192]

İstanbul Otoyol haritası incelendiğinde, otoyolların en az 4 en fazla 8 şeritli olduğu görülmüştür. Karayolu tasarım el kitabına göre; maksimum şerit genişliği (3,5 m), emniyet şeridi (4 m), refüj (4 m), kaldırımlar (2 m) olarak ele alınmıştır. Buna göre, İstanbul'da gidiş-dönüş 4 şeritli yol 44 m, 3 şeritli yol 37 m, 2 şeritli yol 30 m genişliğindedir. Çalışmamızda ele alınan yol genişlikleri 30 – 44 m arasında, bina yükseklikleri 3 – 30 m arasında olduğu için değişkenler,

Lee ve Kang'ın çalışmasında yer alan kombinasyonlarla uyumludur [4]. Bina yükseklikleri ve yol genişliklerine göre değişen H/W oranları Tablo 5.6'da gösterilmiştir. Binaların minimum yüksekliğinin zeminden bir sonraki kata kadar olan standart yüksekliğe karşılık gelen 3 m olduğu varsayılmıştır.

Tablo 5.6 Bina yüksekliği ve yol genişliği değişkenlerine göre H/W oranları

		Bina Yükseklikleri (m)									
H/W Oranı		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Yol Genişliği (m)	30	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	37	0,08	0,16	0,24	0,32	0,41	0,49	0,57	0,65	0,73	0,81
	44	0,07	0,14	0,20	0,27	0,34	0,41	0,48	0,55	0,61	0,68

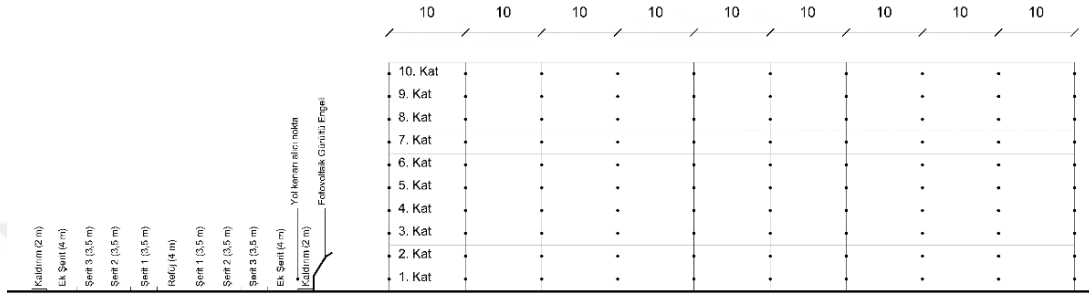
En dar yolun genişliğinin 30 m ve en büyük H/W oranı 1,00 olduğu için, çalışmada yolun karşısındaki binalardan yansıyan sesin, alıcıdaki gürültü düzeyine katkısı ihmal edilmiştir.

Kabuller doğrultusunda, örnek alan modeli için çizgisel kaynak olarak tanımlanan yol 37 m genişliğinde ve 1 km uzunluğundadır. Yol eğimi % 0 olarak atanmıştır ve yol kaplama tipi olarak bitümlü asfalt kaplama seçilmiştir. EC NMPB 96 standardına göre, zemin etkisi için 0,6 (orta yutuculuk) değeri tanımlanmıştır.

Karar destek aracı veritabanına kayıtlı FVGE alternatiflerinden bazılarının kesit gürültü haritası örnek olarak Ek I'da gösterilmiştir. Hesaplamalar için 2002/49/EC sayılı Avrupa Direktifi doğrultusunda, karayolu gürültüsü için NMPB-Routes 96 standardı kullanılmıştır.

Daha sonra, iklim ve çevreye ilişkin kabuller yapılmıştır. Oluşturulan kent formu toplam 0,5 km²'lik brüt taban alanı ile 1000 m x 500 m'lik ölçülere sahiptir. SoundPLAN ile yapılan çalışmada, sadece farklı boyutlara ve eğimlere sahip gürültü engeli başlıklarının etkinliğini gösterebilmek için trafik özellikleri, atmosferik şartlar ve topoğrafik şartlar sabit tutulmuştur. Engel yüksekliği, engel başlıklarının genişliği ve eğimleri değişken olarak ele alınmıştır.

Alanda herhangi bir kütle modellenmemiştir. Engelin uygulanması planlanan alanın arkasında, yatayda ve dikeyde 10 dizi olmak üzere toplam 100 alıcı nokta tanımlanmıştır. Alıcı noktalar, yatayda 10 m aralıklarla, dikeyde ise 3 m aralıklarla konumlandırılmıştır (Şekil 5.20). Bina kat yüksekliği tüm binalar için 3 m olduğu kabul edilerek en fazla 10 kat yüksekliğindeki binalar için alıcı noktalar atanmıştır. Alıcı noktalar ve karayolu arasında kot farkı olmadığı kabul edilmiştir.



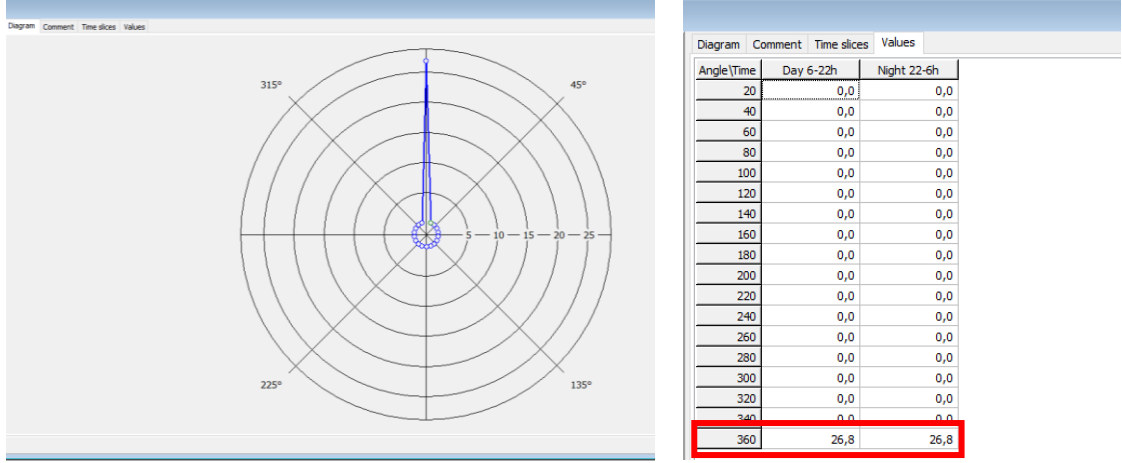
Şekil 5.20 Alıcı noktalar ile gürültü engelinin modellendiği alanın kesit görüntüsü (Autocad)

Engelin kaynağa uzaklığının belirlenmesinde, arsa sınırının olduğu bahçe duvarının yerine konumlandırıldığı kabul edilmiştir. Engel tipleri ek şeride 2 metre uzaklıkta modellenmiştir.

Meteorolojik veriler için Climate Consultant 6.0 yazılımı kullanılmıştır. Yazılıma veri sağlayan IWEC (International Weather for Energy Calculations) veritabanı, saatlik hava durumu verilerinden 18 yıla kadar türetilmiştir. Yıl boyunca ortalama rüzgar hızı 4,8 m/s (11 mph) ve hakim rüzgar yönü Kuzeydoğu'dur (Şekil 5.21). Veritabanının 18 yıllık dönem verilerine göre en yüksek rüzgar hızının 26,8 m/s (61 mph) olduğu görülmüştür. Modelde en kötü durum senaryosunu temsil etmesi için, bu hız ve hakim rüzgar engel yönünde tanımlanmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.21 İstanbul için aylara göre rüzgar hızı değerleri (mph) ve rüzgar yönleri (Climate Consultant)



Şekil 5.22 SoundPLAN yazılımına tanımlanan hakim rüzgar yönü ve rüzgar hızı

5.2.2.2 Gürültü Düzeyinin Değerlendirilmesine İlişkin Kabuller

FVGE projesi öngörülen alanın $L_{gün}$, $L_{akşam}$ ve L_{gece} gürültü düzeyleri için, yol kenarında yapılan ölçüm sonuçları veya gürültü haritalarından elde edilen veriler araca işlenmelidir. L_{gag} değeri ÇÇGDYY Ek-1’de yer alan (5.35) ile eş zamanlı olarak hesaplanmaktadır.

$$L_{gag} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(12 \times 10^{\frac{L_{gündüz}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{akşam} + 5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{gece} + 10}{10}} \right) \right] \quad (5.35)$$

İkinci olarak kullanıcı, gürültü denetiminden faydalanması planlanan yapı tipinin alan kategorisini açılır listeden seçmelidir. Bu adımla, Tablo 5.7’de yer alan, alan kategorisine göre “planlanmış/yenilenmiş/onarılmış yollar” için çevresel gürültü sınır değerleri araca tanımlanmaktadır. Kullanıcı, değerlendirmenin yapılmasını istediği zaman aralığını da açılır listeden seçtikten sonra hesaplamalar otomatik olarak yapılmaktadır.

Gürültüden etkilenen nüfusa ilişkin kabuller, FVGE karar destek aracında nüfus hesaplaması, modelde yer alan her bir alıcı noktaya belirli bir kişi sayısı ataması ile yapılmaktadır. Belirli bir uzaklık ve kat düzeyindeki cephe gürültü düzeyini temsil eden alıcı noktadaki ses düzeyinden kaynaklanan maruziyet belirlenirken, literatürdeki mevcut prosedürlerden NEAR metodu kullanılmıştır. Metot doğrultusunda, ilgili kattaki nüfus her kat düzeyi için oluşturulan gürültü haritalarından en yakın ızgara noktasına atanmıştır [193]. Yani, bir alıcı noktadaki

ses düzeyininin, alıcı noktanın temsil ettiği kattaki tüm kişileri etkilediği varsayılmıştır.

Tablo 5.7 Karayolu çevresel gürültü sınır değerleri [194]

Alanlar	Planlanan/Yenilenmiş/Onarılmış yollar		
	Lgündüz (dBA)	Lakşam (dBA)	Lgece (dBA)
1. Gürültüye hassas kullanımlardan eğitim, kültür ve sağlık alanları ile yazlık ve kamp yerlerinin ağırlıklı olduğu alanlar	60	55	50
2. Ticari yapılar ile gürültüye hassas kullanımların birlikte bulunduğu alanlardan konutların yoğun olarak bulunduğu alanlar	63	58	53
3. Ticari yapılar ile gürültüye hassas kullanımların birlikte bulunduğu alanlardan işyerlerinin yoğun olarak bulunduğu alanlar	65	60	55
4. Endüstriyel alanlar	67	62	57

Yönetmeliklerde alanlar için belirli limit değerler tanımlansa da, gürültüden etkilenme oranı insandan insana değişmektedir. Rahatsız olma miktarı Miedema vd. tarafından yapılan bir çalışmada az rahatsız, rahatsız ve aşırı rahatsız olmak üzere gruplanmıştır [195]. Bu çalışmada, karayolu trafik gürültüsü sebebi ile rahatsız ve aşırı rahatsız nüfus oranları, Miedema vd. tarafından geliştirilen (5.36) ve (5.37) yardımıyla hesaplanmıştır;

$$\% A = 1,795 \times 10^{-4} \times (L_{gag} - 37)^3 + 2,11 \times 10^{-2} \times (L_{gag} - 37)^2 + 0,5353 \times (L_{gag} - 37) \quad (5.36)$$

$$\% HA = 9,868 \times 10^{-4} \times (L_{gag} - 42)^3 - 1,436 \times 10^{-2} \times (L_{gag} - 42)^2 + 0,5118 \times (L_{gag} - 42) \quad (5.37)$$

% A : Rahatsız Kişi Yüzdesi (% Annoyed)

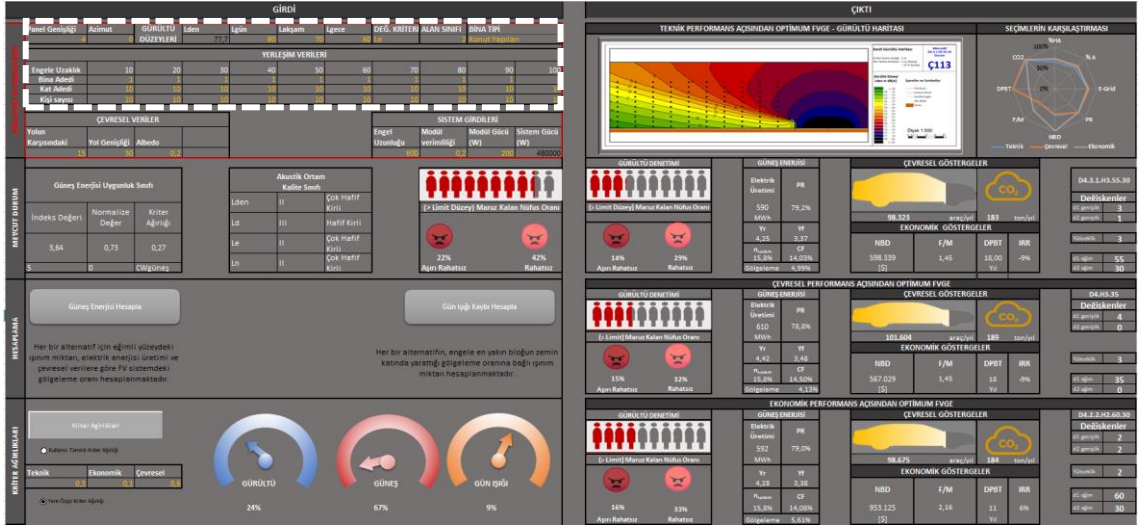
% HA : Aşırı Rahatsız Kişi Yüzdesi (% Highly Annoyed)

Gürültü denetimine ilişkin veri ve kabuller Tablo 5.8'da özetlenmiştir;

Tablo 5.8 Gürültü denetimine ilişkin veri ve kabuller

Karayollarından yayılan gürültünün hesap yöntemi	NMPB - Routes – 96			
Trafik Akışı	Sağ Taraftan			
Emisyon Standardı	Guide du Bruit			
Yol Tipi	Bölünmüş Yol			
Şerit Genişliği	3,5 m			
Refüj Genişliği	4 m			
Kaldırım Genişliği	2 m			
Bağıl Nem	%71,65			
Sıcaklık	13,9° C			
Değerlendirme	Lgag, Lgündüz, Lakşam, Lgece (TR) – road new			
Hesaplama	Tek Nokta Gürültüsü ve Kesit Gürültü Haritası			
Zeminden Yükseklik	1,5 m			
Zaman Dilimi	Lgündüz (07:00-19:00) Lakşam (19:00 – 23:00) Lgece (23:00 – 07:00)			
Zemin Etkisi	0,6 (orta Yutuculuk)			
Gürültü Düzeyleri	(Yoldan 1 m uzakta) Gündüz; 80 dBA, Akşam; 70 dBA Gece; 60 dBA			
Kabul Edilebilir Gürültü Düzeyi	Alan	L _{gündüz} (dBA)	L _{akşam} (dBA)	L _{gece} (dBA)
	1	60	55	50
	2	63	58	53
	3	65	60	55
	4	67	62	57

Aracın gürültü düzeyinin, değerlendirme kriterlerinin ve yerleşim verilerinin tanımlandığı arayüz Şekil 5.23'de beyaz çerçeve ile gösterilmiştir. Metin rengi turuncu olan hücrelere kullanıcı girdisi veya seçimi gerekmektedir. Metin rengi siyah olan hücre ise girdiler doğrultusunda senkronize bir şekilde hesaplanmaktadır. Gürültü denetimi modülü için hesaplama butonuna gerek bulunmamaktadır. Filtrelenen alternatiflerin gürültü azaltımı çıktıları, kullanıcı girdileri doğrultusunda araca gömülü veritabanından çekilmektedir.



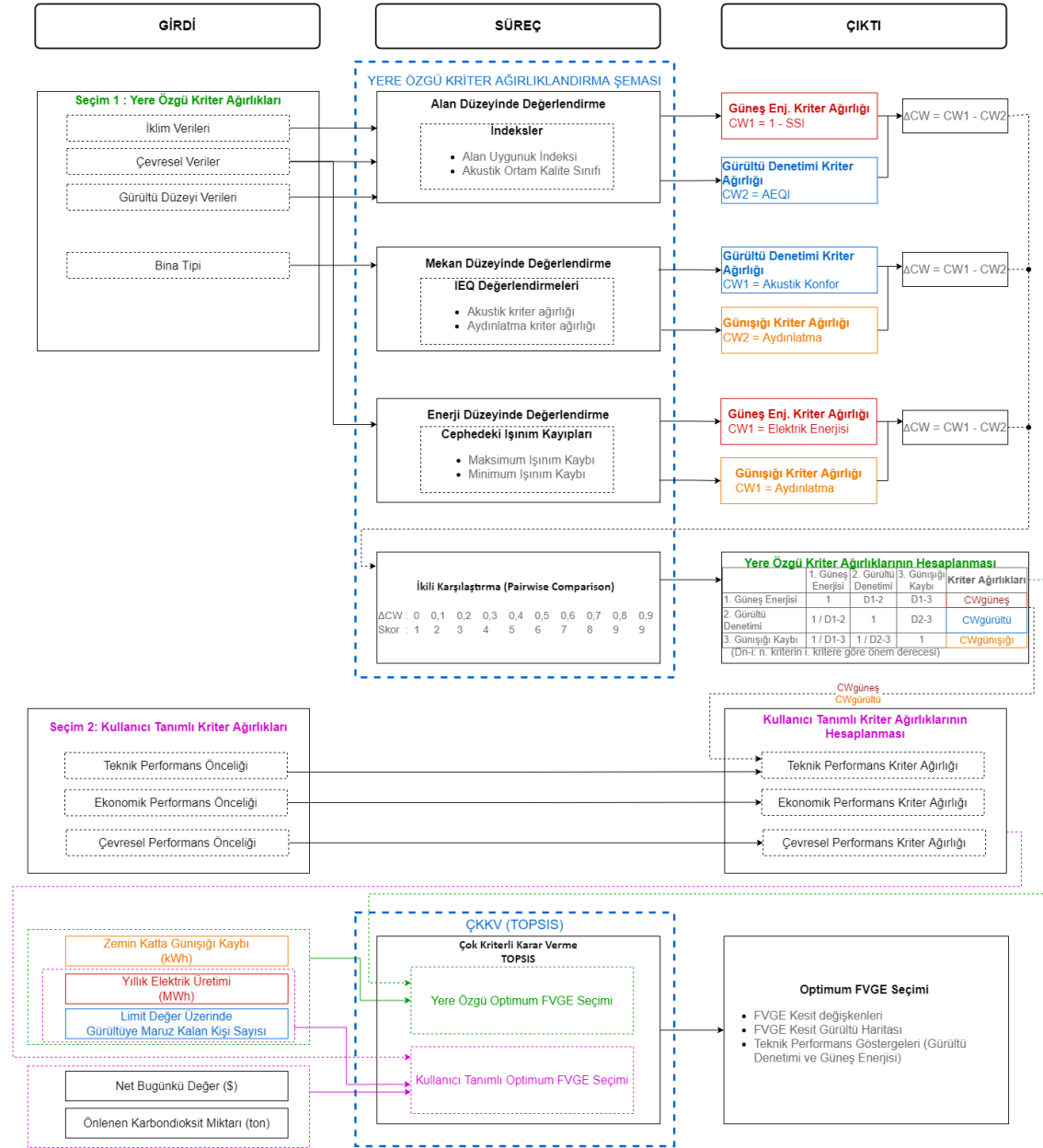
Şekil 5.23 FVGE karar destek aracının ara yüzü ve gürültü denetimi modülünün girdi tablosu

5.3 Performans Analizi

Performans analizi bölümünde, objektif ve subjektif kriter ağırlıklandırma alternatiflerine olanak tanıyan bir şema geliştirilmiştir. Araç arayüzünün kriter ağırlıkları bölümünde, yere özgü kriter ağırlıkları ve kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları olmak üzere iki seçenek bulunmaktadır. Kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları seçeneği, kullanıcının teknik, çevresel ve ekonomik performans öncelikleri doğrultusunda subjektif bir ağırlıklandırma sağlar. Yere özgü kriter ağırlıkları seçeneği ise, alan özelliklerinin uluslararası indekslerle değerlendirilip gürültü denetimi ve güneş enerjisi performansı önceliğini objektif olarak sınıflandırma prensibine dayanır.

Yere özgü kriter ağırlıkları bölümünde, fiziksel çevre faktörlerinin önceliklendirilmesine yönelik kriter ağırlıklandırma şeması geliştirilmiştir. Kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları subjektif girdiler olsa da, güneş enerjisi ve gürültü denetimi önceliğinin teknik performans içindeki oranları, yine yere özgü değerlendirmeden sağlanmaktadır. Daha sonra TOPSIS yöntemi adımları araca tanımlanmıştır. İklimsel veriler, çevresel veriler, gürültü düzeyi verileri ve bina tipi girdileriyle, yere özgü veya kullanıcı tanımlı optimum FVGE kesiti değişkenlerini ve performans göstergelerini sunan bir modül olması hedeflenmiştir. Performans analizi bölümünün çalışma prensibi Şekil 5.24’de gösterilmiştir.

FVGE karar destek aracında optimum seçim yapılırken, alternatiflerin teknik performans değerleri Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodlarından biri olan TOPSIS ile kriter ağırlıklarına göre karşılaştırılarak ideal seçim belirlenmektedir.



Şekil 5.24 Performans analizi bölümünün çalışma prensibi

5.3.1 Kriterleri Ağırlıklandırma Şemasının Geliştirilmesi

Çok kriterli karar vermede kilit adım, her performans kriterinin göreceli ağırlıklarının atanmasıdır [196]. Ağırlıkların sınıflandırılması, objektif, subjektif ve birleşik ağırlıklandırma olarak 3 kategoriye ayrılabilir [197].

Tekniklerin birbirlerinden farklı avantajları ve dezavantajları vardır. Subjektif yöntemlerin ana dezavantajı uzman görüşlerindeki potansiyel belirsizlik iken, objektif yöntemler karar vericilerin uzmanlığından ve deneyimlerinden yoksundur [198]. Ayrıca karar vericilerin değerlendirmelerinde, kendilerine yöneltilen soruları gerçekte nasıl algılayıp yorumladıkları hakkında çok fazla bilgiye sahip olunamadığından, öznel ağırlıklar her zaman cevap hatasına açıktır [199], [200]. Nitekim, analistlerin rolü dikkate alındığında karar analizlerinde birçok önyargı ve hata olabilir [201]. Ayrıca karar vericilerin muhakemesi bazı durumlarda bilgiye bazı durumlarda ise deneyime bağlıdır [202]. Dolayısıyla, kriter ağırlıkları belirlenirken, nesnellik ve özneliğin uygun bir dengesi yakalanmalıdır.

Çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesinde, bilirkişi görüşü kadar deneyimin de önemi kabul edilmiştir. Kriterleri değerlendiren kişinin, elektrikli araç kullandığı için şarj istasyonlarına erişim sorunu yaşamaması ve yaşam alanında aralıksız gürültüye maruz kalması, sorunlarının çözümünde manzaranın engellenmesine ne ölçüde tolerans gösterebileceğinin görece önemlerinin değerlendirilebilmesi için deneyimin varlığı kritiktir.

Bu çalışmada, kriter ağırlıklandırma iki farklı şekilde yapılabilmektedir. İlkinde, 'kullanıcı tanımlı kriter ağırlığı' seçeneği işaretlenerek teknik, çevresel ve ekonomik performans kriterleri için ağırlıklar kullanıcı tarafından tanımlanabilir. Teknik performans, güneş enerjisi ve gürültü denetimi performans çıktılarını dikkate alır. Güneş enerjisi ve gürültü denetiminin kriter ağırlıkları oranı için, yere özgü kriter ağırlığının belirlenmesinde kullanılan ağırlıklandırma şemasından yararlanılır. Ekonomik performans göstergesi olarak net bugünkü değer, çevresel performans göstergesi olarak önlenen karbondioksit miktarını hesaplamaya dahil ederek TOPSIS metoduyla kullanıcı tanımlı optimum seçim belirlenir.

'Yere Özgü Kriter Ağırlığı' seçimi ise, objektif ağırlıkların ikili karşılaştırma ile değerlendirmesine dayalı entegre bir ağırlıklandırma şeması sunar. Kriter ağırlıklandırma aşamasının akış şeması Şekil 5.24'te yer almaktadır. Kriterlerin ağırlıklarının nicelleştirilmesi için, alan, mekan ve enerji düzeyinde ağırlıklandırma şemaları geliştirilerek kriterlerin ikili karşılaştırmaları AHP metodu ile yapılmıştır.

5.3.1.1 Alan Düzeyinde Değerlendirme

Çevresel gürültü kirliliği ve alanların FV sistemler için uygunlukları, konumsal bir olgudur. Gürültü düzeyi, gürültü kaynağı ve çevresel özelliklere göre; güneş enerjisi potansiyeli ise iklimsel ve çevresel parametrelere bağlı olarak coğrafi konuma göre değişir. Bu nedenle, çalışmada karar vericilerin öznel görüşüne ve önyargısına yer bırakmamak amacıyla, kriterlerin değerlendirilmesinde literatür taramasındaki indekslerden yararlanılmıştır.

Gürültü denetimi ve güneş enerjisi potansiyeli bağlamında literatürde yer alan indeksler Ek-J'de yer alan tabloda listelenmiştir. Çalışma kapsamında akustik konfor düzeyi ve güneş enerjisi potansiyeli açısından kullanılan indeksler kırmızı ile gösterilmiştir ve alanların öncelikleri indeksler doğrultusunda belirlenmiştir.

Alanların akustik konfor kalitesinin belirlenmesinde, gürültünün insanların yaşamında neden olduğu rahatsızlığın boyutu dikkate alınmaktadır. Ek-J Tablo J.1'de gürültü düzeyinin ölçeklendirildiği çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Alan çalışması kapsamında Hui vd. tarafından geliştirilen akustik ortam kalite düzeyi sınıflandırması kullanılmıştır [203]. Çalışmada kişi başına düşen gürültü kirliliği indeksi (5.38), (5.39) ve (5.40) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TTNEM = \sum_{i=1}^m (n_{pi} (\Delta LA_i)) \quad (5.38)$$

$$n_{pi} = \sum_{i=1}^n (abpab) \quad (5.39)$$

$$ATNEM = TTNEM / N \quad (5.40)$$

TNEM	Trafik Gürültü Değerlendirme Modeli, toplam gürültü kirliliği miktarı, dB(A)
m	Alanın bölümlendiği parça sayısı
ΔLA_i	Standartta belirtilen limiti aşan gürültü düzeyi değeri
n_{pi}	Her bir parçadaki, gürültüye maruz kalan kişi miktarı
n	Binaların adedi
a	Her binanın kat adedi
b	Her kattaki daire sayısı
pab	Her bir hanedeki kişi sayısı
ATNEM	Kişi başına düşen gürültü kirliliği indeksi, dB(A)
N	Tüm alandaki toplam kişi sayısı

Çalışmada, bölgenin fonksiyonel özelliklerine ve çevresel kalite gereksinimlerine göre, değerlendirme yapılacak alanlar daha küçük parçalara ayrılır. Bu

çalışmada, binaların karayoluna uzaklıklarına göre değerlendirme alanları parçalanarak her kısım için, L_{gag} , $L_{gündüz}$, $L_{akşam}$ ve L_{gece} gürültü düzeyleri hesaplanmıştır. Her parça için, limit düzeyin üzerinde gürültü düzeyine maruz kalan kişi sayısını, alandaki toplam kişi sayısına oranı toplanarak akustik kalite sınıfı karşılığı elde edilir.

Tablo 5.9'un, son sütunda verilen akustik kalite sınıflarına karşılık gelen kriter ağırlığı gürültü denetimi kriter ağırlığı olarak kabul edilir.

Tablo 5.9 Akustik ortam kalite sınıfları ve kriter ağırlıkları

ATNEM	Akustik Ortam Kalite Sınıfı	Akustik Ortam Kalite Durumu	Kriter Ağırlığı ($C_{wgürültü}$)
0	I	Kirlilik yok	0
$0 < ATNEM \leq 5$	II	Çok hafif kirli	0,2
$5 < ATNEM \leq 10$	III	Hafif kirli	0,4
$10 < ATNEM \leq 15$	IV	Kısmen kirli	0,6
$15 < ATNEM \leq 20$	V	Ciddi ölçüde kirli	0,8
>20	VI	Aşırı derecede kirli	1

Alanların güneş enerjisi potansiyeli, çevresel, sosyal ve finansal olarak bir çok kritere bağlıdır. Ek J'de yer alan tabloda, alanların güneş enerjisi üretim sistemi kurulumuna uygunluğunu belirleyen bazı indeksler listelenmiştir. İndeksler farklı iklim bölgelerinde ve farklı kriterleri dikkate alan değerlendirme sistemlerine sahiptir.

Bu çalışmada, alanın güneş enerjisi uygunluğunun belirlenmesinde Doljak ve Stanojevic tarafından geliştirilen, karar verme bilimine dayalı alan uygunluk indeksi kullanılmıştır [204] (Tablo 5.10). Aracın geliştirildiği alan olan İstanbul iline ait veriler son sütuna yazılmış ve dereceler sütununda sarı ile renklendirilmiştir. Dereceler (5.41) yardımıyla hesaplanarak 1 ile 5 arasında bir değer alır. Alınan değer 0 ile 1 arasında olmak üzere normalize edilir.

$$SSI = [AC_w \times ((A_1F_w \times A_1G) + (A_2F_w \times A_2G) + (A_3F_w \times A_3G) + (A_4F_w \times A_4G)] + [BC_w \times ((B_1F_w \times B_1G) + (B_2F_w \times B_2G)] + [CC_w \times (C_1F_w \times C_1G)] \quad (5.41)$$

Tablo 5.10 Güneş enerjisi uygunluk indeksinin, alt kriter ağırlıkları ile atanan dereceleri [204]

Kriter Ağırlığı (Cw)	Kriter	Faktör Ağırlığı (Fw)	Tanım	Sınıflar	Dereceler (G)	İstanbul
0,648	İklim (A)	0,471	(A1) Küresel Güneş Işınımı [kWh/m ² /year]	<413,982	1	1365
				413,982-746,758	2	
				746,758-1079,535	3	
				1079,535-1412,311	4	
				<1412,311	5	
0,284	(A2) Güneşlenme Süresi [h]	0,284	(A2) Güneşlenme Süresi [h]	<1958,903	1	2446
				1958,903-1972,660	2	
				1972,660-1986,417	3	
				1986,417-2000,174	4	
				>2000,174	5	
0,171	(A3) Hava Sıcaklığı [°C]	0,171	(A3) Hava Sıcaklığı [°C]	<2,277	5	14,7
				2,277-4,716	4	
				4,716-7,156	3	
				7,156-9,956	2	
				>9,956	1	
0,074	(A4) Bağıl Nem [%]	0,074	(A4) Bağıl Nem [%]	<75.372	5	71%
				75.372-76.854	4	
				76.854-78.336	3	
				78.336-79.817	2	
				>79.817	1	
0,23	Orografi (B)	0,667	(B1) Eğim [°]	<2	5	0
				2-5.	4	
				5-12.	3	
				12-32.	2	
				>32	1	
0,333	(B2) Yön	0,333	(B2) Yön	(0°-18°) (-18°-0°)	5	Güney
				(18°-36°) (-36° - -18°)	4	
				(36°-54°) (-54° - -36°)	3	
				(54°-72°) (-72° - -54°)	2	
				(72°-90°) (-90° - 72°)	1	
0,122	Vejetasyon	1	(C1) Vejetasyon İndeksi	<0	5	0%
				0-0,2	4	
				0,2-0,4	3	
				0,4-0,6	2	
				>0,6	1	

Tablo 5.10'de sabit olan değerler sarı ile vurgulanmıştır. Çalışma İstanbul sınırlarında yapıldığı için küresel güneş ışınımı, güneşlenme süresi, bağıl nem değerleri İstanbul için sabit olan değerlerdir. Çalışma kapsamında güneş panellerinin ortalama eğimleri 32°den büyük ve sabit olduğu kabul edilmiştir. Otoyol kenarındaki kahverengi alanlarda vejetasyon uygulaması olmasa da, ağaç ve çalı gibi ihtimaller göz önünde bulundurularak 0-0,2 arası vejetasyon indeksi sabit olarak kabul edilmiştir. Yeşil ile vurgulanan alanın yönü, kullanıcı tanımlı arayüzü girdisi olan azimut değerinden elde edilmektedir. Referans gösterilen çalışmada yön değerleri güney ile kuzey arasındaki yönler için 5 dereceye ayrılmıştır. Bu çalışmada ise, FVGE alternatiflerinin sadece doğu ve batı azimut aralıklarında uygulanabilir olduğu kabul edildiği için, güney ve doğu, güney ve batı 18° aı aralıkları ile 5'e ayrılmıştır.

Güneş enerjisi uygunluk indeksi ile elde edilen değer 1 ile 5 arasındadır. İndekse göre elde edilen değer, oransal olarak uyumlu şekilde 0 ile 1 arasında bir değere normalize edilmektedir (Normalize_{SSI}).

Gürültü indeksi ile, alandaki gürültü kirliliği kritiklik düzeyi belirlenmektedir. Dolayısıyla alanın gürültü kirliliği yüksekliği ile kriter ağırlığı doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak güneş enerjisi uygunluk indeksinde, alanın güneş enerjisi potansiyeli belirlenmektedir. Alanın güneş enerjisi potansiyelinin düşmesi, panel eğimine ve azimut açısına toleransını düşüreceği için güneş enerjisi kriter ağırlığı (5.42) yardımıyla elde edilmektedir.

$$\text{Güneş Enerjisi Kriter Ağırlığı (CW}_{\text{güneş}}) = 1 - \text{Normalize}_{\text{SSI}} \quad (5.42)$$

5.3.1.2 Mekan Düzeyinde Değerlendirme

FVGE strüktürüne bitişik olan konutlar, gürültü azaltımından maksimum faydayı görmekle birlikte gün ışığından maksimum düzeyde ödün verebilirler. Dolayısıyla mekandaki aydınlatma ve akustik konfor arasındaki ödünleşmenin nicelleştirilmesinde İç Ortam Kalitesi (Indoor Environmental Quality, IEQ) değerlendirmeleri kullanılmıştır.

İç Ortam Kalitesi (IEQ) konsepti genellikle; ısıl çevre, hava kalitesi, akustik ve aydınlatma olmak üzere 4 ana çevre faktöründen oluşur. Literatürde, çevresel faktörlerin birleşik etkisini farklı ağırlıklandırma şemaları ile ele alan çeşitli IEQ değerlendirme metotları vardır. Bu çalışmada, ÇGDYY’de, karayolu çevresel gürültü sınır değerleri tablosunda yer alan 4 farklı alanda yer alan bina tiplerine yönelik IEQ ağırlıkları literatür taramasından elde edilmiştir. Alan sınıflarında yer alan bina tiplerine göre fiziksel çevre faktörlerinin kriter ağırlıkları Tablo 5.11’de gösterilmiştir.

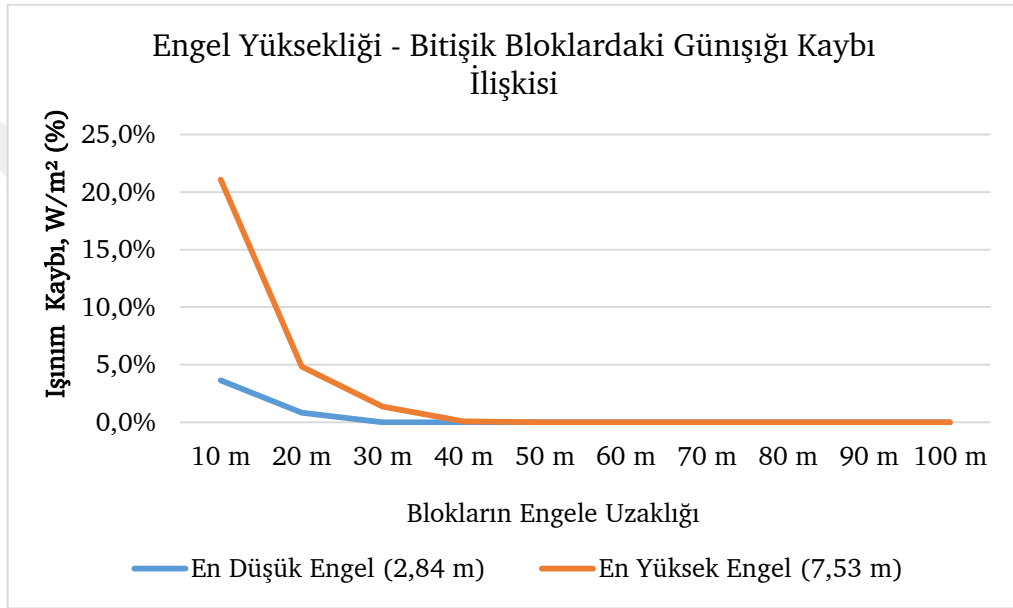
Tablo 5.11 Bina tiplerinin IEQ indekslerine göre fiziksel çevre faktörlerinin kriter ağırlıkları

Alanlar	Bina Tipleri	Isıl Konfor	Hava Kalitesi	Akustik Konfor ($Cw_{akustik}$)	Aydınlatma ($Cw_{aydinlatma}$)
I	Eğitim Yapıları ^a	0,31	0,18	0,31	0,21
	Kültür Yapıları ^b	0,38	0,14	0,27	0,21
	Sağlık Yapıları ^b	0,38	0,14	0,27	0,21
	Yazlık Alanlar	0,28	0,23	0,29	0,21
	Kamp Alanları	0,28	0,23	0,29	0,21
II	Konut Yapıları ^a	0,28	0,23	0,29	0,21
III	Ofis Yapıları ^a	0,31	0,26	0,22	0,20
IV	Endüstriyel Alanlar ^c	0,12	0,2	0,39	0,29

Lecesse vd. en büyük 4 veritabanını kullanarak, farklı bina tiplerinde çevresel faktörün anket yoluyla subjektif değerlendirmesinin yapıldığı 200 çalışmayı incelemiştir [205]. İncelenen çalışmaların, konut, ofis ve eğitim yapı tipleri için kriter ağırlıklarının ortalaması Tablo 5.11’de “a” ile gösterilmiştir. Cao vd.’nin kamu binalarında çevresel faktörlerin kriter ağırlıklarını belirlediği çalışmanın sonuçları ise Tablo 5.11’de “b” ile gösterilmiştir [206]. Yazlık alanlar ve kamp alanlarının da konut yapıları ile aynı ağırlığa sahip olduğu kabul edilmiştir. Endüstriyel alanların kriter ağırlıkları ise ASHRAE’nin Ticari Binalarda Performans Ölçüm Protokolünden alınmıştır [207].

5.3.1.3 Enerji Düzeyinde Değerlendirme

Bu değerlendirmede, engel yüksekliğindeki artış doğrultusunda, engele bitişik blokların yol cephelerindeki ışınlm miktarı kaybı dikkate alınmıştır. Engel alternatifleri veritabanında yer alan 252 engel tipinden en düşük yüksekliğe sahip olan (2,84 m) ile yüksekliği en fazla olan (7,53 m) engelin yola uzaklıkları değişken olan bloklarda sebep olduğu ışınlm kaybı, çalışma kapsamında geliştirilen gölgeleme modülü kullanarak hesaplanmış ve Şekil 5.25'de gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Engel yüksekliğinin bitişik bloklarda sebep olduğu ışınlm kaybı

Bu bölümde aşağıdaki çıkarımlar yapılarak Tablo 5.12'deki kriter ağırlıklarına karar verilmiştir;

Engelden kaynaklanan ışınlm kaybının, sadece zemin kattaki blokların cephelerinde hissedilir olduğu ve diğer kattaki cephelerde, engel nedeniyle gün ışığı mahrumiyeti yaşanmadığı öngörülmüştür. Engelin güneş enerjisi üreten yüzey alanı, günışığı kaybı yaşayan cephe alanından önemli ölçüde fazladır. Bu çıkarımlar doğrultusunda, güneş enerjisi ve günışığı kaybı arasında Tablo 5.12'de gösterilen kriter ağırlıkları kabul edilmiştir.

Tablo 5.12 Güneş ışığı kaybı ve güneş enerjisi kriterlerinin önceliklendirilmesi

	Güneş ışığı Kaybı Kriter Ağırlığı ($CW_{\text{ısıık kaybı}}$)	Güneş Enerjisi Kriter Ağırlığı ($CW_{\text{güneş enerjisi}}$)
Engele 10 m uzaklıkta birden fazla blok varsa	0,2	0,8
Engele 10 m uzaklıkta bir adet blok varsa	0,15	0,85
Engele en yakın blok 20 m uzaklıkta ise	0,1	0,9

- **AHP Metodu ile İkili Karşılaştırma**

İlk olarak, kriter ağırlıklarının 0 ile 1 arasında normalize edilmiş olması gerekmektedir. Bunun için (5.43) ve (5.44)'den yararlanılmıştır;

$$\text{Normalize } CW_1 = \frac{CW_1}{CW_1 + CW_2} \quad (5.43)$$

$$\text{Normalize } CW_2 = \frac{CW_2}{CW_1 + CW_2} \quad (5.44)$$

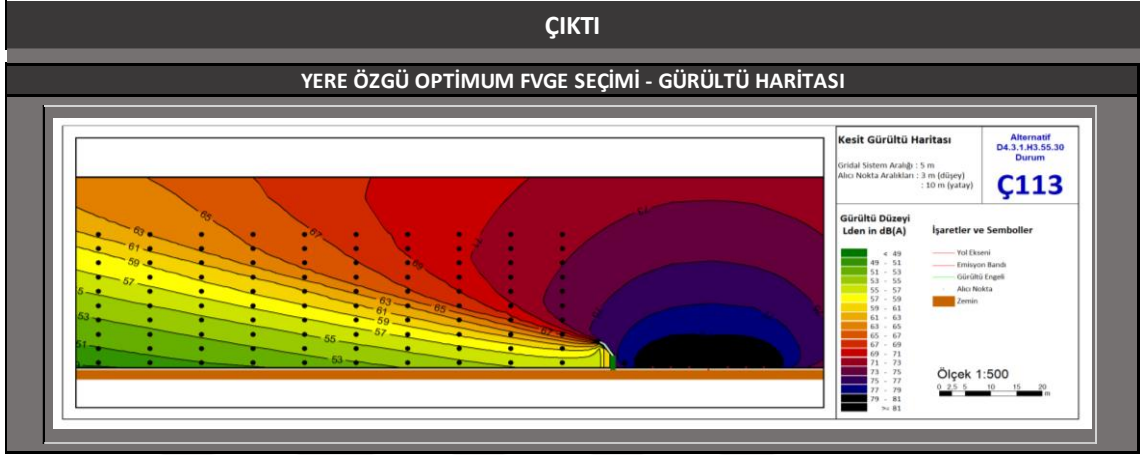
Farklı düzeylerin çevresel faktörlerini ifade eden ikili kriterlerin toplamı 1 olacak şekilde normalize edilen değerler, Analitik Hiyerarşi Sürecinin (Analytical Hierarchy Process, AHP) ikili karşılaştırma matrislerine yerleştirilmek için ölçeklendirilmiştir. Kriter ağırlıklarının farkı (5.45) ile hesaplanarak, önem derecelerinin karşılaştırılmasında 1'den 9'a kadar olan Saaty'nin ölçeği kullanılmıştır. Farklı düzeylerde kriter ağırlıkları farkı ve Saaty ölçeği Tablo 5.13'e göre birlikte değerlendirilerek öncelik vektörleri hesaplanmıştır.

$$\Delta Cw = \text{Normalize } CW_1 - \text{Normalize } CW_2 \quad (5.45)$$

Tablo 5.13 Kriter ağırlıkları arasındaki farkın önem derecesi karşılığı

Fark (ΔCw)	Önem Derecesi	Tanım
$\Delta Cw = 0$	1	Kriterler eşit derecede öneme sahip
$\Delta Cw \leq 0,1$	2	Ara değerler
$0,1 < \Delta Cw \leq 0,2$	3	CW_1, CW_2 'den önemlidir
$0,2 < \Delta Cw \leq 0,3$	4	Ara değerler
$0,3 < \Delta Cw \leq 0,4$	5	CW_1, CW_2 'den oldukça önemlidir
$0,4 < \Delta Cw \leq 0,5$	6	Ara değerler
$0,5 < \Delta Cw \leq 0,6$	7	CW_1, CW_2 'den çok daha fazla önemlidir
$0,6 < \Delta Cw \leq 0,7$	8	Ara değerler
$0,7 < \Delta Cw$	9	CW_1, CW_2 'den kesinlikle daha önemlidir

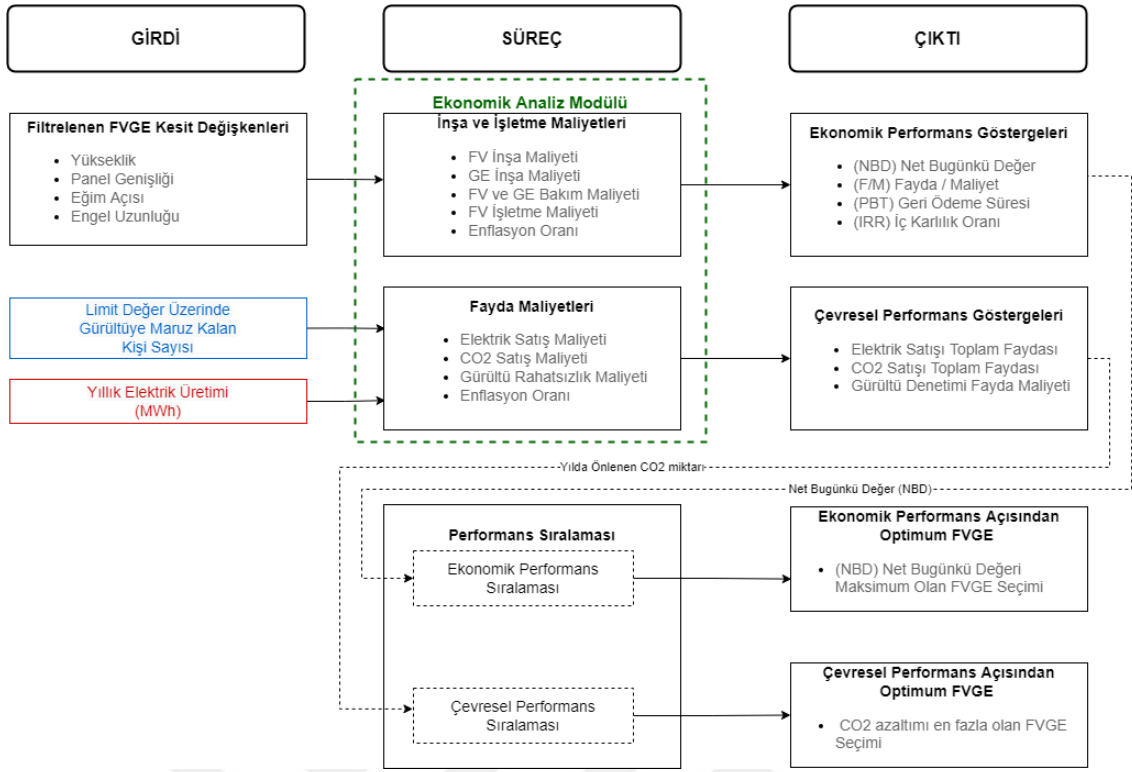
TOPSIS metodu ile seçimi yapılan alternatifin gürültü kesit haritası, araç ara yüzünün çıktı bölümünde gösterilmektedir. Kesit haritasının, arayüzde gösterimi Şekil 5.28'de verilmiştir. Kesit haritası paftasının sağ tarafında, optimum FVGE alternatifinin kodu ile birlikte, tek kırımlı veya çift kırımlı kaçınıcı engel olduğu okunmaktadır.



Şekil 5.28 TOPSIS metodu ile belirlenen optimum FVGE alternatifinin gürültü kesit haritası

5.4 Değerlendirme

Bu bölümde, filtrelenen fotovoltaik gürültü engeli alternatiflerinin, ekonomik ve çevresel performansının analizine ve seçimine yönelik adımlar aktarılmıştır. Değerlendirme aşamasının çalışma prensibi Şekil 5.29'da aktarılmıştır.



Şekil 5.29 Değerlendirme modülünün çalışma prensibi

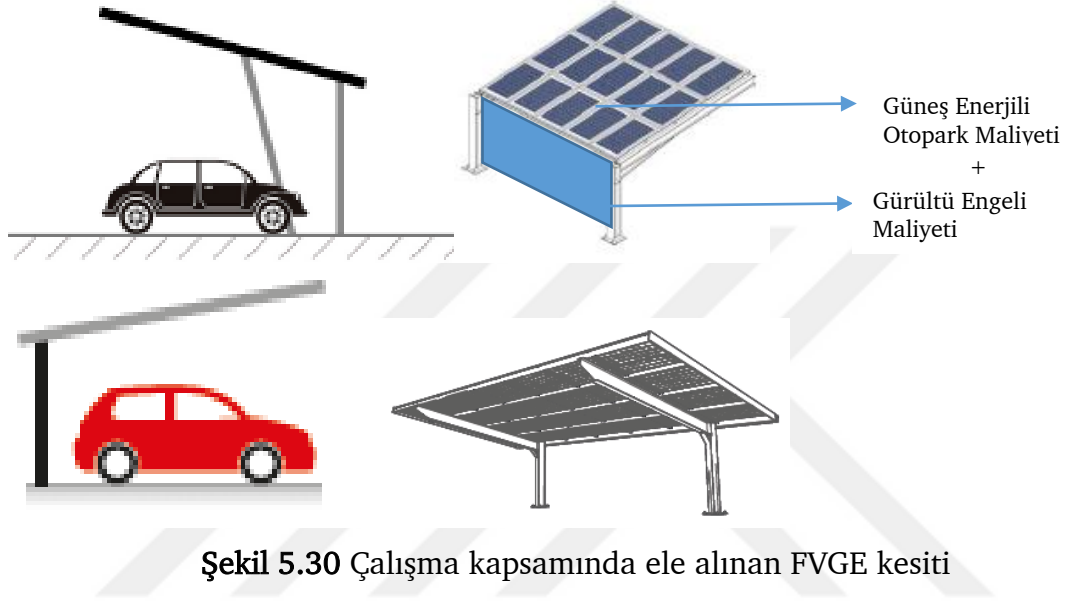
5.4.1 Ekonomik Analiz Modülünün Geliştirilmesi

İlk olarak, FVGE teknolojisi bileşenlerinin inşaa ve işletmesine yönelik birim maliyetler hesaplanarak yatırım maliyeti ve yaşam döngüsü gider maliyeti hesaplanmıştır. Daha sonra, FVGE'nin performans çıktılarının fayda maliyetleri hesaplama adımları aktarılmıştır. Bunlar ekonomik ve çevresel performans göstergeleri üzerinden yorumlanarak optimum seçime yönelik performans sıralaması önerilmiştir. Değerlendirme bölümünün amacı, net bugünkü değeri maksimize eden 'Ekonomik Performans Açısından Optimum FVGE' ve önlenen CO₂ salınımını maksimize eden 'Çevresel Performans Açısından Optimum FVGE' kesitini ve performans göstergelerini sunmaktır.

Maliyetler, Amerikan Doları (\$) birimine göre hesaplanmıştır. Türk Lirası olarak hesaba dahil edilen değerler, T.C. Merkez Bankası 2021 yılı aylık ortalama dolar kuru üzerinden hesaplanarak, yıllık ortalama 1\$=8,83 TL dolar kuru referans alınarak dolar birimine dönüştürülmüştür. Benzer şekilde, 2021 yılı için ortalama Euro/Dolar paritesi 1,18 olarak hesaplanmıştır ve yıllık ortalama 1 €=10,42 TL euro kuru referans alınarak hesaplama yapılmıştır.

5.4.1.1 İnşa ve İşletme Maliyetleri

Fotovoltaik gürültü engeli (FVGE) uygulamaları, gürültü engellerinin fotovoltaik sistemler için bir alt strüktür olarak değerlendirilerek, ses azaltım hedeflerinin yanında elektrik üretimi sağlayan sistemlerdir. Çalışmada ele alınan FVGE şematik kesiti Şekil 5.30'da verilmiştir. Strüktür, bir güneş enerjili otopark (solar carport) ve gürültü engelinin bütünleşik tasarımı olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.30 Çalışma kapsamında ele alınan FVGE kesiti

Güneş enerjili otoparklar, park halindeki elektrikli araçları şarj etmek için elektrik üretir ve araçlara gölge sağlar. Böylece, gelecekte yaygınlık kazanması beklenen elektrikli araçların şarj altyapısı için büyük bir potansiyel barındırır.

FVGE uygulamalarının ekonomik analizi için fotovoltaik sistemler ve gürültü engellerinin inşa, işletme ve fayda maliyetleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Fotovoltaik sistemlerin inşa ve işletme maliyetinde, tesislerin ekonomik fizibilitesi için doğru ve kesin bir değerlendirme önem arz etmektedir. Fotovoltaik sistemlerle ilgili tüm maliyetler, konsept aşamasından sistemin bertarafı aşamasına kadar yaşam döngüsü maliyeti (life cycle cost) olarak ele alınmalıdır. Yaşam döngüsü maliyeti kavramı; bir ürün, hizmet veya sistemin üretim öncesi, üretim ve üretim sonrası yaşam döngüsünün tüm aşamalarını ekonomik ve finansal bağlamda ele alır.

Maliyet tahmini, proje bütçesinin belirlenmesi ve kontrol edilmesinin temeli olduğu için proje yönetiminde önemli bir süreçtir. Maliyet tahmini için, aşağıdaki gibi farklı araç ve teknikler kullanılır [208]:

- Uzman kararı (Expert Judgement),
- Analog tahmin (Analogous Estimating),
- Parametrik tahmin (Parametric Estimating),
- Aşağıdan yukarıya tahmin (Bottom-up Estimating),
- Üç noktalı tahmin (Three-point Estimating),
- Kalite maliyeti (Cost of Quality).

Parametrik ve aşağıdan yukarıya tahminler genellikle en doğru maliyet tahminlerini sağlayan tekniklerdir. Bu nedenle, fotovoltaik sistemin maliyet tahmininde aşağıdan yukarı tahmin tekniğini kullanan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) verileri referans alınmıştır.

FVGE uygulamalarının, güneş enerjisinden elektrik üretimi sağlayan fotovoltaik sistem bileşeninin maliyeti güneş enerjili otoparklar çerçevesinde değerlendirilmiştir. Güneş enerjili otoparklar, fotovoltaik sistem ve fotovoltaik panelleri taşıyan destek strüktürü olmak üzere 2 bileşenden oluşmaktadır. İlk yatırım maliyeti hesaplanırken, iki bileşenin birim maliyeti ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Fotovoltaik sistemin inşa ve işletme maliyeti, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) resmi verileri doğrultusunda hesaplanmıştır.

Standart bir yaşam döngüsü maliyeti analizinde; yinelenen ve yinelenmeyen maliyetler veya sabit ve değişken maliyetler olarak iki grupta incelenir. Sabit maliyetler inşa, tasarım, planlama ve kaynak koruma maliyetlerini içerirken, değişken maliyetler işletme, bakım, sermaye ve destek maliyetlerini içerir. Bu maliyetlerin çoğu, satın alma tarihinden sonraki bir zamanda ortaya çıkar. Bu nedenle maliyet tahminlerinde sistemin ömrü hesaba katılır. Entegre bir sistem ve alt sistemin yaşam döngüsü maliyeti (5.46) yardımıyla hesaplanır [209]

$$\sum (sistemin toplam yaşam döngüsü maliyeti) \quad (5.46)$$

$$= \sum_{n=1}^{25} (C_c + C_o + C_{M\&R} + C_E + C_{diğer})$$

n	: Yıl sayısı	
C_c	: Yatırım Maliyeti	\$
C_o	: İşletim Maliyeti	\$
$C_{M\&R}$: Bakım ve Onarım Maliyeti	\$
C_E	: Enerji Maliyeti	\$
$C_{diğer}$: Diğer Maliyetler (kimyasal, inverter, batarya vb.)	\$

n, sistemin ömrünü temsil eder ve FV paneller için 25 yıldır. C_c yatırım maliyeti, üretimde yer alan ve parasal olarak ölçülebilir teknik faktörleri temsil eder. FV modül, evirici, sistem dengesi ve strüktür maliyetini kapsar. Sistem dengesi (balance of system) kurulum maliyeti, montaj sistemi, altyapı, trafolar, şebeke bağlantısı, kablolama, planlama ve dökümantasyon gibi bileşenleri içerir [210]. C_o işletim maliyetini ifade eder ve tesisin işletiminde yer alan yıllık insan gücü, genel gider ve yakıt maliyetlerini kapsar. $C_{M\&R}$ bakım ve onarım maliyetlerini temsil eder. Bakım maliyetleri tesisin bakımıyla ilgili planlanmış maliyetlerdir. Onarım maliyetleri ise ekipman sisteminin ömrünü değiştirmeden uzatmak için gereken beklenmeyen harcamalardır [211]. C_E enerji maliyetini ve C_{other} diğer maliyetleri (kimyasal, inverter ve batari maliyetleri vb.) temsil eder.

Maliyet analizlerinde uluslar arası değerler, ülkeler arası Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GYİH) oranları kullanılarak hesaplama yapılacak ülke için adapte edilir. Amerika Birleşik Devletleri'nin satın alma gücü paritesinden elde edilen GYİH 2021 yılı değeri ve Türkiye'nin GYİH 2021 değeri [212] Tablo 5.14'de verilmektedir;

Tablo 5.14 GYİH 2021 Değerleri [206] ve oran tablosu

Ülke / Birlik	USD (\$)
Amerika Birleşik Devletleri	63 415
Türkiye	28 435
Türkiye / ABD GYİH Oranı (%)	% 44,8

NREL FV proje fiyatlandırmasını; konut, ticari ve kamu hizmeti sektörü olarak 3 grupta detaylandırmıştır. Tüm sektörlerde monokristal silikon modül kullanıldığı kabul edilir. Kıyaslamalar ayrıca yeni koronavirüs pandemisinden herhangi bir etkisinin olmadığı iş ortamını varsayar. Ticari kurulumlar için NREL 2021 inşa ve işletme maliyetleri dağılımı ve transfer metodu ile Türkiye için birim maliyet değerleri Ek L'de yer alan tabloda gösterilmiştir [213].

Fotovoltaik Sistemin Destek Strüktürünün İnşa Maliyeti

Bu çalışmada türetilen, tek ve çift kırınım yüzeyine sahip 252 FVGE alternatifi, form değişkenleri (yükseklik, kırınım yüzeyi sayısı, genişliği ve eğim açısı) nedeniyle farklı ölü ve dinamik yüklere maruz kalır. Sistemlerin yüklere dayanımı için gerekli olan yapısal asgari özellikler, strüktür maliyetinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, FVGE alternatifleri SAP2000 programıyla analiz edilmiştir.

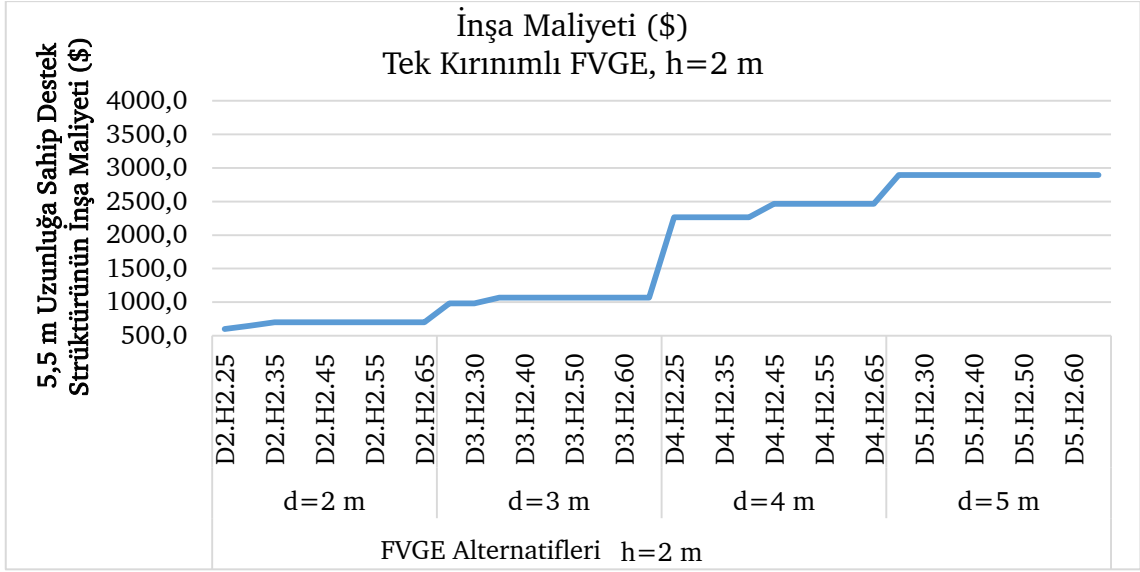
Strüktür tasarımlarında, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik referans alınmıştır [214]. Kar ve rüzgar yükü değerleri TS 498 standardı doğrultusunda hesaplamalara dahil edilmiştir [215]. Strüktürün güvenliği için, rüzgar ve kar yükü açısından uç koşullar dikkate alınmıştır.

İlk olarak, alternatiflerin 3 boyutlu modelleri SAP2000 programında oluşturulmuştur. Strüktürler, S355 demir sınıfından yapısal çelik profiller ve 100x100x10 mm çelik kutu profillerle modellenmiştir. Her bir alternatif, iki otomobilin park etmesine olanak sağlayan genişlikte (5,5 m) analiz edilip, birim maliyet olarak araca aktarılmıştır.

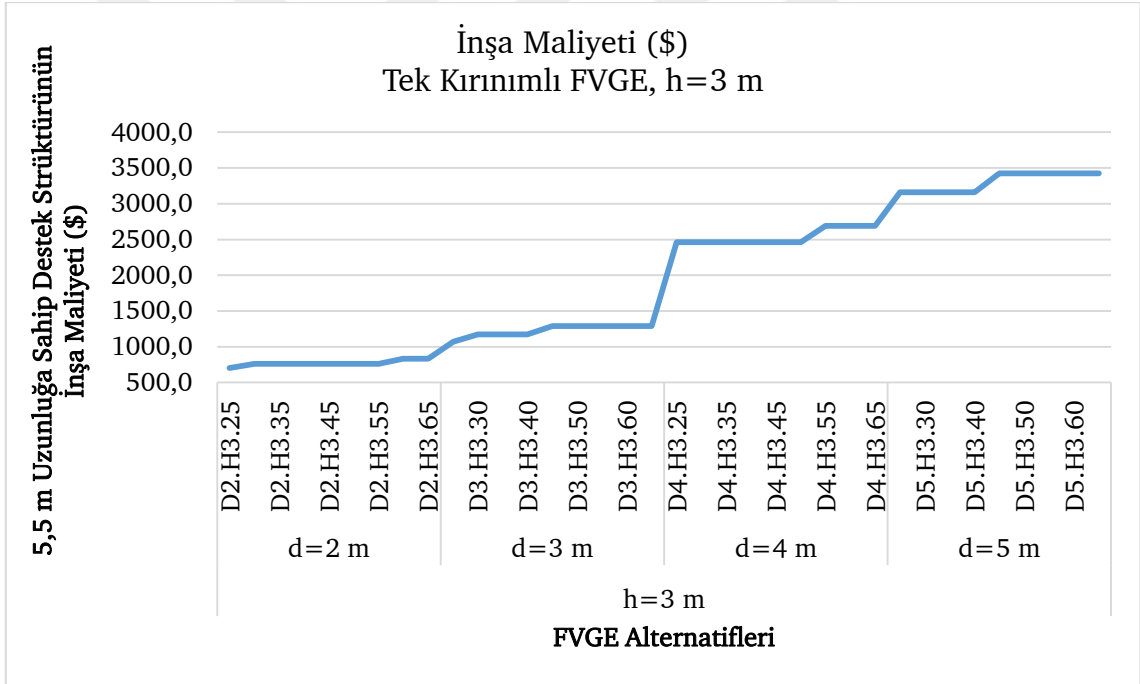
Model çözümlerinde; ölü yük (G), kar yükü (S), rüzgar yükü (W) bileşenleri G+S ve G+S+W kombinasyonları ile tasarım yapılmıştır. Yapısal çelik, aşık profilleri ve güneş panellerinin ağırlığı ölü yüke dahildir. Gürültü engelinden 1 m uzaklıkta ve en fazla 100 km/h hızla seyreden taşıtların oluşturduğu açık havadaki trafiğin oluşturduğu dinamik basınç ($q(v) = 650$ Paskal) rüzgar yüküne dahil edilmiştir [216].

Güneş panellerinden kaynaklanan ölü yükler, yüzeylere dik olarak; rüzgar ve kar yükleri ise profillere dik olarak yazılıma tanımlanmıştır. Kırınım yüzeyinin eğim açısının artması, rüzgar ve kar yükünün yataya yakın açılarla (yere paralel) etki ederek sistemdeki deplasmanı artırmaktadır. Modeller, yönetmelikte yer alan L/300 kuralı doğrultusunda analiz edilmiştir. Sistem maliyetinin asgari düzeyde hesaplanabilmesi için, deplasmanlar limit değere oldukça yakın tutularak tasarım yapılmıştır. Görece düşük profillerle farklı eğimli kırınım yüzeylerinde moment ve kuvvetler açısından dayanım sağlansa da, deplasman şartı sağlanamadığı için dike yakın eğime sahip kırınım yüzeylerinde mukavemeti yüksek profil kullanılması gerekmektedir.

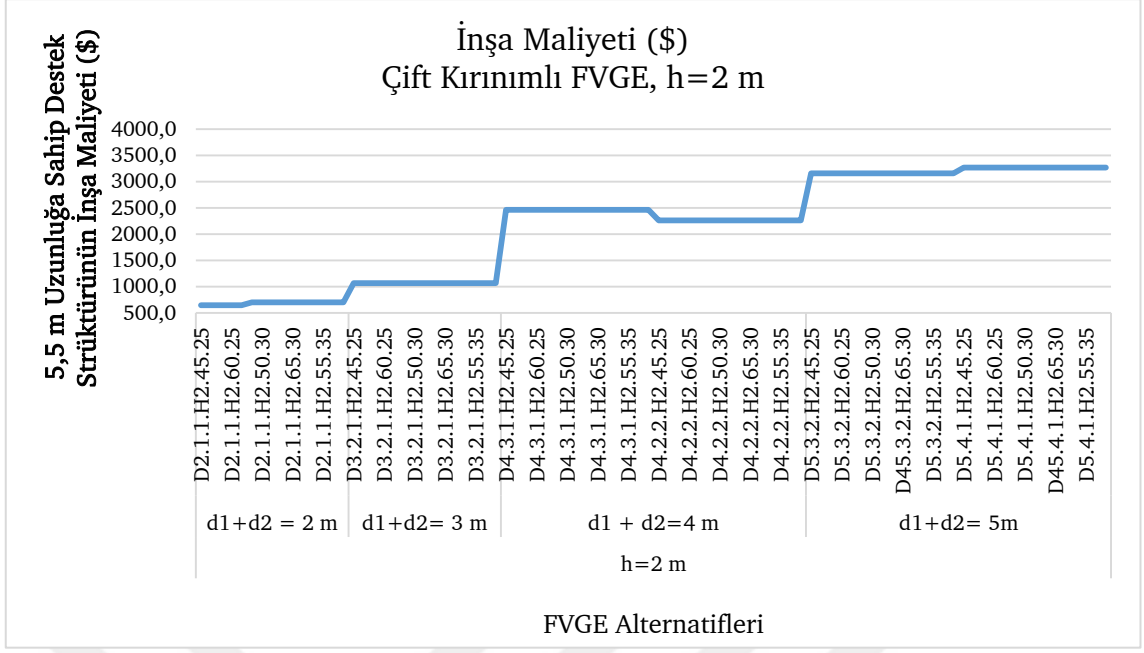
Tasarım ve analize örnek olarak, engel kodu D5.4.1.H3.55.25 (Ç168) olan çift kırınımlı FVGE alternatifinin, yük ve dayanım hesaplamalarına ilişkin ekran görüntüleri Ek M'de yer alan şekillerde gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalar ve dayanım analizleri neticesinde, çelik profillerin kesitleri ve aşık miktarları belirlenmiştir. 252 FVGE alternatifinin yapısal bileşenlerinin metrajı Ek N'de yer alan Tablo N.1'de (1K Engeller) ve Tablo N.2'de (2K Engeller) gösterilmiştir. Yapısal çelik ve aşık kutu profillerinin birim maliyetleri Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2021 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatlarından alınarak 2021 yılı ortalama dolar kuru ile dönüştürülerek ekonomik analize dahil edilmiştir. Yapısal çelik için 15.165.1001, kutu profil için 10.200.3601 poz numaralı birim fiyatlar kullanılmıştır. Tabloda yer alan birim maliyetler, tek ve çift kırınımlı engellerin yüksekliklerine göre Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'de yer alan grafiklerle özetlenmiştir.



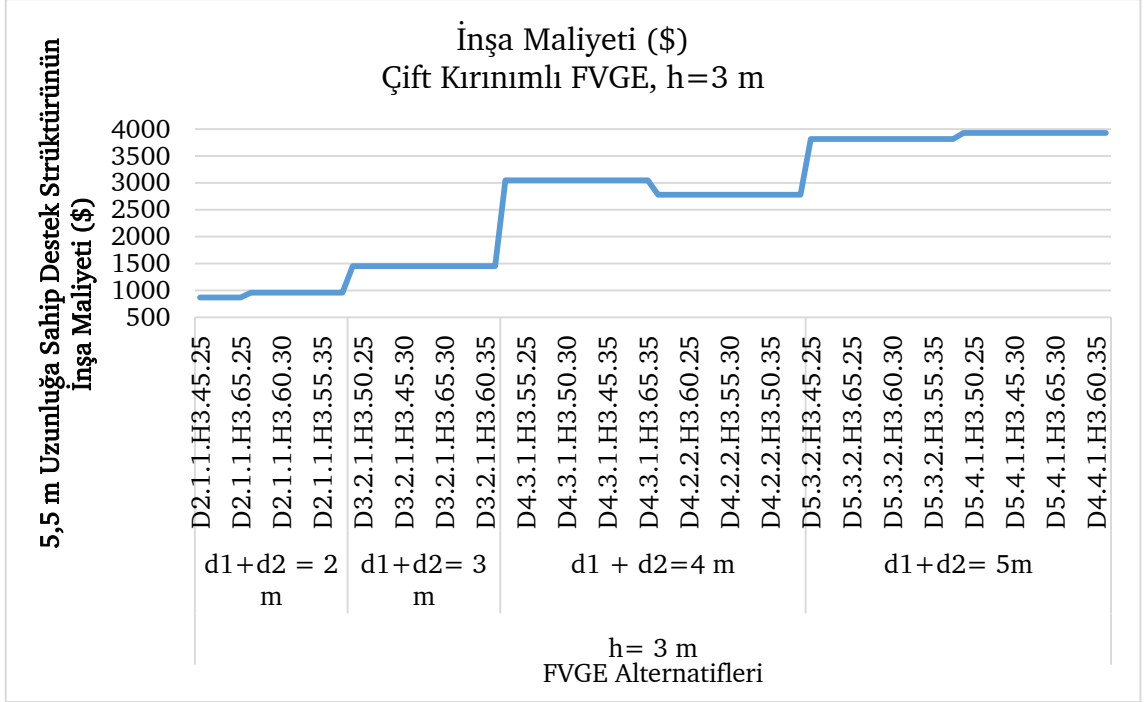
Şekil 5.31 Tek kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 2 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri



Şekil 5.32 Tek kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 3 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri



Şekil 5.33 Çift kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 2 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri



Şekil 5.34 Çift kırınımlı ve dikey bölümünün yüksekliği 3 m olan FVGE alternatiflerinin birim maliyetleri

Gürültü engellerinin inşa ve işletme maliyeti için, uygun panel malzemesinin seçimi, yerel koşullarda uzun hizmet ömrünü ve teknik gereksinimleri sağlamak açısından önemlidir. Bir gürültü engelinin hizmet ömrü, engelin akustik veya fiziksel

özelliklerinde fark edilebilir bir değişiklik olmaksızın sorunsuz performans dönemi olarak tanımlanabilir. Esasen hizmet ömrü, kurulumundan değiştirme ihtiyacına kadar geçen süreyi kapsar [96].

Ahac vd., gürültü engellerinin akustik ve akustik olmayan özellikleri, uzun dönem performansı, teknik ve ekonomik sürdürülebilirliği üzerine yaptığı kapsamlı literatür çalışmasına dayalı çok kriterli değerlendirme yapmıştır [72]. Beton, metal ve ahşap panellerin performans ölçütleri, literatür taraması sonucunda tanımlanan sınır değerlere göre 1-5 arasında puanlanmıştır ve özet Ek O'da yer alan Tablo O.1'de gösterilmiştir. Yapılan analize göre; beton panellerin beşikten mezara sürdürülebilirliği dışında her performans grubu için en yüksek ortalama puana ve en yüksek genel ortalama puana sahip olduğu görülmüştür.

Uzun hizmet ömrü ve yüksek performans özellikleri nedeniyle bu çalışmada beton gürültü engellerinin kullanıldığı kabul edilmiştir.

Gürültü engeli inşa maliyeti hesaplanırken, Amerika Birleşik Devletleri'nin ulusal verileri referans alınmıştır. Amerikan Federal Karayolları İdaresi (FHWA) tarafından, engel malzemesine ve engel yüksekliğine bağlı olarak 2010 yılı verilerine dayalı hazırlanan birim fiyat tablosunun metre ve metrekare dönüşümleri yapılarak Ek O'da yer alan Tablo O.2'de gösterilmiştir [217].

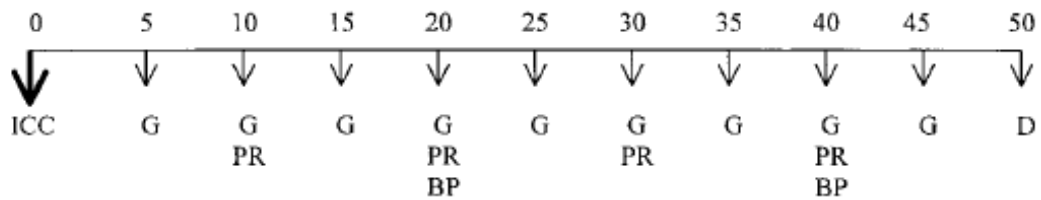
Bu tabloya göre 2 mt ve 3 mt beton gürültü engeli için ortalama birim inşa maliyeti, Amerika'nın yıllık enflasyon oranı %2 kabul edilerek fiyat güncellemesi yapıldığında, 2021 yılı için sırasıyla 324 \$/m² ve 419 \$/m² olmaktadır. Transfer metodu ile Türkiye için birim maliyetler sırasıyla 145 \$/m² ve 187 \$/m² olmaktadır.

Türkiye'de, gürültü engellerinin inşa ve işletme maliyetlerine ilişkin bir rehber bulunmamaktadır. Bu kapsamda, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın güncel yapı yaklaşık birim maliyet cetvelinde 2-A grubu yapılar arasında yer alan "palplanlı ve ankrajlı perde ve istinat duvarları" yapısal benzerliği nedeniyle referans alınabilir [218]. 2021'de yayımlanan maliyet cetveline göre birim yaklaşık maliyeti 640 TL/m² (yaklaşık 72 \$/m²) olarak verilmiştir [219]. Merkez Bankası 2021 yılı aylık ortalama dolar kuru üzerinden yıllık ortalama alınarak (1 \$ = 8,83 TL) dönüştürme yapıldığında, uluslararası maliyet ile Bakanlık maliyetinin orantılı olduğu görülmektedir.

Gürültü engeli işletme maliyetinde, gürültü engellerininin bakımı ile, öngörülen hizmet ömrü boyunca optimum performansını sürdürmesini ve fiziksel hasardan kaynaklanan gerekli onarımların yapılmasını sağlamak önemlidir. Beton gürültü engellerinin yaşam ömrü boyunca sağlanması gereken bakım prosedürleri ve işlem sıklığı Kay vd. çalışmasına göre belirlenmiştir [95].

- Panel değiştirme; Toprak sedler dışındaki tüm engellerin, araç çarpmaları nedeniyle her 10 yılda bir kez engelin %1'lik uzunluğunun değiştirilmesi gerektiği varsayılmıştır.
- Grafiti temizleme; Toprak sedler dışındaki tüm gürültü engellerinde her 5 yılda bir kez, toplam engel yüzey alanının %1'ine eşit bir kısmında grafiti yazılarının kaldırılması için genel boyamanın gerekeceği kabul edilmiştir.
- Boyama; Boyalı beton yüzeylerin 20 yıllık aralıklarla yeniden boyanması gerektiği varsayılmıştır. Boyanmamış beton yüzeyler boyama gerektirmese de, engel ömrünün yarısında (25 yıl) bir kez engeli boyama maliyeti dahil edilir.
- Engel çevresi temizliği; ABD için, gürültü engellerinin bakım maliyetine ilişkin bir veri tabanı olmadığı için Avrupa Yol Yöneticileri Birliği (Conference of European Directors of Road – CEDR) tarafından belirtilen 77 €/m (yükseklikten bağımsız) kullanılmıştır [220], [97]. Birim maliyet 2021 yılına göre enflasyon oranıyla güncellenmiş ve Euro/Dolar parite dönüşümüyle 110 \$ olarak hesaplanmıştır. GYİH oranları ile, 49 \$ olarak hesaplara dahil edilmiştir.

Bakım ve değiştirme faaliyetlerinin zamanlaması da dahil olmak üzere beton engeller için yapılan Kay vd. Çalışmasına dayalı bakım prosedürü varsayımları Şekil 5.35'de gösterilmiştir [96] ve birim maliyetlerle birlikte Tablo 5.15'de özetlenmiştir.



Şekil 5.35 Prefabrike/Öngerilmeli beton paneller için yaşam döngüsü modeli (50 yıllık hizmet ömrü varsayımı için) (ICC= ilk inşaat maliyeti, G=Grafiti kaldırma, Engel yüzey alanının %1'i; PR=Panel değiştirme, Engel uzunluğunun %1'i; BP=Engel boyama, Engel alanının %1'i, D=Bertaraf).

Tablo 5.15 Gürültü engeli işletme maliyeti işlem sıklığı ve birim maliyeti

	İşlem Sıklığı	Miktar	Birim Fiyat	
Panel Değişirme	10 yılda 1 kez	Engel uzunluğunun %1'i	USA	20mt → 141 \$/m ² 3 mt → 182 \$/m ²
			TR	20mt → 148 \$/m ² 3 mt → 222 \$/m ²
Grafiti Temizleme	5 yılda 1 kez	Engel alanının %1'i	TR	30,5 TL/lt Boyacı ustası 34,5 TL/saat Boyacı Ustası 1 m ² alanı 0,3 saatte boyamaktadır [221] (1 lt=6,5 m ² boya) 4,62 TL/m ² (0,52 \$/m ²) İşçilik; 10,3 TL/m ² (1,16 \$/m ²)
Boyama	20 yılda 1 kez	Engel alanının %1'i		
Engel Çevresi Temizliği	5 yılda 1 kez	Engelin Toplam Uzunluğu	EU	93 €/m (2021) €/ \$ Parite Dönüşümü: 110\$/m

5.4.1.2 Fayda Maliyetleri

Fayda maliyetleri hesaplanırken, güneş enerjisi sisteminin sağladığı fayda maliyetleri ve gürültü engelinin sağladığı fayda maliyetleri sırayla hesaplanmıştır.

Güneş enerjisi fayda maliyetleri; yenilenebilir enerji projelerinde, sistemin sağladığı ve toplumun yararlanabileceği tüm maliyet ve faydaları içermelidir. Yenilenebilir enerji kullanımının etkileri; sosyal, ekonomik ve çevresel olmak üzere üç ana grupta incelenir [222]. İlk yatırım maliyeti yüksek yenilenebilir enerji sistemlerinden olan fotovoltaik sistemlerin faydalarının fizibilite çalışmalarına dahil edilmemesi, söz konusu teknolojiye yatırım konusunda etkili motivasyonu sağlamaktan yoksundur. Bunun için faydaların parasal değere çevrilerek ekonomik analizlere dahil edilmesi kritik öneme sahiptir.

FV sistemler sıfır emisyonlu veya emisyonuz enerji sistemleri olarak tanımlanır. Kyoto protokolüne göre sera gazları, altı sera gazı kategorisini kapsar ve emisyonları karşılaştırmak için CO₂ eşdeğeri kullanılır. Güneş enerjisi sistemlerinin sağladığı en önemli çevresel fayda, işletimi sırasında küresel iklim değişikliğinden sorumlu ana gaz olan karbondioksit emisyonunun olmamasıdır.

Elektrik santrallerinde elektrik üretmek için kullanılan fosil kaynaklar, çevre kirliliğinin önemli bir parçasıdır. Dolayısıyla, fotovoltaik sistemlerin uygulanması, atmosferdeki sera gazı emisyonlarını azaltır. Fotovoltaik sistem yatırımını değerlendirmek için, önlenen CO₂ azaltımının ekolojik faydası parasallaştırılarak ekonomik analize dahil edilmelidir.

Bu çalışmada, önlenen karbondioksit emisyonunun değeri Schepper vd. tarafından önerilen (5.47)'e uygun şekilde parasallaştırılmıştır [110];

$$B_{CO_2} = El_{prod,t} \times AvCO_2 \times ValCO_2 \quad (5.47)$$

B_{CO_2}	: Önlenen CO ₂ emisyonunun faydası	€/yıl
$El_{prod,t}$: Üretilen elektrik enerjisi miktarı	kWh/yıl
$AvCO_2$: Önlenen CO ₂ emisyonu miktarı	Ton/kWh
$ValCO_2$: Önlenen CO ₂ emisyonu değeri	€/ton CO ₂

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın, Yakıt Yanmasından Kaynaklanan CO₂ Emisyonları (CO₂ Emissions from Fuel Combustion) raporu, OECD ülkelerinin enerji tüketimlerine göre karbon emisyonları miktarının yıllara göre istatistiğini sağlar [223]. Rapora göre Türkiye'de fosil yakıtlar, nükleer, hidro, jeotermal, güneş ve biyokütle enerjileri tüketiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonu 2017 yılı için 86,1 ton CO₂/terajoule'dur. Bu değer 0,310 x 10⁻³ ton CO₂/kWh değerine eşdeğerdir.

Karbondioksitin sosyal maliyeti için, EPA (Environmental Protection Agency)'nın belirli bir yıldaki bir ton karbondioksit emisyonunun neden olduğu uzun vadeli hasarın dolar cinsinden ölçüsü kullanılmıştır. %2,5 indirgeme oranlarına göre, belirli yıllardaki karbondioksitin sosyal maliyet değerleri Tablo 5.16'de gösterilen şekilde çalışmaya dahil edilmiştir [224].

Tablo 5.16 %2,5 indirgeme oranı doğrultusunda yıllara göre CO₂ sosyal maliyeti

Yıl	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
%2,5 İndirgeme Oranı	62 \$	68 \$	73 \$	78 \$	84 \$	89 \$	95 \$

FV sistemlerin üretim çıktısı elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisi satışından elde edilen kazanç, güncel teşvik miktarlarıyla birlikte hesaplanabilir. Sistemden elde edilen enerji üretim miktarı, her sene degradasyon oranı kadar azaldığı göz önünde bulundurularak elektrik satış gelirleri hesaplanmalıdır.

Bu çalışmada, elektrik satışından elde edilen gelir, Riley vd. tarafından önerilen (5.48), (5.49) ve (5.50) doğrultusunda hesaplanmıştır [225];

$$C_t = \left[C_1 \times \left(1 + \frac{R}{100} \right)^{t-1} \right] \times E_t \quad (5.48)$$

$$E_t = E_1 \times \left[1 - \frac{D}{100} * (t - 1) \right] \quad (5.49)$$

$$V_t = C_t \left[\left(1 + \frac{I}{100} \right)^{t-1} \right] \quad (5.50)$$

t	zaman	yıl
D	FV sistemin bozulma oranı	%/yıl
R	Elektrik maliyetindeki artış	%/yıl
Et	sistem tarafından t yılında üretilen elektrik enerjisi	MWh
Ct	t yılında FV sistemi tarafından üretilen elektrik enerjisinin maliyeti	\$/yıl
Vt*	t yılında FV sistemi tarafından üretilen elektrik enerjisinin değeri	\$/yıl

*Bu değer, maliyetten farklıdır. Çünkü değer enflasyona göre ayarlanırken, Ct hesaplamasında maliyet nominal yılda 1 dolardır. Genel olarak gelecekteki dolarlar mevcut dolardan daha az değerdedir.

NREL araştırması, güneş panellerinin yılda ortalama %0,5'lik bozulma oranına sahip olduğunu; ancak, bu oranın daha sıcak iklimlerde ve çatı sistemlerinde daha yüksek olabileceğini göstermiştir [226]. Bu çalışmada da, yıllık bozulma oranı %0,5 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

31/01/2022 tarihli EPDK kararı doğrultusunda, alçak gerilim abonelerinde ticarethane grubu için satış bedeli 47,473 kuruş olarak belirtilmiştir. Elektrik satış geliri, bu birim fiyat üzerinden hesaplanmıştır.

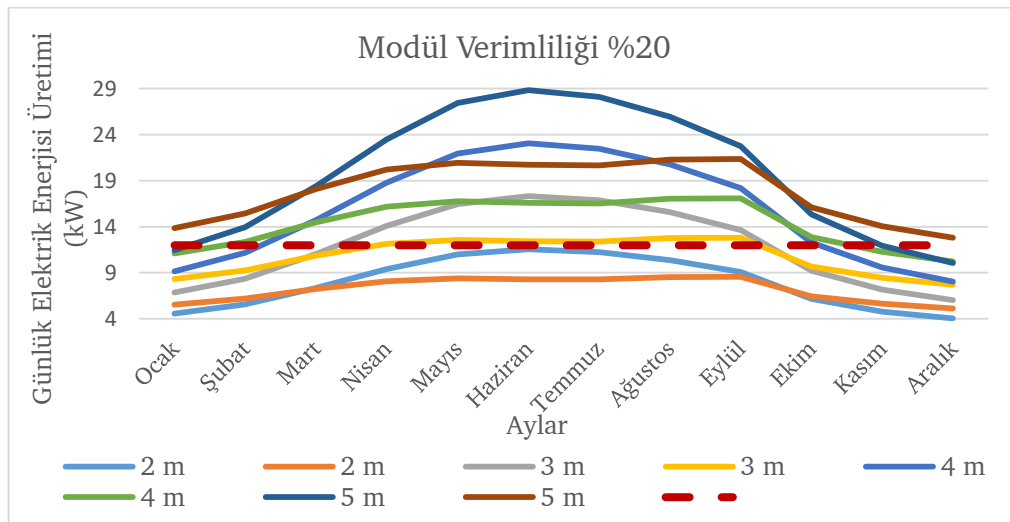
FVGE sistemlerin, gürültü sorunu yaşanan yol kenarlarında elektrikli araçlar için şarj istasyonu olması öngörülmektedir. Şarj sistemleri için, fişler ve soketler ile ilgili IEC 61851 Standardı'nda, şarj fonksiyonu için nominal güç ve dolayısıyla şarj süresine bağlı 3 düzey tanımlanır [227]. Düzeylerine göre model

örneklerinin nominal gücü, şarj süresi ve araç menzili Tablo 5.17’de gösterilmiştir [228]. 4. seviye şarj cihazları tabloda gösterilmesine rağmen piyasada mevcut değildir.

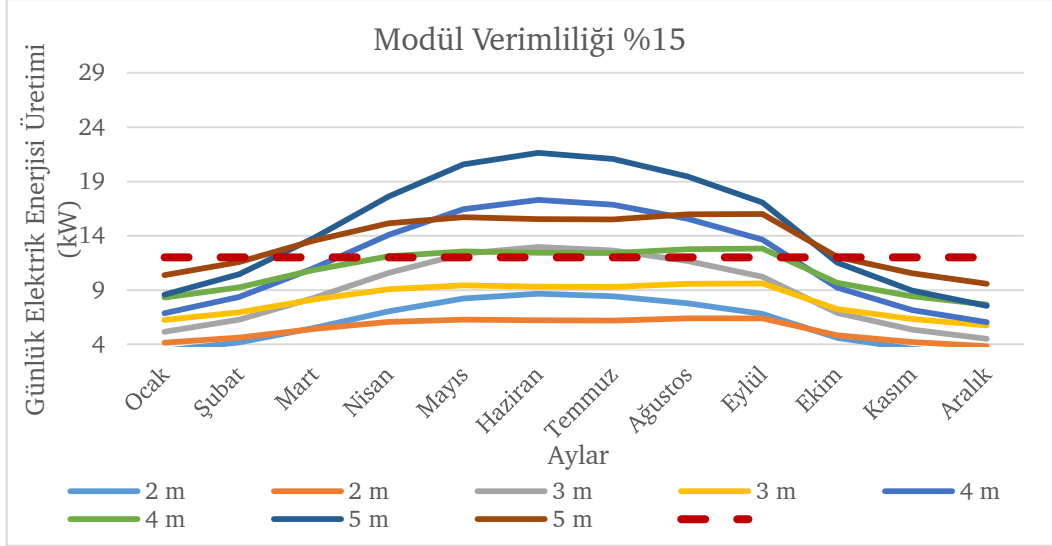
Tablo 5.17 Düzey 1 ile 4 arası kamusal elektrikli araç şarj tesislerinin özeti

Düzey	Tip	Akım Tipi	Voltaj (V)	Güç (kW)	Şarj Süresi (400 km)	Mesafe/1 dk Şarj (km/dk)
1	J1772	AC	120	1,4	43 saat	0,16
2	J1772	AC	240	3-20, ort. 6	11 saat	0,64
3	CHAdeMO	DC	<500	Ort. 50	1 saat	5,14
3	Tesla Supercharger	DC	400	120	40 dk	9,01
4	CHAdeMO 2.0	DC	800-1000	>400	20 dk	35,40

Bu kısımda; kırınım yüzeyi genişliği 2 ila 5 m arasında, eğim açıları 25° ila 65° arasında değişen 252 FVGE alternatifinin sağlayacağı elektrik enerjisinin günlük araç kullanım potansiyeli araştırılmıştır. FVGE sistemlerin gölgeleme nedeniyle ışınım kaybına maruz kalmadığı ve Güney’e yöneldiği kabul edilmiştir. Şarj istasyonlarının 2. düzey olduğu ve 11 saat şarj ile tam dolmuş sağladığı varsayılmıştır. %20 ve %15 verimli FV modüllerle, 5,5 m genişliğindeki 2 araçlık güneş enerjisi otoparkından sağlanan enerji miktarlarını gösteren grafik Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de gösterilmiştir.



Şekil 5.36 Modül verimliliği %20 olan FVGE alternatiflerinin aylara göre elektrik enerjisi üretim miktarları



Şekil 5.37 Modül verimliliği %15 olan FVGE alternatiflerinin aylara göre elektrik enerjisi üretim miktarları

Minimum ile ifade edilen kırmızı kesikli çizgi, ikinci düzey şarj istasyonu ile 11 saatte 400 km menzilli 2 araç için sağlanması gereken ortalama güç miktarını göstermektedir. Modül verimliliği yüksek olduğunda sistemin elektrik üretim potansiyeli artsa da kırımın yüzeyi genişliği 2 metre olan strüktürler günlük 2 araçlık yeterli enerjiyi sağlayamamaktadır. Modül verimliliği %15 olan sistemlerde hem 2 metre hem 3 metre genişliğe sahip sistemler yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, yaz aylarında ve eğim açısı yataya yakın olan sistemlerde elektrik üretim potansiyeli artmaktadır.

Gürültü engeli fayda maliyetleri; yoğun trafik gürültüsüne maruz kalan ve yol kenarında yer alan binalarda yaşayan nüfus için sağlık üzerinde kısa ve uzun vadede olumsuz etkilere sebep olduğu düşünülerek hesaplamalara dahil edilmelidir. Trafik gürültüsü, halk sağlığı üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir ve toplumun refah düzeyini düşürür. Kalıcı veya geçici sonuçları olan bu etkilerin, etkilenen nüfus için sağlık sonuçlarının saptanması ve gürültü hasarının nicel değerlendirilmesi kompleks bir süreçtir.

Maddi olmayan değerlerin para biçimindeki sorgulaması kompleks bir işlem olsa da, toplum refahına doğrudan etki eden projelerde daha iyi karar verme adına, faydanın para birimi cinsinden ifade edilmesi ve fizibilite analizlerine dahil edilmesi kritik öneme sahiptir. Çevresel etkiye sahip olan projelerin yaşam

döngüsü analizinde, çok farklı etki türlerinin ortak bir birim üzerinden değerlendirilmesi alternatifler arasında karşılaştırma yapmayı kolaylaştırır. Fayda/maliyet analizlerinde çevresel gürültünün dış etkilerinin parasallaştırılmasına yönelik çeşitli yöntemler ve teknikler vardır.

Topluma olumlu ve olumsuz etkileri olan ulaşımın sebep olduğu gürültünün çevresel etkisini ölçmek için iç maliyetler ve dış maliyetlerin ayırt edilmesi gerekir. Özel maliyetler olarak da adlandırılan iç maliyetler; işletim, yakıt maliyeti, aracın yıpranması/aşınması, seyahat ücreti, vergiler, harçlar vb. kalemlerle yolu kullanan tarafından ödenir. Sosyal maliyetler olarak da adlandırılan dış maliyetler ise; ulaşım altyapısının sağlanması ve kullanılmasından kaynaklanan tüm maliyetleri yansıtır. Ayrıca, çevresel maliyetleri ve nüfusun azalan sağlık ve refahına ilişkin maliyetleri de içerir [229].

Ulaştırmanın dış maliyetlerine ilişkin, çevresel gürültünün ekonomik değerlendirmesi için kullanılan iki genel yaklaşım vardır. Gürültü rahatsızlığının parasal değere çevrilmesine yönelik metodlar (yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya), yaklaşımlar (açıklanmış tercih yaklaşımı ve belirtilen tercih yaklaşımı) Ek Q'da detaylandırılmıştır.

Gürültünün sosyal maliyetinin değerlendirilmesinde kullanılan 2 ana kategori; ödeme istekliliği (willingness to pay, WTP) ve kabul etme istekliliği (willingness to accept, WTA) yaklaşımlarına dayanır. WTP, bir kişinin bir faydadan yararlanmak için ödemeye istekli olduğu maksimum miktardır, WTA ise bir kişinin gürültü rahatsızlığı için tazminat olarak kabul etmeye istekli olduğu minimum miktardır. Bu miktarlar kişilerin rahatsızlık düzeylerine göre değişmektedir. Kişilerin gürültü rahatsızlık düzeyleri ISO/TS 15666:2003 standardında 4 grupta tanımlanmıştır; rahatsız değil (not annoyed), hafif rahatsız (slightly annoyed), orta derecede rahatsız (moderately annoyed), aşırı derecede rahatsız (very or extremely annoyed) [230].

Karayolu trafiği gürültüsü literatüründe hedonik fiyat çalışmaları yaygın olsa da, ortaya çıkan değerlerin teorik ve pratik olarak fayda transferi sorunu

görülmektedir. Son yıllarda, belirtilen tercihler yaklaşımına ilişkin çalışmaların sayısı artmaktadır. Ancak farklı rahatsızlık düzeyleri için “rahatsız kişi başına yıllık birim maliyet” açısından, maruz kalma-tepki fonksiyonları ile ilişkili WTP çalışması sınırlıdır. Avrupa Birliği 6. Çerçeve projesi HEATCO (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment) bu çalışmalardan biridir [231], [232]. Çalışmaya doğrultusunda, gürültü rahatsızlık düzeylerine göre elde edilen parasal değerler Tablo 5.18’de verilmiştir;

Tablo 5.18 Karayolu gürültüsü fayda maliyeti için önerilen ekonomik değer tablosu

Rahatsızlık Düzeyi	€/rahatsız kişi/yıl (2006)	€/rahatsız kişi/yıl (2021)*	\$/Rahatsız kişi/yıl (2021)* TR
Aşırı Rahatsız (Highly Annoyed)	85	123 (145 \$)	65 \$
Rahatsız (Annoyed)	85	123 (145 \$)	65 \$
Az Rahatsız (Little Annoyed)	37	53 (62 \$)	24 \$
Rahatsız Değil (Not Annoyed)	0	0	

5.4.1.3 Ekonomik Performans Göstergeleri

Yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik fizibilitesinde; net bugünkü değer (NBD), toplam yaşam döngüsü maliyeti (TLCC), seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), iç karlılık oranı (IRR), basit geri ödeme süresi (SPBT), indirgenmiş geri ödeme süresi (DPBT), karlılık indeksi (KI), fayda/maliyet (F/M), tasarruf/yatırım oranları (SIR) göstergeleri dikkate alınır [233]. Çalışmada incelenen ekonomik göstergeler Ek P’de açıklanmıştır. Göstergelerin matematiksel hesaplamalarında Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı’nın (NREL) hesaplama adımları referans alınmıştır [234].

Gerçeğe yakın tahminlerin yapılabilmesi için, uzun ömürlü yatırım projelerinde dikkate alınan enflasyon oranları, değerlendirmede büyük öneme sahiptir. Tahmin modellerinde alınması öngörülen enflasyon oranları, farklı kaynaklarda belirlenen çeşitli değerlere sahiptir.

Enflasyon tahminlerine göre 2023 için %4, 2024 için %3,4, 2030 yılı için %4,08 değerleri öngörülmektedir (Trading Economics). Türkiye’deki Ulaşım

Altyapısının Değerlendirilmesi için Teknik Destek (Technical Assistance to Transportation Infrastructure Needs Assessment - TINA) başlıklı AB proje raporunda 2015 yılı için %6, 2023 yılı için %4 ve 2050 yılı için %3 verilmiştir.

Bu veriler doğrultusunda, yıllara göre maliyet güncellemeleri aşağıdaki Tablo 5.19'de yer alan değerlerle yapılmıştır;

Tablo 5.19 Yıllara göre öngörülen enflasyon oranları

Yıllar	2023	2030	2050	2050 Sonrası
Enflasyon Oranı	%4	%4	%3	%2

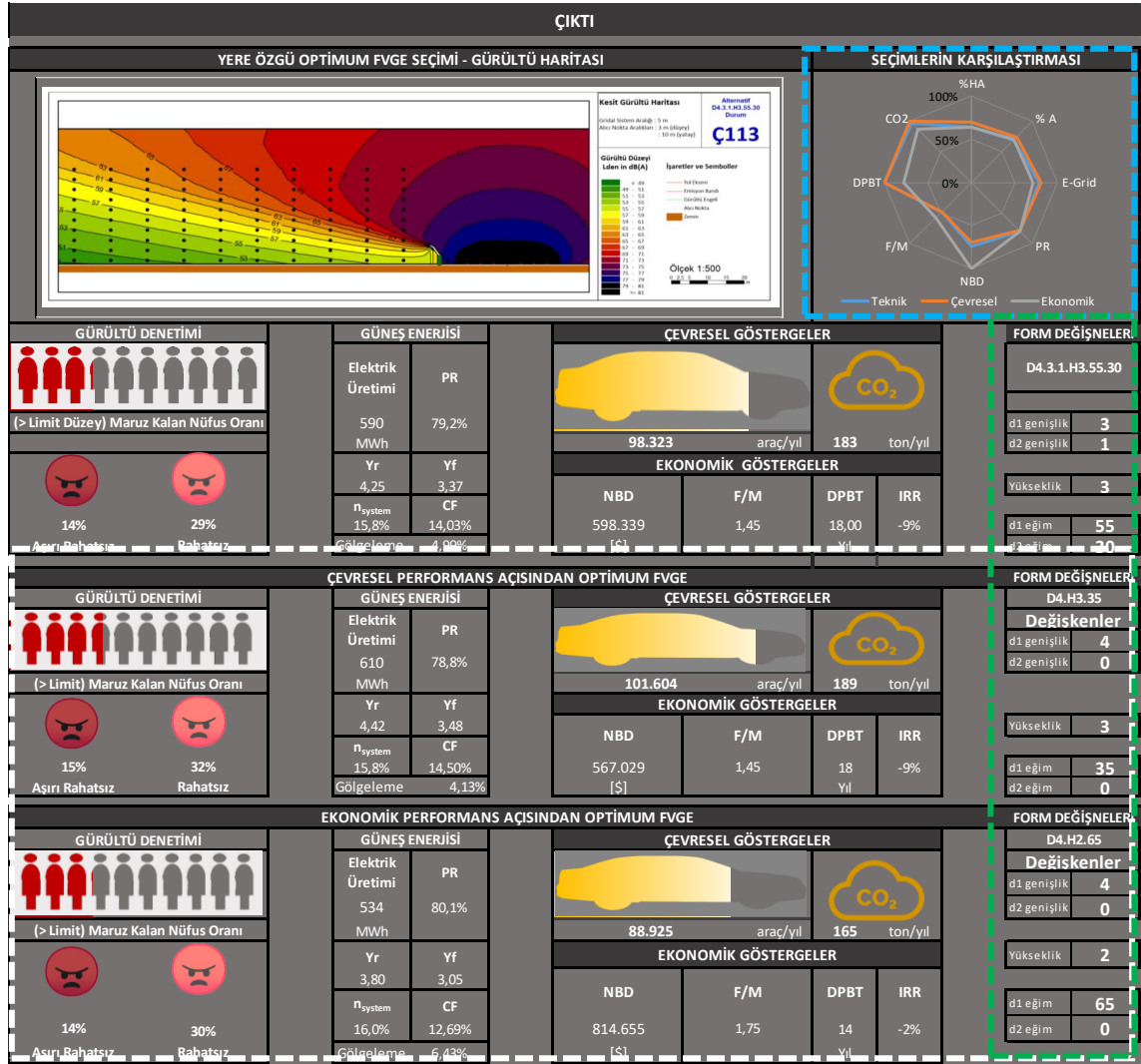
5.4.2 Performans Sıralaması

Yön ve panel genişliği doğrultusunda filtrelenen alternatiflerin yaşam ömrü maliyetleri, değerlendirme modülünde hesaplanır. Bu modülde yapılan hesaplamalar ekonomik ve çevresel performans açısından sıralanarak iki ayrı optimum seçim daha kullanıcıya sunulur.

Filtrelenen FVGE alternatiflerinin, sırasıyla ekonomik ve çevresel performans göstergeleri hesaplanır. Net bugünkü değeri maksimum olan alternatif, ekonomik performans açısından optimum FVGE olarak arayüzde kullanıcıya sunulur. Karbondioksit azaltımı maksimum olan alternatif, çevresel performans açısından optimum FVGE olarak arayüzde kullanıcıya sunulur. Seçimin, kesit değişkenleri ile birlikte performans göstergeleri de arayüzde ifade edilir.

Çevresel ve ekonomik performans açısından maksimum değeri sağlayan FVGE seçimleri ve performans göstergeleri Şekil 5.38'de beyaz çerçeve ile gösterilmiştir. Performans göstergelerine ek olarak; üretilen enerjiden yararlanması öngörülen elektrikli araç sayısı ve FV sistemin gölgeleme oranları da gösterilmektedir. Ayrıca, mavi çerçeve ile gösterilen 'Seçimlerin karşılaştırılması' bölümünde; teknik, çevresel ve ekonomik açıdan optimum FVGE alternatiflerinin performans göstergeleri örümcek grafik üzerinde karşılaştırılmaktadır. Teknik, ekonomik ve çevresel açıdan optimum FVGE seçimlerinin form değişkenleri yeşil çerçeve ile işaretlenen bölümde kullanıcıya

sunulmaktadır. Grafik üzerinde; gürültüden rahatsız ve aşırı rahatsız olan nüfus oranları, yıllık elektrik enerjisi üretimi, FV sistemin performans oranı, net bugünkü değeri, fayda/maliyet oranı, geri ödeme süresi ve yıllık önlenen karbondioksit salınımı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.38 FVGE karar destek aracı arayüzünün performans çıktıları bölümü

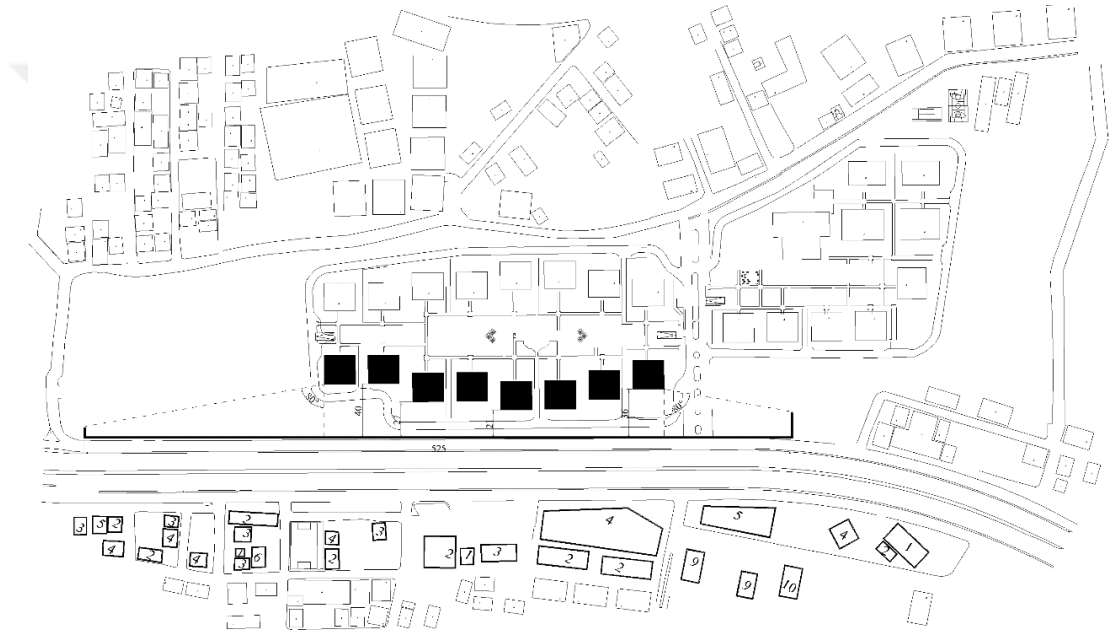
FVGE KARAR DESTEK ARACI UYGULAMASI

Bu bölümde araç, gerçek bir alanda uygulanmaktadır. Keşfedici alan çalışmasında incelenen yerleşim, aracın çalışma prensibi doğrultusunda değerlendirilmiştir. Aşırı gürültü düzeylerine sahip olan ve güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir alanda, alana özgü veriler doğrultusunda teknik, çevresel ve ekonomik açıdan optimum FVGE seçiminin yapılması için aracın kullanım adımları sırasıyla aşağıda özetlenmiştir;

- Metodoloji kurma aşamasında, alanın yol arakesiti ile olan eğimi azimut olarak ve alanın panel genişliği ihtiyacı tanımlanarak veri tabanından uygun FVGE alternatifleri filtrelenir.
- Parametrik çalışma aşamasında; çevresel veriler, FV sistem verileri, gürültü düzeyleri, yerleşim verileri ve değerlendirme kriteri gibi tüm veriler 'kullanıcı tanımlı' olarak belirtilen tabloya tanımlanır.
- Girdilerle eş zamanlı olarak alanın güneş enerjisi ve akustik ortam açısından mevcut durum değerlendirmesi 'Mevcut Durum' tablosunda gösterilir.
- Girdiler tamamlandıktan sonra sırasıyla 'Güneş Enerjisi Hesapla', 'Gün Işığı Kaybı Hesapla' butonlarına tıklanarak filtrelenen alternatifler için Excel Macro'su ile döngüsel hesaplamalar aktif hale getirilir.
- Modüllerde butonla başlatılan hesaplama sonucunda; üretilen elektrik enerjisi miktarı, limit değer üzerinde gürültüye maruz kalan kişi sayısı ve zemin kat cephesindeki ışınım miktarı gibi performans kriterleri çıktıları elde edilir.
- Performans analizi aşamasında, performans kriterleri ve kriter ağırlıkları doğrultusunda, çok kriterli karar verme tekniklerinden TOPSIS metodu ile alternatiflerin sıralaması yapılarak, kullanıcı tanımlı veya yere özgü optimum FVGE seçimi yapılır.

- Değerlendirme aşamasında, 25 yıllık fayda/maliyet analizleri ile çevresel ve ekonomik açıdan optimum FVGE seçimleri yapılır ve performans göstergeleri sunulur.

Açıklayıcı alan çalışması olarak seçilen yerleşim, İstanbul Anadolu Yakasında Çekmeköy mevkiinde, keşfedici alan çalışmasının yapıldığı toplu konut yerleşimidir. Çalışma alanının hali hazır haritası Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında, otoyol ile arasında başka kütle bulunmayan ilk sıradaki bloklar değerlendirilmiştir. Değerlendirilen bloklar 5 katlıdır ve Şekil 6.1’de siyah ile gösterilmiştir.

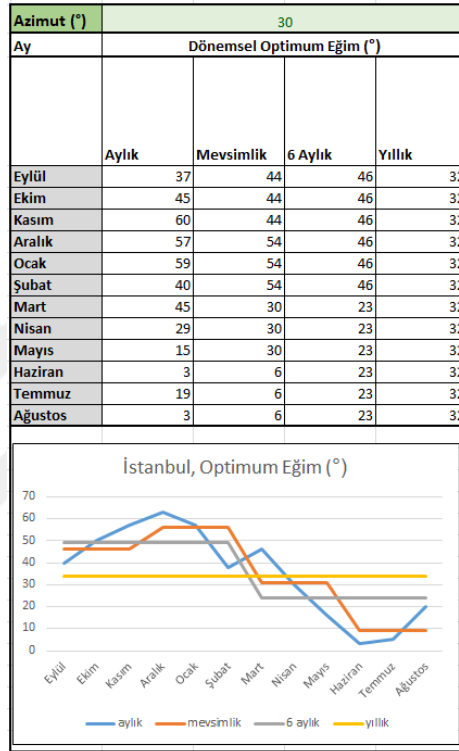


Şekil 6.1 Açıklayıcı alan çalışmasının yapıldığı alanın güncel hali hazır haritası

6.1 Metodoloji Kurma

FVGE'nin konumu, otopark olarak kullanıldığı ve yeterli alana sahip olduğu için 5 m olarak planlanmıştır ve açılır listeden seçilmiştir. Yerleşim ile yol arakesiti -30° azimut açısına sahiptir. Azimut açısı araca tanımlandığında, aracın kullanıcıya sunulmayan optimum eğim hesaplama sayfasında, dönemsel optimum eğim açıları hesaplanarak Şekil 6.2'deki veriler ve grafik üretilmektedir. Yıllık optimum eğim açısı, beş ve katları olmak üzere aşağı veya yukarı yuvarlanarak, çift kırınım yüzeyine sahip engel alternatiflerinde ikinci kırınım yüzeyinin eğim açısını belirler.

Panel genişliği ve azimut açısı, FVGE veritabanından alternatiflerin filtrelenebilmesi için gerekli iki girdidir. Veritabanından, panel genişliği 5 m olan 18 adet tek kırınımlı (1K) FVGE ve 60 adet çift kırınımlı (2K) FVGE olmak üzere 78 alternatif çekilmiştir. Daha sonra, 2K engeller arasından, ikinci kırınım yüzeyi yıllık optimum eğim açısına yakınsayan alternatifler filtrelenerek, 2K engel adedi 20'ye düşürülmüştür. Böylelikle, çalışma için, 18'i 1K ve 20'si 2K olmak üzere toplam 38 FVGE alternatifi belirlenmiştir.



Şekil 6.2 İstanbul ili için kullanıcı tanımlı azimut açısına göre hesaplanan dönemsel optimum eğim açılarını gösteren hesaplama tablosu

6.2 Parametrik Çalışma

Karar destek aracının parametrik çalışma bölümünde, kullanıcı girdileri doğrultusunda güneş enerjisi ve gürültü denetimi modüllerinde hesaplamalar yapılmaktadır. Hesaplama adımları aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

6.2.1 Güneş Enerjisi Modülü Girdileri

Güneş enerjisi modülünde, gömülü iklim ve ışıınım verileriyle Perez transpozisyon modeli doğrultusunda hesaplamalar yapılmaktadır. Filtrelenen FVGE alternatiflerinin, alana özgü hesaplamalarının yapılabilmesi için, çevresel

veriler ve FV sistem verileri modüle tanımlanmıştır. Güneş enerjisi modülü girdileri aşağıdaki sıraya göre modüle tanımlanmıştır;

- **Çevresel veriler;** yolun karşısındaki binaların ortalama yüksekliği, yolun genişliği ve albedo (zemin yansıtıcılığı) katsayısını kapsamaktadır. Yerleşimin kenarında olduğu yol 37 m genişliğe sahiptir. Kent içi uygulamalarda genel olarak albedo katsayısı 0,2 olarak hesaplamalara dahil edilmektedir. Yolun karşısındaki binaların ortalama yüksekliği Şekil 6.1 yer alan hali hazır harita yardımıyla hesaplanmıştır. FVGE karşısındaki kalın çerçeveli bina kütlelerinin kat sayılarının ortalaması alınarak (yaklaşık olarak 4 katlı olmak üzere ortalama 12 m) sisteme tanımlanmıştır.
- **Sistem girdileri;** engel uzunluğu, modül verimliliği ve modül gücü bilgilerini kapsamaktadır. FVGE uzunluğu, çalışma alanının başındaki ve sonundaki binalardan, 80° yatay izdüşüm açısız mesafesiyle (bkz. Şekil 6.1) 525 m olarak hesaplanmıştır. FV sistemin 200 Wp güce sahip ve %20 verimli modüllerden oluştuğu varsayılarak araca tanımlanmıştır.

6.2.2 Gürültü Denetimi Modülü Girdileri

Gürültü denetimi modülünde, filtrelenen FVGE alternatiflerinin gürültü azaltımı çıktıları; mevcut gürültü düzeyi, değerlendirme kriteri ve yerleşim verilerine göre uyarlanarak alternatiflerin gürültü denetimi performansları değerlendirilmektedir. Modülün girdileri için aşağıdaki adımlar izlenmiştir;

- **Gürültü düzeyleri;** gündüz, akşam ve gece zaman aralıklarının gürültü düzeyi göstergelerini kapsamaktadır. Araca gürültü düzeyi ölçümlerinin tanımlanması için, alanda gürültü düzeyi ölçümleri yapılmıştır. Tüm ölçümler Brüel&Kjær Tip 2236 ses düzeyi ölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler; TS 9798 standardı doğrultusunda, bahçe duvarına 2 m mesafede, yerden 1,5 m yükseklikte ve mikrofonda rüzgarlık kullanılarak yapılmıştır. Yoldan 1 m mesafede, gündüz, akşam ve gece zaman aralıklarının yoğun olmayan dilimlerinde yapılan 60 dakikalık L_{Aeq} ölçümleri sonucunda sırasıyla 78,1 dBA, 77,1 dBA ve 79,3 dBA gürültü düzeyi değerleri elde edilmiştir.

- **Değerlendirme kriteri;** kullanıcının değerlendirme yapmak istediği zaman dilimini tanımlar. Değerlendirmenin gündüz zaman aralığı için yapıldığı varsayılarak, kriter olarak gündüz seçilmiştir.
- **Yerleşim verileri;** yerleşimin ÇGDYY'deki alan sınıfı, binaların otoyola uzaklıklarına göre adetleri, kat adetleri, katlardaki kişi sayısı ve bina tipi verilerini kapsamaktadır. Çalışmanın yapıldığı alan, yönetmelikte 2. alan sınıfında belirtilen 'ticari yapılar ile gürültüye hassas kullanımların birlikte bulunduğu alanlardan konutların yoğun olarak bulunduğu alanlar' kapsamındadır. Çalışma alanında, otoyola 21 m uzaklıkta 2 bina vardır ve 'engele uzaklık 20 m' hücresinde tanımlanmıştır. Otoyola 27 m uzaklıkta 3 blok ve 36 m uzaklıkta bulunan tek blok 'engele uzaklık 30 m' hücresine 4 yazılarak tanımlanmıştır. Otoyola 40 m uzaklıkta bulunan 2 blok ise 'engele uzaklık 40 m' hücresinde belirtilmiştir. Keşfedici alan çalışmasında yer verildiği gibi, çalışılan alandaki 6 blok A tipi, 2 blok ise B tipi plan yapısına sahiptir. A blok için kattaki kişi sayısı 12, B blok için kattaki kişi sayısı 10 olarak modülde ilgili bölüme tanımlanmıştır.

Güneş enerjisi modülü girdileri ve gürültü denetimi modülü girdileri Şekil 6.3'de verilen 'Kullanıcı Tanımlı' başlıklı tabloda gösterilmiştir. Turuncu metin rengi ile gösterilen hücrelere veri girişi kullanıcı tarafından yapılmaktadır. Beyaz metin rengi olan hücreler sabit değerlerdir. Siyah metin rengi ile gösterilen hücreler ise veri girişiyle eş zamanlı olarak araç tarafından hesaplanmaktadır.

KULLANICI TANIMLI GİRİŞİ	Panel Genişliği	Azimet	GÜRÜLTÜ DÜZEYLERİ		Lden	Lgün	Lakşam	Lgece	DEĞ. KRİTERİ	ALAN SINIFI	BİNA TİPİ
		5	-30			85,4	78,1	77,1	79,3	Ld	2
YERLEŞİM VERİLERİ											
	Engel Uzaklık	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Bina Adedi	6	2	4	2	6	0	6	0	6	0
	Kat Adedi	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Kişi sayısı	10	12	12	10	10	10	10	10	10	10
ÇEVRESEL VERİLER						SİSTEM GİRDİLERİ					
	Yolun Karşısındaki	Yol Genişliği	Albedo				Engel Uzunluğu	Modül verimliliği	Modül Gücü (W)	Sistem Gücü (W)	
	12	37	0,2				525	0,2	200	525000	

Şekil 6.3 FVGE karar destek aracı arayüzünün kullanıcı tanımlı girdi tablosu

6.2.3 Mevcut Durum Özelliklerinin Hesaplanması

Kullanıcı tanımlı veri girişi ile eş zamanlı olarak, alanın mevcut durum özelliklerine yönelik hesaplamalar indeksler aracılığıyla yapılmaktadır. Alanın,

güneş enerjisi uygunluğu ve akustik ortam kalite sınıfı, araca gömülü referans indekslerle belirlenmektedir. Ayrıca, alan sınıfına göre yönetmelikte belirtilen limit değerlerin üzerinde gürültüye maruz kalan kişi oranı ve rahatsız/aşırı rahatsız kişi oranları da hesaplanmaktadır. Açıklayıcı alan çalışmasının girdileri tamamlandıktan sonra, hesaplama sonucunda arayüzün ‘Mevcut Durum’ tablosu Şekil 6.4’de gösterilmiştir.

MEVCUT DURUM	Güneş Enerjisi Uygunluk Sınıfı			Akustik Ortam Kalite Sınıfı			(> Limit Düzey) Maruz Kalan Nüfus Oranı	
	İndeks Değeri	Normalize Değer	Kriter Ağırlığı	Lden	IV	Kismen Kiri	Aşırı Rahatsız	Rahatsız
	3,56	0,71	0,29	Ld	III	Hafif Kiri	44%	67%
4	0		CWgüneş	Le	IV	Kismen Kiri		
				Ln	V	Ciddi Ölçüde Kiri		

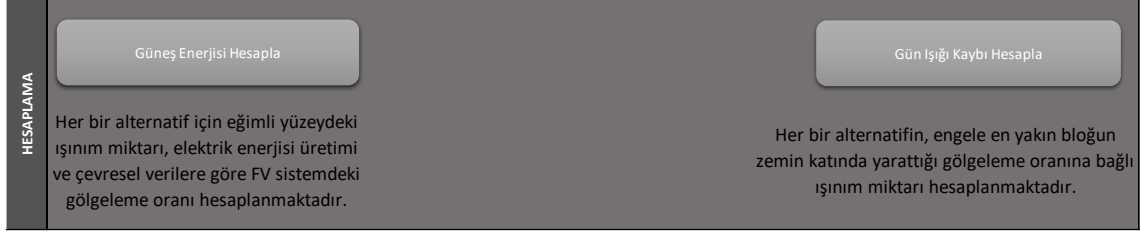
Şekil 6.4 FVGE karar destek aracı arayüzünün mevcut durum tablosu

Mevcut durum değerlendirildiğinde, otoyol ile alıcı noktalar arasında herhangi bir engel olmadığı durumda, yerleşimdeki nüfusun tümü limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalmaktadır. Yerleşimdeki popülasyonun %44’ü gürültüden aşırı rahatsız iken, %67’si rahatsız durumdadır.

6.2.4 Performans Hesaplamalarının Başlatılması

Filtrelenen alternatiflerin her birinin, güneş enerjisi ve gün ışığı kaybına yönelik performans kriterleri için döngüsel hesaplamaların başlatılması gerekmektedir. Şekil 6.5’de görünen, FVGE karar destek aracının ‘Hesaplama’ tablosunda yer alan ‘Güneş Enerjisi Hesapla’ ve ‘Gün Işığı Kaybı Hesapla’ butonları ile, filtrelenen FVGE alternatiflerinin form değişkenleri güneş enerjisi modülüne aktarılarak performans çıktıları elde edilmektedir.

FVGE alternatiflerinin gürültü denetimi performans çıktıları araçta kayıtlı olduğu için hesaplama gerekmemektedir. Filtrelenen FVGE alternatiflerinin, alıcı noktalardaki gürültü azaltımı sonuçları; yerleşim verileri, gürültü düzeyleri ve değerlendirme kriterine göre ikinci bir filtreleme ile alana uyarlanmaktadır.



Şekil 6.5 FVGE karar destek aracı arayüzünün hesaplama tablosu

Hesaplama sonucunda, filtrelenen FVGE alternatiflerinin performans kriteri çıktıları Ek R'de yer alan Tablo R.1'de gösterilmiştir.

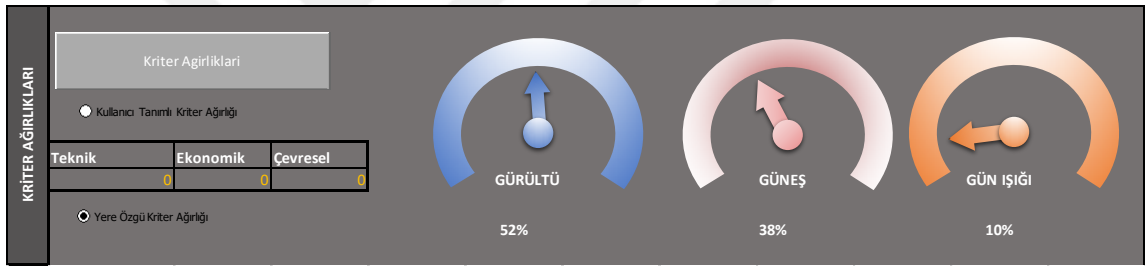
6.3 Performans Analizi

Performans analizi; kriterlerin çıktıları, kullanıcı öncelikleri veya yere özgü öncelikler doğrultusunda TOPSIS metodu ile yapılan seçime yönelik hesaplamaları içermektedir. Performans kriterlerinin sıralaması için, geliştirilen kriter ağırlıklandırma şeması ile öncelik hiyerarşisi belirlenir. Kriter ağırlıklandırma için aşağıdaki adımlar izlenmektedir;

- FVGE karar destek aracı arayüzünün 'Kriter Ağırlıkları' bölümünde, kullanıcı tanımlı kriter ağırlığı veya yere özgü kriter ağırlığı seçiminden biri yapılmalıdır.
- FVGE alternatiflerinin kriter ağırlıkları, arayüzde 'Kriter Ağırlıkları' tablosunda yapılan seçime göre grafikleştirilmektedir. Arayüzün kriter ağırlıkları bölümünün, açıklayıcı alan çalışmasının 'Yere Özgü Kriter Ağırlıkları' seçimi için örneği Şekil 6.6'da gösterilmiştir.
- 'Yere Özgü Kriter Ağırlığı' seçimi yapıldığında; alan, mekan ve enerji düzeyinde değerlendirmelerin yapıldığı indeksler doğrultusunda alanın güneş enerjisi, gürültü denetimi ve gün ışığı öncelikleri belirlenerek TOPSIS metoduyla 'yere özgü optimum FVGE seçimi' yapılmaktadır. Açıklayıcı alan çalışmasında, yere özgü kriter ağırlığı seçimiyle araçta oluşturulan TOPSIS tablosu ve filtrelenen 38 alternatifin performans sıralaması Ek R'de yer alan Tablo S.2'de gösterilmiştir.
- Kullanıcının, teknik, çevresel veya ekonomik açıdan kıstası varsa, 'Kullanıcı Tanımlı Kriter Ağırlığı' seçilmelidir. İlgili hücrelere; teknik, ekonomik ve

çevresel performans öncelikleri, kriterlerinin ağırlıkları toplamı 1 olmak üzere 0 ila 1 arasında değerler girilerek 'Kriter Ağırlıkları' butonuna tıklama yapılmalıdır.

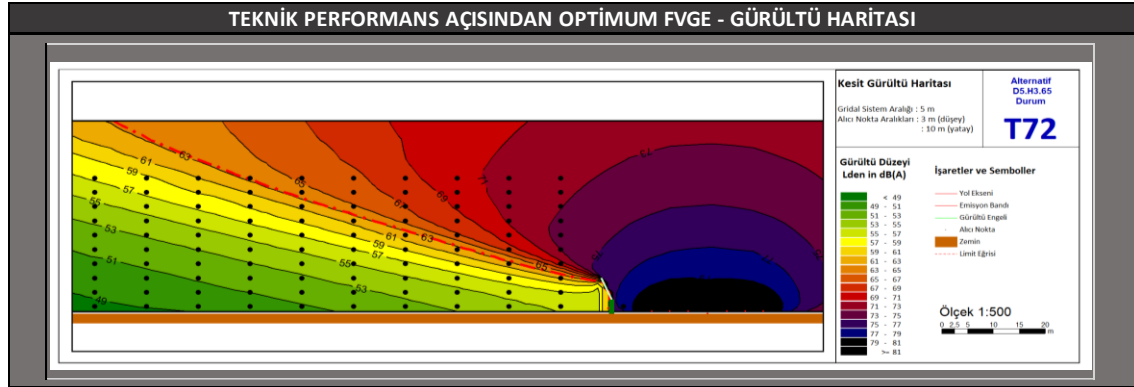
- Teknik performans kriteri, güneş enerjisi ve gürültü denetimi çıktılarını değerlendirir. Ekonomik performans, FVGE alternatiflerinin net bugünkü değerlerini; çevresel performans ise FVGE alternatifler tarafından yılda önlenen karbondioksit miktarını değerlendirir. Net bugünkü değer ve önlenen karbondioksit miktarı değerleri, değerlendirme modülünden TOPSIS tablosuna çekilir. Tanımlanan kriter ağırlıkları doğrultusunda TOPSIS metodu ile bir seçim yapılır. Teknik performansa atanan katsayının, gürültü ve güneş arasında dağılımı yere özgü kriter ağırlığında güneş enerjisi ve gürültü denetimi kriter ağırlıklarının biribine oranlarının verilen kriter ağırlığına normalize edilmesi ile yapılır.



Şekil 6.6 FVGE karar destek aracı arayüzünün yere özgü kriter ağırlıkları tablosu Alanın güneş enerjisi potansiyeli yüksek olduğu için kayıplara toleransı fazladır. Gürültü kritiklik düzeyi daha fazla olduğu için önceliği ve dolayısıyla kriter ağırlığı daha fazladır.

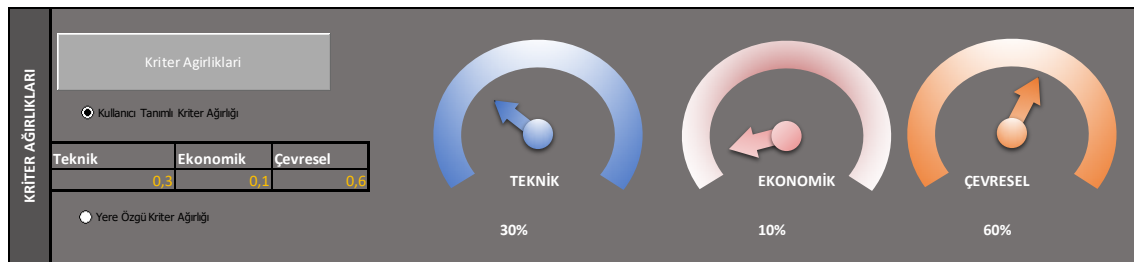
TOPSIS sonucunda, açıklayıcı alan çalışması için yere özgü kriter ağırlıkları doğrultusunda teknik performans açısından optimum FVGE tipi Ek-S Tablo S.2'de kırmızı ile gösterilen D5.H3.65 kodlu alternatiftir. Teknik performans açısından optimum FVGE belirlendikten sonra, seçime ait gürültü kesit haritası karar destek aracına kayıtlı 'Kesit Haritaları' veri tabanından çekilmektedir ve aracın 'Çıktı' bölümünde Şekil 6.7'deki gibi gösterilmektedir. Kesit haritasında, FVGE'nin tek kırımım yüzeyine sahip 72 numaralı engel olduğu (T72)

görülmektedir. Alanın ve alıcı noktaların 1/500 ölçekli kesiti üzerinde, FVGE alternatifinin yerleşimdeki gürültü düzeyine etkisi okunmaktadır.



Şekil 6.7 FVGE karar destek aracı arayüzünün, yere özgü kriter ağırlıkları ile teknik performans açısından optimum FVGE seçiminin gürültü haritasının gösterildiği bölüm

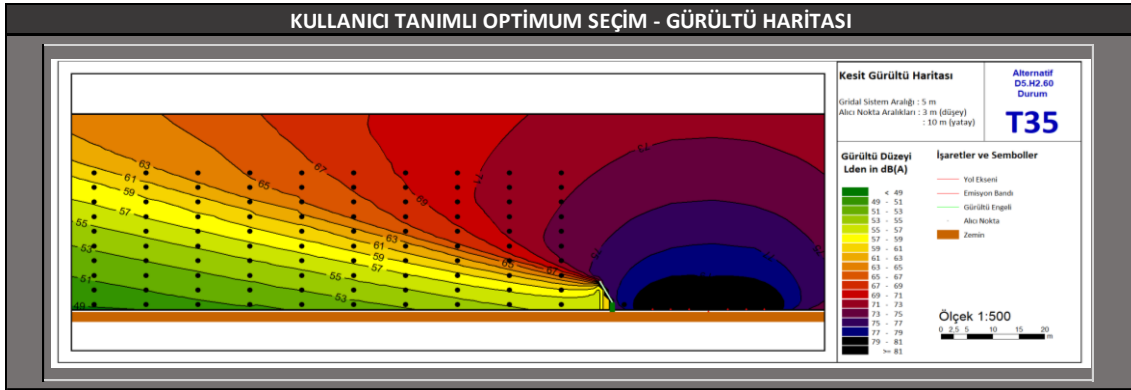
Açıklayıcı alan çalışmasında, ‘Kullanıcı Tanımlı Kriter Ağırlığı’ seçimi yapıldığında; kullanıcının öncelikleri doğrultusunda, teknik, ekonomik ve çevresel performans hücrelerine tanımlanan kriter ağırlıkları ve performans çıktıları TOPSIS metoduyla değerlendirilerek, ‘Kullanıcı Tanımlı Optimum Seçim’ yapılır. Açıklayıcı alan çalışmasında, kullanıcı tanımlı kriter ağırlığı seçimiyle, filtrelenen 38 alternatifin performans sıralaması ve araçta oluşturulan TOPSIS tablosu Ek R’de yer alan Tablo R.3 ve Tablo R.4’te gösterilmiştir. Arayüzün kriter ağırlıkları bölümünün, açıklayıcı alan çalışmasının ‘Kullanıcı Tanımlı Kriter Ağırlıkları’ seçimi için örneği Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 FVGE karar destek aracı arayüzünün kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları tablosu

TOPSIS sonucunda, açıklayıcı alan çalışması için kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları doğrultusunda optimum FVGE tipi Ek R Tablo R.4’te kırmızı ile gösterilen D5.H2.60 kodlu alternatiftir. Kullanıcı tanımlı optimum FVGE

belirlendikten sonra, seçime ait gürültü kesit haritası karar destek aracına kayıtlı 'Kesit Haritaları' veri tabanından çekilmektedir ve aracın 'Çıktı' bölümünde Şekil 6.9'daki gibi gösterilmektedir. Kesit haritasında, FVGE'nin tek kırınım yüzeyine sahip 35 numaralı engel olduğu (T35) görünmektedir. Alanın ve alıcı noktaların 1/500 ölçekli kesiti üzerinde, FVGE alternatifinin yerleşimdeki gürültü düzeyine etkisi okunmaktadır.



Şekil 6.9 FVGE karar destek aracı arayüzünün, kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları optimum FVGE seçiminin gürültü haritasının gösterildiği bölüm

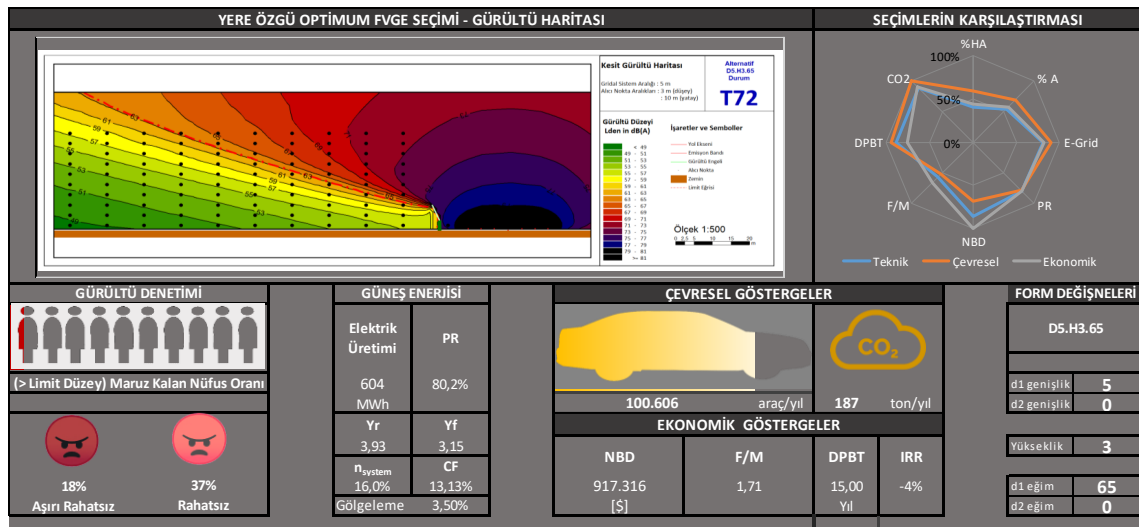
6.4 Değerlendirme

Değerlendirme aşaması, hem TOPSIS ile yapılan seçimin teknik, ekonomik ve çevresel performans göstergelerini sunma; hem de, ekonomik ve çevresel açıdan maksimum performansı sağlayan FVGE'yi belirleme amacına yönelik tasarlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda, sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenir.

- Filtrelenen FVGE alternatiflerin tümünün güneş enerjisi performansı ve gürültü denetimi teknik göstergeleri hesaplanır.
- Teknik göstergeler ve form değişkenleri doğrultusunda sistem alternatiflerinin 25 yıllık fayda/maliyet analizleri yapılır.
- Yapılan analiz sonucunda, önlenen CO₂ salınımının en fazla olduğu alternatif 'Çevresel Performans Açısından Optimum FVGE' olarak belirlenir.
- Net bugünkü değeri en fazla olan engel alternatifi ise 'Ekonomik Performans Açısından Optimum FVGE' olarak belirlenir.

- Belirlenen FVGE alternatiflerinin form değişkenleri ile birlikte; teknik, ekonomik ve çevresel performans göstergeleri 'Çıktı' bölümünde kullanıcıya gösterilir.

Teknik performans göstergeleri, yere özgü kriter ağırlığı ve kullanıcı tanımlı kriter ağırlığı seçimleri ile eş zamanlı olarak çıktı bölümüne yansıtılmaktadır. Açıklayıcı alan çalışmasının yere özgü kriter ağırlıkları ile belirlenen optimum FVGE alternatifinin teknik performans göstergeleri Şekil 6.10'da; kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları ile belirlenen optimum FVGE alternatifinin teknik performans göstergeleri ise Şekil 6. 11'de gösterilmiştir.



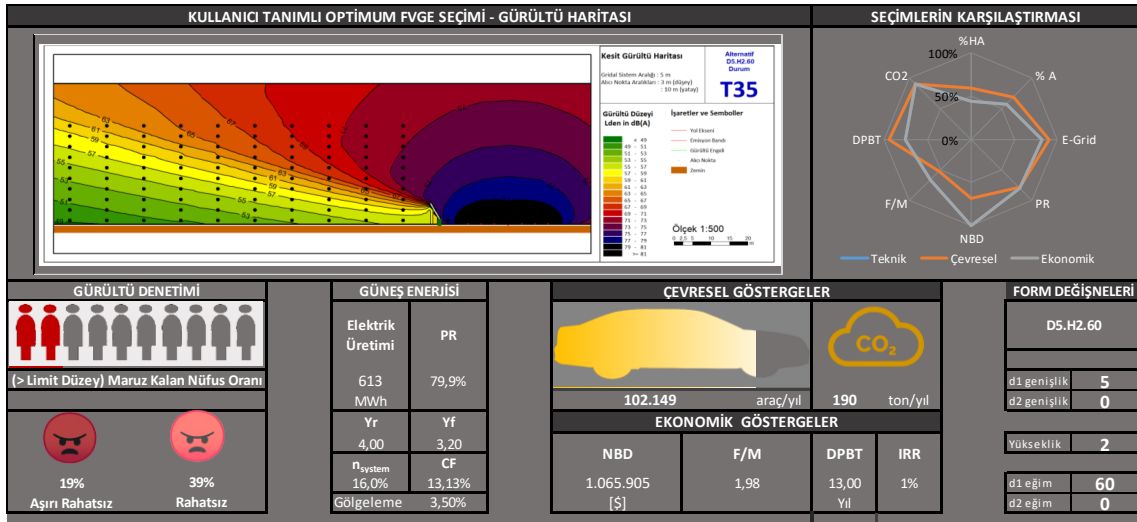
Şekil 6.10 FVGE karar destek aracı arayüzünün, yere özgü kriter ağırlıkları ile optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm

Yere özgü kriter ağırlıkları kullanıldığında, tek kırımım yüzeyine sahip 72 numaralı D5.H3.65 kodlu engel optimum seçim olarak belirlenmiştir. Yere özgü optimum FVGE seçiminin performans göstergeleri aşağıda açıklanmıştır;

- Yere özgü kriter ağırlıkları kullanıldığında, tek kırımım yüzeyine sahip 72 numaralı D5.H3.65 kodlu engel optimum seçim olarak belirlenmiştir.
- D5.H3.65 kodlu engelin kırımım yüzeyi genişliği 5 m, dikey bölümü yüksekliği 3 m ve kırımım yüzeyi eğim açısı 65°dir.
- Mevcut yerleşime D5.H3.65 kodlu FVGE alternatifi uygulanması halinde, yerleşimdeki nüfusun sadece %5'i limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz

kalacağı, gürültüden aşırı rahatsız olan nüfusun %18'e, rahatsız olan nüfus ise %37'ye düşeceği öngörülmektedir.

- Önerilen optimum seçimin, %80,2 performans oranı ile yılda 604 MWh elektrik üretimi sağlaması öngörülmektedir.
- Önerilen sistemin referans verimi 3,93, final verimi 3,15'tir.
- Önerilen sistemin kapasite faktörü %13,13, sistemin toplam verimi ise %16'dır.
- FVGE sistem alanınının %3,5'i, yakın çevreden dolayı gölgelemeye maruz kalmaktadır.
- FVGE sistem ile bir yılda elde edilen elektrik, ikinci düzey şarj süresi ile 400 km menzilli 100.606 elektrikli araç için enerji sağlar.
- Sistem ile üretilen elektrik enerjisi, yılda 187 ton karbondioksit salınımını önler.
- Sistemin 25 yıllık fayda/maliyet analizi sonucunda net bugünkü değeri 917.316 \$ olarak hesaplanmıştır. Fayda/maliyet oranı 1,71, geri ödeme süresi 15 yıl ve iç karlılık oranı %-4'tür.



Şekil 6. 11 FVGE karar destek aracı arayüzünün, kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları ile optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm

Kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları kullanıldığında, tek kırımım yüzeyine sahip 35 numaralı D5.H2.60 kodlu engel optimum seçim olarak belirlenmiştir (Şekil 6. 11). Kullanıcı tanımlı optimum FVGE seçiminin performans göstergeleri aşağıda açıklanmıştır;

- Yere özgü kriter ağırlıkları kullanıldığında, tek kırımım yüzeyine sahip 35 numaralı D5.H2.60 kodlu engel optimum seçim olarak belirlenmiştir.
- D5.H2.60 kodlu engelin kırımım yüzeyi genişliği 5 m, dikey bölümü yüksekliği 2 m ve kırımım yüzeyi eğim açısı 60°'dir.
- Mevcut yerleşime D5.H2.60 kodlu FVGE alternatifi uygulanması halinde, yerleşimdeki nüfusun %20'si limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalacağı, gürültüden aşırı rahatsız olan nüfusun %19'a, rahatsız olan nüfusun ise %39'a düşeceği öngörülmektedir.
- Önerilen optimum seçimin, %79,9 performans oranı ile yılda 613 MWh elektrik üretimi sağlaması öngörülmektedir.
- Önerilen sistemin referans verimi 4,0, final verimi 3,20'dir.
- Önerilen sistemin kapasite faktörü %13,13, sistemin toplam verimi ise %16'dır.
- FVGE sistem alanının %3,5'i, yakın çevreden dolayı gölgelemeye maruz kalmaktadır.
- FVGE sistem ile bir yılda elde edilen elektrik, ikinci düzey şarj süresi ile 400 km menzilli 102.149 elektrikli araç için enerji sağlar.
- Sistem ile üretilen elektrik enerjisi, yılda 190 ton karbondioksit salınımını önler.
- Sistemin 25 yıllık fayda/maliyet analizi sonucunda net bugünkü değeri 1.065.905 \$ olarak hesaplanmıştır. Fayda/maliyet oranı 1,98, geri ödeme süresi 13 yıl ve iç karlılık oranı %1'dir.

Filterelenen FVGE alternatiflerinin, form değişkenleri ve performans kriterleri doğrultusunda 25 yıllık ekonomik analizleri ile gider maliyetleri (inşa ve işletme)

ve fayda (elektrik satışı, önlenen karbon salınımının değeri, gürültüden rahatsız kişi sayısının değeri) maliyetleri hesaplanır. Yaşam döngüsü analizleri doğrultusunda; net bugünkü değer, fayda/maliyet oranı, geri ödeme süresi ve iç karlılık oranı değerleri elde edilir. Filtrelenen FVGE alternatifleri arasında, net bugünkü değeri en yüksek olan değer 'Ekonomik Performans Açısından Optimum FVGE', önlenen karbondioksit salınımı en yüksek olan alternatif ise 'Çevresel Performans Açısından Optimum FVGE' olarak belirlenerek göstergeleri sunulur. Açıklayıcı alan çalışması için, arayüzde ekonomik ve çevresel açıdan optimum FVGE alternatifinin ve göstergelerinin sunulduğu kısım Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Belirlenen alternatiflerin, 25 yıllık ekonomik analizleri Ek-S'de yer alan tablolarda gösterilmiştir.

GÜRÜLTÜ DENETİMİ		ÇEVRESEL PERFORMANS AÇISINDAN OPTİMUM FVGE				FORM DEĞİŞKENLERİ			
 (> Limit) Maruz Kalan Nüfus Oranı		GÜNEŞ ENERJİSİ		ÇEVRESEL GÖSTERGELER		D5.H3.30			
 26% Aşırı Rahatsız 47% Rahatsız		Elektrik Üretimi	PR	 112,462 araç/yıl 190 ton/yıl		Değişkenler			
		675 MWh	78,9%			d1 genişlik	5		
		Yr	Yf	EKONOMİK GÖSTERGELER		d2 genişlik	0		
		4,46	3,52	NBD	F/M	DPT	Yükseklik		
		n _{system}	CF	723.939 [\$]	1,57	16 Yıl	3		
		15,8%	13,33%	IRR		d1 eğim			
		Gölgeleme	4,86%	-6%		30			
						d2 eğim			
						0			

Şekil 6.12 FVGE karar destek aracı arayüzünün, çevresel performans açısından optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm

Çevresel performans açısından optimum seçim, tek kırımım yüzeyine sahip D5.H3.30 kodlu engel optimum seçim olarak belirlenmiştir. Çevresel performans açısından optimum FVGE seçiminin performans göstergeleri aşağıda açıklanmıştır;

- D5.H3.30 kodlu engelin kırımım yüzeyi genişliği 5 m, dikey bölümü yüksekliği 3 m ve kırımım yüzeyi eğim açısı 30°dir.
- Mevcut yerleşime D5.H3.30 kodlu FVGE alternatifi uygulanması halinde, yerleşimdeki nüfusun %40'ı limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalacağı, gürültüden aşırı rahatsız olan nüfusun %26'ya, rahatsız olan nüfusun ise %47'ye düşeceği öngörülmektedir.
- Önerilen optimum seçimin, %78,9 performans oranı ile yılda 675 MWh elektrik üretimi sağlaması öngörülmektedir.

- Önerilen sistemin referans verimi 4,46, final verimi 3,52'dir.
- Önerilen sistemin kapasite faktörü %13,13, sistemin toplam verimi ise %15,8'dir.
- FVGE sistem alanının gölgelenen alanı %4,86 büyüklüğe sahiptir.
- FVGE sistem ile elde edilen elektrik, ikinci düzey şarj süresi ile 400 km menzilli 112.462 elektrikli araç için enerji sağlar.
- Sistem ile üretilen elektrik enerjisi, yılda 190 ton karbondioksit salınımını önler.
- Sistemin 25 yıllık fayda/maliyet analizi sonucunda net bugünkü değeri 723.939 \$ olarak hesaplanmıştır. Fayda/maliyet oranı 1,57, geri ödeme süresi 16 yıl ve iç karlılık oranı %-6'dır.

EKONOMİK PERFORMANS AÇISINDAN OPTIMUM FVGE				FORM DEĞİŞKENLERİ	
GÜRÜLTÜ DENETİMİ		GÜNEŞ ENERJİSİ		ÇEVRESEL GÖSTERGELER	
		Elektrik Üretimi 613 MWh	PR 79,9%		D5.H2.60
(> Limit) Maruz Kalan Nüfus Oranı		Yr 4,00	Yf 3,20	102.149 araç/yıl	Değişkenler
		n _{system} 16,0%	CF 13,33%	190 ton/yıl	d1 genişlik 5
19% Aşırı Rahatsız		Gölgeleme 4,86%			d2 genişlik 0
39% Rahatsız					Yükseklik 2
EKONOMİK GÖSTERGELER					
		NBD 1.065.905 [\$]	F/M 1,98	DPBT 13 Yıl	d1 eğim 60
			IRR 1%		d2 eğim 0

Şekil 6.13 FVGE karar destek aracı arayüzünün, ekonomik performans açısından optimum FVGE seçiminin teknik, çevresel ve ekonomik göstergelerinin gösterildiği bölüm

Ekonomik performans açısından optimum seçim, tek kırımın yüzeyine sahip D5.H2.60 kodlu engel optimum seçim olarak belirlenmiştir (Şekil 6.13). Kullanıcı tanımlı optimum FVGE seçimi ile aynı özelliklere sahiptir.

6.4.1 Bulguların Değerlendirilmesi

Açıklayıcı alan çalışması kapsamında, FVGE karar destek aracının çıktıları doğrultusunda yapılan çıkarımlar aşağıdaki gibidir;

- Yere özgü optimum FVGE seçimi, gürültü denetimi performansı en yüksek olan sonuçtur. Gürültü denetimi kriter ağırlığının en fazla olmasının yanında, gürültü denetimine ilişkin çıktıların varyans katsayılarının diğer kriterlerden önemli ölçüde fazla olması sonuca etkisini artırmıştır.

- Kullanıcı tanımlı değerlendirmede ise, net bugünkü değeri en yüksek olan sonuç optimum seçim olarak belirlenmiştir. Net bugünkü değerleri karşılaştıran ekonomik performansın kriter ağırlığı en düşük olmasına rağmen, varyans katsayısı yüksek olduğu için seçimde belirleyici olmaktadır.
- Kullanıcı tanımlı değerlendirmede, çevresel performans oranının kriter ağırlığı en yüksek olduğu için, en fazla karbondioksit salınımını önleyen alternatif optimum seçim olarak belirlenmiştir.
- Optimum seçimler arasında, fayda/maliyet oranı en yüksek olan değer kullanıcı tanımlı seçenek ile belirlenmiştir. Bunun nedeni, ekonominin belirleyici parametreler arasına alınmasındandır.
- Final verimi, referans verimi ve kapasite faktörü en yüksek olan alternatif, çevresel performans açısından optimum FVGE seçimidir. Çünkü, önlenen CO₂ üretilen elektrik enerjisi ile doğrudan ilişkilidir.

Teknik (yere özgü ve kullanıcı tanımlı), çevresel ve ekonomik performans açısından belirlenen 3 optimum FVGE seçimi, fotovoltaik sistemin entegre edilmediği durumlar için finansal açıdan analiz edilmiştir. Yalnız gürültü engelinin inşa edildiği durum ile FVGE'yi finansal açıdan karşılaştırmak amaçlanmıştır. Optimum seçim ile belirlenen FVGE alternatifinin toplam yüksekliği, gürültü engelinin toplam yüksekliği olarak kabul edilerek fayda/maliyet analizleri yapılmıştır ve analiz sonuçları gösterilmiştir. Tablo 6.1'de durum sütununda 1 ile ifade edilenler optimum FVGE seçimini, 2 ile ifade edilenler ise FV sistemin maliyet analizine dahil edilmediği (sadece, FVGE ile eş yükseklikte gürültü engeli inşa edildiği) durumu temsil etmektedir.

Farklı performans göstergeleri açısından belirlenen optimum FVGE seçimleri ayrı ayrı ele alınmıştır;

Tablo 6.1 25 yıllık FVGE maliyetleri ile FV sistemin hariç tutulduğu maliyet analizlerinin karşılaştırması

Durum	FVGE Kodu	İnşa Maliyeti		İşletme Maliyet		Fayda Maliyeti		İndirgenmiş		Ekonomik Göstergeler		
		FV İnşa	GE İnşa	FV İşletme	GE İşletme	FV Fayda	GE Fayda	FVGE Maliyet	FVGE Fayda	NBD	F/M	PBT
1	D5.H3.65	678837	294525	166900	178916	1552634	707382	1286200	2203516	917316	1,7131	15
2	D5.H3.65	0	558432	0	246801	0	707382	785102	689697	-95404	0,87	28
1	D5.H2.60	627867	152250	166900	172233	1553214	659274	1091271	2157176	1065905	1,9767	13
2	D5.H2.60		411075	0	241737	0	659083	636492	642606	6113,886	1,0096	24
1	D5.H3.30	653352	294525	166900	178916	1557088	479108	1261352	1985291	723939	1,5739	16
2	D5.H3.30	0	444874	0	242899		478105	670579	466152	-204426	0,69	27

- Yere özgü kriter ağırlıkları ile belirlenen D5.H3.65 kodlu alternatifin ilk yatırım maliyeti, yalnızca gürültü engelinin inşa maliyetinden %74; işletme maliyeti ise %40 daha fazladır. FVGE alternatifin fayda maliyeti ise, sadece gürültü engelinin inşa edildiği duruma göre %219 fazladır. Fayda maliyet oranı 0,87'den 1,71'e yükselmiş ve geri ödeme süresi 13 yıl kısalmıştır.
- Kullanıcı tanımlı ve ekonomik performans açısından optimum sağlayan D5.H2.60 kodlu alternatifin ilk yatırım maliyeti, yalnızca gürültü engelinin inşa maliyetinden %90; işletme maliyeti ise %40 daha fazladır. FVGE alternatifin fayda maliyeti ise, sadece gürültü engelinin inşa edildiği duruma göre %235 fazladır. Fayda maliyet oranı 1,00'dan 1,97'e yükselmiş ve geri ödeme süresi 11 yıl kısalmıştır.
- Çevresel performans açısından optimum sağlayan D5.H3.30 kodlu alternatifin ilk yatırım maliyeti, yalnızca gürültü engelinin inşa maliyetinden %113; işletme maliyeti ise %42 daha fazladır. FVGE alternatifin fayda maliyeti ise, sadece gürültü engelinin inşa edildiği duruma göre %352 fazladır. Fayda maliyet oranı 0,69'dan 1,57'y'e yükselmiş ve geri ödeme süresi 11 yıl kısalmıştır.

Çalışmanın ilham kaynağı, fotovoltaik modüller için bir alt strüktür olarak yola bitişik yerleşimleri trafik gürültüsünden koruyan gürültü engellerinin kullanılmasıdır. Yenilenebilir enerji ihtiyacı ile arazi kıtlığı arasındaki çelişki göz önüne alındığında, yol kenarındaki işlevsiz alanlar sosyal ve çevresel faydalar yaratabilir.

Tez çalışması; keşfedici alan çalışması, FVGE karar destek aracının geliştirilmesi ve FVGE karar destek aracının uygulanması olmak üzere 3 temel aşamaya sahiptir. Bölümlerde yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir;

- 1. Keşfedici alan çalışması;** Gerçek bir alanda trafik gürültüsünün etkilerinin azaltılması ve enerji üretimi için geliştirilen FVGE alternatifleri arasından TOPSIS metoduyla optimum bir seçim yapılmıştır. İlk varsayımlara dayalı olarak, sistem parametrelerinin performans etkilerini ve girdilerle ilişkisini gerçek bir alanda ampirik olarak incelemek ve keşfetmek amaçlanmıştır. Yıllık elektrik enerjisi üretimi fotovoltaik sistem performansını, yönetmelikte belirtilen limit düzeyin üzerinde gürültüye maruz kalan alıcı noktaların sayısı gürültü denetimi performansını, otoyola en yakın konut bloklarının ön cephelerinin zemin katlarında oluşan gölgelemeden kaynaklanan ışınım kaybı da çevresel etki kriterini temsil eder.

Keşfedici alan çalışmasının en önemli adımları; gürültü haritalarının doğrulanması, dönemsel optimum eğim açılarının belirlenerek FVGE varyasyonlarının oluşturulması ve kriter ağırlıklarının belirlenmesidir. İBB Trafik Müdürlüğü'nden alınan sensör verilerine göre üretilen gürültü haritaları, alanda yapılan gürültü düzeyi ölçümleri ile doğrulanmıştır. Hesaplama ve ölçüm sonuçları arasındaki farkın, referans çalışmalarda belirtilen kabul edilebilir aralıklarda olması, çalışma sonuçlarına güvenilirlik sağlamıştır. Literatür taraması doğrultusunda, aşamalı olarak 1K ve 2K FVGE alternatifleri türetilmiştir.

Alanın gürültü ve güneş enerjisi modelleri oluşturularak, türetilen tüm alternatiflerin, güneş enerjisi ve gürültü denetimi simülasyonları yapılmıştır. Güneş enerjisi ve gürültü denetiminin eşit öneme sahip olduğu kabul edilerek eşit kriter ağırlıkları tanımlanmıştır. Keşfedici alan çalışmasının sonucunda, performans göstergeleri ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren özetleyici korelasyon matrisi oluşturulmuştur. FVGE alternatiflerinin simülasyon çıktıları ve korelasyon matrisi doğrultusunda elde edilen keşfedici alan çalışması bulguları, karar destek aracı geliştirilirken FVGE veritabanının oluşturulmasına katkı sağlamıştır.

2. Karar Destek Aracının Geliştirilmesi; Keşifsel alan çalışması bulguları doğrultusunda metodoloji kurma, parametrik çalışma ve performans analizi süreci sistematik bir çerçeveye oturtulmuştur. İklim ve çevresel girdiler doğrultusunda, güneş enerjisi verileri ve gürültü denetimi gereksinimi açısından yere özgü veya kullanıcı seçimine dayalı en uygun çözümü belirlemek için geliştirilen yaklaşım tanıtılmaktadır.

İlk olarak, keşfedici alan çalışmasının bulguları doğrultusunda 2K gürültü engellerinin optimum tasarımına yönelik öneriler ortaya konarak, 1K ve 2K toplam 252 engel alternatifin türetildiği FVGE veritabanı oluşturulmuştur. Daha sonra sırasıyla, güneş enerjisi modülü, gürültü denetimi modülü, performans analizi bölümü ve değerlendirme bölümü olmak üzere aracı oluşturan 4 ana bölüm geliştirilmiştir.

Güneş enerjisi modülü, FVGE veritabanında yer alan engel alternatiflerinin güneş paneli yüzeylerindeki ışınım miktarını ve sistemlerin elektrik üretimini miktarını belirlemek hedefine uygun olarak geliştirilmiştir. Yüzeylerdeki ışınım tahmini Perez transpozisyon modeli doğrultusunda hesaplanarak PVsyst yazılımı ile doğrulanmıştır. Azimut açısı, panel eğimi, aylara ve şehirlere göre aracın istatistiksel hata göstergeleri incelenmiştir. Sistemin elektrik üretimi, modül yüzeyindeki ışınım kayıpları ve FV sistem dönüştürme verimliliği kabulleri doğrultusunda hesaplanmıştır.

Gürültü denetimi modülü, FVGE veritabanında yer alan engel alternatiflerinin, mevcut gürültü düzeylerine göre alıcı noktalardaki gürültü

azaltımını belirlemek hedefine uygun olarak geliştirilmiştir. Bu hedef doğrultusunda, geliştirilen 252 adet engel alternatifi SoundPLAN yazılımında oluşturulan farazi bir kentsel ortamda modellenerek gürültü azaltımı çıktıları araca kaydedilmiştir. Kentsel ortamın kurgulanmasında, karayolu, iklim, çevre, alıcı noktalar ve etkilenen nüfusa ilişkin varsayımlar yapılmıştır. Gürültü düzeyleri, alan sınıfı ve yerleşim verileri gibi alana özgü değişkenlere göre kayıtlı veriler uyarlanarak değerlendirme kriterine dayalı gürültü denetimi performans göstergeleri elde edilmektedir.

FVGE karar destek aracının performans analizi bölümünde, alternatiflerin teknik performans değerleri Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metotlarından biri olan TOPSIS ile kriter ağırlıklarına göre karşılaştırılarak ideal seçim belirlenmektedir. Performans analizi modülünde, objektif ve subjektif kriter ağırlıklandırmaya olanak tanıyan yere özgü kriter ağırlıkları ve kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları olmak üzere kriter ağırlıklandırma şeması geliştirilmiştir. Kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları seçeneği, kullanıcının teknik, çevresel ve ekonomik performans öncelikleri doğrultusunda subjektif bir ağırlıklandırma sağlar. Yere özgü kriter ağırlıkları seçeneği ise, alan özelliklerini uluslararası indekslerle değerlendirip gürültü denetimi ve güneş enerjisi performansı önceliğini objektif olarak sınıflandırma prensibine dayanır. Kriter ağırlıklandırmadan sonra, TOPSIS yöntemi adımları araca tanımlanmıştır.

Değerlendirme bölümünde, filtrelenen FVGE alternatiflerinin, ekonomik ve çevresel performansının analizine ve seçimine yönelik adımlara yer verilmiştir. İlk olarak, FVGE teknolojisi bileşenlerinin inşa, işletme ve fayda maliyetlerine yönelik verilerle, yatırım maliyeti ve yaşam döngüsü maliyeti hesaplanmıştır. Bunlar ekonomik ve çevresel performans göstergeleri üzerinden yorumlanarak optimum seçime yönelik performans sıralaması önerilmiştir. Net bugünkü değeri maksimize eden alternatif 'Ekonomik Performans Açısından Optimum FVGE' ve çevresel performansı maksimize eden 'Çevresel Performans Açısından Optimum FVGE' olarak belirlenerek alternatiflerin form değişkenleri ve performans göstergeleri sunulmaktadır.

3. Karar Destek Aracının Uygulanması; Aşırı gürültü düzeylerine sahip olan ve güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir alanda, alana özgü veriler doğrultusunda teknik, çevresel ve ekonomik açıdan optimum FVGE seçiminin yapılması için aracın kullanım adımları gösterilmiştir. Keşfedici alan çalışmasında incelenen yerleşim, aracın çalışma prensibi doğrultusunda değerlendirilmiştir. Girdiler ara yüzle ilişkilendirilerek, bazı noktalarda ara yüzün arka planında yapılan hesaplamalar aktarılmıştır. Optimum fotovoltaik gürültü engellerinin, sadece gürültü engeli inşasına göre ilk yatırım, işletme ve fayda maliyetleri karşılaştırılarak net bugünkü değere, fayda/maliyet oranına ve indirgenmiş geri ödeme süresine etkisi değerlendirilmiştir.

7.1 Bulgular

Optimum FVGE tasarımına yönelik geliştirilen yöntemle ilişkin yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- Kırınım yüzeyi eğim açısı ile enerji performansı arasında negatif ilişki vardır. Üstte yer alan kırığın eğiminin artması enerji üretimini daha büyük ölçüde negatif etkilemektedir. Benzer şekilde, kırığın eğimi ile performans oranı arasındaki negatif ilişki üstte yer alan kırığın eğiminde daha güçlüdür. Bu nedenle enerji üretimini ve performans oranını artırmak için yataya yakın açılar üstte konumlanmalıdır.
- Engel başlığının eğimlerinin artması, fotovoltaik sistemdeki gölgeleme kaybını artırmaktadır, yüzeye gelen güneş ışınımı miktarını azaltmaktadır. Alt yüzeydeki kırığın eğiminin artması gölgelemeyi hafif şekilde artırırken, üstte yer alan kırığın eğimi daha büyük ölçüde gölgeleme kaybını artırmaktadır. Ayrıca, yola yakın olan yüzeyin genişliğinin artması, enerji üretimini ve performans oranını artırırken, üstte yer alan engel yüzeyinin genişlemesi performansa negatif etki etmektedir. Bu nedenle yola yakın olan yüzeyin daha geniş ve daha dik açığa sahip olması, üstte yer alan kırınım yüzeyinin ise daha kısa ve yataya yakın açığa sahip olması gerekmektedir.

- Perez transpozisyon modeline dayalı olarak geliştirilen eğimli yüzeylerdeki güneş ışınımını hesaplama modelinin PVsyst yazılımı ile doğrulanması sonucunda, ortalama hata sapması oranı (% MBE) %5'i geçmediği için (maksimum % 4,37) aracın tahmin performansının güvenilir aralıkta olduğu kanıtlanmıştır.
- Kırınım yüzeylerinin eğim açısının güneş enerjisi performansına ve gürültü denetimine etkisi ters orantılıdır. Eğimin artması elektrik enerjisi üretimini olumsuz etkilerken, gürültü engeli etkinliğini artırmaktadır. Alanın, güneş enerjisi ve gürültü denetimi önceliğini belirlemeye yönelik geliştirilen objektif kriter ağırlıklandırma şeması, bu iki performans kriteri arasındaki dengeyi sağlamaktadır.
- Ortalama 2. düzey sarj istasyonu ile 400 km menzilli 2 araçlık enerji ihtiyacı baz alındığında; modül verimliliği %20 olan FVGE sistemlerde, toplam kırınım yüzeyi genişliğinin minimum 3 m olması; modül verimliliği %15 olan FVGE sistemlerinde ise toplam kırınım yüzeyi genişliğinin minimum 4 m olması gerekmektedir.
- Gürültü engellerine fotovoltaik panellerin entegrasyonu prensibine dayanan fotovoltaik gürültü engelleri, aynı yükseklikte gürültü engelinin inşa edildiği duruma göre; inşa maliyetini yere özgü seçimde %74, kullanıcı tanımlı seçimde ise %90, işletme maliyetini ise %40 artırır. Güneş enerjisi fayda maliyetlerinin dahil olmasıyla, fayda/maliyet oranını en az 2 katı artırarak geri ödeme süresini 11 ila 13 yıl arasında kısaltmaktadır.
- Gürültü denetimine ilişkin çıktıların ve net bugünkü değer çıktılarının varyans katsayılarının diğer performans kriterlerinden önemli ölçüde fazla olması, bu performans göstergelerini TOPSIS değerlendirmelerinde belirleyici hale getirmektedir.
- Çift kırıklı FVGE alternatiflerinin yüksek ilk yatırım maliyeti ve net bugünkü değer yüksek varyans katsayısı nedeniyle, ekonomik performans hesaplamaya dahil edildiğinde optimum FVGE seçimi çift kırıklı engel olamamaktadır.

- Fotovoltaik gürültü engellerinin tasarımına yönelik geliştirilen karar destek aracının girdileri ve çıktıları Tablo 7.1’de özetlenmiştir. Araç arayüzünün kullanıcı tanımlı tablosunda; modül parametrelerine yönelik 2 girdi, güneş enerjisine yönelik 7 girdi, gürültü denetimine yönelik 3 seçim ve 33 girdi, kriter ağırlıklarına yönelik minimum tek seçim veya maksimum 1 seçim ve 3 girdi olmak üzere toplam maksimum 48 girdi gerekmektedir. Bu girdilerle yapılan hesaplamalar doğrultusunda; performanslara göre optimum FVGE seçimini gösteren 3 çıktı, seçimleri karşılaştıran 1 çıktı, kesit gürültü haritasını sunan 1 çıktı, gürültü denetimi etkinliğini gösteren 6 çıktı, güneş enerjisi performansını veren 18 çıktı, çevresel göstergeleri sunan 6 çıktı, ekonomik göstergeleri sunan 12 çıktı ve seçimlerin form değişkenlerini gösteren 15 çıktı olmak üzere toplam 62 çıktı sunulmaktadır.

7.2 Yaygın Etki

FVGE sistemleri, güneş enerjisi uygulamalarında paradigma değişikliği yaratır. Mevcut uygulamalarda, güneş enerjisi sistemleri büyük alanlar gerektirir ve kentten uzak noktalarda planlanır. Bu durum; üretilen enerjinin nihai tüketiciye ulaşmasında kayıpları artırır; yol ağundan uzakta olması nedeniyle ulaşım açısından dezavantajlar yaratır, yeşil alanları ve tarım alanlarını işlevsizleştirir. FVGE sistemleri ile düşük arazi kalitesindeki işlevsiz alanların yenilenebilir enerji üretimi, söz konusu dezavantajları gidererek teknolojisinin uygulanmasında itici güç sağlar.

Mimarlar, mühendisler (yapısal, mekanik, elektrik), fotovoltaik sistem uzmanları, akustik mühendisleri, üreticiler ve kurulumu yapanlar olmak üzere pek çok farklı disiplinden sektör paydaşının dahil olduğu FVGE sistemlerin tasarım ve yapım süreci; geliştirilen karar destek aracı ile sektör aktörlerinin, sade bir şekilde değerlendirme ve seçim yapabilmesine olanak sağlamaktadır.

Tablo 7.1 FVGE karar destek aracı girdileri ve çıktıları

GİRDİ		ÇIKTI
Modül Parametreleri	<ul style="list-style-type: none"> Panel Genişliği Yön (Azimut Açısı) 	<ul style="list-style-type: none"> Teknik Performans Açısından Optimum FVGE (Kullanıcı Tanımlı Optimum FVGE veya Yere Özgü Optimum FVGE) Çevresel Performans Açısından Optimum FVGE Ekonomik Performans Açısından Optimum FVGE Teknik, Ekonomik ve Çevresel Performans Açısından Optimum FVGE'nin Karşılaştırması Kesit gürültü haritası (Sadece Teknik Performans Açısından Optimum Seçim İçin)
Güneş Enerjisi Modülü	<p>Çevresel Veriler</p> <ul style="list-style-type: none"> Yolun Karşısındaki Binaların Ort. Yüksekliği Yol Genişliği Albedo Katsayısı <p>Sistem Girdileri</p> <ul style="list-style-type: none"> Engel Uzunluğu Modül Verimliliği Modül Gücü 	
Gürültü Denetimi Modülü	<p>Gürültü Düzeyleri</p> <ul style="list-style-type: none"> Lgün Lakşam Lgece <p>Değerlendirme Kriteri (Seçim)</p> <ul style="list-style-type: none"> Lgün, Lakş, Lgece <p>Alan Sınıfı (Seçim)</p> <ul style="list-style-type: none"> I, II, III, IV <p>Bina Tipi (Seçim)</p> <ul style="list-style-type: none"> Eğitim Yapıları, Kültür Yapıları, Sağlık Yapıları, Yazlık Alanlar/Kamp Alanları, Konut Yapıları, Ofis Yapıları, Endüstriyel Alanlar <p>Yerleşim Verileri</p> <ul style="list-style-type: none"> Bina Adedi (Uzaklığa Göre) Kat Adedi Kişi Sayısı 	
Kriter Ağırlıkları	<p>Yere Özgü Kriter Ağırlığı (Girdiye gerek bulunmamaktadır.)</p> <p>Kullanıcı Tanımlı Kriter Ağırlığı</p> <ul style="list-style-type: none"> Teknik Ekonomik Çevresel 	<p>Gürültü Denetimi Etkinliği</p> <ul style="list-style-type: none"> >Limit Düzey Üzerinde Gürültüye Maruz Kalan Nüfus Oranı Gürültüden Aşırı Rahatsız/Rahatsız Nüfus Oranı <p>Güneş Enerjisi Performansı</p> <ul style="list-style-type: none"> Elektrik Üretimi Performans Oranı Referans Verim ve Nihai Verim Sistem Verimliliği Kapasite Faktörü Modüllerin Gölgeleme Oranı <p>Çevresel Göstergeler</p> <ul style="list-style-type: none"> Faydalanan elektrikli araç miktarı Önlenen CO₂ miktarı <p>Ekonomik Göstergeler</p> <ul style="list-style-type: none"> Net Bugünkü Değer (NBD) Fayda/Maliyet Oranı (F/M) DPBT (İndirgenmiş Geri Ödeme Süresi) İç Karlılık Oranı (IRR) <p>Form değişkenleri</p> <ul style="list-style-type: none"> Kırınım Yüzeyi Genişlikleri Kırınım Yüzeyi Eğimleri Engel dikey bölümü Yüksekliği

Geliştirilen araç; sistemlerin performans göstergelerini, yapısal statüğünü, girdilerini, tasarım parametrelerini, maliyetlerini, faydalarını, değerlendirme kriterlerini etkileşimli ve eş zamanlı olarak değerlendirilmesini sağlar. Tez çalışması kapsamında geliştirilen FVGE karar destek aracının, öngörülen etki alanları aşağıda özetlenmektedir:

- Araç kullanıcılarının, güneş enerjisi ve gürültü denetimi konularında bilgi, yetenek ve deneyime sahip olması avantaj sağlasa da, konu ile ilgili herhangi bir altyapıya sahip olmayan karar vericilerin kullanımına olanak sağlaması ve konuya dair yeni bir vizyon kazandırması mümkündür.
- Araç bünyesinde geliştirilen kriter ağırlıklandırma şeması, alanların güneş enerjisi ve gürültü denetimi önceliklerini alanın özellikleri, mekanın ihtiyaçları ve enerji performansı açısından bütünlük değerlendiren özgün bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem, birbirinden bağımsız fiziksel çevre öğelerini ele alan farklı disiplinlerin, hem kent hem mekan ölçeğinde değerlendirilebileceği tekrarlanabilir bir çerçeve sunar.
- Gürültü engeli ve güneş enerjisi yere özgü teknik çözümler gerektirdiği için, sistemin modüler hale getirilmesi yapım maliyetini ve yapım süresini kısaltır, uygulama kolaylığı sağlar ve kent içinde bütüncül bir görüntü sağlar. Çalışmada türetilen FVGE alternatifleri, aynı boyutlara sahip panellerle farklı kesitler sağlayan elemanlarla modüler yapım yaklaşımı sunması açısından öneme sahiptir.
- Araç, kullanıcı tercihleri veya yere özgü öncelikler doğrultusunda, teknik, ekonomik ve çevresel performans açısından optimum FVGE seçimlerini sağlayarak fizibilite hesaplarını sunar. Aracın sunduğu olanaklar ve kullanım kolaylığı, mevcut veya yeni yerleşimlere FVGE planlaması potansiyelini artırır.
- Çalışma, yerleşim alanlarını olumsuz etkileyen yol kenarlarının güneş enerjisi kazanımı için uygun olduğunu ve fotovoltaik gürültü engellerinin geniş bir pazar potansiyeli sunduğunu göstermektedir.
- FVGE uygulamaları, kent içinde temiz, erişilebilir ve güvenli enerji arzı sağlar. Kentlerin gürültü kirliliği ve güneş enerjisi uygunluğuna yönelik

potansiyel değerlendirildiğinde, sürdürülebilir akıllı ulaşımı temelden destekleyen ve enerjide dışa bağımlılığı azaltan bir uygulama olma potansiyeline sahiptir.

- Çeşitli ülkelerin emisjonsuz araçlara yönelik altyapı programları, şarj süresi ve sarj istasyonlarına erişim gibi elektrikli araçların önündeki en önemli engellerin çözümüne yönelik politikalar izler. FVGE tesislerin şarj istasyonu olarak kullanılması, şarj ekosistemi ve elektrikli araç alt yapısının kent içinde geliştirilmesine yönelik yenilikçi bir uygulamadır. Gürültü kirliliğinin yoğun olduğu karayollarının kenarında tasarlanan FVGE sistemleri, elektrikli araçlar için şarj istasyonu ağını oluşturmak için bir itici güç yaratır. Otoyollarda, belirli aralıklarla hızlı şarj ve pil değişimi imkanı tanıyan teknolojilerle birlikte, tesislerin yaygınlaşması, gürültü denetiminin yanında karbon nötr şehirler politikasını destekler.
- Geliştirilen aracın, İstanbul için planlanan FVGE tesislerinin tasarım ve karar aşamasında, sürece dahil olan aktörler tarafından kullanılması mümkündür.
- Bu tez ile ulusal literatüre kazandırılan fotovoltaik gürültü engeli sistemleri, Türkiye’de uygulanabilir ve yaygın hale gelebilir. Bölümlerde irdelenen, FVGE sistemlerin tasarım parametreleri ve performans göstergeleriyle ilişkisi, profesyonellerin tasarım ve karar verme sürecini kolaylaştırır.
- Uluslar arası literatüre kazandırılan FVGE karar destek aracı ise, FVGE planlanan tüm noktalarda, FVGE’nin konumuna özgü ışınım ve iklim verilerinin araca işlendiği tüm alanlarda, ulusal ve uluslararası projelerde kullanılabilir.

7.3 Özgün Değer

FVGE tasarımlarının tüm yönleriyle ele alındığı ve karar destek aracının geliştirildiği bu çalışmanın önemi, aşağıdaki özellikler ile literatürdeki diğer çalışmalardan öne çıkmaktadır:

- Tez çalışmasının konusu, fotovoltaik gürültü engelleri tasarım parametrelerinin çevresel verilerle ilişkisini ortaya koyma ve ekonomik

analizini detaylı bir şekilde değerlendirmesi açısından ulusal literatüre katkı sağlamaktadır.

- Tez çalışması kapsamında geliştirilen araç, FVGE sistemleri hem güneş enerjisi hem gürültü denetimi açısından bütüncül olarak değerlendiren bir hesaplama yapması ve yaşam döngüsü maliyetini tüm yönleriyle (inşa, işletme ve fayda) ele alması açısından özgün değere sahiptir ve uluslararası literatüre katkı sağlamaktadır.
- Çalışma, günümüze kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak, alternatiflerin güneş enerjisi ve gürültü denetimi performansına ek olarak çevresel etki, statik analiz ve yapım maliyetlerinin tasarım parametreleriyle ilişkilendirilmesi açısından yol gösterici niteliğe sahiptir.
- Aracın performans analizi ve karar bölümüne yönelik geliştirilen kriter ağırlıklandırma şeması, kent ve mekan ölçeğinde fiziksel çevre öğelerini, alana özgü verilerle objektif olarak değerlendirmesi açısından özgün bir yöntem sunmaktadır.
- FVGE sistemlere yönelik geliştirilen karar destek aracı, tasarım parametrelerinin teknik, ekonomik ve çevresel olmak üzere tüm performans ölçütlerine etkisini hesaplayan ilk ve tek ürün olmasıyla çalışmaya özgün değer sağlamaktadır.

7.4 Çalışmanın Sınırlılıkları ve Gelecekteki Çalışmalar

Bu çalışmanın gelecekteki çalışmalarda ele alınması gereken bazı kısıtlarından ve sınırlılıklarından bahsetmek yarar sağlayacaktır.

- FVGE veritabanı, kırınım yüzeyi binalara yönelen L-kesitli engel alternatiflerinden oluşmaktadır. Bir sonraki adım, bu çalışmayı değişken kırınım yüzeyi kesitlerine sahip FVGE tasarımları ile yapmak olmalıdır. Farklı kırınım yüzeyi kesitlerine sahip FVGE alternatiflerine yönelik hesaplamalar, araca sonradan ilave edilerek geliştirilebilir.
- Çevresel etki, FVGE alternatiflerinin zemin kat cephesindeki güneş ışınımı kaybı üzerinden değerlendirilir. FV modülün veya kırınım yüzeyinin saydamlığı gibi malzeme özellikleri dikkate alınmadan gün ışığı kaybı

olarak kabul edilir. Bu, malzemenin görünür ışık iletiminin göz ardı edildiği ve simülasyon sonuçlarını etkileyebileceği anlamına gelir. Bu nedenle, şeffaf FVGE alternatifleri ile saydamlığın ışınım kaybı etkisini azaltmadaki rolü gelecekteki araştırmalarda dikkate alınmalıdır.

- FVGE karar destek aracının gürültü denetimi modülü geliştirilirken modellenen farazi kentsel ortam, sürekli akışa sahip trafiğin yanında ve yol ile aynı kotta modellenmiştir. Dolayısıyla, otoyollarda sürekli akış göstermeyen bileşimlerin (kavşak, yol ayrımı vs.) çevresinde ve yol ile aynı kotta olmayan bina gruplarında kullanılamamaktadır.
- Araç, farklı durum senaryolarını kaydedip eş zamanlı karşılaştırma yapmak için elverişli değildir. Araç, aynı alanda farklı panel genişliğine ve yönlere sahip FVGE kesitlerinin performans göstergelerini karşılaştırmaya olanak sağlayacak şekilde geliştirilmelidir.
- FV sistemler ve gürültü engelleri için ulusal ve uluslararası yönetmelikler, rehberler olmasına rağmen hem fotovoltaik sistemleri hem gürültü engellerini birlikte ele alan rehber sistemler yoktur. FVGE teknolojisini; tasarım parametreleri, strüktürel tahditleri, uygulama kararları ve yapım maliyetleri konusunda, projelendirme ve denetime ilişkin usul ve esasların belirlendiği yönetmeliklere, şartnamelere ihtiyaç vardır.
- Elektrikli araç kullanımında en büyük engel olan sınırlı şarj istasyonu ve uzun şarj süresi nedeniyle, önerilen teknolojilerin potansiyeli ve elektrikli araç kullanımını yaygınlaştırmadaki rolü araştırılmalıdır.
- Sözkonusu hibrit teknolojinin öngörüldüğü alanlarda, güneş enerjisi ve gürültü denetiminin önceliklendirilmesi ve ağırlıklandırılmasına yönelik geliştirilen kriter ağırlıklandırma şeması, literatürde yer alan indekslere, farklı konumlara ve referans çalışmalara göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tasarım kararlarını etkileyen kriterlerin önceliğini belirleyen bir indeks, çalışılan alana özgü olmak üzere her iki fiziksel çevre faktörü açısından birlikte geliştirilmelidir.

- [1] I. D. Williams and I. S. McCrae, "Road traffic nuisance in residential and commercial areas," *Sci. Total Environ.*, vol. 169, no. 1–3, pp. 75–82, 1995, doi: 10.1016/0048-9697(95)04635-E.
- [2] V. Pathak, B. D. Tripathi, and V. kumar Mishra, "Evaluation of traffic noise pollution and attitudes of exposed individuals in working place," *Atmos. Environ.*, vol. 42, no. 16, pp. 3892–3898, 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.070.
- [3] P. H. T. Zannin and D. Q. De Sant'Ana, "Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project - A case study in Brazil," *Appl. Acoust.*, vol. 72, no. 8, pp. 479–486, 2011, doi: 10.1016/j.apacoust.2010.09.014.
- [4] European Environment Agency, *Environmental noise in Europe - 2020*, no. 22/2019. 2020.
- [5] W. Yang, M. Cai, and P. Luo, "The calculation of road traffic noise spectrum based on the noise spectral characteristics of single vehicles," *Appl. Acoust.*, vol. 160, p. 107128, 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.107128.
- [6] J. Björk, J. Ardö, E. Stroh, H. Lökvist, P. O. Östergren, and M. Albin, "Road traffic noise in southern Sweden and its relation to annoyance, disturbance of daily activities and health," *Scand. J. Work. Environ. Heal.*, vol. 32, no. 5, pp. 392–401, 2006, doi: 10.5271/sjweh.1035.
- [7] M. Sørensen *et al.*, "Road traffic noise and stroke: A prospective cohort study," *Eur. Heart J.*, vol. 32, no. 6, pp. 737–744, 2011, doi: 10.1093/eurheartj/ehq466.
- [8] International Energy Agency (IEA), "Total final consumption by sector," 2018. [Online]. Available: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy consumption&indicator=TFCShareBySector](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector)
- [9] International Energy Agency (IEA), "Energy consumption in transport," 2018. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-consumption-in-transport-in-iea-countries-2018>
- [10] International Transport Forum, "ITF Transport Outlook 2017," 2017. doi: <https://doi.org/10.1787/9789282108000-en>.
- [11] TÜİK, "Road Motor Vehicles, February 2021," 2021. [Online]. Available: <https://turkstatweb.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=37424>
- [12] J. J. West *et al.*, "what We Breathe Impacts Our Health: Improving Understanding of the Link between Air Pollution and Health," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 10, pp. 4895–4904, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b03827.
- [13] WHO, "Burden of disease from Burden of disease from," p. 126, 2011.

- [14] A. Chow, S. Li, and A. S. Fung, "Modeling urban solar energy with high spatiotemporal resolution: A case study in Toronto, Canada," *Int. J. Green Energy*, vol. 13, no. 11, pp. 1090–1101, 2016, doi: 10.1080/15435075.2016.1170686.
- [15] K. Kurokawa, K. Komoto, peter van der Vleuten, and D. Faiman, *Energy From the Desert: Practical Proposals for Very Large Scale Photovoltaic Systems*. London: Earthscan, 2007.
- [16] R. Práválie, C. Patriche, and G. Bandoc, "Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 692–721, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.239.
- [17] A. Korfiati *et al.*, "Estimation of the global solar energy potential and photovoltaic cost with the use of open data," *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 9, no. February, pp. 17–29, 2016, doi: 10.5278/ijsepm.2016.9.3.
- [18] M. M. Hoogwijk, *On the global and regional potential of renewable energy sources*, no. november 1974. 2004. [Online]. Available: [http://np-net.pbworks.com/f/Hoogwijk+\(2004\)+Global+and+regional+potential+of+renewable+energy+sources+\(Thesis+Utrecht\).pdf](http://np-net.pbworks.com/f/Hoogwijk+(2004)+Global+and+regional+potential+of+renewable+energy+sources+(Thesis+Utrecht).pdf)
- [19] Solargis, "Global Solar Atlas," 2020. <https://globalsolaratlas.info/map?m=site&c=23.32208,-17.402344,3&s=40.580585,30.234375>
- [20] YEGM, "Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası," 2020. <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/pages/34.aspx> (accessed Jan. 03, 2022).
- [21] K. G. Bayraktar, "Güneş ülkemizin enerjî geleceğidir," 2016.
- [22] Y. I. Topcu and F. Ulengin, "Energy for the future: An integrated decision aid for the case of Turkey," *Energy*, vol. 29, no. 1, pp. 137–154, 2004, doi: 10.1016/S0360-5442(03)00160-9.
- [23] K. Calvert and W. Mabee, "More solar farms or more bioenergy crops? Mapping and assessing potential land-use conflicts among renewable energy technologies in eastern Ontario, Canada," *Appl. Geogr.*, vol. 56, pp. 209–221, 2015, doi: 10.1016/j.apgeog.2014.11.028.
- [24] Renewable Energy World, "Strength in Numbers: 5 Partnerships That Could Expand Renewable Energy," 2011. <https://www.renewableenergyworld.com/2011/10/04/strength-in-numbers-5-partnerships-that-could-expand-renewable-energy/>
- [25] W. Li, S. Stadler, and R. Ramakumar, "Modeling and assessment of wind and insolation resources with a focus on their complementary nature: A case study of oklahoma," *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, vol. 101, no. 4, pp. 717–729, 2011, doi: 10.1080/00045608.2011.567926.
- [26] P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, "A current and future state of art

- development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 2096–2103, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.10.006.
- [27] G. M. Shafiullah, M. T. O. Amanullah, A. B. M. Shawkat Ali, D. Jarvis, and P. Wolfs, “Prospects of renewable energy - a feasibility study in the Australian context,” *Renew. Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 183–197, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.08.016.
- [28] C. Peng, Y. Huang, and Z. Wu, “Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.032.
- [29] B. P. Jelle, C. Breivik, and H. Drolsum Røkenes, “Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 100, no. 7465, pp. 69–96, 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2011.12.016.
- [30] E. Biyik *et al.*, “A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 833–858, 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2017.01.009.
- [31] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, “Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2725–2732, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- [32] P. Denholm and R. M. Margolis, “Land-use requirements and the per-capita solar footprint for photovoltaic generation in the United States,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 9, pp. 3531–3543, 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.05.035.
- [33] T. Nordmann and L. Clavadetscher, “PV on noise barriers,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 6, pp. 485–495, 2004, doi: 10.1002/pip.566.
- [34] International Energy Agency (IEA), “Turkey 2021, Energy Policy Review,” 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/turkey-2021>
- [35] E. P. Review, “Turkey 2021,” 2021.
- [36] Government of Turkey, “Decision on the approval of the Eleventh Development Plan (2019-2023),” 2019. [Online]. Available: https://sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/03/On_BirinciPlan_ingilizce_SonBaski.pdf
- [37] A. Botelho, P. Ferreira, F. Lima, L. M. C. Pinto, and S. Sousa, “Assessment of the environmental impacts associated with hydropower,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. May 2015, pp. 896–904, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.271.
- [38] H. Vural, “Hidroelektrik Santrallerin (HES) Çevreye, Ekonomiye ve Toplumla Etkisi: Deriner Hidroelektrik Santrali Örneği,” Atatürk

Üniversitesi, 2020.

- [39] S. R. Wadhawan and J. M. Pearce, "Power and energy potential of mass-scale photovoltaic noise barrier deployment: A case study for the U.S," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. May, pp. 125–132, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.223.
- [40] IEC 61829, *IEC 61829 Photovoltaic (PV) array – On-site measurement of current-voltage characteristics*. 2015.
- [41] EN 1793, *EN 1793 Road traffic noise reducing devices*. 2017.
- [42] L. Schirone, P. Bellucci, and U. Grasselli, "Quality issues for photovoltaic-sound barriers," *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Convers.*, vol. C, pp. 2459–2462, 2003.
- [43] S. Grubeša, K. Jambrošić, and H. Domitrović, "Noise barriers with varying cross-section optimized by genetic algorithms," *Appl. Acoust.*, vol. 73, no. 11, pp. 1129–1137, 2012, doi: 10.1016/j.apacoust.2012.05.005.
- [44] D. H. Crombie and D. C. Hothersall, "The performance of multiple noise barriers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 176, no. 4. pp. 459–473, 1994. doi: 10.1006/jsvi.1994.1389.
- [45] G. R. Watts, "Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites," *Appl. Acoust.*, vol. 47, no. 1, pp. 47–66, 1996, doi: 10.1016/0003-682X(95)00030-D.
- [46] T. Huld *et al.*, "A power-rating model for crystalline silicon PV modules," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 12, pp. 3359–3369, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2011.07.026.
- [47] K. Bakirci, "General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 6149–6159, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.07.009.
- [48] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, F. El-Hussainy, R. Hamid, M. M. Beheary, and K. M. Abdel-Moneim, "Optimum solar flat-plate collector slope: Case study for Helwan, Egypt," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 5, pp. 624–637, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.05.015.
- [49] F. Hasmaden, G. Zorer Gedik, and N. Yüğrük Akdağ, "An approach to the design of photovoltaic noise barriers and a case study from Istanbul, Turkey," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, no. 0123456789, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18625-0.
- [50] M. Tiris and C. Tiris, "Optimum Collector Slope and Model Evaluation: Case Study For Gebze, Turkey," vol. 39, no. 3, pp. 167–172, 1998.
- [51] A. Mutlu and A. N. Turkeri, "Proposed Model for Design of Photovoltaic Mounted Steep Roof Systems and Case Study: Istanbul, Turkey," *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 7, pp. 289–298, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-17387-5_29.
- [52] B. B. Ekici, "Variation of photovoltaic system performance due to climatic

- and geographical conditions in Turkey,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 4693–4706, 2016, doi: 10.3906/elk-1404-341.
- [53] S. D. Mangan and G. K. Oral, “Energy and Cost Analyses of Solar Photovoltaic (PV) Microgeneration Systems for Different Climate Zones of Turkey,” *Energy Power Eng.*, vol. 08, no. 03, pp. 117–129, 2016, doi: 10.4236/epe.2016.83010.
- [54] A. Goetzberger and G. Kleiss, “THERMIE B Project : EU PVNB POT ,, Evaluation of the potential of PV noise barrier technology for electricity production and market share “ Project Number : SME-1479-97 FINAL REPORT Volume 1 Report Period : Prepared by the co-ordinator,” 1999.
- [55] M. De Jong, “Solar Highways Benchmark Study An overview and evaluation of existing photovoltaic noise barriers,” no. January, pp. 1–40, 2015, [Online]. Available: <https://www.seac.cc/wp-content/uploads/2018/06/SEAC-Solar-Highways-Benchmark-Study.pdf>
- [56] S. R. Wadhawan and J. M. Pearce, “Preprint: Siddharth R. Wadhawan & Joshua M. Pearce, Power and energy potential of mass-scale photovoltaic noise barrier deployment: A case study for the U.S.,” pp. 125–132, 2017.
- [57] A. Vallati, R. De Lieto Vollaro, A. Tallini, and L. Cedola, “Photovoltaics noise barrier: Acoustic and energetic study,” *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 716–723, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.797.
- [58] C. Costa and P. Duiella, “La A22 viaggia verso il sole,” 2010. <https://www.stradeeautostrade.it/strade-e-autostrade/la-a22-viaggia-verso-il-sole/>
- [59] A. Gharakhani Siraki and P. Pillay, “Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 1920–1928, 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.02.030.
- [60] J. Betcke, *Opbrengstgegevens van het PV-geluidsscherm langs de A27 na twee jaar systeembedrijf Eindrapport Copernicus Instituut sectie Natuurwetenschap en Samenleving*, no. May. 2002.
- [61] M. Ross, “Snow and Ice Accumulation on Photovoltaic Arrays: An Assessment of the TN Conseil Passive Melting Technology,” 1995. doi: 10.1016/j.solener.2013.02.014.
- [62] P. Bellucci, D. Fernandez, S. La Monica, and L. Schirone, “Assesment of the photovoltaic potential on noise barriers along national roads in Italy,” *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Convers.*, vol. C, pp. 2474–2477, 2003.
- [63] Environmental Protection Department Hong Kong, “Guidelines On Design of Noise Barriers,” no. 2, pp. 1–12, 2003, [Online]. Available: https://www.epd.gov.hk/epd/sites/default/files/epd/english/environmentinhk/noise/guide_ref/files/barrier_leaflet.pdf
- [64] N. Yügrük Akdağ, “Gürültü Denetimi 2, Ders Notu,” 2017.

- [65] V. Laxmi, C. Thakre, and R. Vijay, "Evaluation of noise barriers based on geometries and materials: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 1729–1745, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-16944-2.
- [66] I. Ekici and H. Bougdah, "A review of research on environmental noise barriers," *Build. Acoust.*, vol. 10, no. 4, pp. 289–323, 2003, doi: 10.1260/135101003772776712.
- [67] G. R. Watts, D. H. Crombie, and D. C. Hothersall, "Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: Full scale tests," *J. Sound Vib.*, vol. 177, no. 3, pp. 289–305, 1994, doi: 10.1006/jsvi.1994.1435.
- [68] European Committee for Standardization (CEN), *CEN/TC 226/WG 6—Noise Reducing Devices, Published Standards*.
- [69] J. Fryd *et al.*, *Technical Report 2017-03 State of the art in managing road traffic noise: cost-benefit analysis and cost-effectiveness analysis*, no. January. 2017.
- [70] S. Shahidan, N. I. R. Ramzi Hannan, M. Z. Md Maarof, A. S. Leman, and M. S. Senin, "A Comprehensive Review on the Effectiveness of Existing Noise Barriers commonly used in the Railway Industry," *MATEC Web Conf.*, vol. 87, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20178701007.
- [71] FHWA, *Highway Noise Barrier Design Handbook*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2000.
- [72] M. Ahac, S. Ahac, and S. Lakušić, "Long-term sustainability approach in road traffic noise wall design," *Sustain.*, vol. 13, no. 2, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/su13020536.
- [73] Z. Maekawa, "Noise reduction by screens*," *Appl. Acoust.*, vol. 1, no. 3, pp. 157–173, 1968, doi: 10.1016/0003-682X(68)90020-0.
- [74] M. Benöhr and A. Gebremedhin, "Photovoltaic systems for road networks," vol. 4, no. 2, pp. 672–684, 2021.
- [75] D. C. Hothersall, D. H. Crombie, and S. N. Chandler-Wilde, "The performance of t-profile and associated noise barriers," *Appl. Acoust.*, vol. 32, no. 4, pp. 269–287, 1991, doi: 10.1016/0003-682X(91)90075-P.
- [76] D. C. Hothersall, S. N. Chandler-Wilde, and M. N. Hajmirzae, "Efficiency of single noise barriers," *J. Sound Vib.*, vol. 146, no. 2, pp. 303–322, 1991, doi: 10.1016/0022-460X(91)90765-C.
- [77] M. Baulac, J. Defrance, and P. Jean, "Optimisation with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface," *Appl. Acoust.*, vol. 69, no. 4, pp. 332–342, 2008, doi: 10.1016/j.apacoust.2006.11.002.
- [78] M. R. Monazzam and Y. W. Lam, "Performance of T-shape barriers with top surface covered with absorptive quadratic residue diffusers," *Appl. Acoust.*, vol. 69, no. 2, pp. 93–109, 2008, doi: 10.1016/j.apacoust.2006.10.006.

- [79] D. Greiner, J. J. Aznárez, O. Maeso, and G. Winter, “Single- and multi-objective shape design of Y-noise barriers using evolutionary computation and boundary elements,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 41, no. 2, pp. 368–378, 2010, doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.06.007.
- [80] D. N. May and N. M. Osman, “Highway noise barriers: new shapes,” *J. Sound Vib.*, vol. 71, no. 1, pp. 73–101, 1980, doi: 10.1016/0022-460X(80)90410-1.
- [81] Ž. Venckus, R. Grubliauskas, and A. Venslovas, “The research on the effectiveness of the inclined top type of a noise barrier,” *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.*, vol. 20, no. 2, pp. 155–162, 2012, doi: 10.3846/16486897.2011.634068.
- [82] S. S. T. Ho, I. J. Busch-Vishniac, and D. T. Blackstock, “Noise reduction by a barrier having a random edge profile,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, no. 5, pp. 2669–2676, 1997, doi: 10.1121/1.418508.
- [83] W. Shao, H. P. Lee, and S. P. Lim, “Performance of noise barriers with random edge profiles,” *Appl. Acoust.*, vol. 62, no. 10, pp. 1157–1170, 2001, doi: 10.1016/S0003-682X(00)00099-2.
- [84] R. J. Alfredson and X. Du, “Special Shapes And Treatment For Noise Barriers,” in *Inter-Noise 95*, 1995, pp. 381–384.
- [85] H. Shima *et al.*, “Branched Noise Barriers,” in *Inter-Noise 98*, 1998, pp. 403–406.
- [86] D. H. Crombie, D. C. Hothersall, and S. N. Chandler-Wilde, “Multiple-edge noise barriers,” *Appl. Acoust.*, vol. 44, no. 4, pp. 353–367, 1995, doi: 10.1016/0003-682X(94)00032-Q.
- [87] T. Ishizuka and K. Fujiwara, “Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions,” *Appl. Acoust.*, vol. 65, no. 2, pp. 125–141, 2004, doi: 10.1016/j.apacoust.2003.08.006.
- [88] R. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, “Modulaire Geluidsschermen Handleiding configuratie en implementatie.” [Online]. Available: https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_117090_31/
- [89] P. M. Jochems, “The potential of PV panels near road infrastructure in the Netherlands,” *Constr. Manag. Eng.*, vol. Master, p. 112, 2012, [Online]. Available: http://alexandria.tue.nl/extra2/afstversl/bwk/Jochems_2013.pdf
- [90] M. Jaszczur, A. Koshti, W. Nawrot, and P. Sedor, “An investigation of the dust accumulation on photovoltaic panels,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, no. 2, pp. 2001–2014, 2020, doi: 10.1007/s11356-019-06742-2.
- [91] N. J. C. M. Borg van der and M. J. Jansen, “Photovoltaic noise barrier at the A9-highway in The Netherlands Results of the monitoring programme,” no. February, pp. 1–42, 2001.
- [92] A. A. Hegazy, “Effect of dust accumulation on solar transmittance through

- glass covers of plate-type collectors,” *Renew. energy*, vol. 22, no. 4, pp. 525–540, 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00093-8.
- [93] S. Mekhilef, R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, “Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2920–2925, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.012.
- [94] H. Lu and W. Zhao, “Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system,” *Appl. Energy*, vol. 220, no. October 2017, pp. 514–526, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.095.
- [95] S. N. Kay, D. H. Morgan, S. M., and Bodapati, “Evaluation of service of noise barrier walls in Illinois,” 1999.
- [96] S. M. Morgan, D. H. Kay, and S. N. Bodapati, “Study of noise barrier life-cycle costing,” *J. Transp. Eng.*, vol. 127, no. 3, pp. 230–236, 2001, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:3(230).
- [97] M. Çalış, “Betonarme Gürültü Bariyerleri İçin Ses Yutucu Perlit Esaslı Kaplama Tasarımı Yapılarak Fiziksel Performansının Ve Maliyetinin Araştırılması,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2014.
- [98] D. Chianese *et al.*, “Power and energy production of PV modules (cycle 8),” no. October, pp. 7–11, 2002.
- [99] Central Intelligence Agency, “The World Factbook, Country Comparisons-Roadways.” <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/roadways/country-comparison> (accessed Apr. 03, 2022).
- [100] M. Kanellis, M. M. de Jong, L. Slooff, and M. G. Debije, “The solar noise barrier project: 1. Effect of incident light orientation on the performance of a large-scale luminescent solar concentrator noise barrier,” *Renew. Energy*, vol. 103, pp. 647–652, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.10.078.
- [101] Z. Usman, J. Tah, H. Abanda, and C. Nche, “A critical appraisal of pv-systems’ performance,” *Buildings*, vol. 10, no. 11, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/buildings10110192.
- [102] M. Mani and R. Pillai, “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 3124–3131, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.065.
- [103] C. Poe, A. Plovnick, T. Hodges, A. Hastings, and S. Dresley, “Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers,” 2017. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/energy/publications/photovoltaic/>
- [104] T. Nordmann, A. Frölich, and L. Clavadetscher, “Drei integrierte PV-Schallschutz Versuchsfelder Bau und Erprobung,” 2002.

- [105] Jose de Medeiros Rocha, "An economic and environmental evaluation of photovoltaic noise barriers.pdf," The University of Guelph, 2006.
- [106] B. Kotzen and C. English, *Environmental noise barriers: A guide to their acoustic and visual design*. London: E&FN Span, 1999.
- [107] M. Clerico and F. Pognant, "Feasibility criteria of photovoltaic noise barriers (PVNB)," *Geoling. Ambient. e Mineraria*, vol. 140, no. 3, pp. 35–42, 2013.
- [108] N. Hanley and A. Owen, *The Economics of Climate Change*. London: Routledge, 2004.
- [109] I. İplik, "Yapılarda Gürültü Denetimi Sürecindeki Uygulamaların Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2019.
- [110] E. De Schepper, S. Van Passel, J. Manca, and T. Thewys, "Combining photovoltaics and sound barriers - A feasibility study," *Renew. Energy*, vol. 46, pp. 297–303, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.03.022.
- [111] M. Tawalbeh, A. Al-Othman, F. Kafiah, E. Abdelsalam, F. Almomani, and M. Alkasrawi, "Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook," *Sci. Total Environ.*, vol. 759, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.
- [112] Y. Jin, P. Behrens, A. Tukker, and L. Scherer, "Water use of electricity technologies: A global meta-analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, no. June, p. 109391, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109391.
- [113] G. F. Nemet, "Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 6, pp. 2173–2178, 2009, doi: 10.1021/es801747c.
- [114] T. Tsoutsos, N. Frantzeskaki, and V. Gekas, "Environmental impacts from the solar energy technologies," *Energy Policy*, vol. 33, no. 3, pp. 289–296, 2005, doi: 10.1016/S0301-4215(03)00241-6.
- [115] A. Gawande and P. Chaudhry, "Environmental and Social Impacts of Solar Energy: A View Point with Reference to India," vol. 17, no. 2, pp. 8115–8125, 2019.
- [116] M. Milousi, M. Souliotis, G. Arampatzis, and S. Papaefthimiou, "Evaluating the environmental performance of solar energy systems through a combined life cycle assessment and cost analysis," *Sustain.*, vol. 11, no. 9, 2019, doi: 10.3390/su11092539.
- [117] J. K. Lidman, "Effect of a Noise Wall on Snow Accumulation and Air Quality.," *Transp. Res. Rec.*, no. 1033, pp. 79–88, 1985.
- [118] G. E. Bowker, R. Baldauf, V. Isakov, A. Khlystov, and W. Petersen, "The effects of roadside structures on the transport and dispersion of ultrafine particles from highways," *Atmos. Environ.*, vol. 41, no. 37, pp. 8128–8139, 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.06.064.
- [119] F. C. Godoi, S. Prakash, and B. R. Bhandari, "LIFE+ Project Final report,"

2021. [Online]. Available:
<http://libdcms.nida.ac.th/thesis6/2010/b166706.pdf>
- [120] C. Azar, J. Holmberg, and K. Lindgren, "Socio-ecological indicators for sustainability," *Ecol. Econ.*, vol. 18, no. 2, pp. 89–112, 1996, doi: 10.1016/0921-8009(96)00028-6.
- [121] J. P. Arenas, "Sound barriers and environmental impact studies," *13th Int. Congr. Sound Vib. 2006, ICSV 2006*, vol. 1, no. June, pp. 42–57, 2006.
- [122] M. E. Nilsson and B. Berglund, "Soundscape quality in suburban green areas and city parks," *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 92, no. 6, pp. 903–911, 2006.
- [123] S. Fujita, H. Koi, and H. Tamura, "Analysis of the group preference for the environmental impact of heavy road traffic," *Trans. Inst. Syst. Control Inf. Eng.*, vol. 3, no. 8, pp. 237–244, 1990.
- [124] S. Fujita, H. Koi, and H. Tamura, "Evaluation of countermeasures for preventing environmental impact of heavy road traffic and modeling of consensus formation between two conflicting groups," *Trans. Inst. Syst. Control Inf. Eng. 4(5)*, vol. 4, no. 5, pp. 196–203, 1991.
- [125] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2263–2278, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.
- [126] A. J. Waldau, "Economic and Social Benefits of ICT," no. June, pp. 1–21, 2011.
- [127] C. Bhushan and J. Hamberg, *Facing the sun: 2020*. doi: 10.2307/j.ctv138wsfh.8.
- [128] H. A. Nijland, E. E. M. M. Van Kempen, G. P. Van Wee, and J. Jabben, "Costs and benefits of noise abatement measures," *Transp. Policy*, vol. 10, no. 2, pp. 131–140, 2003, doi: 10.1016/S0967-070X(02)00064-1.
- [129] H. Tamura, S. ichi Fujita, and H. Koi, "Decision analysis for environmental impact assessment and consensus formation among conflicting multiple agents - including case studies for road traffic," *Sci. Total Environ.*, vol. 153, no. 3, pp. 203–210, 1994, doi: 10.1016/0048-9697(94)90199-6.
- [130] WHO, "Ambient (outdoor) air pollution," *World Health Organization*, 2021. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [131] PVresources, "Photovoltaic Noise Barriers." <https://www.pvresources.com/en/pvpowerplants/noisebarriers.php> (accessed Mar. 30, 2022).
- [132] D. van der Graaf, "Solar Highways." <https://www.solarhighways.eu/en> (accessed Mar. 30, 2022).
- [133] N. T. Vontobel Thomas, "Auswertung der Langzeit- Betriebserfahrung der

- PV-Lärmschutz-Anlage A13,” 2019.
- [134] A. Goetzberger *et al.*, “The Potential of PV-noise barrier technology in Europe,” *16th Eur. Photovolt. Energy Conf. Exhib.*, no. January, p. 2911, 2000, [Online]. Available: http://www.pvdatabase.org/pdf/Mur_anti_bruit_ARRAS3.pdf
- [135] E. C. Kotzen Benz, *Environmental Noise Barriers A Guide To Their Acoustic and Visual Design*, Second Edi. CRC Press, 1999.
- [136] E. T. W. Etway, “Sound Solar Panel,” 2013. https://soundsolarpanel.com/pdf/SSP_Barriera-Antirumore-Fotovoltaica_ENG.pdf (accessed Nov. 07, 2021).
- [137] G. J. Faturrochman, M. M. de Jong, R. Santbergen, W. Folkerts, M. Zeman, and A. H. M. Smets, “Maximizing annual yield of bifacial photovoltaic noise barriers,” *Sol. Energy*, vol. 162, no. December 2017, pp. 300–305, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.01.001.
- [138] M. Kanellis, *Application of Luminescent Solar Concentrators as Noise Barriers*, no. January. 2016. [Online]. Available: https://pure.tue.nl/ws/files/14501512/2016_02_04_SEBC_Kanellis_M.pdf
- [139] Á. Bognár *et al.*, “The solar noise barrier project 4: Modeling of full-scale luminescent solar concentrator noise barrier panels,” *Renew. Energy*, vol. 151, pp. 1141–1149, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.102.
- [140] Energy Ville, “ROLLING SOLAR: SOUND BARRIERS WITH INTEGRATED SOLAR PANELS DEMONSTRATE THEIR ENERGY POTENTIAL,” 2020. <https://www.energyville.be/en/news-events/rolling-solar-sound-barriers-integrated-solar-panels-demonstrate-their-energy-potential>
- [141] R. Yin, *Applications of Case Study Research*. SAGE Publications, 1993.
- [142] Karayolları Genel Müdürlüğü, “Devlet Yolları Hacim Haritası (Birinci Bölge),” 2022. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritalari2020.aspx>
- [143] J. L. D. S. Silva, T. S. Costa, K. B. De Melo, E. Y. Sako, H. S. Moreira, and M. G. Villalva, “A comparative performance of PV power simulation software with an installed PV plant,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2020-Febru, pp. 531–535, 2020, doi: 10.1109/ICIT45562.2020.9067138.
- [144] A. G. Siraki and P. Pillay, “Comparison of PV System Design Software Packages for Urban applications,” *Siraki, A. Gharakhani*, p. 12, 2010, [Online]. Available: <http://www.indiaenergycongress.in/montreal/library/pdf/285.pdf>
- [145] Climate consultant 6.0, “Climate Consultant Software.” [Online]. Available: <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>

- [146] European Parliament and Council of the European Union, *Assessment and management of environmental noise (EU Directive)*, no. L189. 2002, pp. 12–25. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.02.014.
- [147] RENAM, *Regulation of Environmental Noise Assessment and Management*, vol. No. 25862., no. Turkey (In Turkish). 2010. [Online]. Available: <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=14012&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeligi&mevzuatTertip=5>
- [148] CETUR, *Guide du Bruit des Transports Terrestres [Land Transport Noise Guide - Forecasting noise levels]*. 1980.
- [149] ISO, *International Standard International Standard*. 1993.
- [150] N. Y. Akdağ, G. Z. Gedik, F. Kiraz, and B. Şener, “Effect of mass housing settlement type on the comfortable open areas in terms of noise,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 189, no. 10, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1007/s10661-017-6202-1.
- [151] WG-AEN, “Position Paper: Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure,” 2007.
- [152] E. A. King and H. J. Rice, “The development of a practical framework for strategic noise mapping,” *Appl. Acoust.*, vol. 70, no. 8, pp. 1116–1127, 2009, doi: 10.1016/j.apacoust.2009.01.005.
- [153] I. C. M. Guedes, S. R. Bertoli, and P. H. T. Zannin, “Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju - Brazil,” *Sci. Total Environ.*, vol. 412–413, pp. 66–76, 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.018.
- [154] J. Prezelj and J. Murovec, “Traffic noise modelling and measurement: Inter-laboratory comparison,” *Appl. Acoust.*, vol. 127, no. December 2017, pp. 160–168, 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.06.010.
- [155] M. Maruyama, K. Kuno, and T. Sone, “The minimum measurement time for estimating LAeqT of road traffic noise from the number of vehicle pass-bys,” *Appl. Acoust.*, vol. 74, no. 3, pp. 317–324, 2013, doi: 10.1016/j.apacoust.2012.08.005.
- [156] N. A. Bastián-Monarca, E. Suárez, and J. P. Arenas, “Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile,” *Sci. Total Environ.*, vol. 550, pp. 439–448, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.139.
- [157] S. W. Lee, S. Il Chang, and Y. M. Park, “Utilizing noise mapping for environmental impact assessment in a downtown redevelopment area of Seoul, Korea,” *Appl. Acoust.*, vol. 69, no. 8, pp. 704–714, 2008, doi: 10.1016/j.apacoust.2007.02.009.
- [158] D. M. Murillo-Gómez, J. C. Gil-Carvajal, V. Zapata-Rodríguez, and J. J. Téllez-García, “Assessment of the RLS 90 calculation method for predicting road traffic noise in Colombian conditions,” *Rev. Fac. Ing.*, vol. 1, no. 75,

- pp. 175–188, 2015, doi: 10.17533/udea.redin.n75a17.
- [159] G. Licitra and G. Memoli, “Limits and advantages of Good Practice Guide to noise mapping,” in *Proceedings - European Conference on Noise Control*, 2008, no. June 2014, pp. 771–776. doi: 10.1121/1.2932687.
- [160] P. Vukadin, I. Bublic, and I. Tudor, “Urban noise mapping - an approach to the establishment of standard making procedure,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, p. 3031, Jun. 2008, doi: 10.1121/1.2932683.
- [161] D. Bies, C. Hansen, and C. Howard, “The Human Ear,” in *Engineering Noise Control*, Abingdon, England: Spon Press, 2018, pp. 56–93.
- [162] L. Bell and D. Bell, “Levels and Spectra,” in *Industrial Noise Control*, 2nd ed., New York, USA: Marcel Dekker, 1994, pp. 37–66.
- [163] D. M. Murillo Gómez, A. M. Jaramillo, and J. Ochoa, “Analysis of the measurement uncertainty and its effects on noise mapping validations,” *J. Environ. Manage.*, vol. 266, no. April, p. 110606, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110606.
- [164] measurement and assessment ISO 1996-1:2003. Acoustics – Description, of environmental noise – part 1: basic quantities and, and A. Procedures., “International Standard International Standard,” *Int. Organ. Stand.*
- [165] K. Kumar, M. Parida, and V. K. Katiyar, “Optimized height of noise barrier for non-urban highway using artificial neural network,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 719–730, 2014, doi: 10.1007/s13762-013-0257-5.
- [166] C. Demain, M. Journée, and C. Bertrand, “Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces,” *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 710–721, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.07.031.
- [167] D. Yang, “Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks,” *Sol. Energy*, vol. 136, no. October 2016, pp. 288–302, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.062.
- [168] P. G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felmann, P. A. Strachan, T. Frank, and G. M. Maxwell, “Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 254–267, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.03.009.
- [169] M. David, P. Lauret, and J. Boland, “Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location,” *Renew. Energy*, vol. 51, pp. 124–131, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.074.
- [170] S. A. Khalil and A. M. Shaffie, “Evaluation of transposition models of solar irradiance over Egypt,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 105–119, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.066.
- [171] J. Hay and D. C. McKay, “Calculation of Solar Irradiances for Inclined Surfaces: Verification of Models which use Hourly and Daily Data,” 1988.

- [172] G. Notton, C. Cristofari, and P. Poggi, "Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 2, pp. 147–173, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.03.022.
- [173] S. A. Kalogirou, "Environmental Characteristics," in *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd Editio., Academic Press, 2013.
- [174] S. Odeh and M. Behnia, "Improving photovoltaic module efficiency using water cooling," *Heat Transf. Eng.*, vol. 30, no. 6, pp. 499–505, 2009, doi: 10.1080/01457630802529214.
- [175] IEC International Standard, "International Standard. Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis," *ISO. 9241-11. First Ed.*, 1998.
- [176] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2549–2557, 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.06.022.
- [177] N. Manoj Kumar, K. Sudhakar, and M. Samykano, "Techno-economic analysis of 1 MWp grid connected solar PV plant in Malaysia," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 40, no. 4, pp. 434–443, 2019, doi: 10.1080/01430750.2017.1410226.
- [178] A. Mermoud, "Note about the PHOTON simulation Software survey - 2011," *Phot. Mag.*, no. June, p. 3, 2011, [Online]. Available: http://www.pvsyst.com/images/papers/photon_survey_corr_irrad_190611_en.pdf
- [179] P. Ineichen, "Long term satellite hourly, daily and monthly global, beam and diffuse irradiance validation. Interannual variability analysis," no. December, p. 60, 2013, [Online]. Available: <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:29606> Disclaimer:
- [180] Meteotest, "Meteonorm Software."
- [181] V. Schepel, A. Tozzi, M. Klement, H. Ziar, O. Isabella, and M. Zeman, "The Dutch PV portal 2.0: An online photovoltaic performance modeling environment for the Netherlands," *Renew. Energy*, vol. 154, no. May 2020, pp. 175–186, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.033.
- [182] A. Erduman, A. Durusu, H. C. Kilickiran, B. Kekezoglu, and M. Tanrioven, "the Effect of Soiling Factor on Pv Array Performance: a Case Study for Istanbul," *Conf. 4th Eur. Conf. Renew. Energy Syst. (ECRES2016), Istanbul, Vol. 4*, no. August, pp. 1–7, 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/307207342_THE_EFFECT_OF_SOILING_FACTOR_ON_PV_ARRAY_PERFORMANCE_A_CASE_STUDY_FOR_ISTANBUL
- [183] L. Micheli, E. F. Fernández, J. T. Aguilera, and F. Almonacid, "Economics of seasonal photovoltaic soiling and cleaning optimization scenarios," *Energy*, vol. 215, p. 119018, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119018.

- [184] Arno Smets; Klaus Jäger; Isabella Olindo; Rene van Swaaij; Miro Zeman, *Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. 2016. doi: 10.1038/249726a0.
- [185] E. Aronova, Ž. Radovanović, V. Murgul, N. Vatin, and M. Shvarts, “Energy-Efficient Modernization of the Nobel’s Mansion in Saint Petersburg: Solar Energy Supply Potential,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 725–726, no. January, pp. 1505–1511, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1505.
- [186] O. Perpiñan, E. Lorenzo, and M. A. Castro, “On the calculation of energy produced by a PV grid-connected system,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 15, no. 3, pp. 265–274, 2007, doi: 10.1002/pip.728.
- [187] L. Castañer, S. Bermejo, T. Markvart, and K. Fragaki, *Energy Production by a PV Array*. Elsevier Ltd, 2012. doi: 10.1016/B978-0-12-385934-1.00018-0.
- [188] E. D. Dunlop, A. Gracia Amillo, E. Salis, T. Sample, and N. Taylor, *Transitional methods for PV modules , inverters and systems in an Ecodesign Framework*. 2019. doi: 10.2760/496002.
- [189] J. Kang, “Sound propagation in street canyons : Comparison between,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. November 1999, pp. 1394–1404, 2000.
- [190] J. Kang, “Sound propagation in interconnected urban streets: A parametric study,” *Environ. Plan. B Plan. Des.*, vol. 28, no. 2, pp. 281–294, 2001, doi: 10.1068/b2680.
- [191] H. Onaga and J. H. Rindel, “Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades,” *Appl. Acoust.*, vol. 68, no. 3, pp. 310–325, 2007, doi: 10.1016/j.apacoust.2006.01.010.
- [192] P. J. Lee and J. Kang, “Effect of height-to-width ratio on the sound propagation in urban streets,” *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 101, no. 1, pp. 73–87, 2015, doi: 10.3813/AAA.918806.
- [193] D. P. Miquel Arana, Ricardo San Martin, Inaki Nagore, “Using Noise Mapping to Evaluate the Percentage of People Affected by Noise,” *ACTA Acust. United with Acust.*, vol. 95, pp. 550–554, 2009.
- [194] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği*. 2008.
- [195] H. M. E. Miedema and C. G. M. Oudshoorn, “Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 109, no. 4, pp. 409–416, 2001, doi: 10.1289/ehp.01109409.
- [196] D. Pamučar, Ž. Stević, and S. Sremac, “A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM),” *Symmetry (Basel)*, vol. 10, no. 9, pp. 1–22, 2018, doi: 10.3390/sym10090393.

- [197] R. Ginevicius and V. Podvezko, "Objective and Subjective Approaches to Determining the Criterion Weight in Multicriteria Models," *Proceeding Int. Conf. RelStat 2004*, no. 1, pp. 133–139, 2004.
- [198] M. Alemi-Ardakani, A. S. Milani, S. Yannacopoulos, and G. Shokouhi, "On the effect of subjective, objective and combinative weighting in multiple criteria decision making: A case study on impact optimization of composites," *Expert Syst. Appl.*, vol. 46, pp. 426–438, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2015.11.003.
- [199] J. Jia, G. W. Fischer, and J. S. Dyer, "Attribute weighting methods and decision quality in the presence of response error: A simulation study," *J. Behav. Decis. Mak.*, vol. 11, no. 2, pp. 85–105, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1099-0771(199806)11:2<85::AID-BDM282>3.0.CO;2-K.
- [200] R. P. Hämäläinen and S. Alaja, "The threat of weighting biases in environmental decision analysis," *Ecol. Econ.*, vol. 68, no. 1–2, pp. 556–569, 2008, doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.05.025.
- [201] T. Gilovich, D. Griffin, and D. Kahneman, Eds., *Heuristics and Biases*. Cambridge University Press, 2002. doi: 10.1017/CBO9780511808098.
- [202] G. O. Odu, "Weighting methods for multi-criteria decision making technique," *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 23, no. 8, p. 1449, 2019, doi: 10.4314/jasem.v23i8.7.
- [203] H. Di *et al.*, "Estimation of the quality of an urban acoustic environment based on traffic noise evaluation models," *Appl. Acoust.*, vol. 141, no. June, pp. 115–124, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.07.010.
- [204] D. Doljak and G. Stanojević, "Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia," *Energy*, vol. 127, pp. 291–300, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.140.
- [205] F. Leccese, M. Rocca, G. Salvadori, E. Belloni, and C. Buratti, "Energy & Buildings Towards a holistic approach to indoor environmental quality assessment: Weighting schemes to combine effects of multiple environmental factors," *Energy Build.*, vol. 245, p. 111056, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111056.
- [206] B. Cao, Q. Ouyang, Y. Zhu, L. Huang, H. Hu, and G. Deng, "Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai," *Build. Environ.*, vol. 47, pp. 394–399, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.022.
- [207] ASHRAE, *Performance Measurement Protocols For Commercial Buildings: Best Practices Guide*. 2012.
- [208] G. L. Richardson, *Project Management Body of Knowledge*. 2004. doi: 10.1201/b17589-7.
- [209] M. U. Sajid and Y. Bicer, "Comparative life cycle cost analysis of various solar energy-based integrated systems for self-sufficient greenhouses,"

- Sustain. Prod. Consum.*, vol. 27, pp. 141–156, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2020.10.025.
- [210] M. J. Irene Illescas Garcí'a, "Recharging of electric cars by solar photovoltaics," in *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, 2017, pp. 415–487. doi: 10.1016/B978-0-12-803021-9.00012-4.
- [211] S. S. Alrwashdeh and H. Ammari, "Life cycle cost analysis of two different refrigeration systems powered by solar energy," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 16, no. August, p. 100559, 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100559.
- [212] OECD, "OECD," 2021. <https://data.oecd.org/>
- [213] R. Fu *et al.*, "U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020," *Natl. Renew. Energy Lab.*, no. September, pp. 1–120, 2021, [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.%0Ahttps://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77324.pdf
- [214] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *ÇELİK YAPILARIN TASARIM, HESAP VE YAPIM ESASLARINA DAİR YÖNETMELİK HAKKINDA*. 2016.
- [215] TSE, "Türk Standardı Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri," no. 112, 2003.
- [216] TSE, *TS EN 1794-1 Yoldaki trafik gürültüsünü azaltma cihazları - Akustik olmayan performans - Bölüm 1: Mekanik performans ve denge kuralları*.
- [217] G. S. Vij and M. L. Agrawal, "A review paper on R & D efforts in assessing the traffic noise on highways," *Recent Res. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 5, pp. 54–58, 2013.
- [218] M. Çalış and Z. Öztürk, "Perlite coating for concrete noise barriers and its cost," *Tek. Dergi/Technical J. Turkish Chamb. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 8433–8457, 2018, doi: 10.18400/tekderg.378524.
- [219] ÇŞB, "Mimarlık Ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında Kullanılacak 2021 Yılı Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğ," 2021. [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/03/20210324-3.htm>
- [220] I. Milford, S. J. Aaseboe, and K. Strommer, "Value for money in road traffic noise abatement," *INTERNOISE 2014 - 43rd Int. Congr. Noise Control Eng. Improv. World Through Noise Control*, no. December, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1112.
- [221] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "2021 Yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları," 2021.
- [222] M. Kumar, "Social, Economic, and Environmental Impacts of Renewable Energy Resources," *Wind Sol. Hybrid Renew. Energy Syst. [Working Title]*, pp. 1–11, 2020, doi: 10.5772/intechopen.89494.
- [223] International Energy Agency (IEA), "CO2 emissions from fuel combustion," *IEA Publ.*, pp. 1–165, 2019, [Online]. Available:

https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb3b2e8d-28e0-47fd-a8ba-160f7ed42bc3/CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Highlights.pdf

- [224] EPA, “Social Cost of Carbon,” 2016. [Online]. Available: <http://scholar.aci.info/view/1488df20b53381d035a/15355485d8a00150002>
- [225] D. M. Riley, J. E. Fleming, and G. R. Gallegos, “A Photovoltaic System Payback Calculator,” no. June, 2016.
- [226] D. Jordan and S. Kurtz, “Overview of Field Experience - Degradation Rates & Lifetimes (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory),” 2015.
- [227] 61851 IEC, *IEC 61851 Electric Vehicle Conductive Charging System*. 2010.
- [228] D. Yang, N. J. S. Sarma, M. F. Hyland, and R. Jayakrishnan, “Dynamic modeling and real-time management of a system of EV fast-charging stations,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 128, no. July 2020, p. 103186, 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103186.
- [229] A. Ir Bert Peeters Gijssan van Blokland, “Decision and cost/benefit methods for noise abatement measures in Europe,” 2018.
- [230] ISO 15666, *ISO 15666, Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*, vol. 2003. 2003.
- [231] P. Bickel *et al.*, “Deliverable 7 Final Technical Report,” *Dev. Harmon. Eur. Approaches Transp. Costing Proj. Assess.*, no. January, 2005.
- [232] Stuttgart: European Commission EC-DG TREN, “Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment Deliverable 1 Current practice in project appraisal in Europe,” 2005.
- [233] W. Short, D. Packey, and T. Holt, “A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies,” 1995. doi: NREL/TP-462-5173.
- [234] E. Drury, P. Denholm, and R. Margolis, “The Impact of Different Economic Performance Metrics on the Perceived Value of Solar Photovoltaics,” 2011.
- [235] E. Lorenzo, “Energy Collected and Delivered by PV Modules,” in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, no. January 2003, 2003, pp. 905–970. doi: 10.1002/0470014008.ch20.
- [236] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Editio. Wiley, 2013.
- [237] M. Harhash, W. Dawoud, A. H. Oraby, and M. M. Abdel Wahab, “Decomposition model for estimating diffuse solar radiation,” *Appl. Math. Inf. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 285–289, 2019, doi: 10.18576/AMIS/130217.
- [238] M. Xiao, Z. Yu, and Y. Cui, “Evaluation and estimation of daily global solar radiation from the estimated direct and diffuse solar radiation,” *Theor.*

- Appl. Climatol.*, vol. 140, no. 3–4, pp. 983–992, 2020, doi: 10.1007/s00704-020-03140-4.
- [239] C. Toledo, A. M. G. Amillo, G. Bardizza, J. Abad, and A. Urbina, “Evaluation of solar radiation transposition models for passive energy management and building integrated photovoltaics,” *Energies*, vol. 13, no. 3, 2020, doi: 10.3390/en13030702.
- [240] H. Al-Taani and S. Arabasi, “Solar irradiance measurements using smart devices: A cost-effective technique for estimation of solar irradiance for sustainable energy systems,” *Sustain.*, vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.3390/su10020508.
- [241] M. S. Lave, “Albedo and Diffuse POA Measurements to Evaluate Transposition Model Uncertainty,” *Sandia Rep. 2015-8803*, no. October, 2015.
- [242] D. Yang, Z. Dong, A. Nobre, Y. S. Khoo, P. Jirutitijaroen, and W. M. Walsh, “Evaluation of transposition and decomposition models for converting global solar irradiance from tilted surface to horizontal in tropical regions,” *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 369–387, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.08.033.
- [243] B. Liu and R. C. Jordan, “Daily insolation on surfaces tilted towards equator,” *ASHRAE Trans.*, vol. 3, pp. 526–541, 1961.
- [244] R. Dubayah and P. M. Rich, “Topographic solar radiation models for GIS,” *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 405–419, 1995, doi: 10.1080/02693799508902046.
- [245] M. Iqbal, “Solar Radiation Incident on Tilted Planes on the Earth’S Surface,” *An Introd. to Sol. Radiat.*, pp. 303–334, 1983, doi: 10.1016/b978-0-12-373750-2.50016-1.
- [246] P. I. Cooper, “The absorption of radiation in solar stills,” *Sol. Energy*, vol. 12, pp. 333–346, 1969.
- [247] J. Laskar and P. Robutel, “The chaotic obliquity of the planets,” *Nature*, vol. 361, no. 6413, pp. 608–612, 1993, doi: 10.1038/361608a0.
- [248] ASHRAE, “Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerizing Energy Calculations,” 1975.
- [249] J. F. Kreider and K. Frank, *Principles of Solar Engineering*. Hemisphere Publishing Corporation, 1978.
- [250] D. T. Reindl, W. A. Beckman, and J. A. Duffie, “Evaluation of hourly tilted surface radiation models,” *Sol. Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 9–17, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90061-G.
- [251] J. E. Hay, “Calculating solar radiation for inclined surfaces: Practical approaches,” *Renew. Energy*, vol. 3, no. 4–5, pp. 373–380, 1993, doi: 10.1016/0960-1481(93)90104-O.
- [252] A. Q. Jakhriani, S. R. Samo, A. R. H. Rigit, and S. A. Kamboh, “Selection of

- models for calculation of incident solar radiation on tilted surfaces,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 22, no. 9, pp. 1334–1343, 2013, doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.09.316.
- [253] C. Gueymard, “An Anisotropic Solar Irradiance Model for Tilted Surfaces and Its Comparison with Selected Engineering Algorithms,” *Sol. Energy*, vol. 38, pp. 367–386, 1987, doi: 10.1016/0038-092X(87)90009-0.
- [254] Y. Vurarak, A. Çikman, M. E. B. İ. L. G. İ. L. İ, and Z. Gözübüyük, “Toprak İş lemede Yeni Yakla ş ı mlar : Albedo Etkisi,” vol. 15, no. 3, pp. 83–90, 2019.
- [255] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, “Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance,” *Sol. Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 271–289, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90055-H.
- [256] PVP/MC, “Plane of Array (POA) Irradiance,” *PV Performance Modeling Collaborative*.
- [257] N. H. Umar, B. Bora, N. Umar, C. Banerjee, and B. S. Panwar, “Comparison of different PV power simulation softwares: case study on performance analysis of 1 MW grid-connected PV solar power plant,” vol. 7, no. August, pp. 11–24, 2018, [Online]. Available: www.ijesi.org%7C%7CVolumewww.ijesi.org
- [258] J. T. Schultz, *Community Noise Rating*. Elsevier Applied Science, 1982.
- [259] P. Nassiri, E. Karimi, M. R. Monazzam, M. Abbaspour, and L. Taghavi, “Analytical comparison of traffic noise indices—a case study in district 14 of Tehran city,” *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, vol. 35, no. 3, pp. 221–229, 2016, doi: 10.1177/0263092316660917.
- [260] X. Wang and X. Liu, “Application of Reformed Pollution Index Method to Urban Noise Evaluation,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 4, 2008.
- [261] O. S. Olayinka, “Noise Map : Tool for Abating Noise Pollution in Urban Areas,” *Open Access Sci. Reports*, vol. 1, no. 3, pp. 1–7, 2012, doi: 10.4172/scientificreports.185.
- [262] V. Bevacqua, S. Magri, and J. Fogola, “Monitoraggio acustico del sistema autostradale tangenziale di torino,” *Agenzia Reg. per la Prot. Ambiente*, 2006.
- [263] H. Z. Al Garni and A. Awasthi, *A monte carlo approach applied to sensitivity analysis of criteria impacts on solar PV site selection*. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-816514-0.00020-5.
- [264] T. Finn and P. McKenzie, “A high-resolution suitability index for solar farm location in complex landscapes,” *Renew. Energy*, vol. 158, pp. 520–533, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.121.
- [265] M. Uyan, “GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapınar region Konya/Turkey,” *Renew. Sustain.*

- Energy Rev.*, vol. 28, pp. 11–17, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.042.
- [266] M. Zoghi, A. Houshang Ehsani, M. Sadat, M. javad Amiri, and S. Karimi, “Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 986–996, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.014.
- [267] M. Tahri, M. Hakdaoui, and M. Maanan, “The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1354–1362, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.054.
- [268] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, E. Rahnama, and M. A. Rosen, “A new systematic decision support framework based on solar extended exergy accounting performance to prioritize photovoltaic sites,” *J. Clean. Prod.*, vol. 256, p. 120356, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120356.
- [269] FHWA, “Noise Barrier Construction Material Average Unit Cost by Height,” 2010.
https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/noise_barriers/inventory/summary/stable712.cfm (accessed Apr. 30, 2022).
- [270] R. Perez, L. Burtis, T. Hoff, S. Swanson, and C. Herig, “Quantifying residential PV economics in the US - Payback vs cash flow determination of fair energy value,” *Sol. Energy*, vol. 77, no. 4 SPEC. ISS., pp. 363–366, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2004.03.004.
- [271] R. J. Brown and R. R. Yanuck, *Life Cycle Costing: A Practical Guide for Energy Managers*. Atlanta: Fairmont Press Inc., 1980.
- [272] K. Hume, “Sleep disturbance due to noise: Current issues and future research,” *Noise Heal.*, vol. 12, no. 47, pp. 70–76, 2010, doi: 10.4103/1463-1741.63206.
- [273] A. H. D.W. Pearce, “Technical Report on Methodology: Cost Benefit Analysis and Policy Responses,” 2000.

A

DÜNYADAN FVGE UYGULAMALARI

Tablo A.1. Dünyadaki bazı büyük belgelenmiş FVGE tesisleri [33], [131], [60], [132]

No	Ülke	Tesis	Kurulum	Maliyet	Sistem Gücü (kWp)	Verim (kWh/kWp)	Eğim (°)	Azimut (°)
1	İsviçre	Domat/Ems A13 ^a	1989	16,27	103	1211	45	
2	İsviçre	Magadino SBB	1992	13,50	103	935		
3	Avusturya	Seewalchen, A1	1992	13,50	40			160
4	Almanya	Rellingen A23	1992		30			200
5	İsviçre	Giebenach A2 ^b	1995	12,08	104	969	45	
6	Almanya	Saarbrücken A6	1995	8-9,40	60			
7	Hollanda	Utrecht A27	1995	10,50	48,5	680	50	245
8	Almanya	Ammersee A96b	1997		28			
9	İsviçre	Zürich ^b	1998		26			
10	Hollanda	Ouderkerk A9 ^d	1998	10,61	205	859	50	200
11	Hollanda	Amstelveen, A9	1998			216		
12	Almanya	Ammersee,	1998		8,77	751		35
13	Almanya	Zueblin	1998		9,13	814		30
14	Almanya	DLW Metecno	1998		10,08	794		75
15	İsviçre	Aubugg	1997		8,27	681	90	80
16	İsviçre	Wallisellen (Demiryolu)	1998		9,65	497	45	200
17	İsviçre	Bruettisellen	2000		8,2	446	90	140
18	Almanya	Sausenheim, A6	1999		100			
19	Fransa	Foquiere, Pas de Calais A21	1999		63		45	170
20	İsviçre	Safenwil, Alpha A1 ^c	2000	>7,0	75	805	45	170
21	Avusturya	Gleisdorf, A2	2001	8,9	101			
22	Almanya	Freising, Munich, A92	2003 – 2009		600		45	180
23	Almanya	Emden	2003		53		90	180
24	Almanya	Freiburg, B31	2006		365			
25	Almanya	Grobbettlingen	2006		28			
26	Almanya	Töging, A94	2007		1000		45	210

27	İsviçre	Melide, Gothard	2007		123		45	220
28	Avusturya	Melbourne, 40	2007		24		90	180
29	Japonya	Neyagawakita IC	2009		120			
30	Almanya	<i>Aschaffenburg, A3</i>	2009		2650		45	150
31	İtalya	<i>Marano d'Isera, A22</i>	2009		730	945		140
32	İtalya	<i>Oppeano^s</i>	2010		833		45	210
33	Almanya	<i>Bürstadt, B57</i>	2010		283		60	150
34	Almanya	<i>Biessenhofen</i>	2010		90		45	180
35	Almanya	<i>Wallersdorf</i>	2010		1000		45	150
36	İtalya	<i>Borgo Valsugana</i>	2010		12		33	
37	Almanya	<i>München,</i>	2013		7,54			
38	Çin	<i>Hong, Kong</i>	2013		15			
39	İtalya	<i>Cittadella</i>	2013		41		33	
40	İsviçre	<i>Zürih, Zumikon</i>	2014		80			
41	Almanya	<i>Bollberg Thuringia</i>	2015		1000			
42	Hollanda	<i>Tiel, A15</i>	2015		572	831		
43	Hollanda	<i>Den Bosch</i>	2015				15	180
44	Hollanda	<i>Pijnacker-Nootforp, N470</i>	2017				15	90
					52			
45	İtalya	<i>Lodi</i>	2017		42		33	
46	Hollanda	<i>Uden</i>	2018			816	90	90
47	Çin							

Dünyadan FVGE uygulamalarının görselleri



Şekil A.1 (1) İsviçre, Domat/Ems A13
(1989)



Şekil A.2 (5) İsviçre, Giebenach A2
(1995)



Şekil A.3 (7) Hollanda, Utrecht A27
(1995)



Şekil A.4 (10) Hollanda, Ouderkerk A9
(1998)



Şekil A.5 (11) Hollanda, Amstelveen
A9, 1998



Şekil A.6 (12) Almanya, Ammersee,
1998



Şekil A.7 (13) Almanya, Ammersee
(1998)



Şekil A.8 (14) Almanya, Ammersee,
1998



Şekil A.9 (15) İsviçre, Aubrugg (1998)



Şekil A.10 (16) İsviçre, Wallisellen (1998)



Şekil A.11 (17) İsviçre, Bruettisellen (2000)



Şekil A.12 (19) Fransa, Foquire (1999)



Şekil A.13 (20) İsviçre, Safenwil A1 (2000)



Şekil A.14 (21) Avusturya, Gleisdorf A2 (2001)



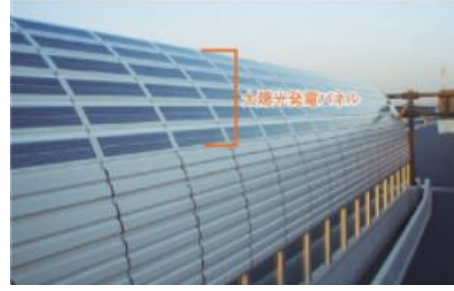
Şekil A.15 (22) Almanya, Munich A92 (2003, sol), (2009, sağ)



Şekil A.16 (23) Almanya, Emden (2003)



Şekil A.17 (24) Almanya, Freiburg
B31 (2006)



Şekil A.18 (29) Japonya,
Neyagawakita IC (2009)



Şekil A.19 (31) İtalya, Marano d'Isera,
A22 (2009)



Şekil A.20 (34) Almanya,
Biessenhofen (2010)



Şekil A.21 (36) İtalya, Borgo
Valsugana (2010)



Şekil A.22 (37) Almanya, München
(2013)



Şekil A.23 (38) Hong Kong (2013)



Şekil A.24 (39) İtalya, Cittadella
(2013)



Şekil A.25 (40) İsviçre, Zürih (2014)



Şekil A.26 (43) Hollanda, Den Bosch (2015)



Şekil A.27 (45) İtalya, Lodi (2017)



Şekil A.28 (46) Hollanda, Uden (2018)



Şekil A.29 (47) Çin

B

KEŞFEDİCİ ALAN ÇALIŞMASINDA MODELLENEN 1K VE 2K ENGELLERİN GÜNEŞ ENERJİSİ PERFORMANSLARI

Tablo B.1 Çift kırıklı engel kırınım yüzeylerinin farklı açı kombinasyonları için elektrik enerjisi üretim miktarları

α°	α°	(W/m ²)	(W/m ²)	A1			A2			A3		
				1 m	1 m	Toplam	2 m	1 m	Toplam	1 m	2 m	Toplam
27	27	1493	1493	1493	1493	2986	2986	1493	4479	1493	2986	4479
27	31	1493	1494	1493	1494	2987	2986	1494	4480	1493	2988	4481
27	33	1493	1493	1493	1493	2986	2986	1493	4479	1493	2985	4478
27	34	1493	1491	1493	1491	2984	2986	1491	4477	1493	2982	4475
27	43	1493	1464	1493	1464	2957	2986	1464	4450	1493	2929	4422
27	45	1493	1455	1493	1455	2948	2986	1455	4441	1493	2909	4402
27	51	1493	1420	1493	1420	2913	2986	1420	4406	1493	2839	4332
27	53	1493	1406	1493	1406	2899	2986	1406	4392	1493	2813	4306
27	55	1493	1392	1493	1392	2885	2986	1392	4378	1493	2783	4276
27	58	1493	1367	1493	1367	2860	2986	1367	4353	1493	2735	4228
31	27	1494	1493	1494	1493	2987	2988	1493	4481	1494	2986	4480
31	31	1494	1494	1494	1494	2988	2988	1494	4482	1494	2988	4482
31	33	1494	1493	1494	1493	2987	2988	1493	4481	1494	2985	4479
31	34	1494	1491	1494	1491	2985	2988	1491	4479	1494	2982	4477
31	43	1494	1464	1494	1464	2959	2988	1464	4453	1494	2929	4423
31	45	1494	1455	1494	1455	2949	2988	1455	4443	1494	2909	4404
31	51	1494	1420	1494	1420	2914	2988	1420	4408	1494	2839	4334
31	53	1494	1406	1494	1406	2901	2988	1406	4395	1494	2813	4307
31	55	1494	1392	1494	1392	2886	2988	1392	4380	1494	2783	4278
31	58	1494	1367	1494	1367	2861	2988	1367	4356	1494	2735	4229
33	27	1493	1493	1493	1493	2986	2985	1493	4478	1493	2986	4479
33	31	1493	1494	1493	1494	2987	2985	1494	4479	1493	2988	4481
33	33	1493	1493	1493	1493	2985	2985	1493	4478	1493	2985	4478
33	34	1493	1491	1493	1491	2984	2985	1491	4476	1493	2982	4475
33	43	1493	1464	1493	1464	2957	2985	1464	4449	1493	2929	4421
33	45	1493	1455	1493	1455	2947	2985	1455	4440	1493	2909	4402
33	51	1493	1420	1493	1420	2912	2985	1420	4405	1493	2839	4332

33	53	1493	1406	1493	1406	2899	2985	1406	4391	1493	2813	4305
33	55	1493	1392	1493	1392	2884	2985	1392	4377	1493	2783	4276
33	58	1493	1367	1493	1367	2860	2985	1367	4352	1493	2735	4227
34	27	1491	1493	1491	1493	2984	2982	1493	4475	1491	2986	4477
34	31	1491	1494	1491	1494	2985	2982	1494	4477	1491	2988	4479
34	33	1491	1493	1491	1493	2984	2982	1493	4475	1491	2985	4476
34	34	1491	1491	1491	1491	2982	2982	1491	4474	1491	2982	4474
34	43	1491	1464	1491	1464	2956	2982	1464	4447	1491	2929	4420
34	45	1491	1455	1491	1455	2946	2982	1455	4437	1491	2909	4401
34	51	1491	1420	1491	1420	2911	2982	1420	4402	1491	2839	4331
34	53	1491	1406	1491	1406	2898	2982	1406	4389	1491	2813	4304
34	55	1491	1392	1491	1392	2883	2982	1392	4374	1491	2783	4275
34	58	1491	1367	1491	1367	2859	2982	1367	4350	1491	2735	4226
43	27	1464	1493	1464	1493	2957	2929	1493	4422	1464	2986	4450
43	31	1464	1494	1464	1494	2959	2929	1494	4423	1464	2988	4453
43	33	1464	1493	1464	1493	2957	2929	1493	4421	1464	2985	4449
43	34	1464	1491	1464	1491	2956	2929	1491	4420	1464	2982	4447
43	43	1464	1464	1464	1464	2929	2929	1464	4393	1464	2929	4393
43	45	1464	1455	1464	1455	2919	2929	1455	4384	1464	2909	4374
43	51	1464	1420	1464	1420	2884	2929	1420	4349	1464	2839	4304
43	53	1464	1406	1464	1406	2871	2929	1406	4335	1464	2813	4277
43	55	1464	1392	1464	1392	2856	2929	1392	4321	1464	2783	4248
43	58	1464	1367	1464	1367	2832	2929	1367	4296	1464	2735	4199
45	27	1455	1493	1455	1493	2948	2909	1493	4402	1455	2986	4441
45	31	1455	1494	1455	1494	2949	2909	1494	4404	1455	2988	4443
45	33	1455	1493	1455	1493	2947	2909	1493	4402	1455	2985	4440
45	34	1455	1491	1455	1491	2946	2909	1491	4401	1455	2982	4437
45	43	1455	1464	1455	1464	2919	2909	1464	4374	1455	2929	4384
45	45	1455	1455	1455	1455	2909	2909	1455	4364	1455	2909	4364
45	51	1455	1420	1455	1420	2874	2909	1420	4329	1455	2839	4294
45	53	1455	1406	1455	1406	2861	2909	1406	4316	1455	2813	4268
45	55	1455	1392	1455	1392	2846	2909	1392	4301	1455	2783	4238
45	58	1455	1367	1455	1367	2822	2909	1367	4277	1455	2735	4189
51	27	1420	1493	1420	1493	2913	2839	1493	4332	1420	2986	4406
51	31	1420	1494	1420	1494	2914	2839	1494	4334	1420	2988	4408
51	33	1420	1493	1420	1493	2912	2839	1493	4332	1420	2985	4405
51	34	1420	1491	1420	1491	2911	2839	1491	4331	1420	2982	4402
51	43	1420	1464	1420	1464	2884	2839	1464	4304	1420	2929	4349

51	45	1420	1455	1420	1455	2874	2839	1455	4294	1420	2909	4329
51	51	1420	1420	1420	1420	2839	2839	1420	4259	1420	2839	4259
51	53	1420	1406	1420	1406	2826	2839	1406	4246	1420	2813	4233
51	55	1420	1392	1420	1392	2811	2839	1392	4231	1420	2783	4203
51	58	1420	1367	1420	1367	2787	2839	1367	4207	1420	2735	4154
53	27	1406	1493	1406	1493	2899	2813	1493	4306	1406	2986	4392
53	31	1406	1494	1406	1494	2901	2813	1494	4307	1406	2988	4395
53	33	1406	1493	1406	1493	2899	2813	1493	4305	1406	2985	4391
53	34	1406	1491	1406	1491	2898	2813	1491	4304	1406	2982	4389
53	43	1406	1464	1406	1464	2871	2813	1464	4277	1406	2929	4335
53	45	1406	1455	1406	1455	2861	2813	1455	4268	1406	2909	4316
53	51	1406	1420	1406	1420	2826	2813	1420	4233	1406	2839	4246
53	53	1406	1406	1406	1406	2813	2813	1406	4219	1406	2813	4219
53	55	1406	1392	1406	1392	2798	2813	1392	4205	1406	2783	4190
53	58	1406	1367	1406	1367	2774	2813	1367	4180	1406	2735	4141
55	27	1392	1493	1392	1493	2885	2783	1493	4276	1392	2986	4378
55	31	1392	1494	1392	1494	2886	2783	1494	4278	1392	2988	4380
55	33	1392	1493	1392	1493	2884	2783	1493	4276	1392	2985	4377
55	34	1392	1491	1392	1491	2883	2783	1491	4275	1392	2982	4374
55	43	1392	1464	1392	1464	2856	2783	1464	4248	1392	2929	4321
55	45	1392	1455	1392	1455	2846	2783	1455	4238	1392	2909	4301
55	51	1392	1420	1392	1420	2811	2783	1420	4203	1392	2839	4231
55	53	1392	1406	1392	1406	2798	2783	1406	4190	1392	2813	4205
55	55	1392	1392	1392	1392	2783	2783	1392	4175	1392	2783	4175
55	58	1392	1367	1392	1367	2759	2783	1367	4151	1392	2735	4126
58	27	1367	1493	1367	1493	2860	2735	1493	4228	1367	2986	4353
58	31	1367	1494	1367	1494	2861	2735	1494	4229	1367	2988	4356
58	33	1367	1493	1367	1493	2860	2735	1493	4227	1367	2985	4352
58	34	1367	1491	1367	1491	2859	2735	1491	4226	1367	2982	4350
58	43	1367	1464	1367	1464	2832	2735	1464	4199	1367	2929	4296
58	45	1367	1455	1367	1455	2822	2735	1455	4189	1367	2909	4277
58	51	1367	1420	1367	1420	2787	2735	1420	4154	1367	2839	4207
58	53	1367	1406	1367	1406	2774	2735	1406	4141	1367	2813	4180
58	55	1367	1392	1367	1392	2759	2735	1392	4126	1367	2783	4151
58	58	1367	1367	1367	1367	2735	2735	1367	4102	1367	2735	4102

Tablo B.2 Tek kırıklı FVGE alternatiflerinin tasarım parametreleri ve aylık ortalama PO ilişkisi

d	Ay	h=1 m										h=2 m									
		27°	31°	33°	34°	43°	45°	51°	53°	55°	58°	27°	31°	33°	34°	43°	45°	51°	53°	55°	58°
d=2 m	O	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84
	Ş	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84
	M	0,86	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83
	N	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82
	M	0,82	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79
	H	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77
	T	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76
	A	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77
	E	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79
	E	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81
	K	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82
	A	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85
d=3 m	O	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84
	Ş	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84
	M	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,82	0,86	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83
	N	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82
	M	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79
	H	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77
	T	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,75	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76
	A	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76
	E	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78
	E	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81
	K	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82
	A	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85
d=4 m	O	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85
	Ş	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85
	M	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83
	N	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82
	M	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80
	H	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78
	T	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76
	A	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77
	E	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79
	E	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81
	K	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83
	A	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85
d=5 m	O	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85
	Ş	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,88	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85
	M	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84
	N	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
	M	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80
	H	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78
	T	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77
	A	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77
	E	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79
	E	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82
	K	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83
	A	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86

0,850-0,875	0,825-0,850	0,800-0,825	0,775-0,800	0,750-0,775
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------



Şekil B.1 Optimum FVGE'nin peyzaj alternatifli 3 boyutlu modeli



Şekil B.2 Optimum FVGE'nin renkli panelli alternatifli ve 3 boyutlu modeli



Şekil B.3 Optimum FVGE'nin yolun karşısından görünümü



Şekil B.4 Optimum FVGE'nin 5. kattan görünümü



Şekil B.5 Optimum FVGE'nin 3. kattan görünümü

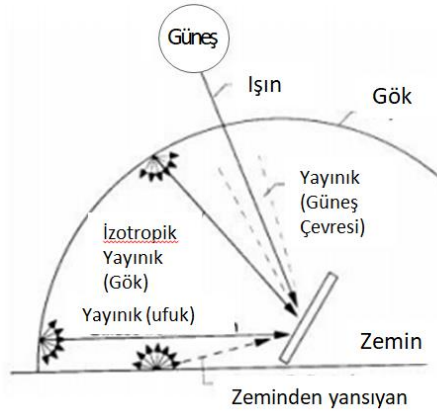


Şekil B.6 Optimum FVGE'nin bahçeden görünümü

C

GÜNEŞ IŞINIMININ YAPISI VE IŞINIM TAHMİNLERİ HESAPLAMALARINA YÖNELİK LİTERATÜR TARAMASI

Güneş ışınları atmosferden geçerken, atmosferde bulunan bileşenlerle etkileşime girerek değişime uğrar. Bir kısmı bulutlardan yansır; bir kısmı ise atmosferdeki ozon, oksijen, karbon dioksit ve su buharı gibi bileşenler tarafından yutulur. Su damlacıkları ve asılı toz parçacıkları da saçılmaya neden olur. Bu sürecin sonunda, güneş ışınları farklı bileşenlere ayrılır. Doğrudan ışınım bileşeni, yansıma ve saçılmaya uğramadan düz bir çizgi halinde direkt yüzeye ulaşır. Yayınık ışınım bileşeni, Güneş diski dışında tüm gökyüzünden saçılarak yüzeye ulaşır. Albedo ışınım bileşeni ise, zeminden yansıyarak yüzeye ulaşır. Bir yüzeye düşen ışınım miktarı, bunların toplamıdır (doğrudan + dağınık + zeminden yansıyan) ve küresel ışınım olarak adlandırılır [235].



Şekil C.1 Güneş ışınımı bileşenleri [236]

Yüzeylerdeki güneş ışınımı, radyometreler kullanılarak güvenilir bir şekilde ölçülebilse de, ölçüm ekipmanının yüksek maliyeti, özel bakım ve kalibrasyon gereksinimleri nedeniyle birçok konum için mevcut veri yoktur [237]. Bu nedenle, küresel yatay ışınım verisinin olmadığı konumlarda, yüzeylerdeki ışınım güneşlenme süresi, bulutluluk, sıcaklık ve bağıl nem gibi meteorolojik faktörlerle ilişkilendirilerek tahmin edilebilir [238]. Ancak bu yaklaşımlar, ufuk yüksekliği

profilini ve günlük değişkenliği dikkate almadıkları için, kısa zaman aralıklarında güvenilir veri sağlayamazlar. Bu nedenle, kesin tahminler için gerçek zamanlı ölçümlere ihtiyaç vardır [239].

Piranometre ve ışınım ölçer gibi güneş ışınımını ölçmek için özel olarak tasarlanmış cihazlar vardır. Bu cihazlar, ışınımı yüksek doğrulukla ölçebilir ve geniş bir spektral aralığı kapsayabilir [240]. Belirli bir yönelim ve eğime sahip düzlemlerdeki ışınım verilerini, ışınım ölçümlerine dayalı tahmin etmeye yönelik geliştirilen yöntemler iki grupta incelenebilir;

- Yatay küresel ışınım ölçümlerinin girdi olarak kullanıldığı yöntemler (dekompozisyon yöntemleri),
- Yatay küresel ışınım ve yatay yayınık ışınım ölçümlerinin girdi olarak kullanıldığı yöntemler (transpozisyon yöntemleri).

Çoğu konum için yatay küresel ışınım ölçüm verileri mevcuttur. Yıllık enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak için eğimli yerleştirilen fotovoltaik modül yüzeylerindeki ışınımın modellenmesi iki adımı içerir; (1) küresel yatay ışınımın direkt ve yayınık ışınım bileşenlerine ayrılması (dekompozisyon), (2) bu bileşenlerin modül yüzeylerine aktarılması (transpozisyon) [241]. Küresel yatay ışınım ve yayınık yatay ışınım, transpozisyon modelleri için gerekli girdilerdir. Yalnızca küresel yatay ışınım ölçümleri mevcut olduğunda, transpozisyon modelleri dekompozisyon modellerinin yardımıyla kullanılabilir [242].

Yayınık ışınımın oranını belirleyen transpozisyon modelleri izotropik ve anizotropik olmak üzere ikiye ayrılır. Neredeyse tüm modeller, direkt ışınım ve zeminden yansıyan ışınımın hesaplanmasında aynı metodu kullandığı için, temel fark yayınık ışınımın hesaplanması yaklaşımıdır.

Yayınık ışınımın gök kürede homojen bir şekilde dağıldığını kabul eden izotropik modellerden ilki Liu ve Jordan tarafından geliştirilmiştir [243]. Bulutsuz koşullar altında dağınık gökyüzü ışınımı, izotropik model ile tahmin edilebilir [244]. Anizotropik model ise, güneş çevresi yayılmasının yanı sıra ufuk aydınlatıcı bileşenlerin eğimli yüzeyler üzerindeki etkilerini hesaba katacak şekilde tasarlanmıştır [236]. Genel olarak, anizotropik gökyüzü modelleri (Hay ve

Davies, Reindl ve Perez, ve diğeri) eğimli bir yüzeydeki toplam radyasyonun karşılaştırılabilir tahminlerini sağlar ve genel kullanım için önerilir (TRNSYS). Bu nedenle, yayın ışınımın açıl dağılımı zamanla değişen karmaşık bir fonksiyondur. Difüz ışınım esasen anizotropiktir [235].

En uygun anizotropik modelin seçilebilmesi için literatür taraması yapılmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar listelenmiştir;

1. Uluslararası Enerji Ajansı (EIA) güneş enerjisiyle ısıtma ve soğutma programının (Solar Heating and Cooling Programme) 9 numaralı raporunda, eğimli yüzeyde ışınım hesaplamasında kullanılan 21 model karşılaştırılmıştır. Çalışma, farklı iklimlerdeki alanlardan 1961-1984 yıllarını kapsayan 24 veri seti sunar. Çalışmada modeller, farklı zaman aralıkları ve ışınım modelleri dahilinde 4 kategoride değerlendirilmiştir. İlgili kategorideki değişkenler ölçüldüğünde, Perez1 ve Perez2 algoritmalarının eğimli yüzeylerdeki yayın ışınımın en doğru tahminini sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Perez'den sonraki en iyi model olarak ise Gueymard tavsiye edilmiştir. Bu iki modelin, parametre sayısı ve modellemedeki küçük detayların kaliteliliği açısından daha iyi olduğu ve doğrulama modellerindeki yüksek performansları kanıtlanmıştır [171].
2. Yang (2016) 26 transpozisyon modelinin performansını karşılaştırmış ve modelleme doğruluğu konusunda küresel bir kıyaslama sunmuştur. Model performansını ölçmek için çeşitli hata göstergeleri, doğrusal sıralama ve ikili hipotez testi kullanılmıştır. Modeller, farklı kıtalardan, farklı enlemlere ve iklimlere sahip 4 konum verisiyle doğrulanmıştır. Çeşitli bölgeler için, farklı azimut ve eğim açlarına sahip toplam 18 durum kombinasyonu için eğimli yüzeylerdeki yıllık toplam güneş enerjisi hesaplanmıştır. Normalize kök ortalama hata kareleri (nRMSE) ve normalize ortalama hata sapması (nMBE) değerlerine dayalı olarak model performansları sıralanmıştır. Ayrıca 18 vaka çalışmasının tahmin doğruluğunu karşılaştırmak için Diebold-Mariano (DM) testi yapılmış ve sonuçlar görselleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, tüm modellerden daha iyi performans gösteren evrensel bir model sunulamamıştır. Ancak, her iki incelemede de, Perez model ailesinin

diğer modellere göre açıkça daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. nRMSE değerlerinin doğrusal sıralamasında en iyi sonuca sahip olan Perez modelini Muneer, Hay ve Gueymard takip etmiştir. Bu sonucun, Hay and McKay (1988) tarafından yapılan çalışma sonuçlarına paralel olduğu görülmüştür. Modellerin hata oranları yüzeylerin eğim açlarına ve azimut açlarına göre değişmektedir. Her kombinasyon için Perez modellerinin doğruluğunun kabul edilebilir bir sınırdaki olduğu görülmüştür [167].

3. Demain vd. (2012), 14 transpozisyon modelinin performansını değerlendirmiştir. Brüksel Uccle platosunda (50.79° K, 4.35° D) deniz seviyesinden 101 m yükseklikte bulunan Belçika Kraliyet Meteoroloji Enstitüsü'nün (RMI) radyometrik kulesinde, sekiz aylık zaman diliminde gerçekleştirilen ölçümlerle, yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Küresel yatay ışınım, yayınık yatay ışınım, yatay direkt ışınım ve güneye doğru 50.79° eğimli düzlemdeki küresel ışınım olmak üzere ölçümlerle dört veri seti oluşturulmuştur. Eğimli düzlemdeki doğrudan, yayınık ve yansıyan ışınımın göreceli oranları incelendiğinde, en büyük katkının, yayınık bileşenden kaynaklandığı açıkça görülmüştür. Zamanın % 80'inden fazlasında, yayınık bileşenin küresel ışınımına katkısının % 60'tan fazla olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla küresel ışınımın yayınık bileşenini doğru bir şekilde tahmin eden model seçmenin önemi vurgulanmıştır.

Modellerin tahmin performansı, ortalama hata sapması(MBE) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) olmak üzere iki istatistiksel hata indeksi aracılığıyla incelenmiştir. Değerlendirme sürecinin ilk adımında, gökyüzü koşullarından bağımsız olarak hata indeksleri hesaplanmıştır. İkinci adımda, modellerin performansı farklı gökyüzü türlerine göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında; kapalı (kt; 0.0-0.2), bulutlu (kt; 0.2-0.4), kısmen bulutlu (0.4-0.6), kısmen açık (0.6-0.8), açık (0.8-1.0) olmak üzere beş adet gökyüzü koşulu değerlendirilmiştir.

Ara gökyüzü koşulları için model tutarsızlıklarının açık veya kapalı duruma göre daha büyük olduğu görülmüştür. Değerlendirilen transpozisyon modellerinden hiçbirinin, beş gökyüzü kategorisininin her birinde başarılı

olamadığı görülmüştür. Bugler modelinin tüm gökyüzü, açık ve kısmen açık koşullarda en iyi performansı gösterdiği görülürken, Willmot modelinin parçalı bulutlu ve bulutlu koşullarda en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Son olarak, Perez modelinin kapalı gök koşullarında yapılan ölçümlerle en uyumlu performansa sahip olduğu görülmüştür. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için; Perez, Willmot ve Bugler modellerinin kombinasyonundan oluşan bir model geliştirilmiştir [166].

4. David vd. (2013), güney yarım küredeki bir konum (Reunion Adası) için eğimli düzlemlerde toplam güneş ışınlamını tahmin etmede kullanılan dört modelin performanslarını değerlendirmiştir. Gök kürenin anizotropik yapısı nedeniyle, Hay, Skartveit ve Olseth, Gueymard ve Perez modelleri değerlendirmeye alınmıştır.

Farklı gökyüzü koşulları için, $\pm 90^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 30^\circ$ ve 0° azimut açalarına sahip 20° ve 40° eğimli yüzeylerin oluşturduğu kombinasyonların tahmin hesapları, oluşturulan deneysel prosedürle karşılaştırılmıştır. RMSE, nRMSE, MAPE, BIC değerleri 4 model için yakın sonuçlar gösterirken, Perez modelinin MBE sonuçları diğerlerinin yaklaşık yarısına denktir ve en iyi performansı gösteren model olarak belirlenmiştir [169].

5. Notton vd. tarafından 15 model test edilmiştir. Modellerin performansı, RMSE ve MBE verilerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında tahmin hesaplamaları, Ajaccio (41.92° K, 8.73° B) bölgesinde 45° ve 60° eğimli yüzeylerde yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Test edilen modeller arasında, tahmin performansı en yüksek olanın Perez modeli olduğu görülmüştür [172].

6. Loutzenhiser vd. (2007) tarafından, eğimli yüzeylerdeki güneş ışınlamını hesaplayan 7 model doğrulanmıştır. EnergyPlus (2005), DOE-2.1E (2002), ESP-r (2005), and TRNSYS-TUD (2005) olmak üzere 4 simülasyon ele alınmış ve çeşitli güneş ışınlamı tahmin modelleri incelenmiştir.

Doğrulama amacıyla, İsviçre'nin Duebendorf (47.24° K, 8.36° D) kentindeki bir banliyö bölgesinde EMPA kampüsünde, farklı atmosferik koşulları ve güneş irtifalarını içeren Ekim ve Mart / Nisan aylarında 25

günlük iki dönemde güneş ışınımları ölçülmüştür. Saatlik ölçülen ve tahmin edilen küresel dikey parlaklıkları analiz etmek için çok sayıda istatistiksel parametre kullanılmıştır. Her iki dönem için ortalama mutlak farklar şu şekilde bulunmuştur: (1) izotropik gökyüzü modeli için % 13,7 ve % 14,9, (2) Hay – Davies modeli için % 9,1, (3) Reindl modeli için % 9,4, (4) Muneer modeli için % 7.6, (5) Klucher modeli için % 13.2, 1990 Perez modelleri için (6) % 9.0, % 7.7, % 6.6 ve % 7.1 ve 1987 Perez modeli için (7) % 7.9. Bu deneyler sırasında, basit hesaplama parametreleri ve yayınık ışınım bileşenlerini hesaba katmadığı için izotropik model en düşük tahmin performansını gerçekleştirmiştir. Reindl ve Hay-Davies modeli yayınık ışınımın ek bileşenlerini hesaba katmasına rağmen (güneşin yakın çevresi ve ufuk parlaklığı gibi), yayınık bileşenleri ölçmek için ampirik verilere dayanan Perez formülasyonu, bu konum ve duvar yönü için en iyi sonuçları vermiştir [168].

7. Khalil ve Shaffie (2016), 1984'ten 2014'e kadar olan dönemde Mısır'ın Kahire kentinde (30.05° K, 31.15° D), yatay ve eğimli yüzeylerde meydana gelen küresel, direkt ve yayınık güneş ışınımının; aylık, saatlik ve günlük verilerinin istatistiksel karşılaştırmasını değerlendirmiştir. Güneye ve batıya bakan, eğimleri 15° ila 90° arasında değişen yüzey modellerinin istatistiksel sonuçları analiz edilmiştir. Toplam güneş ışınımı, bölge için piranometre ile ölçülmüştür. Yaygın güneş ışınımının ölçülen ve hesaplanan değerleri ile ortalama hata sapması (MBE), kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama yüzde hatası (MPE %), R² ve t-testi değerleri ile değerlendirilmiştir [170].

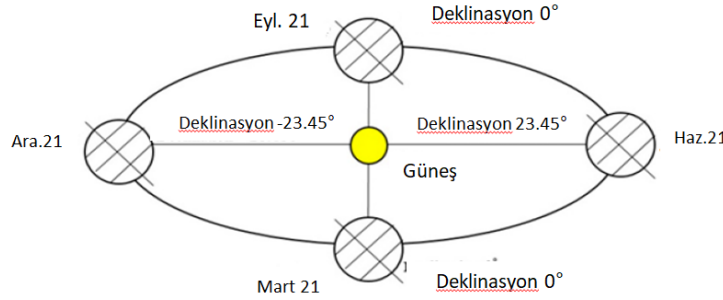
MBE sonuçları incelendiğinde; izotropik, Perez, Hay ve Klucher'in modelleri, eğimli bir yüzeydeki ışınım için ölçülen değer in altında tahmin verdiği; Tamps ve Coulson modelinin, eğimli bir yüzeydeki ışınımı büyük ölçüde daha fazla tahmin ettiği gözlenmiştir. RMSE sonuçları, anizotropik modellerin (Hay, Klucher ve Perez) genel olarak benzer performans gösterdiğini; ancak, izotropik modelin ve Tamps ve Coulson modelinin hata payının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Genel olarak, Perez ve Klucher modellerinin, eğimli düzlemdeki ışınımı daha doğru tanımladığı teyit edilmiştir.

D

GÜNEŞİN KONUMUNUN BELİRLENMESİNE YÖNELİK GÜNEŞ AÇILARININ HESAPLAMALARI

D.1 Deklinasyon, δ

Deklinasyon, güneş ışınlarının, dünyanın ekvatoruna olan açısal mesafesidir. Dünya'nın dönme eksenini ve güneş etrafında yıllık dönüşünü yaparken izlediği eliptik yörünge düzlemi arasındaki 23.45° eğimden ileri gelmektedir (bkz.Şekil D.1). Mevsimleri oluşturan Dünya ekseninin yörüngeden sapma açısı, 23.45° Kuzey ve 25.45° Güney arasında değişir. Deklinasyon açılarının minimum ve maksimum olduğu 21 Aralık ve 21 Haziran tarihleri, sırasıyla kış ve yaz gündönümü olarak adlandırılır. Sonbahar ve İlkbahar ekinoksu olarak adlandırılan 21 Eylül ve 21 Mart tarihlerinde güneş ışınları ekvatora dik gelir [245].

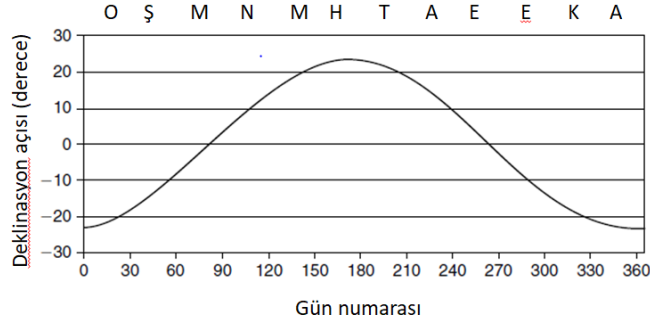


Şekil D.1 Deklinasyon açısının maksimum ve minimum değerleri

Deklinasyon açısının yıl boyunca değişimi Şekil D.2'de gösterilmiştir. Yılın herhangi bir günü için, derece cinsinden deklinasyon açısı, yaklaşık olarak (D.1) yardımıyla hesaplanabilir [246].

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (D.1)$$

Formülde gösterilen 23.45° değeri, Dünya'nın ekstenel eğikliği olarak kabul edilir. Bu değer, Ay'ın stabilize edici etkisi nedeniyle ortalama 23.3° olsa da $\pm 1,3^\circ$ lik küçük bir değişim gösterir [247]. Araç geliştirilirken doğrulama PVsyst programıyla yapıldığı için, yazılımla uyumlu olarak 23.433° değeri hesaba katılmıştır.



Şekil D.2 Güneşin deklinasyonu

Güneş enerjisi hesaplamaları Tablo D.1’de gösterildiği gibi aylık ortalama deklinasyon açısına tekabül eden günde yapılır ve sabit kabul edilebilir [236].

Tablo D.1 Her ay için tavsiye edilen ortalama gün, gün numaraları ve deklinasyon açıları

Ay	Gün Numarası	Aylık Ortalama Gün		
		Tarih	Gün	δ (°)
Ocak	i	17	17	-20,92
Şubat	31 + i	16	47	-12,95
Mart	59 + i	16	75	-2,42
Nisan	90 + i	15	105	9,41
Mayıs	120 + i	15	135	18,79
Haziran	151 + i	11	162	23,09
Temmuz	181 + i	17	198	21,18
Ağustos	212 + i	16	228	13,45
Eylül	243 + i	15	258	2,22
Ekim	273 + i	15	288	-9,60
Kasım	304 + i	14	318	-18,91
Aralık	334 + i	10	344	-23,05

D.2 Saat Açısı, h

Dünya üzerindeki bir noktanın saat açısı, h, noktanın meridyenini doğrudan güneşin altına getirmek için dünyanın döneceği açı olarak tanımlanır. Öğlen saatinde saat açısı sıfırdır. Her bir boylam 1 saate eşittir ve 15°’ye (360/24) tekabül eder. Öğleden önceleri (-), öğleden sonraları (+) değere sahiptir [173].

Günbatımı saat açısı (D.2) yardımı ile hesaplanabilir;

$$\text{Cos} (\omega_{ss}) = - \tan (L) \times \tan (\delta) \quad (\text{D.2})$$

Günbatımında ω_{ss} (+) değere sahipken, gündeğümünde aynı büyüklüğün (-) değeri olarak hesaplanır. Güneş enerjisi tahmin aracı geliştirilirken, aylık ortalama günlerin günbatımı saat açısı hesaplanarak, interpolasyonla tam saatlerdeki, saat açıları tespit edilmiştir.

D.3 Güneş Yükseklik Açısı, α

Direkt güneş ışınlarının yatayla yaptığı açıdır ve zenit açısının (Φ) tümleyenidir (D.3) [236]. Güneş yükseklik açısının matematiksel ifadesi (D.4) ile gösterilmiştir;

$$\Phi + \alpha = \pi / 2 = 90^\circ \quad (D.3)$$

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \times \sin(\delta) + \cos(L) \times \cos(\delta) \times \cos(h) \quad (D.4)$$

D.4 Güneş Azimut Açısı, z

Direkt güneş ışınlarının izdüşümünün, güneyden açısal uzaklığı olarak tanımlanır. Güneşin doğusundaki azimut değerleri (-), batısındaki azimut değerleri (+) hesaplanır. Güneş azimut açısının matematiksel ifadesi (D.5)'te ifade edilmiştir;

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (D.5)$$

Bu eşitlik, $\cos(h) > \tan(\delta) / \tan(L)$ durumlarında geçerlidir [248]. Eşitliğin sağlanmadığı durumlar, güneşin doğu – batı aksının arkasında kaldığını gösterir. Bu durumlarda azimut açısı; öğleden önce $-\pi + |z|$, öğleden sonra $\pi - z$ ile hesaplanır [173].

D.5 Güneş Geliş Açısı, θ

Güneşin geliş açısı, θ , direkt güneş ışınları ile bir yüzeyin normali arasındaki açıdır. Yatay bir düzlem için güneşin geliş açısı, zenith açısına eşittir. Güneşin geliş açısı, (D.6) ile hesaplanabilir [249], [236].

$$\cos(\theta) = \frac{\sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(Z_s) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h)}{\cos(\beta) + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(Z_s) + \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(Z_s)} \quad (D.6)$$

E

EĞİMLİ BİR YÜZEYDEKİ TOPLAM GÜNEŞ İŞİNİMİNİN HESAPLANMASI

Belirli bir eğime sahip yüzeydeki toplam küresel ışınım; doğrudan ışınım, zeminden yansıyan ışınım ve gökyüzünden yüzeye ulaşan yayınık ışınımın toplamıdır ve (E.1) ile hesaplanabilir [250].

$$G_c = B_c + R_c + D_c \quad (E.1)$$

Eğimli bir yüzeydeki doğrudan ışınım miktarı, (E.2)'de ifade edildiği gibi, yatay küresel ışınım ile güneşin gökküredeki konumu ve eğimli yüzeyin yönü arasındaki geometrik ilişkiden elde edilir [251].

$$B_c = B_h \times \cos(\theta) \quad (E.2)$$

B_h , yatay yüzeydeki aylık ortalama doğrudan ışınımdır ve genellikle yatay küresel ışınımdan yatay difüze ışınım çıkarılarak tahmin edilir. R_c , yansıyan ışın bileşenidir. Yansıyan ışınım, toplam güneş ışınımının, yeryüzünün yüzeyinden ve ağaçlar, arazi veya binalar gibi gökyüzüne maruz kalan bir yüzeyin üzerindeki diğer yüzeyleri kesen nesnelere tarafından yansıtılan kısmı, zeminden yansıyan ışınım olarak adlandırılır [252].

Yüzeyin eğimi arttıkça yerden yansıyan ışınımın (R_c), eğimli yüzey üzerindeki toplam ışınımına katkısı artar ve önemli bir faktör haline gelir. Bu varsayımlar altında, eğimli yüzeydeki yansıyan ışınım bileşeni (E.3) ile ifade edilebilir [253]. İzotropik, Hay ve Davies ve Perez gibi neredeyse tüm transpozisyon modelleri (E.3) eşitliğini kullanır;

$$R_c = G_h \times \rho \times \left(\frac{1 - \cos\theta_T}{2} \right) \quad (E.3)$$

Literatürde albedo (ρ), diğer adıyla yansıtılabilirlik yüzeylerin ışığı yansıtma gücü ya da bir yüzeyin üzerine düşen elektromanyetik enerjiyi yansıtma kapasitesi

olarak tanımlanmaktadır [254]. Albedo değeri, zemin yüzeyi heterojenliğine, yerel iklime (özellikle kar yağışının varlığına) ve eğimli yüzeyin yakınında bulunan ve gölge oluşturabilecek herhangi bir ögeye göre değişir. Gerçek koşullarda bu ideal varsayımları bulmak oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, Gueymard (1987) tarafından önerildiği gibi, yansıyan bileşen albedoyu sabit yayınlık yansımanın ve ışın geometrisinin bir fonksiyonu olarak kabul edilerek hesaplanır [239]. Çoğu mühendislik uygulamasında sabit ve 0,2 olarak kabul edildiği için, bu çalışmada da 0,2 ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Perez vd. (1990) güneş ışınımının yayınlık bileşenini tahmin etmek için gökyüzünü, farklı yayınlık ışınım yoğunluklarına sahip 3 bölge olarak kabul eder [255]. Bu bölgeler; güneşin yakın çevresi, ufuk çizgisi üzerindeki bölge ve izotropik olan gökyüzünün geri kalanı olmak üzere farklı katsayılarla hesaplanır. Perez modeline göre, eğimli bir yüzeydeki ışınım yoğunluğu (E.4) yardımıyla hesaplanır:

$$Dc = Dh \times \left[F1 \frac{a}{b} + F2 \sin \theta T + (1 - F1) \left(\frac{1 + \cos \theta T}{2} \right) \right] + \quad (E.4)$$

Toplamdaki üç terim, gökyüzünü oluşturduğu kabul edilen üç bölgeyi temsil eder. F1 ve F2 sırasıyla, güneş çevresi bölgesi ve ufuk çizgisi üzerindeki bölge için gökyüzü parlaklığını temsil eden katsayılardır. a ve b terimleri, güneşin yakın çevresinden yüzeylere gelen radyasyonun geliş açılarını tanımlar. a ve b terimleri (E.5) ve (E.6) tarafından tanımlanır.

$$a = \max(0, \cos(\theta)) \quad (E.5)$$

$$b = \max(\cos(85^\circ), \cos(\theta z)) \quad (E.6)$$

F1 ve F2 sırasıyla, (E.7) ve (E.8) ile hesaplanır ve denklemlerde zenit açısı derece cinsinden ifade edilir:

$$F1 = \max\left[0, \left(f_{11} + f_{12} \Delta + f_{13} \frac{\pi \theta z}{180^\circ} \right) \right] \quad (E.7)$$

$$F2 = \left(f_{21} + f_{22} \Delta + f_{23} \frac{\pi \theta z}{180^\circ} \right) \quad (E.8)$$

Parlaklık katsayıları, gökyüzü durumunu tanımlayan üç parametrenin işlevidir; zenit açısı (θz), açıklık (ϵ) ve parlaklık (Δ). Parlaklık (Δ), (E.9) yardımıyla hesaplanır:

$$\Delta = \frac{Dh \times AMa}{Ea} \quad (E.9)$$

Hava kütlesi (Ama), atmosferin optik uzunluğunun görelî bir ölçüsüdür. Deniz seviyesinde, güneş doğrudan tepede olduğunda ($\theta z = 0$), hava kütlesi 1'e eşittir. Zenit açısı arttıkça, doğrudan güneş ışığının geçiş yolu uzar ve hava kütlesi artar. Arazi yüksekliği arttıkça ise, atmosferin kalınlığına paralel olarak hava kütlesi azalır. Bağlı hava kütesinin en basit tahmini (arazi yükseklik etkileri göz ardı edilerek) küresel bir dünya ve atmosfer varsayar. Bağlı hava kütlesi, zenit açısının trigonometrik bir fonksiyonudur ve (E.10) ile hesaplanır [256];

$$AMa = \frac{1}{\cos(\theta z)} \quad (E.10)$$

Dünya dışı radyasyon (Ea), atmosferin tepe noktasındaki güneş enerjisinin yoğunluğudur. Bir düzlemdeki dünya dışı radyasyon, dünya ve güneş arasındaki mesafeye göre, yılın zamanına ve güneş sabitine (Gsc) göre değişir. Çoğu mühendislik hesabında % $\pm 3,3$ aralığında yeterli doğrulukla (E.11)'e göre hesaplanır [236].

$$Ea = Gsc \times \left(1 + 0,033 \times \left(\frac{360^\circ \times n}{365} \right) \right) \quad (E.11)$$

Gsc , güneş sabitidir ve 1367 W/m^2 'dir.

f katsayıları (f_{11} , f_{12} , f_{13} , f_{21} , f_{22} , f_{23}), farklı konumların açıklık indeksine göre deneysel verilerin istatistiksel analizine dayanır ve gökyüzü açıklığına göre tanımlanır. Perez modellerinde f katsayıları için 3 veri seti oluşturulmuştur. Perez1 ve Perez2'de kullanılan katsayılar Trappes ve Carpentras'ın çalışmasındandır ve Fransa'dan saatlik ölçümler kullanılarak yerleştirilmiştir.

Yerel olarak yerleştirilmiş katsayıların kullanılması, belirli konumlar için model performansını iyileştirebilse de, bu katsayılar diğer konumlar için en iyi şekilde performans göstermeyebilir. Bu nedenle, Perez ve ark. (1990), 10 Amerikan ve 3 Avrupa bölgesinden gelen verileri kullanarak başka bir katsayı seti oluşturdu. PEREZ3 modeli, PEREZ2'nin formülasyonunu takip eder, ancak Tablo E.1'deki üçüncü katsayı kümesini kullanır. PEREZ3 modelinde gökyüzü açıklığının hesaplanması, Perez1 ve Perez2'den farklıdır [167]. Perez3 modelinde, gökyüzü açıklığı (E.12)'ye göre hesaplanır;

$$\varepsilon = \frac{\frac{(Dh + Bh)}{Dh} + k \times \theta z^3}{1 + k \times \theta z^3} \quad (\text{E.12})$$

k, radyan cinsinden açılar için 1.041; derece cinsinden açılar için 5.535×10^{-6} ile ifade edilen bir sabittir.

Utrillas ve Martinez-Lozano (1994), Perez modelinin çeşitli versiyonları üzerinde kapsamlı bir inceleme yapmıştır ve iki önemli sonuca ulaşılmıştır: (1) Perez1 orijinal modelden (Perez0) belirgin ölçüde daha iyi performans gösterir ve (2) modeller kullanılan katsayı setlerine duyarlıdır. Bunlar dikkate alındığında, Perez0'ın sonuçları yerine, Perez1 formülasyonuna sahip ancak Perez3'ün gökyüzü açıklığı f katsayılarını kullanan başka bir model olan Perez4 kullanılmıştır. Tablo E.1'deki üçüncü katsayılar kümesi, kullandığı birçok veri kümesi nedeniyle en evrensel model olarak kabul edilebilir [167].

Tablo E.1 Gökyüzünün açıklığının bir fonksiyonu olarak parlaklık için Perez modeli katsayıları (ε ve ε' değerlerinin farklı şekilde hesaplandığı unutulmamalıdır.)

ε Aralığı	$f11$	$f12$	$f13$	$f21$	$f22$	$f23$
(Perez1 için ε')						
1,000-1,056	-0,011	0,748	-0,080	-0,048	0,073	-0,024
1,056-1,253	-0,038	1,115	-0,109	-0,023	0,106	-0,037
1,253-1,586	0,166	0,909	-0,179	0,062	-0,021	-0,050
1,586-2,134	0,419	0,646	-0,262	0,140	-0,167	-0,042
2,134-3,230	0,710	0,025	-0,290	0,243	-0,511	-0,004
3,230-5,980	0,857	-0,370	-0,279	0,267	-0,792	0,076
5,980-10,08	0,743	-0,073	-0,228	0,231	-1,180	0,199
10,08 - $+\infty$	0,421	-0,661	0,097	0,119	-2,125	0,446
(Perez2 için ε')						
1,000-1,056	0,041	0,621	-0,105	-0,040	0,074	-0,031
1,056-1,253	0,054	0,966	-0,166	-0,016	0,114	-0,045
1,253-1,586	0,227	0,866	-0,250	0,069	-0,002	-0,062
1,586-2,134	0,486	0,670	-0,373	0,148	-0,137	-0,056
2,134-3,230	0,819	0,106	-0,465	0,268	-0,497	-0,029
3,230-5,980	1,020	-0,260	-0,514	0,306	-0,804	0,046
5,980-10,08	1,009	-0,708	-0,433	0,287	-1,286	0,166
10,08 - $+\infty$	0,936	-1,121	-0,352	0,226	-2,449	0,383
(Perez3 ve Perez4 için ε)						
1,000-1,065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
1,065-1,230	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
1,230-1,500	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
1,500-1,950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
1,950-2,800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
2,800-4,500	1,133	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
4,500-6,200	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
6,200 - $+\infty$	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

GÜNEŞ ENERJİSİ YAZILIMLARINA YÖNELİK LİTERATÜR TARAMASI ÖZETİ

1. Uluslararası ölçekte önde gelen FV güneş enerjisi dergisi olan ve 3 dilde yayınlanan PHOTON, 20 yazılımı laboratuvarında analiz ve test etmiştir. Programların verim tahminlerinin gözlemi için farklı konumlarda 3 kurulum seçilmiştir. Her kurulum, yatay düzlemdeki ışınım verisinin ve ortam sıcaklığı ölçüm setlerinin yanı sıra ufuk gölgeleme kaydını yapan bir ekipman içermektedir. Ölçüm ve simülasyonlar arasındaki farklar, en iyi uydu modeli olan SolarGIS verileriyle karşılaştırıldığında, ortalama fark değerlerine (Mean Bias Differences, MBD) göre en iyi sonucu PVsyst yazılımının gösterdiği görülmüştür [178].
2. Umar vd. (2018), FV sistem için kullanılan 10 simülasyon yazılımının incelemesini ve karşılaştırmasını sunmuştur. 1 MW şebekeye bağlı FV güneş santralinin performans analizi yapılmıştır. Simülasyon araçları, tesisin performansını tespit etmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları FV tesisinin gerçek performansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; Homer, SAM ve PVsyst yazılımlarının, farklı sistem yapılandırmalarını değerlendirmeyi daha kolay ve daha hızlı yapabilmesini sağlayan çoklu analizler nedeniyle en etkili araçlar olduğu görülmüştür [257].
3. Silva vd. (2020), Campinas Üniversitesi'nin en büyük güneş enerjisi tesisini farklı FV yazılımlarında simüle ederek, kurulu FV sistemin aylık verileriyle simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır. Simülasyonlar için PVsyst, PV*SOL ve HOMER yazılımları kullanılmıştır. Sonuç olarak, HOMER yazılımı iyimser, PV*SOL çıktıları daha ihtiyatlı iken PVsyst yazılımının gerçek verilere en yakın sonuçları verdiği görülmüştür [143].
4. Siraki ve Pillay (2010), Montreal kent merkezinde bulunan bir binanın için Ecotect 2010 ve PVsyst yazılımlarının sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bu programların özelliklerine ve ayrıcalıklarına göre uygun şekilde kullanılması

için sonuçlar çıkarılmıştır. Ayrıca, belirli bir güneş enerjisi aracının yerine genel bir güneş enerjisi aracı kullanımından kaynaklanan hatanın büyüklüğünü bulmak için, hesaplamalar aynı konum için HOMER yazılım paketi kullanılarak tekrarlanmıştır. Sonuçlar, genel bir güneş enerjisi yazılım aracının bir kentsel uygulama için kullanılmaması gerektiğini göstermektedir. PVSyst yazılımının, sistem bileşenlerinin gerçeğe en yakın sonuca sahip olacak şekilde seçileceği detay tasarım aşaması için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, elektrik üretimi tahmininin bu araçta daha doğru olduğu gözlenmiştir [144].



H

GÜNEŞ ENERJİSİ MODÜLÜNÜN HESAPLAMA TABLOSU

SABİT VERİLER						GÜNEŞİN KONUMUNUN BELİRLENMESİ														
GÜN	SAAT	GHI, Küresel Yatay Işınım	DHI, Yayınık Yatay Işınım	BNI, Direkt Yatay Işınım	Gün Doğumu Saati	Gün Batımı Saati	L, Enlem	N, Temsili Gün	δ, Deklınasyon	ω _{ss} , Gün Batı mı Saat	ω _{sr} , Gün Doğumu Saat	h, Saat Açısı	sin α, sinüs (Saat Açısı),	φ, Zenit Açısı	α, Güneş Yükseklik Açısı	sin Z, Sinüs (Güneş Azimut Açısı)	Z, Güneş Azimut Açısı	β, Eğim	Zs, Sistem Azimut Açısı	CosAOI, Cosinüs (Güneş Geliş Açısı)
17.Oca	05:00	0,00	0,00	0,00	08:29	17:57	41,03	17	-20,43		0,00	-123,21	-0,62	90,00	90,00	0	0,00	30	0	-
	06:00	0,00	0,00	0,00			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-108,21	-0,45	90,00	90,00	0	0,00	30	0	-
	07:00	0,00	0,00	0,00			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-93,21	-0,27	90,00	90,00	0	0,00	30	0	-
	08:00	2,50	2,50	3,09			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-78,21	-0,08	90,00	90,00	0	0,00	30	0	0,12117856
	09:00	73,88	45,41	174,50			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-63,21	0,09	84,87	5,13	-0,83984	-57,12	30	0	0,34780459
	10:00	164,80	90,28	248,86			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-48,21	0,24	76,00	14,00	-0,72005	-46,06	30	0	0,54617751
	11:00	235,13	126,18	272,35			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-33,21	0,36	68,76	21,24	-0,55063	-33,41	30	0	0,70277855
	12:00	270,46	150,91	251,79			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-18,21	0,44	63,75	26,25	-0,32649	-19,06	30	0	0,80693560

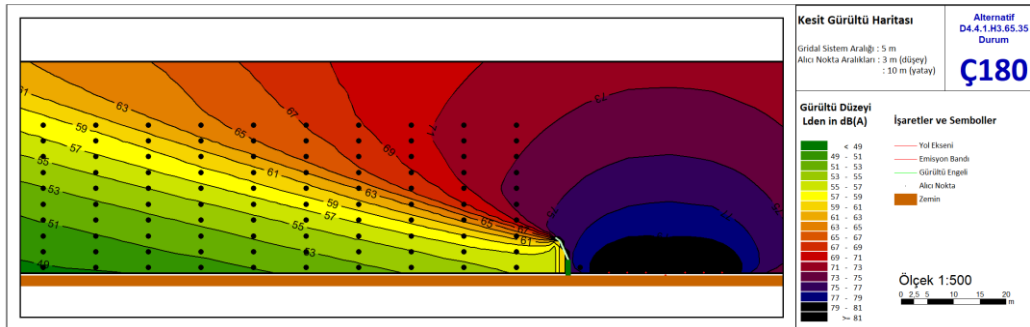
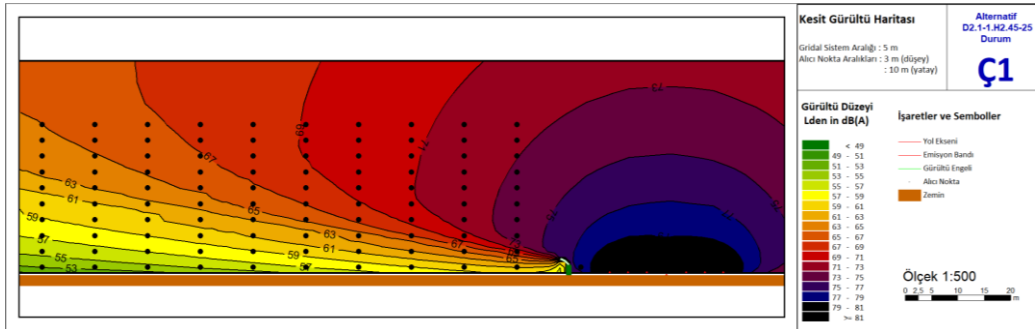
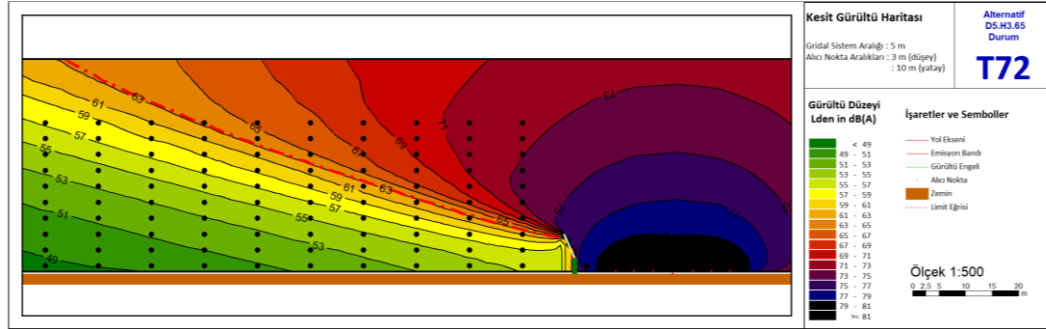
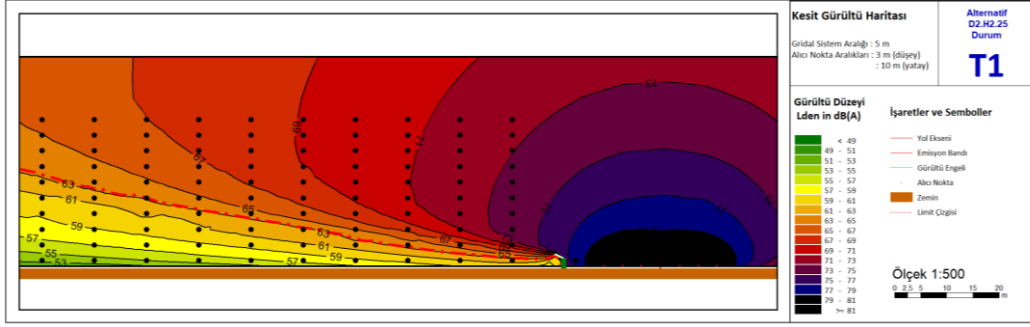
13:00	288,07	164,42	247,12			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	-3,21	0,48	61,53	28,47	-0,05966	-3,42	30	0	0,85155053
14:00	257,24	146,97	247,82			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	11,79	0,46	62,43	27,57	0,216022	12,48	30	0	0,83358290
15:00	196,35	117,17	225,80			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	26,79	0,40	66,31	23,69	0,461265	27,47	30	0	0,75425719
16:00	119,07	74,13	192,98			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	41,79	0,30	72,67	17,33	0,654183	40,86	30	0	0,61897930
17:00	23,43	18,06	47,76			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	56,79	0,16	80,91	9,09	0,794003	52,56	30	0	0,43696820
18:00	0,04	0,04	0,01			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	71,79	-0,01	90,00	90,00	0	0,00	30	0	0,22062765
19:00	0,00	0,00	0,00			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	86,79	-0,19	90,00	90,00	0	0,00	30	0	0,01529909
20:00	0,00	0,00	0,00			41,03	17	-20,43	71,08	-71,08	101,79	-0,37	90,00	90,00	0	0,00	30	0	0,25473402

EĞİMLİ YÜZEYDEKİ TOPLAM GÜNEŞ İŞİNİMİNİN HESAPLANMASI

GÜN	SAAT	Bc, Yüzeye Gelen Direkt Işınım	Rc, Zeminden Yansıyan Yüzeye Gelen Işınım	p, albedo	k	Ea, Dünya Dışı Radyasyon	Ama, Hava Kütleli	Δ, Parlaklık	a	b	ε, Gökyüzü Açıklık İndeksi	ε Class, Gökyüzü Açıklık İndeksi Sınıfı	f11	f12	f13	f21	f22	f23	F1	F2	Dc, Yüzeye Gelen Yayınım	Epoa, Yüzeydeki Küresel Işınım	Günlük Toplam Küresel Işınım	Aylık Toplam Küresel Işınım
17.Oca	05:00	0,00	0,00	0,20	5,35E-06	1410	0,00	0	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0	0	0	1245	38610
	06:00	0,00	0,00	0,20	5,35E-06	1410	0,00	0	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0	0	0		
	07:00	0,00	0,00	0,20	5,35E-06	1410	0,00	0	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0	0	0		
	08:00	0,37	0,03	0,20	5,35E-06	1410	0,00	0	0,12	0,09	1,25	3,00	0,347	-0,23	0,0585	-0,074	0	0,0188	2,35305	2,50768				
	09:00	60,69	0,99	0,20	5,35E-06	1410	9,98	0,32147	2	0,35	0,09	1,88	4,00	0,82	0,3	-0,35	0,2065	-0,41	0,0012	0,2083	0,0724	71,9637	73,3008	

MODÜL YÜZEYİNDEKİ GÖLGELEMeye BAĞLI İŞNİM KAYBININ HESAPLANMASI												SİSTEMİN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN HESAPLANMASI							
GÜN	SAAT	LT, Karşı Binaların Ortalama Gölge Uzunluğu	Kesişim	Lxb, Modül Yüzeyindeki Gölgenin Yatay İzdüşüm Genişliği	Xb, Modül Yüzeyindeki Gölge Genişliği	Gölg. Oranı	Günlük Toplam Küresel İşnım (Gölgeleme Dahil)	Aylık Toplam Küresel İşnım (Gölgeleme Dahil)	Aylık Toplam Küresel İşnım (Gölgeleme Hariç)	Aylık Toplam Küresel İşnım (Gölgeleme Dahil)	Sistemin Toplam Gölgeleme Oranı	Günlük Toplam Küresel İşnım (PPV= $G_{POA} \times n_{PV} \times A_{PV}$)	Aylık Toplam Küresel İşnım (PPV= $G_{POA} \times n_{PV} \times A_{PV}$)	Sıcaklık	Tc, Hücre Sıcaklığı	nt, Sıcaklığa Bağlı Modül Verimliliği	Günlük Elektrik Üretimi (FV Sitem Dönüştürme Verimliliğine Bağlı)	Aylık Elektrik Üretimi (FV Sitem Dönüştürme Verimliliğine Bağlı)	Aylık Elektrik Enerjisi Üretimi (MWh)
17.Oca	05:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0	1638487	1583138,16	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1	0,00	0	597
	06:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0				0,00	0,00	0,00	0,00	1	0,00	0	
	07:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0				0,00	0,00	0,00	0,00	1	0,00	0	
	08:00	0,00	0,00	0,00	0	0	2,51	77,73823				2,34	72,39	4,16	4,24	1	0,43	13,20508194	
	09:00	133,59	3,46	3,46	4	1	72,95	2261,545				67,93	2105,95	5,08	7,46	1	12,39	384,1595548	
	10:00	48,13	3,46	3,46	4	1	122,57	3799,718				114,14	3538,30	6,23	10,22	1	20,82	645,4428621	
	11:00	30,87	0,87	0,35	0,4050	0,1012	166,54	5162,708				155,08	4807,51	7,23	12,65	1	28,29	876,9685587	
	12:00	24,33	-5,67	0,00	0	0	194,73	6036,765				181,34	5621,44	8,03	14,37	1	33,08	1025,441023	
	13:00	22,13	-7,87	0,00	0	0	210,60	6528,604				196,11	6079,44	8,62	15,48	1	35,77	1108,987818	
	14:00	22,98	-7,02	0,00	0	0	191,22	5927,744				178,06	5519,92	8,82	15,05	1	32,48	1006,922073	
	15:00	27,34	-2,66	0,00	0	0	154,15	4778,647				143,54	4449,88	8,79	13,81	1	26,18	811,729608	
	16:00	38,45	3,46	3,46	4	1	102,08	3164,614				95,06	2946,89	8,47	11,80	1	17,34	537,5603686	
	17:00	75,00	3,46	3,46	4	1	25,85	801,4063				24,07	746,27	7,85	8,69	1	4,39	136,1316669	
	18:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,26	8,017715				0,24	7,47	1,47	1,48	1	0,04	1,361937094	
19:00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0				0,00	0,00	0,00	0,00	1	0,00	0		

KARAR DESTEK ARACI VERİTABANINA KAYITLI FVGE ALTERNATİFLERİNDEN BAZILARININ KESİT GÜRÜLTÜ HARİTASI



J

ALANLARIN GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİ DÜZEYİNİ VE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELLERİNİ DEĞERLENDİREN İNDEKSLER

KRİTER	REFERANS	GİRDİ	ÇIKTI
Gürültüye Maruz Kalma	[258] [259] [260] [203] [261] [262]	Gürültü Kaynağı Özellikleri <ul style="list-style-type: none"> • Ulaşım Tipi • Araç hacmi • Ağır Araç Oranı • Araç hızları • Araç yaşı Çevresel Özellikler <ul style="list-style-type: none"> • Yol Boyutları • Yol yüzeyi özellikleri • Bina boyutları • Bina Yükseklikleri • Bina kullanım tipi 	Gürültü Dereceleri (Noise Ratings) Gürültü Etki İndeksi (Noise Impact Index) Gürültü Kirliliği İndeksi (Noise Pollution Index) Akustik Ortam Kalite Düzeyi (Acoustic Environment Quality Level) Trafik Gürültü İndeksi (Traffic Noise Index) Kritiklik indeksi (Criticality Index)
Güneş Potansiyeli	[263] [264] [204] [265] [266] [267] [268]	İklimsel Özellikler <ul style="list-style-type: none"> • Küresel Güneş Işınımı • Güneşlenme Süresi • Hava Sıcaklığı • Bağıl Nem Miktarı • Rakım Orografi; Eğim, Yön / Bakı Çevresel; <ul style="list-style-type: none"> • Vejetasyon İndeksi (NDVI) • Agrolojik kapasite • Alan kullanımı Konum; <ul style="list-style-type: none"> • Kentsel alanlara uzaklık • Trafo merkezine uzaklık • Arazi örtüsü • Nüfus yoğunluğu • Ana yollara uzaklık • Enerji nakil hattına uzaklık • Tarihi alanlara uzaklık • Yaban hayatına uzaklık Ekonomik <ul style="list-style-type: none"> • Arazi maliyeti • Strüktür Maliyeti • Alan büyüklüğü 	Uygunluk İndeksi (Suitability Index) Alan Uygunluk İndeksi (Spatial Suitability Index) Arazi Uygunluk İndeksi (Land Suitability Index) Uygunluk Haritası (Suitability Map) Tercih Oranı (Preference Rate) Ekserji Hesaplama Performans Çerçevesi (Exergy Accounting Performance Framework)

K


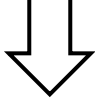

ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME , TOPSIS METODU

TOPSIS metodunu oluşturan adımlar, excel tabanlı aracın karar bölümüne aşağıdaki şekilde aktarılmıştır;





1. Karar matrisinin oluşturulması,
2. Standart karar matrisinin oluşturulması (normalize matris),
3. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisinin oluşturulması,
4. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerinin elde edilmesi,
5. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine uzaklıkların elde edilmesi,
6. İdeal çözüme göreli yakınlıkların hesaplanması.

Çok kriterli karar verme için karar matrisleri, kullanıcı seçimi doğrultusunda, yere özgü veya kullanıcı tanımlı olarak oluşturulmaktadır. Yere özgü kriter ağırlıkları doğrultusunda oluşturulan karar matrisi Tablo K.1’de gösterilmiştir. Kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları doğrultusunda oluşturulan karar matrisi ise Tablo K.2’de gösterilmiştir.

Tablo K.1 Performans kriterlerinin, yere özgü kriter ağırlıkları doğrultusunda TOPSIS metoduna göre etkilerinin sınıflandırılması

KARAR MATRİSİ (Yere Özgü Değerlendirme)		
Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3
Yıllık Elektrik Üretimi (MWh)	Limit Düzeyin Üzerinde Gürültüye Maruz Kalan Kişi Sayısı	Bitişik Bloğun zemin cephesindeki Işınım Miktarı (kWh)
Kriter Ağırlığı 1 $CW_{güneş}$	Kriter Ağırlığı 2 $CW_{gürültü}$	Kriter Ağırlığı 3 $CW_{günışığı}$
İdeal Çözüm En Yüksek Değer	İdeal Çözüm En Düşük Değer	İdeal Çözüm En Yüksek Değer
		

Tablo K.2 Performans kriterlerinin, kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları doğrultusunda TOPSIS metoduna göre etkilerinin sınıflandırılması

KARAR MATRİSİ (Kullanıcı Tanımlı Değerlendirme)			
Kriter 1 Teknik Performans		Kriter 2 Ekonomik Performans	Kriter 3 Çevresel Performans
Alt Kriter 1	Alt Kriter 2		
Yıllık Elektrik Üretimi (MWh)	Gürültü Denetiminden Faydalanan Nüfus	Net Bugünkü Değer (\$)	Yıllık Önlenebilir CO ₂ Miktarı (ton)
Kriter Ağırlığı 1 $\frac{CW_{teknik} \times CW_{güneş}}{CW_{güneş} + CW_{gürültü}}$	Kriter Ağırlığı 2 $\frac{CW_{teknik} \times CW_{gürültü}}{CW_{güneş} + CW_{gürültü}}$	Kriter Ağırlığı 3 $CW_{ekonomik}$	Kriter Ağırlığı 3 $CW_{çevresel}$
İdeal Çözüm En Yüksek Değer	İdeal Çözüm En Yüksek Değer	İdeal Çözüm En Yüksek Değer	İdeal Çözüm En Yüksek Değer
			

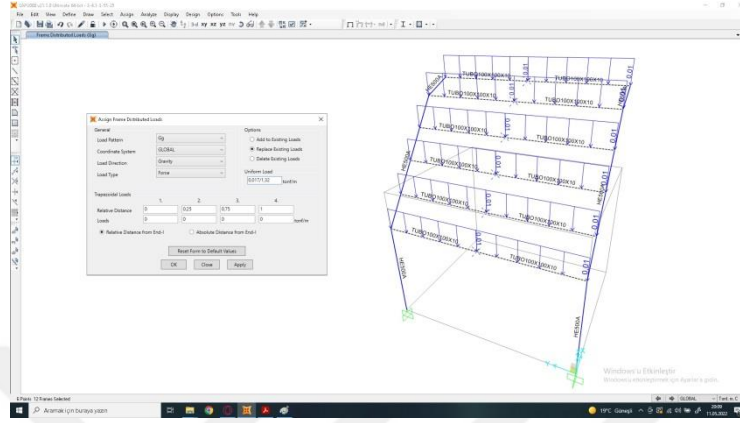
FOTOVOLTAİK SİSTEM BİLEŞENLERİNİN BİRİM MALİYETLERİ

Tablo L.1 Fotovoltaik sistem bileşenlerinin birim maliyetleri [213]

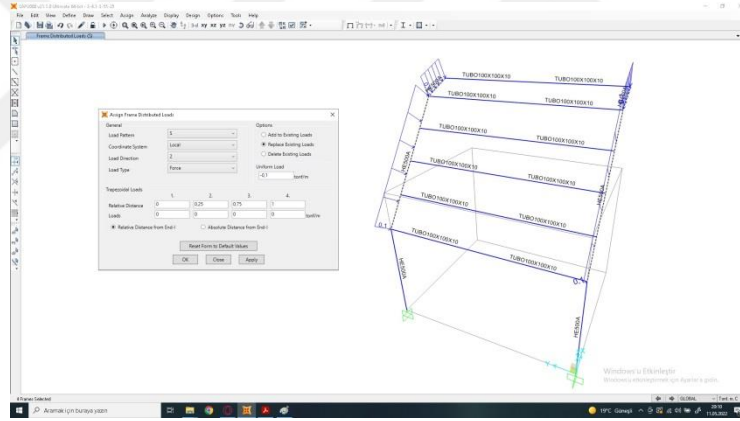
İnşaa ve Yatırım Maliyeti	USD/Watt (\$/W)	USD/Watt (\$/W) Türkiye
Modül	0,33	0,14
Çevirici	0,07	0,031
Donanım – Denge Sistemi (Strüktürel Bileşenler)	0,13	0,058
Donanım – Denge Sistemi (Elektriksel Bileşenler)	0,25	0,111
Dolaylı Maliyetler (Kurulum için İşgücü)	0,15	0,067
Mühendislik, Tedarik ve İnşaat (EPC) Genel Gider	0,11	0,049
İzin, Denetleme ve Ara Bağlantı Giderleri	0,04	0,017
Sales Tax	0,05	0,022
Geliştirici Genel Gideri	0,34	0,152
Beklenmedik Giderler (%3)	0,05	0,022
Mühendislik, Tedarik, İnşaat (EPC) / Geliştirici Karı	0,12	0,053
Toplam	1,64	0,73
Strüktür Maliyetlerinin Dahil Edilmediği Toplam Maliyet	1,51	0,67
İşletim ve Bakım Maliyeti	USD / KiloWatt/yıl (\$/kW/yıl)	USD/KiloWatt (\$/kW) Türkiye
Modül Temizliği & Vejetasyon Yönetimi	2,55	1,14
Sistem Denetimi & Gözlem	2,14	0,95
Bileşen Parçalarının Değişimi & Modül Değişimi	0,54	0,24
Çevirici Değişimi	2,19	0,98
Arazi Kiralama	2,07	0,92
Emlak Vergisi	1,74	0,77
Sigorta, Varlık Yönetimi ve Güvenlik	3,62	1,62
Varlık Yönetimi ve Güvenlik	1,5	0,67
Operasyon Yönetimi	0,75	0,33
Toplam	17,10	7,65

M

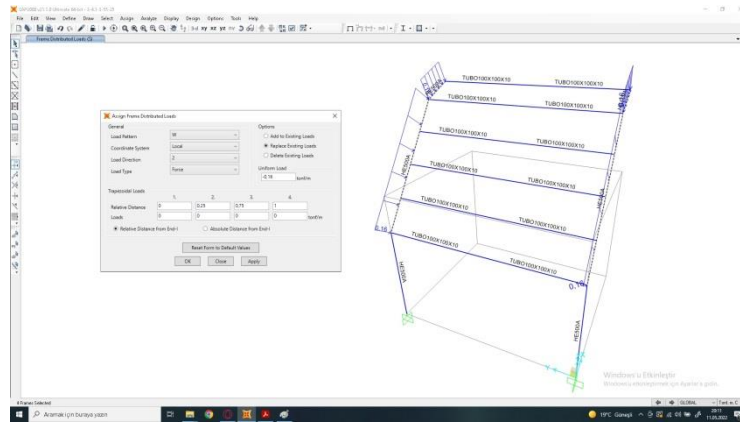
ÖRNEK FVGE ALTERNATİFİNİN DESTEK STRÜKTÜRÜNÜN STATİK ANALİZİ



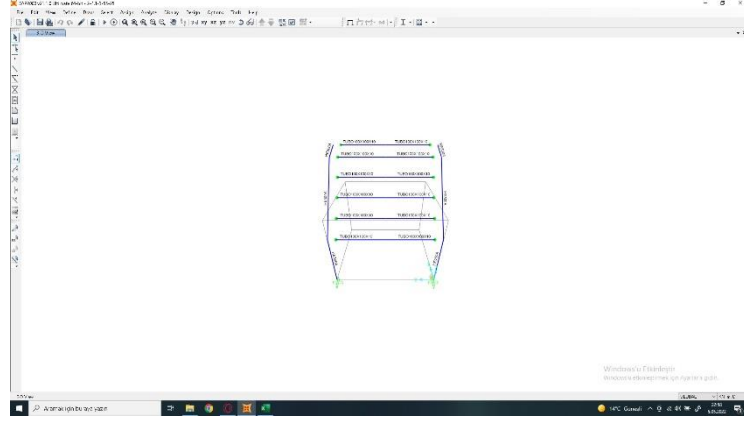
Şekil M.1 Aşık ölü yüklerinin sisteme tanımlanması



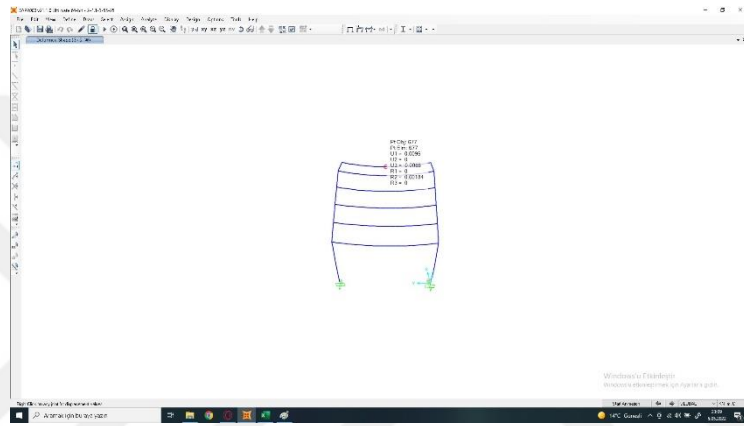
Şekil M.2 Aşıklara etkiyen kar yüklerinin sisteme tanımlanması



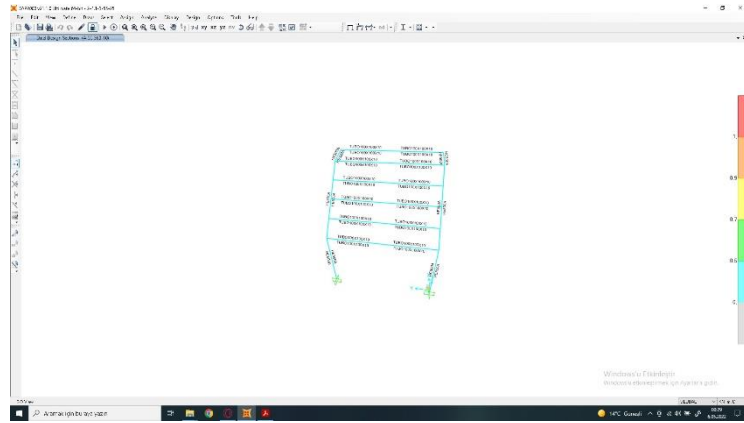
Şekil M.3 Aşıklara etkiyen rüzgar yüklerinin sisteme tanımlanması



Şekil M.4 SAP2000 programında oluşturulan FVGE modeli



Şekil M.5 FVGE sistemin deplasman şartının kontrolü



Şekil M.6 FVGE system dayanımı ve çelik kesitleri

FVGE VERİTABANI ALTERNATİFLERİNİN DESTEK STRÜKTÜRLERİNİN METRAJİ

Tablo N.1 FVGE veritabanı tek kırıklı engel alternatiflerinin yapısal metrajları

Tek Kırıklı Engel																		
Kod	d	h	α	Yapısal Çelik Profili	Yapısal Çelik Birim Ağırlığı (t/m)	Yapısal Çelik Uzunluğu (m)	Yapısal Çelik Toplam Ağırlığı (ton)	Yapısal Çelik Birim Fiyatı (TL/ton)	Yapısal Çelik Birim Fiyatı (\$/ton)	Yapısal Çelik Toplam Fiyatı (\$)	Aşık	Aşık Birim Ağırlığı (t/m)	Aşık Uzunluğu (m)	Aşık Toplam Ağırlığı (ton)	Aşık Birim Fiyatı (TL/Ton)	Aşık Birim Fiyatı (\$/Ton)	Aşık Toplam Fiyat (\$)	TOPLAM (\$)
D2.H2.25	2	2	25	IPE220	0,0262	8	0,2096	11226	1271,3	266,5	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	600,4
D2.H2.30	2	2	30	IPE240	0,0307	8	0,2456	11226	1271,3	312,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	646,1
D2.H2.35	2	2	35	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H2.40	2	2	40	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H2.45	2	2	45	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H2.50	2	2	50	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H2.55	2	2	55	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H2.60	2	2	60	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H2.65	2	2	65	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H3.25	2	3	25	IPE270	0,0361	8	0,2888	11226	1271,3	367,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	701,1
D2.H3.30	2	3	30	IPE300	0,0422	8	0,3376	11226	1271,3	429,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	763,1
D2.H3.35	2	3	35	IPE300	0,0422	8	0,3376	11226	1271,3	429,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	763,1
D2.H3.40	2	3	40	IPE300	0,0422	8	0,3376	11226	1271,3	429,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	763,1
D2.H3.45	2	3	45	IPE300	0,0422	8	0,3376	11226	1271,3	429,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	763,1
D2.H3.50	2	3	50	IPE300	0,0422	8	0,3376	11226	1271,3	429,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	763,1
D2.H3.55	2	3	55	IPE300	0,0422	8	0,3376	11226	1271,3	429,2	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	763,1

D2.H3.60	2	3	60	IPE330	0,0491	8	0,3928	11226	1271,3	499,4	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	833,3
D2.H3.65	2	3	65	IPE330	0,0491	8	0,3928	11226	1271,3	499,4	100x100x10	0,0256	16,5	0,4224	6980	790,487	333,9	833,3
D3.H2.25	3	2	25	IPE300	0,0422	10	0,422	11226	1271,3	536,5	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	981,7
D3.H2.30	3	2	30	IPE300	0,0422	10	0,422	11226	1271,3	536,5	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	981,7
D3.H2.35	3	2	35	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H2.40	3	2	40	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H2.45	3	2	45	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H2.50	3	2	50	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H2.55	3	2	55	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H2.60	3	2	60	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H2.65	3	2	65	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H3.25	3	3	25	IPE330	0,0491	10	0,491	11226	1271,3	624,2	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1069,4
D3.H3.30	3	3	30	IPE360	0,0571	10	0,571	11226	1271,3	725,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1171,1
D3.H3.35	3	3	35	IPE360	0,0571	10	0,571	11226	1271,3	725,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1171,1
D3.H3.40	3	3	40	IPE360	0,0571	10	0,571	11226	1271,3	725,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1171,1
D3.H3.45	3	3	45	IPE400	0,0663	10	0,663	11226	1271,3	842,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1288,1
D3.H3.50	3	3	50	IPE400	0,0663	10	0,663	11226	1271,3	842,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1288,1
D3.H3.55	3	3	55	IPE400	0,0663	10	0,663	11226	1271,3	842,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1288,1
D3.H3.60	3	3	60	IPE400	0,0663	10	0,663	11226	1271,3	842,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1288,1
D3.H3.65	3	3	65	IPE400	0,0663	10	0,663	11226	1271,3	842,9	100x100x10	0,0256	22	0,5632	6980	790,487	445,2	1288,1
D4.H2.25	4	2	25	HEA360	0,112	12	1,344	11226	1271,3	1708,7	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2265,2
D4.H2.30	4	2	30	HEA360	0,112	12	1,344	11226	1271,3	1708,7	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2265,2
D4.H2.35	4	2	35	HEA360	0,112	12	1,344	11226	1271,3	1708,7	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2265,2
D4.H2.40	4	2	40	HEA360	0,112	12	1,344	11226	1271,3	1708,7	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2265,2
D4.H2.45	4	2	45	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H2.50	4	2	50	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H2.55	4	2	55	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H2.60	4	2	60	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5

D4.H2.65	4	2	65	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.25	4	3	25	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.30	4	3	30	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.35	4	3	35	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.40	4	3	40	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.45	4	3	45	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.50	4	3	50	HEA400	0,125	12	1,5	11226	1271,3	1907,0	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2463,5
D4.H3.55	4	3	55	HEA450	0,14	12	1,68	11226	1271,3	2135,9	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2692,4
D4.H3.60	4	3	60	HEA450	0,14	12	1,68	11226	1271,3	2135,9	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2692,4
D4.H3.65	4	3	65	HEA450	0,14	12	1,68	11226	1271,3	2135,9	100x100x10	0,0256	27,5	0,704	6980	790,487	556,5	2692,4
D5.H2.25	5	2	25	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.30	5	2	30	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.35	5	2	35	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.40	5	2	40	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.45	5	2	45	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.50	5	2	50	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.55	5	2	55	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.60	5	2	60	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H2.65	5	2	65	HEA400	0,125	14	1,75	11226	1271,3	2224,9	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	2892,7
D5.H3.25	5	3	25	HEA450	0,14	14	1,96	11226	1271,3	2491,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3159,6
D5.H3.30	5	3	30	HEA450	0,14	14	1,96	11226	1271,3	2491,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3159,6
D5.H3.35	5	3	35	HEA450	0,14	14	1,96	11226	1271,3	2491,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3159,6
D5.H3.40	5	3	40	HEA450	0,14	14	1,96	11226	1271,3	2491,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3159,6
D5.H3.45	5	3	45	HEA500	0,155	14	2,17	11226	1271,3	2758,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3426,6
D5.H3.50	5	3	50	HEA500	0,155	14	2,17	11226	1271,3	2758,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3426,6
D5.H3.55	5	3	55	HEA500	0,155	14	2,17	11226	1271,3	2758,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3426,6
D5.H3.60	5	3	60	HEA500	0,155	14	2,17	11226	1271,3	2758,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3426,6
D5.H3.65	5	3	65	HEA500	0,155	14	2,17	11226	1271,3	2758,8	100x100x10	0,0256	33	0,8448	6980	790,487	667,8	3426,6

Tablo N.2 FVGE veritabanı çift kırıklı engel alternatiflerinin metrajları

Çift Kırıklı Engel																					
Kod	d1	d2	h	α	β	Yapısal Çelik Profili	Yapısal Çelik Birim Ağırlığı (t/m)	Yapısal Çelik Uzunluğu (m)	Yapısal Çelik Toplam Ağırlığı (ton)	Yapısal Çelik Birim Fiyatı (TL/ton)	Yapısal Çelik Birim Fiyatı (\$/ton)	Yapısal Çelik Toplam Fiyatı (\$)	Aşık	Aşık Birim Ağırlığı (t/m)	Aşık Uzunluğu (m)	Aşık Toplam Ağırlığı (ton)	Aşık Birim Fiyatı (TL/Ton)	Aşık Birim Fiyatı (\$/Ton)	Aşık Toplam Fiyat (\$)	TOPLAM	
D2.1.1.H2.45.2 5	1	1	2	45	25	IPE240	0,030	8	0,245	1122	1271,34	312,243	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	646,144
D2.1.1.H2.50.2 5	1	1	2	50	25	IPE240	0,030	8	0,245	1122	1271,34	312,243	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	646,144
D2.1.1.H2.55.2 5	1	1	2	55	25	IPE240	0,030	8	0,245	1122	1271,34	312,243	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	646,144
D2.1.1.H2.60.2 5	1	1	2	60	25	IPE240	0,030	8	0,245	1122	1271,34	312,243	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	646,144
D2.1.1.H2.65.2 5	1	1	2	65	25	IPE240	0,030	8	0,245	1122	1271,34	312,243	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	646,144
D2.1.1.H3.45.2 5	1	1	3	45	25	IPE300	0,042	10	0,422	1122	1271,34	536,508	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	870,410
D2.1.1.H3.50.2 5	1	1	3	50	25	IPE300	0,042	10	0,422	1122	1271,34	536,508	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	870,410
D2.1.1.H3.55.2 5	1	1	3	55	25	IPE300	0,042	10	0,422	1122	1271,34	536,508	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	870,410
D2.1.1.H3.60.2 5	1	1	3	60	25	IPE300	0,042	10	0,422	1122	1271,34	536,508	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	870,410
D2.1.1.H3.65.2 5	1	1	3	65	25	IPE300	0,042	10	0,422	1122	1271,34	536,508	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	870,410
D2.1.1.H2.45.3 0	1	1	2	45	30	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.50.3 0	1	1	2	50	30	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.55.3 0	1	1	2	55	30	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1 0	0,025	6	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066

D2.1.1.H2.60.3 0	1	1	2	60	30	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.65.3 0	1	1	2	65	30	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H3.45.3 0	1	1	3	45	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.50.3 0	1	1	3	50	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.55.3 0	1	1	3	55	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.60.3 0	1	1	3	60	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.65.3 0	1	1	3	65	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H2.45.3 5	1	1	2	45	35	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.50.3 5	1	1	2	50	35	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.55.3 5	1	1	2	55	35	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.60.3 5	1	1	2	60	35	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H2.65.3 5	1	1	2	65	35	IPE270	0,036	8	0,288	1122	1271,34	367,165	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	701,066
D2.1.1.H3.45.3 5	1	1	3	45	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.50.3 5	1	1	3	50	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.55.3 5	1	1	3	55	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.60.3 5	1	1	3	60	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D2.1.1.H3.65.3 5	1	1	3	65	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	16,5	0,422	6980	790,48	333,901	958,133
D3.2.1.H2.45.2 5	2	1	2	45	25	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.50.2 5	2	1	2	50	25	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43

D3.2.1.H2.55.2 5	2	1	2	55	25	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.60.2 5	2	1	2	60	25	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.65.2 5	2	1	2	65	25	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H3.45.2 5	2	1	3	45	25	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.50.2 5	2	1	3	50	25	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.55.2 5	2	1	3	55	25	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.60.2 5	2	1	3	60	25	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.65.2 5	2	1	3	65	25	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H2.45.3 0	2	1	2	45	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.50.3 0	2	1	2	50	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.55.3 0	2	1	2	55	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.60.3 0	2	1	2	60	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.65.3 0	2	1	2	65	30	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H3.45.3 0	2	1	3	45	30	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.50.3 0	2	1	3	50	30	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.55.3 0	2	1	3	55	30	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.60.3 0	2	1	3	60	30	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.65.3 0	2	1	3	65	30	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H2.45.3 5	2	1	2	45	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43

D3.2.1.H2.50.3 5	2	1	2	50	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.55.3 5	2	1	2	55	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.60.3 5	2	1	2	60	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H2.65.3 5	2	1	2	65	35	IPE330	0,049	10	0,491	1122	1271,34	624,231	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1069,43
D3.2.1.H3.45.3 5	2	1	3	45	35	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.50.3 5	2	1	3	50	35	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.55.3 5	2	1	3	55	35	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.60.3 5	2	1	3	60	35	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D3.2.1.H3.65.3 5	2	1	3	65	35	IPE400	0,066	12	0,795	1122	1271,34	1011,48	100x100x1	0,025	22	0,563	6980	790,48	445,202	1456,68
D4.3.1.H2.45.2 5	3	1	2	45	25	HEA40	0,125	12	1,5	1122	1271,34	1907,02	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	2463,52
D4.3.1.H2.50.2 5	3	1	2	50	25	HEA40	0,125	12	1,5	1122	1271,34	1907,02	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	2463,52
D4.3.1.H2.55.2 5	3	1	2	55	25	HEA40	0,125	12	1,5	1122	1271,34	1907,02	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	2463,52
D4.3.1.H2.60.2 5	3	1	2	60	25	HEA40	0,125	12	1,5	1122	1271,34	1907,02	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	2463,52
D4.3.1.H2.65.2 5	3	1	2	65	25	HEA40	0,125	12	1,5	1122	1271,34	1907,02	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	2463,52
D4.3.1.H3.45.2 5	3	1	3	45	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122	1271,34	2491,84	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	3048,34
D4.3.1.H3.50.2 5	3	1	3	50	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122	1271,34	2491,84	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	3048,34
D4.3.1.H3.55.2 5	3	1	3	55	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122	1271,34	2491,84	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	3048,34
D4.3.1.H3.60.2 5	3	1	3	60	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122	1271,34	2491,84	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	3048,34
D4.3.1.H3.65.2 5	3	1	3	65	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122	1271,34	2491,84	100x100x1	0,025	27,5	0,704	6980	790,48	556,502	3048,34

D4.3.1.H2.45.3 0	3	1	2	45	30	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.50.3 0	3	1	2	50	30	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.55.3 0	3	1	2	55	30	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.60.3 0	3	1	2	60	30	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.65.3 0	3	1	2	65	30	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H3.45.3 0	3	1	3	45	30	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.50.3 0	3	1	3	50	30	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.55.3 0	3	1	3	55	30	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.60.3 0	3	1	3	60	30	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.65.3 0	3	1	3	65	30	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H2.45.3 5	3	1	2	45	35	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.50.3 5	3	1	2	50	35	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.55.3 5	3	1	2	55	35	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.60.3 5	3	1	2	60	35	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H2.65.3 5	3	1	2	65	35	HEA40	0,125	12	1,5	1122 6	1271,34 8	1907,02 2	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2463,52 4
D4.3.1.H3.45.3 5	3	1	3	45	35	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.50.3 5	3	1	3	50	35	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.55.3 5	3	1	3	55	35	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.3.1.H3.60.3 5	3	1	3	60	35	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4

D4.3.1.H3.65.3 5	3	1	3	65	35	HEA45	0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	3048,34 4
D4.2.2.H2.45.2 5	2	2	2	45	25	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.50.2 5	2	2	2	50	25	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.55.2 5	2	2	2	55	25	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.60.2 5	2	2	2	60	25	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.65.2 5	2	2	2	65	25	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H3.45.2 5	2	2	3	45	25	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.50.2 5	2	2	3	50	25	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.55.2 5	2	2	3	55	25	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.60.2 5	2	2	3	60	25	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.65.2 5	2	2	3	65	25	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H2.45.3 0	2	2	2	45	30	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.50.3 0	2	2	2	50	30	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.55.3 0	2	2	2	55	30	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.60.3 0	2	2	2	60	30	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.65.3 0	2	2	2	65	30	HEA36	0	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H3.45.3 0	2	2	3	45	30	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.50.3 0	2	2	3	50	30	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.55.3 0	2	2	3	55	30	HEA40	0	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1

D4.2.2.H3.60.3 0	2	2	3	60	30	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.65.3 0	2	2	3	65	30	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H2.45.3 5	2	2	2	45	35	HEA36	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.50.3 5	2	2	2	50	35	HEA36	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.55.3 5	2	2	2	55	35	HEA36	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.60.3 5	2	2	2	60	35	HEA36	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H2.65.3 5	2	2	2	65	35	HEA36	0,112	12	1,344	1122 6	1271,34 8	1708,69 1	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2265,19 4
D4.2.2.H3.45.3 5	2	2	3	45	35	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.50.3 5	2	2	3	50	35	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.55.3 5	2	2	3	55	35	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.60.3 5	2	2	3	60	35	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D4.2.2.H3.65.3 5	2	2	3	65	35	HEA40	0,125	14	1,75	1122 6	1271,34 8	2224,85 8	100x100x1 0	0,025 6	27,5	0,704	6980	790,48 7	556,502 8	2781,36 1
D5.3.2.H2.45.2 5	3	2	2	45	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.50.2 5	3	2	2	50	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.55.2 5	3	2	2	55	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.60.2 5	3	2	2	60	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.65.2 5	3	2	2	65	25	HEA45	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H3.45.2 5	3	2	3	45	25	HEA50	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.50.2 5	3	2	3	50	25	HEA50	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6

D5.3.2.H3.55.2 5	3	2	3	55	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.60.2 5	3	2	3	60	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.65.2 5	3	2	3	65	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H2.45.3 0	3	2	2	45	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.50.3 0	3	2	2	50	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.55.3 0	3	2	2	55	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.60.3 0	3	2	2	60	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.65.3 0	3	2	2	65	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H3.45.3 0	3	2	3	45	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.50.3 0	3	2	3	50	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.55.3 0	3	2	3	55	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.60.3 0	3	2	3	60	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.65.3 0	3	2	3	65	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H2.45.3 5	3	2	2	45	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.50.3 5	3	2	2	50	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.55.3 5	3	2	2	55	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.60.3 5	3	2	2	60	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H2.65.3 5	3	2	2	65	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3159,64 5
D5.3.2.H3.45.3 5	3	2	3	45	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6

D5.3.2.H3.50.3 5	3	2	3	50	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.55.3 5	3	2	3	55	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.60.3 5	3	2	3	60	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.3.2.H3.65.3 5	3	2	3	65	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	33	0,844 8	6980	790,48 7	667,803 4	3820,74 6
D5.4.1.H2.45.2 5	4	1	2	45	25	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.50.2 5	4	1	2	50	25	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.55.2 5	4	1	2	55	25	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.60.2 5	4	1	2	60	25	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.65.2 5	4	1	2	65	25	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H3.45.2 5	4	1	3	45	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.50.2 5	4	1	3	50	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.55.2 5	4	1	3	55	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.60.2 5	4	1	3	60	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.65.2 5	4	1	3	65	25	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H2.45.3 0	4	1	2	45	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.50.3 0	4	1	2	50	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.55.3 0	4	1	2	55	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.60.3 0	4	1	2	60	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.65.3 0	4	1	2	65	30	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5

D5.4.1.H3.45.3 0	4	1	3	45	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.50.3 0	4	1	3	50	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.55.3 0	4	1	3	55	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.60.3 0	4	1	3	60	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.65.3 0	4	1	3	65	30	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H2.45.3 5	4	1	2	45	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.50.3 5	4	1	2	50	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.55.3 5	4	1	2	55	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.60.3 5	4	1	2	60	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H2.65.3 5	4	1	2	65	35	HEA45 0	0,14	14	1,96	1122 6	1271,34 8	2491,84 1	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3270,94 5
D5.4.1.H3.45.3 5	4	1	3	45	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.50.3 5	4	1	3	50	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D5.4.1.H3.55.3 5	4	1	3	55	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D4.4.1.H3.60.3 5	4	1	3	60	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6
D4.4.1.H3.65.3 5	4	1	3	65	35	HEA50 0	0,155	16	2,48	1122 6	1271,34 8	3152,94 2	100x100x1 0	0,025 6	38,5	0,985 6	6980	790,48 7	779,104	3932,04 6

O

GÜRÜLTÜ ENGELİ MALZEME TIPLERİNE GÖRE GÜRÜLTÜ ENGELİ PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ VE BİRİM MALİYETLERİ

Tablo O.1 Malzeme tiplerine göre gürültü engeli performans ölçütlerinin genel değerlendirmesi [72]

Performans Grubu	Gürültü Engeli Performans Ölçütü	Beton	Metal		Ahşap	
			Alüminyum	Çelik	Kereste	Söğüt
Akustik Performans	Ses yutuculuğunun tek sayı derecelendirmesi (dB)	3	4	4	4	4
	Ses yalıtımının tek sayı derecelendirmesi (dB)	5	3	3	5	5
	Geçiş kaybı (dB(A))	4	4	4	3	3
	Yüzey Yoğunluğu (kg/m ²)	5	1	1	1	1
Akustik Olmayan Performans	Mekanik Direnç (kg/m ²)	5	4	4	2	2
	Ortalama İnşa Maliyeti (€ /m ²)	2	3	3	4	4
	Minimum hizmet ömrü (yıl)	5	5	4	5	3
Uzun dönem performansı	Bakım ve değişim maliyeti (€ /m ²)	5	2	2	2	2
	Yaşam döngüsü maliyeti (€ /m ²)	4	1	1	3	3
	Karbon ayakizi (t)	1	4	2	2	5
	Su ayakizi (10 ⁶ l)	5	4	4	5	1
	Birincil enerji kullanımı (10 ⁹ J)	2	4	5	5	4
	Ulaştırma gömülü enerji (10 ⁹ J)	2	5	5	5	4
	Yaşam ömrü sonunda geri dönüşüm potansiyeli (%)	4	5	5	1	2
Panel malzeme türü için ortalama toplam puan		3,7	3,5	3,4	3,4	3,1

Tablo O.2 Gürültü engeli malzeme tipi ve yüksekliğine göre ortalama birim maliyeti (\$/m²) [269]

Malzeme	Yükseklik									
	≥ 9,14	8,22-8,83	7,31-7,92	6,4-7,01	5,48-6,09	4,57-5,18	3,65-4,26	2,74-3,35	< 1,82-2,43	1,82
Beton	1351	405	283	431	431	391	391	419	324	649
Blok	67	0	175	0	405	364	311	352	283	41
Ahşap	486	0	311	472	216	283	297	256	297	27
Metal	230	0	297	0	203	229	216	352	283	27
Toprak Set	122	0	41	53	162	81	81	81	108	122
Tuğla	0	0	0	0	311	405	459	486	486	0
Komb.	1351	229	189	216	283	256	311	311	338	14
Yutucu	0	364	230	324	351	459	364	567	311	0
Tüm Malz.	3608	364	283	405	378	352	352	352	297	891

EKONOMİK PERFORMANS GÖSTERGELERİ

P.1 Net Bugünkü Değer (Net Present Value)

Net bugünkü değer (NBD), gelecekteki maliyetlerin ve gelirlerin indirgenmiş toplamından hesaplanan, bir yatırım tarafından üretilen net karı temsil eder ve pozitif NBD değeri projenin karlı olduğunu gösterir [234]. Bir projenin net bugünkü değer hesaplaması (P.1) ile yapılabilir;

$$NBD = \sum_{t=0}^N \frac{Gelir_t - Maliyet_t}{(1 + d)^t} \quad (P.1)$$

Denklemlerde, t hesaplama yapılan yılı, n sistemin toplam yaşam ömrünü; d indirgeme oranını temsil eder.

P.2 Fayda-Maliyet Oranı (Cost/Benefit Ratio)

Fayda-maliyet oranı (F/M), indirgenmiş sistem gelirlerinin indirgenmiş sistem maliyetlerine oranını temsil eder ve (P.2) ile hesaplanır [234];

$$F/M = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{Gelir_t}{(1 + d)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{Maliyet_t}{(1 + d)^t}} \quad (P.2)$$

P.3 İç Karlılık Oranı (Internal Rate of Return)

İç karlılık oranı (IRR), projeye ait net bugünkü değer oranının sifra eşit olduğu kazanç oranını temsil eder ve sıklıkla yıllık yatırım getirisi olarak yorumlanır. İç karlılık oranı (P.3) ile hesaplanabilir [234];

$$NBD = \sum_{t=0}^N \frac{Gelir_t - Maliyet_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (P.3)$$

P.4 Basit ve İndirgenmiş Geri Ödeme Süresi (Simple Payback Time and Discounted Payback Time)

Basit geri ödeme süresi (SPBT), indirgenmemiş FV net gelirlerinin ilk yatırım maliyetine eşit olması için gereken süredir ve (P.4) ile hesaplanır [270]. İndirgenmiş geri ödeme süresi (DPBT), paranın zaman değerini hesaba katarken yatırımın proje maliyetini geri kazanmak için gereken yıl sayısıdır ve (P.5) ile hesaplanabilir [233].

$$SPBT = \frac{\text{Sistem Maliyeti} - \text{Teşvik}}{\text{Sistem Geliri} - \text{İşletme\&Bakım Maliyeti}} \quad (\text{P.4})$$

$$DPBT = \sum_{t=0}^{\text{DPB Süresi}} \frac{\text{Gelir}_t - \text{Maliyet}_t}{(1 + d)^t} > 0 \quad (\text{P.5})$$

P.5 Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (Levelized Cost of Energy)

Seviyelendirilmiş enerji maliyetinin (LCOE) hesaplamasında, sadece FV sistem performansı dikkate alınır. LCOE, sistemin ömrü boyunca indirimli proje maliyetlerini telafi etmek için FV elektriğinin satılması gereken indirgenmiş fiyatı temsil eder ve (P.6) ile hesaplanabilir [234];

$$LCOE_{\text{ticari}} = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{\text{Maliyet}}{(1 + d)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{\text{Elektrik Enerjisi}_t}{(1 + d)^t}} \quad (\text{P.6})$$

P.6 Toplam Yaşam Döngüsü Maliyeti (TLCC)

Toplam yaşam döngüsü maliyeti (TLCC) analizi, alternatif projeler arasındaki maliyet farklılıklarını ve maliyetlerin zamanlamasını değerlendirmek için kullanılır. TLCC'ler, bir varlığın ömrü boyunca veya yatırımcının ilgilendiği süre boyunca bir varlığın mülkiyeti nedeniyle katlanılan maliyetlerdir [271]. TLCC analizi, projenin ömrü boyunca tüm maliyetlerini dikkate alır. Bu maliyetler daha sonra bugünkü değer analizi kullanılarak bir baz yıla indirgenir. Toplam yaşam döngüsü maliyeti (P.7) ile hesaplanabilir [233];

$$TLCC = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1 + d)^n} \quad (\text{P.7})$$

Q GÜRÜLTÜ RAHATSIZLIĞININ PARASAL DEĞERE ÇEVİLMESİNE YÖNELİK YAKLAŞIMLAR

Q.1 Yukarıdan-aşağı yaklaşım (top-down approach);

Toplam gürültü maliyetleri makro ölçekte, tahmini insan sayısı ile belirlenerek ortalama bir WTP (Willingness to pay) değeri belirlenir.

Q.2 Aşağıdan-yukarı yaklaşım (bottom-up) yaklaşım;

Mikro ölçekten, yani belirli bir rotadaki trafik akışından başlayarak 5 adımda değerlendirme yapılır; (a) gürültü emisyonu hesaplanır (zaman, konum, frekans, düzey ve kaynak dahil edilerek), (b) coğrafi konuma özgü ve ses yayılımına ilişkin faktörlerle L_{gag} , L_{gece} değerleri hesaplanır, (c) doz-etki ilişkilerinden yararlanarak sağlık sonuçları belirlenir, (d) sağlık sonuçlarının ekonomik değeri belirlenir ve (e) sağlık sonuçlarının ekonomik değerine karşılık gelen etki ile çarpılıp sonuçları toplanır.

Yukarıdan aşağıya bir yaklaşım, ortalama gürültü maliyetleriyle sonuçlanırken, aşağıdan yukarıya bir yaklaşım, daha net gürültü maliyetleri sağlar. Teorik açıdan, aşağıdan yukarıya yaklaşım tercih edilir ve daha hassas sonuçlar sağlar [229].

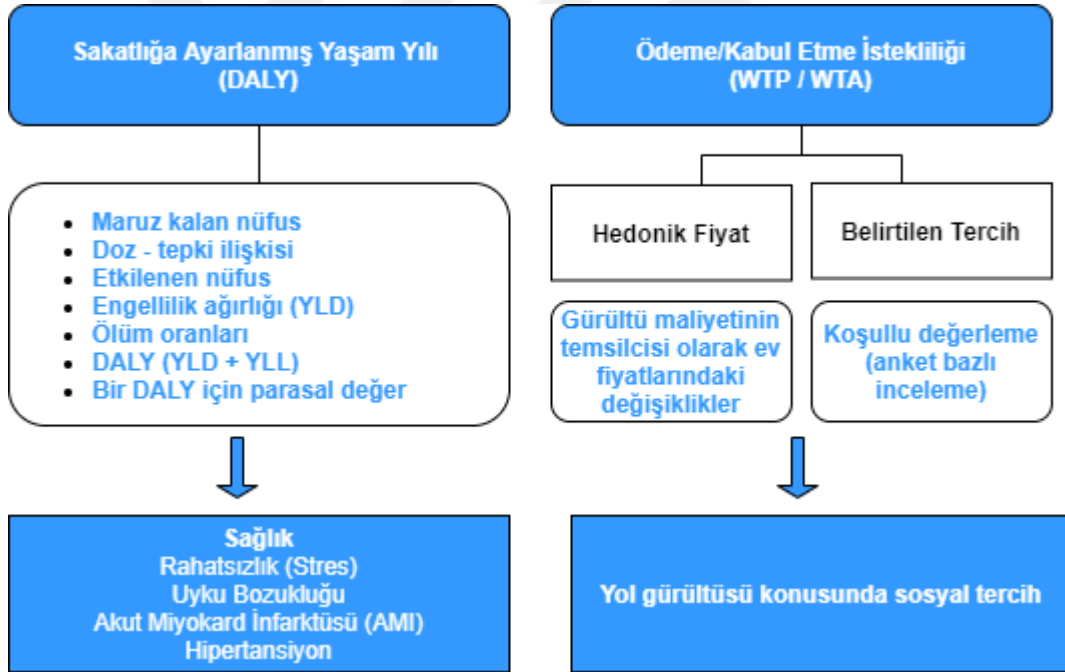
Stres ve hastalıklar iki bağımsız etki olarak düşünüldüğünden, uzun vadeli potansiyel sağlık riski, insanlar tarafından algılanan gürültü rahatsızlığında dikkate alınmayabilir. Hume vd. ölçülebilir sağlık etkilerinin sıkıntı ve strese kıyasla çok az önemli olduğunu göstermiştir [272]. Bu nedenle, trafik gürültüsünün sağlık etkileri çalışmaya dahil edilmemiştir.

Pearce & Howarth (2000) çalışmasına dayanan ve gürültünün sosyal maliyetinde kullanılan 2 ana değerlendirme kategorisi aşağıdaki gibidir [273];

1. Açıklanmış Tercih Yaklaşımı veya Dolaylı Yaklaşım (Revealed Preference approach (RP) or indirect approach); Bu yaklaşım, mal ve hizmet

fiyatlarının çevresel özelliklerden etkilendiği varsayımına dayanmaktadır. Örneğin bir bölgedeki gürültü kirliliği, o bölgede bulunan evlerin piyasa fiyatını düşürebilir. Bu nedenle, tüketicilerin farklı çevresel özelliklere sahip pazar alanlarına ilişkin davranışları karşılaştırılarak ödeme veya kabul etme istekliliği tahmin edilmektedir. Hedonik fiyat yöntemi bu yaklaşıma aittir ve gürültü maliyetini kiralık veya satılık ev fiyatları açısından değerlendirmek için kullanılabilir [69].

2. **Belirtilen Tercihler Yaklaşımı veya Doğrudan Yaklaşım (Stated Preferences approach (SP) or direct approach)**; Bireylerin daha iyi bir çevre için ödeme yapmak istediği varsayımına dayanmaktadır. Koşullu değerlendirme yöntemi bu kategoriye aittir. İlgili kişilere doğrudan bir anket aracılığıyla daha sessiz bir ortamda yaşamak için ne kadar ödemeye razı olacaklarına dair anket yapılır.



Şekil Q.1 Parasal değere çevirme yaklaşımları

R

AÇIKLAYICI ALAN ÇALIŞMASININ FVGE ARACI İLE YAPILAN HESAPLAMA ÇIKTILARI

Tablo R.1 Yere özgü kriter ağırlıkları seçimi doğrultusunda FVGE aracı ile yapılan hesaplama sonucunda elde edilen performans kriteri çıktıları

Değerlendirme Kriteri	FVGE Kodu	Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi E_{grid} (MWh)	Limit Değer Üzerinde Gürültüye Maruz Kalan Nüfus	Zemin Katta Işınım Miktarı (kWh)
L _{gün}	D5.H2.25	666,5	300	1513,7
L _{gün}	D5.H2.30	668,1	256	1510,8
L _{gün}	D5.H2.35	668,3	256	1510,7
L _{gün}	D5.H2.40	665,0	208	1509,4
L _{gün}	D5.H2.45	658,2	188	1505,6
L _{gün}	D5.H2.50	647,7	188	1501,1
L _{gün}	D5.H2.55	632,0	164	1487,8
L _{gün}	D5.H2.60	612,9	96	1486,7
L _{gün}	D5.H2.65	593,4	96	1477,7
L _{gün}	D5.H3.25	671,4	208	1509,5
L _{gün}	D5.H3.30	674,8	188	1505,7
L _{gün}	D5.H3.35	673,8	188	1497,5
L _{gün}	D5.H3.40	669,2	164	1487,3
L _{gün}	D5.H3.45	662,5	96	1477,7
L _{gün}	D5.H3.50	652,0	96	1468,8
L _{gün}	D5.H3.55	639,1	96	1463,5
L _{gün}	D5.H3.60	623,0	96	1458,0
L _{gün}	D5.H3.65	603,6	24	1448,2
L _{gün}	D5.3.2.H2.45.30	665,9	208	1509,5
L _{gün}	D5.3.2.H2.50.30	662,7	188	1506,0
L _{gün}	D5.3.2.H2.55.30	658,2	188	1505,6
L _{gün}	D5.3.2.H2.60.30	652,3	188	1503,8
L _{gün}	D45.3.2.H2.65.30	645,3	188	1497,4
L _{gün}	D5.3.2.H3.45.30	670,1	164	1487,6
L _{gün}	D5.3.2.H3.50.30	667,0	164	1486,7
L _{gün}	D5.3.2.H3.55.30	662,5	96	1477,7

L _{gün}	D5.3.2.H3.60.30	656,6	96	1474,0
L _{gün}	D5.3.2.H3.65.30	649,6	96	1468,6
L _{gün}	D5.4.1.H2.45.30	662,7	188	1506,0
L _{gün}	D5.4.1.H2.50.30	656,4	188	1505,3
L _{gün}	D5.4.1.H2.55.30	647,7	188	1501,1
L _{gün}	D5.4.1.H2.60.30	634,8	164	1496,5
L _{gün}	D45.4.1.H2.65.30	622,7	164	1487,2
L _{gün}	D5.4.1.H3.45.30	667,0	164	1486,7
L _{gün}	D5.4.1.H3.50.30	660,7	96	1474,5
L _{gün}	D5.4.1.H3.55.30	652,0	96	1468,8
L _{gün}	D5.4.1.H3.60.30	641,9	96	1463,8
L _{gün}	D5.4.1.H3.65.30	629,8	96	1461,3

Tablo R.2 Filtrelenen FVGE alternatiflerinin, “Yere Özgü Kriter Ağırlıkları”nın kullanıldığı TOPSIS metodu ile performans sıralaması

FVGE Kodu	Performans Sonucu	Performans Sıralaması
D5.H2.25	0,04707	38
D5.H2.30	0,16591	37
D5.H2.35	0,16594	36
D5.H2.40	0,33564	35
D5.H2.45	0,40715	26
D5.H2.50	0,40667	30
D5.H2.55	0,49270	20
D5.H2.60	0,73673	13
D5.H2.65	0,73495	14
D5.H3.25	0,33607	33
D5.H3.30	0,40798	22
D5.H3.35	0,40793	23
D5.H3.40	0,49408	16
D5.H3.45	0,73940	2
D5.H3.50	0,73906	6
D5.H3.55	0,73846	10
D5.H3.60	0,73747	12

D5.H3.65	0,95412	1
D5.3.2.H2.45.30	0,33570	34
D5.3.2.H2.50.30	0,40737	24
D5.3.2.H2.55.30	0,40715	26
D5.3.2.H2.60.30	0,40687	29
D45.3.2.H2.65.30	0,40656	32
D5.3.2.H3.45.30	0,49411	15
D5.3.2.H3.50.30	0,49399	17
D5.3.2.H3.55.30	0,73940	2
D5.3.2.H3.60.30	0,73922	5
D5.3.2.H3.65.30	0,73896	8
D5.4.1.H2.45.30	0,40737	24
D5.4.1.H2.50.30	0,40706	28
D5.4.1.H2.55.30	0,40667	30
D5.4.1.H2.60.30	0,49281	19
D45.4.1.H2.65.30	0,49236	21
D5.4.1.H3.45.30	0,49399	17
D5.4.1.H3.50.30	0,73935	4
D5.4.1.H3.55.30	0,73906	6
D5.4.1.H3.60.30	0,73861	9
D5.4.1.H3.65.30	0,73793	11

Tablo R.3 Kullanıcı tanımlı kriter ağırlıkları seçimi doğrultusunda FVGE aracı ile yapılan hesaplama sonucunda elde edilen performans kriteri çıktıları

Değerlendirme Kriteri	FVGE Kodu	Yıllık Elektrik Üretimi (MWh)	Gürültü Denetiminden Faydalanan Kişi Sayısı	Net Bugünkü Değer (\$)	Yıllık Önlenebilir CO2 (ton)
L _{gün}	D5.H2.25	666,5093623	118	697632,2	206,6179023
L _{gün}	D5.H2.30	668,0715429	129	726558,5	207,1021783
L _{gün}	D5.H2.35	668,2623427	147	774296,8	207,1613262
L _{gün}	D5.H2.40	664,995344	177	854780,2	206,1485566
L _{gün}	D5.H2.45	658,1760077	182	867468,9	204,0345624
L _{gün}	D5.H2.50	647,6889204	191	888837,4	200,7835653
L _{gün}	D5.H2.55	632,0043405	197	903605,9	195,9213455

L _{gün}	D5.H2.60	612,8923378	244	1027261,8	189,9966247
L _{gün}	D5.H2.65	593,4235072	244	1026073,3	183,9612872
L _{gün}	D5.H3.25	671,391362	177	682971,5	208,1313222
L _{gün}	D5.H3.30	674,7713774	177	683177,9	209,179127
L _{gün}	D5.H3.35	673,7977239	191	718232,1	208,8772944
L _{gün}	D5.H3.40	669,2042164	197	733677,7	207,4533071
L _{gün}	D5.H3.45	662,4625252	239	820136,1	205,3633828
L _{gün}	D5.H3.50	652,0314617	244	832604,3	202,1297531
L _{gün}	D5.H3.55	639,0807821	252	853822,4	198,1150424
L _{gün}	D5.H3.60	623,010652	256	862011,7	193,1333021
L _{gün}	D5.H3.65	603,6388323	262	876555,1	187,128038
L _{gün}	D5.3.2.H2.45.30	665,9221966	177	829989,2	206,4358809
L _{gün}	D5.3.2.H2.50.30	662,7163886	177	829793,5	205,4420805
L _{gün}	D5.3.2.H2.55.30	658,1760077	182	842621,3	204,0345624
L _{gün}	D5.3.2.H2.60.30	652,293522	191	864270,9	202,2109918
L _{gün}	D5.3.2.H2.65.30	645,2768445	191	863842,6	200,0358218
L _{gün}	D5.3.2.H3.45.30	670,1130059	197	672205,7	207,7350318
L _{gün}	D5.3.2.H3.50.30	666,9588774	200	681183,4	206,757252
L _{gün}	D5.3.2.H3.55.30	662,4625252	239	783456,3	205,3633828
L _{gün}	D5.3.2.H3.60.30	656,6162213	244	796204,3	203,5510286
L _{gün}	D5.3.2.H3.65.30	649,6279458	244	795777,7	201,3846632
L _{gün}	D5.4.1.H2.45.30	662,7163886	177	813170,9	205,4420805
L _{gün}	D5.4.1.H2.50.30	656,3619239	182	825887,9	203,4721964
L _{gün}	D5.4.1.H2.55.30	647,6889204	191	847367,2	200,7835653
L _{gün}	D5.4.1.H2.60.30	634,82184	197	862307,7	196,7947704
L _{gün}	D5.4.1.H2.65.30	622,6929949	223	930828,6	193,0348284
L _{gün}	D5.4.1.H3.45.30	666,9588774	200	664560,8	206,757252
L _{gün}	D5.4.1.H3.50.30	660,6613825	244	779828,6	204,8050286
L _{gün}	D5.4.1.H3.55.30	652,0314617	244	779301,8	202,1297531
L _{gün}	D5.4.1.H3.60.30	641,8745852	252	800690,5	198,9811214
L _{gün}	D5.4.1.H3.65.30	629,828981	252	799955,2	195,2469841

Tablo R.4 Filtrelenen FVGE alternatiflerinin, “Kullanıcı Tanımlı Kriter Ağırlıkları”nın kullanıldığı TOPSIS metodu ile performans sıralaması

FVGE Kodu	Performans Sonucu	Performans Sıralaması
D5.H2.25	0,10450	38
D5.H2.30	0,13824	37
D5.H2.35	0,23693	36
D5.H2.40	0,43529	30
D5.H2.45	0,46732	27
D5.H2.50	0,52204	18
D5.H2.55	0,55964	16
D5.H2.60	0,85685	1
D5.H2.65	0,84041	3
D5.H3.25	0,38794	35
D5.H3.30	0,38888	34
D5.H3.35	0,47294	26
D5.H3.40	0,51044	22
D5.H3.45	0,76537	11
D5.H3.50	0,79119	7
D5.H3.55	0,82884	5
D5.H3.60	0,83553	4
D5.H3.65	0,84176	2
D5.3.2.H2.45.30	0,42723	31
D5.3.2.H2.50.30	0,42642	32
D5.3.2.H2.55.30	0,45910	28
D5.3.2.H2.60.30	0,51492	19
D5.3.2.H2.65.30	0,51351	20
D5.3.2.H3.45.30	0,49212	25
D5.3.2.H3.50.30	0,51278	21
D5.3.2.H3.55.30	0,74369	14
D5.3.2.H3.60.30	0,76902	9
D5.3.2.H3.65.30	0,76753	10
D5.4.1.H2.45.30	0,42100	33
D5.4.1.H2.50.30	0,45325	29
D5.4.1.H2.55.30	0,50856	23
D5.4.1.H2.60.30	0,54695	17
D5.4.1.H2.65.30	0,72283	15
D5.4.1.H3.45.30	0,50779	24
D5.4.1.H3.50.30	0,75937	12
D5.4.1.H3.55.30	0,75776	13
D5.4.1.H3.60.30	0,79364	6
D5.4.1.H3.65.30	0,78964	8

ÇEVRESEL VE EKONOMİK PERFORMANS AÇISINDAN OPTIMUM FVGE ALTERNATIFİNİN 25 YILLIK FAYDA/MALİYET ANALIZI

Tablo S.1 Çevresel performans açısından optimum FVGE alternatifinin 25 yıllık fayda/maliyet analizi

YIL	GİDER MALİYETİ									FAYDA MALİYETİ						ANALİZ		
	İnşa Maliyeti		İşletme Maliyeti						Toplam	Elektrik Satışı		CO2 Satışı		GE Fayda	Toplam	İndirgenmiş Maliyet	İndirgenmiş Fayda	Nakit Akışı
	FV İnşa Maliyeti (\$/W) + (\$/Modül)	GE İnşa Maliyeti (\$/m2)	GE Panel Değişirme (10 yılda 1)	GE Grafiti Temizleme (5 yılda 1)	GE Boyama (20 yılda 1)	FV Bakım & Onarım Maliyeti	Genel Bakım Temizlik	Enflasyon Oranı	TOPLAM	Yıllık Elektrik Üretimi (kWh)	Elektrik Satış Geliri	Önlenen CO2 (ton)	CO2 Değeri (\$/ton)	Gürültü Engeli Fayda Maliyeti	Toplam Fayda Maliyeti			
2021	653352,5	294525	2945,25	26	2646	4016	25725	0,04	951893,7	674771	36438	209,1791	5810	11529	53777	928096	52433	-875664
2022			3063	28	2752	4177	26754	0,04	4177	663177	37244	205,5848	5710	11990	54945	4072	53571	-826165
2023			3186	29	2862	4344	27824	0,04	4344	659844	38539	204,5517	5682	12470	56691	4235	55273	-775127
2024			3313	30	2976	4518	28937	0,04	4518	656512	39878	203,5186	5653	12969	58500	4405	57037	-722495
2025			3446	31	3095	4698	30095	0,04	4698	653179	41263	202,4855	6169	13487	60919	4581	59396	-667680
2026			3583	32	3219	4886	31298	0,04	36217	649847	42694	201,4525	6137	14027	62858	35312	61287	-641704
2027			3727	33	3348	5082	32550	0,04	5082	646514	44175	200,4194	6106	14588	64868	4955	63246	-583413
2028			3876	35	3482	5285	33852	0,04	5285	643182	45705	199,3863	6074	15172	66950	5153	65277	-523289
2029			4031	36	3621	5497	35206	0,04	5497	639849	47287	198,3532	6043	15778	69108	5359	67380	-461268
2030			4192	38	3766	5716	36615	0,03	5716	636516	48922	197,3201	6453	16410	71785	5573	69990	-396852
2031			4318	39	3879	5888	37713	0,03	47958	633184	50126	196,287	6419	16902	73447	46759	71611	-372000
2032			4447	40	3995	6065	38845	0,03	6065	629851	51358	195,2539	6386	17409	75152	5913	73273	-304639
2033			4581	41	4115	6246	40010	0,03	6246	626519	52619	194,2208	6352	17931	76902	6090	74979	-235750
2034			4718	42	4239	6434	41210	0,03	6434	623186	53909	193,1877	6318	18469	78696	6273	76729	-165295
2035			4860	44	4366	6627	42446	0,03	6627	619854	55229	192,1546	6715	19023	80967	6461	78943	-92813

2036			5005	45	4497	6826	43720	0,03	50590	616521	56580	191,1216	6679	19594	82853	49326	80781	-61357	
2037			5156	46	4632	7030	45031	0,03	7030	613189	57963	190,0885	6642	20182	84787	6855	82667	14455	
2038			5310	48	4771	7241	46382	0,03	7241	609856	59377	189,0554	6606	20787	86771	7060	84601	91996	
2039			5470	49	4914	7459	47774	0,03	7459	606524	60824	188,0223	6570	21411	88805	7272	86585	171309	
2040			5634	51	5061	7682	49207	0,03	7682	603191	62305	186,9892	7037	22053	91395	7490	89110	252929	
2041			5803	52	5213	7913	50683	0,03	69664	599858	63819	185,9561	6998	22715	93532	67922	91194	276200	
2042			5977	54	5370	8150	52204	0,03	8150	596526	65369	184,923	6959	23396	95724	7946	93331	361584	
2043			6156	55	5531	8395	53770	0,03	8395	593193	66954	183,8899	6920	24098	97972	8185	95522	448921	
2044			6341	57	5697	8647	55383	0,03	8647	589861	68575	182,8568	6881	24821	100277	8430	97770	538261	
2045			6531	59	5867	8906	57045	0,03	8906	586528	70233	181,8238	7250	25566	103048	8683	100472	630050	
2046			6727	60	6043	9173	58756		9173	583196	71929	180,7907	7208	26333	105470	8944	102833	723939	
						166901			178916								Toplam	1261352	1985291
			NBD	723939	F/M	1,573939	PBT	16	IRR	-5%									

Tablo S.2 Ekonomik Performans açısından optimum FVGE alternatifinin 25 yıllık fayda/maliyet analizi

YIL	GİDER MALİYETİ									FAYDA MALİYETİ						ANALİZ		
	İnşa Maliyeti		İşletme Maliyeti						Toplam	Elektrik Satışı		CO2 Satışı		GE Fayda	Toplam	İndirgenmiş Maliyet	İndirgenmiş Fayda	Nakit Akışı
	FV İnşa Maliyeti (\$/W) + (\$/Modül)	GE İnşa Maliyeti (\$/m2)	GE Panel Değişirme (10 yılda 1)	GE Grafiti Temizleme (5 yılda 1)	GE Boyama (20 yılda 1)	FV Bakım & Onarım Maliyeti	Genel Bakım Temizlik	Enflasyon Oranı	TOPLAM	Yıllık Elektrik Üretimi (kWh)	Elektrik Satış Geliri	Önlenen CO2 (ton)	CO2 Değeri (\$/ton)	Gürültü Engeli Fayda Maliyeti	Toplam Fayda Maliyeti			
2021	627868	152250	1523	18	1764	4016	25725	0,04	784134	612892	33096	189,9966	5277	15865	54238	764531	52882	-711648
2022			1583	18	1835	4177	26754	0,04	4177	663177	37244	205,5848	5710	16499	59454	4072	57967	-657754
2023			1647	19	1908	4344	27824	0,04	4344	659844	38539	204,5517	5682	17159	61380	4235	59845	-602144
2024			1713	20	1984	4518	28937	0,04	4518	656512	39878	203,5186	5653	17846	63377	4405	61792	-544756
2025			1781	21	2064	4698	30095	0,04	4698	653179	41263	202,4855	6169	18559	65991	4581	64341	-484996

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. Hasmeden, Gülay, Z. Gedik, Neşe, Y. Akdağ, “Evaluation of Photovoltaic Noise Barriers in terms of Noise Control - A Case Study from Istanbul,” no. May, pp. 20–21, 2021, doi: 10.38027/ICCAUA2021164N11.

Makaleler

1. F. Hasmeden, G. Zorer Gedik, and N. Yüğrük Akdağ, “An approach to the design of photovoltaic noise barriers and a case study from Istanbul, Turkey,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, no. 0123456789, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18625-0.