

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜNEL AÇMA SİSTEMLERİNDE ÇELİK LİFLİ
PÜSKÜRTME BETONUN UYGULANABİLİRLİĞİ

İnş. Müh. Halil İbrahim AYIŞ

FBE Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Z. Canan GİRGİN

Juri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Aykut ŞENOL (İTÜ)

: Yrd. Doç. Dr. Havvanur KILIÇ (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin Belirlenmesi	1
1.2 Amaç	2
1.3 Kapsam	2
1.4 Yöntem	2
2. TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA TEKNOLOJİLERİ	3
2.1 Dünyada Tüneller ve Tünel Açma Teknolojilerinin Gelişimine Tarihsel Bakış	3
2.1.1 Türkiye’de Tünel Tarihinin Gelişimi	13
2.2 Tünel Açma ve İksa (Destekleme) Teknolojileri	16
2.2.1 Delme Patlatma Yöntemi	16
2.2.1.1 Tam Kesit (Full-Face) Yöntemi	17
2.2.1.2 Kalot-Stross Yöntemi	18
2.2.1.3 Çok Galerli Yöntemi	18
2.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)	19
2.3.1 NATM’in Tarihsel Gelişimi	19
2.3.2 NATM ile Tünel Açma ve Kazı İksa (Destekleme) Sistemleri	22
2.3.2.1 NATM ile İstanbul Metrosu’nda Uygulanan Tünel Kesitleri ve Kazı İksa (Destekleme) Sistemleri	23
2.3.2.2 İstanbul Metrosunda NATM ile açılan tünellerde alınacak önlemler	28
2.4 Tünel Delme Makinesi (TBM) Yöntemi	30
2.4.1 TBM’in Tarihsel Gelişimi	30
2.4.2 TBM ile Tünel Açma ve Kazı Destekleme	33
2.5 Zemin Basıncı Dengeleme Makinesi (EPBM) Yöntemi	36
2.5.1 EPBM’in Tarihsel Gelişimi	36
2.5.2 EPBM ile Tünel Açma ve Kazı Destekleme	39
2.6 Aç-Kapa Yöntemi	41
3. PÜSKÜRTME BETON TEKNOLOJİSİ	42
3.1 Püskürtme Betonun Tarihsel Gelişimi	42
3.2 Püskürtme Betonun Tünel Kazı İksa (Destekleme) Sistemindeki İşlevsel	

Özellikleri	44
3.3 Püskürtme Betonun Uygulama Yöntemleri.....	46
3.3.1 Kuru Karışım Sistemi	46
3.3.2 Yaş Karışım Sistemi	47
3.3.3 Kuru ve Yaş Püskürtme Yöntemlerinin Karşılaştırılması	48
3.3.4 Püskürtme Beton Ekipmanları.....	48
3.4 Püskürtme Betonda Priz Hızlandırıcı Kullanımı	50
3.4.1 Genel.....	50
3.4.1.1 Alkali İçeren Priz Hızlandırıcı Türleri.....	51
3.4.1.2 Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcı Türleri.....	55
3.4.2 Priz Hızlandırıcıların Genel Değerlendirilmesi	57
3.5 Püskürtme Betonda Puzzolanik Katkı Kullanımı	58
3.5.1 Silis Dumanı Kullanımı	58
3.5.2 Diğer Mineral Katkıların Kullanımı	59
3.6 Püskürtme Betonda Lif Kullanımı.....	59
3.6.1 Çelik Lifli Püskürtme Beton.....	60
3.6.2 Sentetik Lifli Püskürtme Beton	63
3.6.3 Çelik Lifli ve Lifsiz Betonda Karışım Tasarımı	64
3.6.4 Çelik Lifli Püskürtme Betonda Geri Sıçrama.....	64
3.6.5 Püskürtme Betonda Karot Alma İşlemleri.....	66
3.6.6 Çelik Lifli Betonun Tokluk İndeksi ile Değerlendirmesi	67
3.6.7 Lifli Betonun Performansı Üzerine Yapılan Çalışmalar	69
4. PÜSKÜRTME BETON TASARIMININ OPTİMİZASYONUNA YÖNELİK DENEYSEL PROGRAM.....	71
4.1 Genel.....	71
4.2 Deney Programı ve Deneyde Kullanılan Malzemeler	71
4.3 Deneysel Çalışmada Geliştirilen Püskürtme Beton Tasarımı.....	74
4.4 Üretilen Beton Karışımları ve Deneylerin Yapılışı	76
4.4.1 Yapılan Deneylere Ait Bulgular ve Yorumlar.....	79
4.5 Deney Sonuçları	81
4.6 Çelik Lifli Betonun Karşılaştırmalı Maliyet Analizi	88
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR.....	93
EKLER	97
Ek 1 NATM’de kazı iksa (destekleme) sistemi hakkında detaylı bilgiler.....	98
Ek 2 A5 tipi kazı iksa sistemine ait ayrıntılı bilgiler (Şemsiye borusu, Zemin çivisi ve Süren Uygulamaları)	105
Ek 3 İstanbul Metro Projesi NATM yöntemiyle açılan tünel güzergahındaki inşaat çalışmalarının genel hatlarıyla tanıtılması	110
Ek 4 EPB makineleri ile ilgili detaylı bilgiler	120
Ek 5 Uygun yöntemin belirlenmesinde saha araştırmasının önemi	122
TERİM AÇIKLAMALARI.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	127

KISALTMA LİSTESİ

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
ACS	Avusturya Beton Birliği (Austrian Concrete Society)
AREA	Amerikan Demiryolu Mühendisliği Birliği (American Railway Engineering Association)
ASTM	Amerikan Malzeme Test Birliği (American Society for Testing of Materials)
EPBM	Zemin Basıncı Dengeleme Yöntemi (Earth Pressure Balance Method)
EFNARC	Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)
NATM	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
TBM	Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Machine)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Ahşap malzeme ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975)	3
Şekil 2.2 Demir destek elemanları ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975).....	3
Şekil 2.3 Mal-Passe tünelinden görünüm (http://picasaweb.google.com)	4
Şekil 2.4 Tronguay-en Bony tünelinden görünüm (www.france-pittoresque.com; http://en.structurae.de)	5
Şekil 2.5 Bourgogne kanalındaki Poulli tünelinden görünüm (www.larousse.fr; http://members.home.nl)	5
Şekil 2.6 Pennsylvania, Schuylkill kanalındaki tünel görünümü (www.dep.state.pa.us)	5
Şekil 2.7 Thames nehri altından geçen tünel görünümü (www.uh.edu ; www.pbs.org).....	6
Şekil 2.8 Terre Noire hattındaki tünel görünümü (http://en.structurae.de)	6
Şekil 2.9 Mont Cenis tüneli görünümü (http://en.structurae.de)	7
Şekil 2.10 Londra Metrosu'nda aç-kapa yöntemi uygulaması (www.ltmcollection.org)	7
Şekil 2.11 New York Metrosundan görünüm (www.cable-car-guy.com)	8
Şekil 2.12 Saint-Gothard çift hat demiryolu tünelinden görünüm (www.affordable-cruises- tours.com ; www.superseal.ca)	8
Şekil 2.13 Simplon-I tünelinden görünüm (www.delcampe.net ; www.britannica.com)	8
Şekil 2.14 New Cascade tüneli (www.cccrow.com ; www.flickr.com)	9
Şekil 2.15 Apennine tüneli (http://mikes.railhistory.railfan.net)	9
Şekil 2.16 Utah tünelinden görünüm (www.pbase.com)	10
Şekil 2.17 Manş tünelinden görünüm (http://tempsreel.nouvelobs.com)	10
Şekil 2.18 Seikan tüneli (www.tat-ti.ch)	11
Şekil 2.19 San Gottardo tüneli (www.tat-ti.ch)	11
Şekil 2.20 Türkiye demiryollarına ait tünellerden görünüm (www.turkiyetanitim.net)	14
Şekil 2.21 Galata-Pera arasındaki tünel (http://galeri.netfotograf.com ; http://e-imo.imo.org.tr)14	
Şekil 2.22 75. Yıl Selatin tünelinden görünüm (www.ubak.gov.tr ; http://wowturkey.com)15	
Şekil 2.23 Nefise Akçelik (Hapan) tünelinden görünüm (http://wowturkey.com)	15
Şekil 2.24 Bolu dağı tünelinden görünüm (http://wowturkey.com)	15
Şekil 2.25 Tünel açma tekniklerinden genel bir görünüm (www.putzmeister.com.tr)	16
Şekil 2.26 Deliklere patlayıcı yerleştirilmesi ve tam kesit (full-face) patlatma şeması (H.İ. Ayış arşivinden)	17
Şekil 2.27 Kalot-Stross tünel açma yöntemi (Erguvanlı, 1982)	18

Şekil 2.28 Çok galeri yöntemi (Erguvanlı, 1982).....	18
Şekil 2.29 NATM ile inşa edilen tünelden görünüm (www.marmaray.com.tr).....	19
Şekil 2.30 Frankfurt Metrosu, NATM ile yapım aşamalarından görünüm (http://aic-anthes.com).....	20
Şekil 2.31 Russia Wharf Binası altından geçen Russia Wharf tüneli (www.dr-sauer.com)	20
Şekil 2.32 Fort Canning karayolu tüneline görünüm (www.laabmayr.com).....	21
Şekil 2.33 Tynols Corner tüneli şemsiye borusu uygulamasından görünüm (www.dr-sauer.com).....	22
Şekil 2.34 NATM’ da kullanılan bazı ekipmanlar (www.civil.nagasaki-u.ac.jp).....	22
Şekil 2.35 İstanbul Metrosunda uygulanan farklı tünel tip kesitleri ve ortalama alanlar (H.İ.Ayış arşivinden)	24
Şekil 2.36 A1, A2, A3 ve A5 tipi kazı iksa sistemlerinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.37 TBM görünümü (www.dogusinsaat.com.tr)	30
Şekil 2.38 Hoosac tüneline görünüm (http://etc.usf.edu ; www-tc.pbs.org).....	31
Şekil 2.39 İlk zamanlarında TBM makinesinin elemanları (Çınar ve Feridunoğlu, 1994).....	31
Şekil 2.40 Niagara projesinde kullanılan TBM’den görünüm (www.infobatt.com).....	32
Şekil 2.41 Niagara tünel projesinde kullanılan TBM enkesiti (Arıoğlu, 2009)	33
Şekil 2.42 TBM boy kesit görünümü (Ünlütepe, 2005).....	33
Şekil 2.43 TBM’ in kısımları (Zhao, 2008., Arıoğlu, 2009)	34
Şekil 2.44 Farklı formasyonlara sahip zeminlerde kullanılan, ripper dişler ve disk kesikli TBM tasarımı (www.jointech.net.cn).....	35
Şekil 2.45 Sert kayalarda kullanılan disk kesikli TBM tasarımları (www.americancommercial.com).....	35
Şekil 2.46 Yeraltında EPBM’den görünüm (www.tunnelseis.com)	36
Şekil 2.47 İlk üretilen EPBM’den bir görünüm (http://indiagovernance.gov.in).....	36
Şekil 2.48 EPBM kısımları (Arıoğlu vd., 2002).....	39
Şekil 2.49 EPB makinelerine ait destek sistemleri (www.p3planningengineer.com).....	40
Şekil 2.50 Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel	41
Şekil 3.1 a) Tünel kazı destekleme b) Şev stabilitesi c) Kazı-iksa sistemi d) Bina güçlendirme uygulamalarında püskürtme beton (www.admixtures.org)	42
Şekil 3.2 Akeley’in 1907’de geliştirdiği püskürtme beton aleti (www.shotcrete.org).....	43
Şekil 3.3 Tabanca sistemi kullanılarak püskürtme betonun yüzeye uygulanması (www.allentownshotcrete.com)	43
Şekil 3.4 Kuru karışım püskürtme beton makinesi kısımları (www.beksa.com.tr).....	46

Şekil 3.5 Yaş karışım püskürtme beton makinesi (www.mekanikmakina.com.tr)	48
Şekil 3.6 Püskürtme beton robot makinesi (www.aykimtas.com)	49
Şekil 3.7 Püskürtme betonun robot makinesiyle uygulanması (www.putzmeister.com.tr)	50
Şekil 3.8 Farklı dozajlarda kullanılan karbonat ve alüminat tipi hızlandırıcılar ile 6 saatten 28 güne kadar basınç dayanımındaki değişim	53
Şekil 3.9 Çimento uyuşum deneyleri.....	54
Şekil 3.10 Basınç dayanımı-kür süresi ilişkisi.....	55
Şekil 3.11 Farklı dozajlardaki alkali içermeyen hızlandırıcı katkıları ile alüminat bazlı hızlandırıcı katkılı betonların kıyaslanması	57
Şekil 3.12 Kullanılan çelik lif tipleri (www.beksa.com.tr)	61
Şekil 3.13 Tipik çelik lif tipleri ve boyutları (Banthia vd., 1994)	61
Şekil 3.14 Çelik hasırlı ile çelik lifli püskürtme betonun karşılaştırması (www.beksa.com.tr).....	63
Şekil 3.15 Püskürtme betonda liflerin çatlak gelişimini önlemesi ve ilave taşıyıcılık işlevi (Arıoğlu vd., 2008)	63
Şekil 3.16 Panellere betonun püskürtülmesi ve numune alma aşamaları (Arıoğlu vd., 2008).	66
Şekil 3.17 ASTM C 1018'e göre deney düzeneği	67
Şekil 3.18 Tokluk hesaplamalarında kullanılan yük-yerdeğiştirme eğrisi (Çivici, 2004).....	67
Şekil 4.1 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman kesimi metro projesine ait güzergah planı (H.İ.Ayış arşivinden).....	71
Şekil 4.2 Kullanılan çelik lif tipine ait görünüm (www.beksa.com.tr)	73
Şekil 4.3 Karışım tasarımlarında kullanılan agregalara ait granülometri eğrisi	74
Şekil 4.4 Uygulama yerindeki paneller ve çökme ölçümünden bir görünüm.	77
Şekil 4.5 Paneller ile nozul arasındaki mesafenin ayarlanması ve püskürtme betonla doldurulmuş paneller.	77
Şekil 4.6 Panellerden alınan silindirik karot numunelere ait görünüm	79
Şekil 4.7 f_3/f_{28} oranı ile f_3 basınç dayanım sonuçları arasındaki ilişki.....	82
Şekil 4.8 f_7/f_{28} oranı ile f_7 basınç dayanım sonuçları arasındaki ilişki.....	83
Şekil 4.9 Basınç dayanımı (f_{28}) ile yoğunluk (γ_{28}) değerleri arasındaki ilişki.....	83
Şekil 4.10 Farklı karışım tasarımlarına ait basınç dayanım sonuçları arasındaki ilişki	85
Şekil 4.11 Aynı karışım ve farklı hava basıncı ile uygulanan püskürtme betonda basınç dayanımları arasındaki ilişki	85
Şekil 4.12 Aynı karışım ve farklı hava basıncı ile uygulanan püskürtme betonda basınç dayanımları arasındaki ilişki	86
Şekil 4.13 Çelik lif katılarak hazırlanan püskürtme betonda farklı hava basınçları için	

sonuçların kıyaslanması	86
Şekil 4.14 Çelik liflerin ve hava sürükleyici katkının eklenmesiyle hazırlanan betonlarda farklı hava basınçları için dayanımların karşılaştırılması	87
Şekil 4.15 Aynı püskürtme basıncı ve farklı karışım tasarımları ile denenen püskürtme betonların geri sıçrama miktarı arasındaki ilişki.....	87
Şekil 4.16 Aynı karışım tasarımı ve farklı püskürtme basıncı (5.5, 5, 4.5 bar) altında denenen püskürtme betonların geri sıçrama miktarı arasındaki ilişki.....	88
Şekil 4.17 A tipi tünel üst yarı kısmının hasır çelik veya çelik lifle desteklenmesi sonucunda m' lik ilerleme maliyetlerinin kıyaslanması	89

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Dünya çapında inşa edilen en önemli ilk 10 Demiryolu, Metro ve Karayolu tüneli, (http://en.wikipedia.org)	12
Çizelge 2.2 Delme Patlatma yönteminin özellikleri (Palmstorn, Berthelsen, 1988).....	17
Çizelge 2.3 İstanbul Metrosunda uygulanan kazı iksa sistemleri.....	25
Çizelge 2.4 İstanbul Metrosunda NATM kazı iksa sistemleri.....	26
Çizelge 2.5 NATM kazı destekleme sisteminin uygulama aşamalarına ait görünüm (H.İ.Ayış arşivinden)	29
Çizelge 2.6 Zemin formasyonuna göre TBM sınıflandırması (www.directindustry.com ; www.robbinstbm.com);	37
Çizelge 2.7 TBM’de ön üretimli beton eleman uygulama aşamaları (H.İ.Ayış arşivinden)....	38
Çizelge 3.1 Püskürtme beton kaplamanın işlevleri (Mahar vd., 1975; Cecil, 1970).....	45
Çizelge 3.2 Kuru ve yaş püskürtme sistemlerinin karşılaştırılması (Girgin vd., 1998)	49
Çizelge 3.3 Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri (Arıoğlu vd., 2008).....	51
Çizelge 3.4 Alkali içeren priz hızlandırıcı katkıların özellikleri	52
Çizelge 3.5 Kullanılan hızlandırıcı katkıları.....	53
Çizelge 3.6 Çimento - Katkı uyumu için priz deneyleri	54
Çizelge 3.7 Katkı türü ve özelliklerine göre priz hızlandırıcı katkıların genel değerlendirilmesi	57
Çizelge 3.8 Çimento ile ikame edilen puzzolanik katkı miktarları	59
Çizelge 3.9 Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler (DSİ, 1994)	60
Çizelge 3.10 Püskürtme beton üzerine yapılmış bazı deneysel çalışmalarda kullanılan karışım tasarımları	65
Çizelge 3.11 ACI 506.2-95 standardına göre karot kalite sınıflandırması	66
Çizelge 3.12 I ₅ , I ₁₀ , I ₂₀ İndeksleri için ölçütler (Uğurlu,1994)	68
Çizelge 3.13 Çelik lifli betonun mekanik büyüklükleri üzerinde yapılan deneylere ait sonuçlar [(Yurdakul, 2001; Jeng vd., 2001; ITA Report, 2006; Leung vd., 2004; Taşdemir vd., 2007; Hoek vd., 2006; Pfeuffer and Kusterle, 2001) kaynaklarından yararlanarak oluşturulmuştur].	69
Çizelge 4.1 Agregalara ait fiziksel özellikler	72
Çizelge 4.2 Kullanılan çimentonun özellikleri.....	72
Çizelge 4.3 Meyco SA160 tipi sıvı priz hızlandırıcıya ait teknik özellikler	73
Çizelge 4.4 Micro air 200 tipi hava sürükleyici katkıya ait teknik özellikler	73

Çizelge 4.5 Dramix ZP305 çelik lif tipine ait fiziksel ve mekanik özellikler	73
Çizelge 4.6 ACI kriterlerine göre agrega gradasyonu	74
Çizelge 4.7 Agregaların elek analizi sonuçları ve karışımın gradasyonu.....	75
Çizelge 4.8 Deneylerde kullanılan püskürtme beton karışım bileşenleri	76
Çizelge 4.9 Sika PM 407 P tipi yaş sistem robot makinesine ait teknik özellikler	77
Çizelge 4.10 Yaş karışım püskürtme beton deneylerinde kullanılan karışımlar ve uygulama koşulları.....	78
Çizelge 4.11 09.10.2009-09.12.2009 tarihleri arasında yapılan püskürtme beton deneylerinin sonuçları.....	81
Çizelge 4.12 Püskürtme beton deneylerinin ortalama dayanım sonuçları	82
Çizelge 4.13 Belirlenememiş karotlara ait kestirimler de dahil edilmiş dayanım değerleri....	84
Çizelge 4.14 1m ³ çelik lifli ve lifsiz püskürtme betona ait maliyetler	89
Çizelge 4.15 İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi Anahat (A tipi) tünelde üst yarı kısmının hasır ve çelik lifle desteklenmesi sonucunda 1 m'lik ilerleme maliyetlerinin kıyaslanması (2010 yılı güncel fiyatlarla).....	90

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı gerçekleştirmem sırasında her konuda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen özellikle danışmanlığı ve anlayışı için danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Z. Canan Girgin'e, deney çalışmalarında her türlü ekipman ve malzeme desteği sağlayan Soner Temel Müh. İnş. ve Tic. A.Ş çalışanları ile deney çalışmalarına verdiği destek için Şantiye Şefi Maden Müh. İrfan Atik, Jeo. Müh. Zafer Gölcük, Kalite Kontrol Şefi Ali Fuat Yamanlı ve sahada yardımlarını esirgemeyen tüm ekibe, püskürtme beton üretimini titizlikle gerçekleştiren Yolaşan Beton tesis sorumlusu Sn. Sedat Erkek'e, deneylerde kullandığım çelik lif temini konusundaki desteğinden dolayı Beksa A.Ş'den Sn. Mehmet Yerlikaya'ya, hoşgörüsünden dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Müdürü Sn. Yalçın Eyigün'e, 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman kesimi metro projesi kontrol amiri Sn. Fahrettin Öner'e, yakın desteğinden dolayı Maden Müh. Yasin Yeşildağ ve YTÜ Elektrik Müh. Bölümü'nden Arş.Gör.Yasemin Öner'e, tercüme konusundaki yardımlarından dolayı Harita Müh. Fırat Ekinci ve İnş.Müh.Osman Şahin'e, tezin yazılması ve hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma, özellikle bu süreçte manevi desteği ile her zaman yanımda olduklarını hissettiren aileme ve her anımda yanımda olduğu için Mimar Zuhal Dere'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Saygılarımla

Mart, 2010

Halil İbrahim AYIŞ

ÖZET

Tünel açma yöntemleri teknolojik gelişmelere uygun olarak sürekli gelişmektedir. Buna paralel olarak kullanılan teknik donanım da sürekli gelişim içindedir.

Tünel açma yöntemlerinden özellikle Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM), 1960'lı yıllardan itibaren önemli tünel teknolojilerinden biri haline gelmiştir. Çalışmada NATM'ın son yıllardaki gelişimi, İstanbul Metrosu'ndaki uygulama şeklini de içerecek şekilde detaylı olarak ele alınmıştır.

Kazı destekleme sisteminin en önemli ögesi olan püskürtme beton ve lifli püskürtme beton teknolojisi, teorik ve deneysel özellikleri ile yer almaktadır. Bu çerçevede püskürtme betonun kullanım alanları, işlevsel özellikleri, uygulama yöntemleri, malzeme bileşenleri ve ekipmanları tanıtılmıştır. Püskürtme betonda kullanılan katkıların mekanik büyüklüklere etkileri ile çelik lifli püskürtme betonda lif tipi ve miktarının performansa etkisi araştırılmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen bir seri püskürtme beton deneyinde püskürtme betonun karışım tasarımı ile püskürtme hava basıncının; betonun yerleşimi, basınç dayanımı ve geri sıçrama miktarına etkisi araştırılarak bir optimizasyon çalışmasının yapılması amaçlanmıştır. Nihai olarak, deneysel sonuçlardan yararlanarak çelik lif kullanımının maliyetlere olan etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmanın Birinci Bölümünde problem, çalışmanın amacı, kapsamı ve izlenecek yöntem tanımlanmıştır.

İkinci Bölümde pratikte en çok karşılaşılan tünel açma ve destekleme yöntemlerinin (Delme-Patlatma, NATM, TBM ve EPBM) tarihçesi, genel ilkeleri ve kazı destekleme sistemlerinin seçimiyle ilgili karar verme amaçlı teknik bilgiler verilmiştir.

Üçüncü Bölümde, püskürtme beton bileşenleri ve teknolojisi literatür eşliğinde incelenmiştir.

İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Haciosman Metro Projesi kapsamında açılan tünellerde gerçekleştirilen püskürtme beton deneyleri ve elde edilen sonuçlar Dördüncü Bölümün konusunu oluşturmaktadır.

Beşinci Bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tünel Teknolojisi, NATM, TBM, EPBM, Püskürtme Beton, Çelik Lifli Püskürtme Beton

ABSTRACT

Tunnel excavation and earth retaining methods have been improving constantly in accordance with technological developments. In parallel with this, technical equipments are in continuous development as well.

In this study, the history and general rules of the commonly applied tunnel excavation and earth retaining methods (Boring-Blasting, NATM, TBM, and EPBM) and technical information on how to decide choosing earth retaining systems are given.

Especially, New Austrian Tunnelling Method (NATM) has become one of the important tunnel technologies since 1960's. In this study, NATM has been elaborately investigated by including recent developments and applications in İstanbul Metro Line System.

This study also includes shotcrete and fiber reinforced shotcrete (sprayed concrete) technologies, which are the most important part of the earth retaining system, with their theoretical and experimental characteristics. The shotcrete and mixture design are investigated according to theoretical researches and in situ tests.

Within a testing program, the relations among the mixture design of shotcrete, air pressure during spraying, rebound, compressive strengths were investigated in in-situ applications. In the second stage the effect of steel fibers on rebound and compressive strengths were determined. Then theoretical cost estimations were performed based on experimental results.

The scope, importance, method and assumptions of this study are introduced in the First Section.

The Second Section establishes the history, technical characteristics, equipments of commonly applied tunnel boring and earth retaining methods.

Sprayed concrete technologies, mixture design principles and equipments are presented in the Third Section.

The experimental studies and results were emphasized in the Fourth Section.

The Fifth Section covers the results of experimental studies executed in this study.

Keywords : Tunneling technologies, NATM, TBM, EPBM, Sprayed Concrete, Shotcrete, Steel Fiber Shotcrete

1. GİRİŞ

1.1 Problemin Belirlenmesi

Metrolar, sürekli artan trafik yoğunluğunun bir çözümü olarak günümüz toplu taşımacılık alanında tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır. Metro ağlarının uygulanmasında dikkat edilecek başlıca unsurlar, yapım süresince emniyetten ödün vermeden, en düşük maliyetle ve en kısa sürede tamamlayarak hizmete açabilmektir. Bu amaca en uygun tünel açma tekniklerinin belirlenmesi gereklidir.

Tünel açma teknikleri geçmişten günümüze ciddi oranda değişim göstermiştir. Genellikle, tünel açılacak güzergahın topoğrafyası, zemin koşulları ve açılacak tünelin geometrisi gibi parametreler değerlendirilerek tünel açım teknikleri belirlenmektedir. Tünel açma makinelerinin hızlı gelişimi de, zemin şartlarından nerede ise bağımsız şekilde, tünel açılabilmesini beraberinde getirmiştir.

1920’li yıllardan itibaren Maden ve İnşaat Mühendisliği alanlarında kullanılmaya başlanan püskürtme betonun, özellikle 1960’lı yıllardan itibaren Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi’nin (NATM) geliştirilmesi ile kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Günümüzde püskürtme betonun bütün dünyada 10 milyon m³/yıl düzeyinde tüketimi mevcuttur. Tünel kazı destek sisteminin vazgeçilmez elemanı olan püskürtme beton, yıllarca hasır çelik ile birlikte kullanıldıktan sonra günümüzde gittikçe artan şekilde çelik lifler ile birlikte uygulanmaya başlanmıştır. Tek başına beton gibi gevrek özellik gösteren püskürtme betonun, özellikle hızlı inşa edilen ve yüksek enerji yutma kapasitesine sahip kaplamanın zorunluluk olduğu (örneğin, kaya patlaması olgusu) tünellerde, çelik liflerle birlikte kullanılması tünel teknolojilerinde önemli bir devrim niteliğindedir. Püskürtme betona doğru oranda ve tipte katılan çelik liflerin matris içinde süresiz bir şekilde dağılması ile; çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi, çekme, yorulma, çarpma ve aşınma dayanımında önemli artışlar sağlanabilmektedir.

Türkiye’de tünel kaplama tasarımında halen kullanılan klasik çelik hasır yerine çelik liflerin kullanılmaya başlaması için karışım tasarımı, püskürtme hava basıncı, yerleşim, geri sıçrama, dayanım ve maliyet ilişkisi, üzerinde dikkatle durulması gereken en önemli olgudur.

1.2 Amaç

Tünel açma-kazı destek sistemleri ve bu sistemlerin vazgeçilmez bir ögesi olan püskürtme beton teknolojisinin incelenmesi; buradan hareketle Türkiye’de halen inşa halinde olan bir tünelde uygulanan püskürtme betonda, son yıllarda dünyada giderek daha fazla uygulama alanı bulan çelik liflerin, karışım tasarımı optimize edildikten sonra denenmesi hedeflenmiştir. Böylece Türkiye’deki tünel inşaatlarında çelik liflerin ekonomik kullanılabilirliği hakkında önemli veriler elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Kapsam

Bu çalışmada, tünel açma-kazı destek sistemleri incelenmiş, bunların içinde yaygın uygulanan Yeni Avusturya Tünel Yöntemi (NATM)’nin en önemli ögesi olan püskürtme betonun bileşenleri incelenmiştir. Bu araştırmalardan hareketle İstanbul Metrosu kapsamında halen inşa halindeki bir tünelde, püskürtme beton karışımında en uygun bileşenler ve oranları, püskürtme hava basıncı ve mesafesi, geri sıçrama ve bunların basınç dayanımına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu araştırmadan sonra deneysel çalışmanın ikinci aşaması çelik lifler kullanılarak gerçekleştirilmiş, sonuçta deneysel çalışmanın sonuçlarına dayalı olarak maliyet analizleri yapılmıştır.

1.4 Yöntem

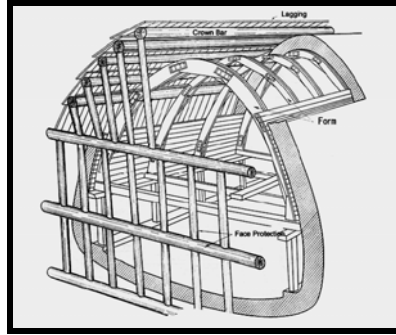
Tünel açma-kazı destek sistemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve dünyadaki gelişimleri ile birlikte ele alınmıştır. Bu tekniklerden NATM yönteminde kullanılan püskürtme beton teknolojisinin özellikleri, yapılan deneysel çalışmalarla desteklenerek incelenmiştir.

2. TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA TEKNOLOJİLERİ

2.1 Dünyada Tüneller ve Tünel Açma Teknolojilerinin Gelişimine Tarihsel Bakış

Antik çağda, insanoğlu tünel ve mağaraları; barınma, tehlikeli düşmanlarından korunma ve avladıkları besinlerini saklamak için kazmıştır. Taş devri insanları da şaft ve sürme tünelleri açmak için çakmaktaşıdan kürekli aletler yapmışlardır. Tünel açmak için; kemik, boynuz, çakmaktaşı, tahta; medeniyetin gelişmesi ile birlikte de ahşap, bronz ve demir'den faydalanılmıştır.

M.Ö. 4000' lerde yeryüzünde ilk tünelin Babil yakınlarında, Fırat nehrinin altında 3.5x4.5 m çapında ve 1 km uzunluğunda açıldığı rivayet edilmektedir. Sonraki dönemlerde galeri açmanın bir savaş taktiği olarak da kullanıldığı görülmektedir. Surların aşılabilmesi için galerilerin kazma ve kürek ile açıldığı bilinmektedir. Mısırlılar ve Romalılar da ağırlıklı olarak su nakletmek amacıyla tüneller açmışlardır. Günümüzden ~**3000** yıl önce değerli metallerin araştırılması amacıyla, Babilliler ve Aztekler tarafından Hindistan, Mısır ve Mezopotamya'da inşa edilen tüneller en eski tüneller arasındadır. Destekleme sistemi olarak insan gücü ile ahşap (Şekil 2.1), demir destek elemanları ve bağlantılar kullanılmaktaydı (Şekil 2.2) (Fukushima, 1975).



Şekil 2.1 Ahşap malzeme ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975)



Şekil 2.2 Demir destek elemanları ile tünel desteklenmesi (Fukushima, 1975)

Tünel teknolojileri tarihi Fukushima (1975); Bozkurt (1987); Çınar ve Feridunoğlu (1994); Arıoğlu vd. (2008) kaynaklarından yararlanılarak aşağıda verilmiştir.

M.Ö. 3500'de *ilk metal madeni çıkartma kazısı*, Karadeniz kıyısında bulunan *Cavcasia*'da yapılmıştır.

M.Ö. 687'de Helen uygarlığı döneminde ilk tünelin, Sakız adasında 1600 m uzunlukta ve 0.6 m² kesitinde açıldığı bilinmektedir.

M.Ö 6.yy'da tünelin sert kayada 9 m/yıl hızla ve elle açıldığı tahmin edilmektedir.

17.yy'da gelişmeye başlayan *kanal nakliyesi*, tünelcilikte önemli gelişmelere neden olmuştur.

1679-1681 yılları arasında Fransa'da Langedog kanalını geçirmek amacıyla Mal-Passe tüneli inşa edilmiştir. Bu tünel 160 m uzunluk, 7 m genişlik ve 8 m yükseklikte olup tüflü zeminde inşa edilmiştir (Şekil 2.3).

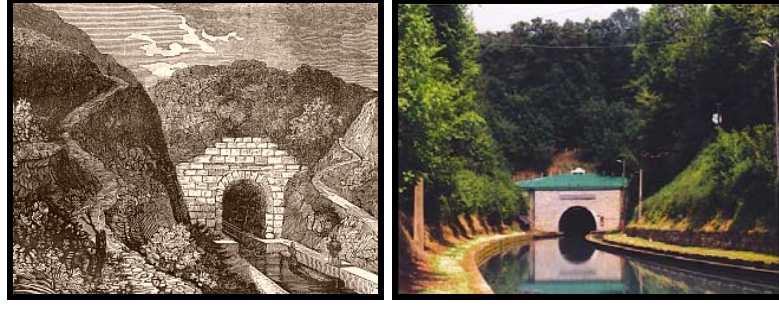


Şekil 2.3 Mal-Passe tüneline görünüm (http://picasaweb.google.com)

1761'de İngiltere'de James Brodley, inşa ettiği kanalı Rossley dağı'nın altından geçirebilmek için 1 mil uzunluğunda tünel açmıştır.

1799 yılında kanal tünellerin toplam uzunluğu 40 mil'i bulmuştur.

1803-1810 yılları arasında Fransa'da Saint-Quentin kanalı için *ilk taş kemerli* Tranguay-en Bony tüneli (Şekil 2.4) ve **1824** yılında Bourgogne kanalı için Poulli tüneli (Şekil 2.5) inşa edilmiştir.

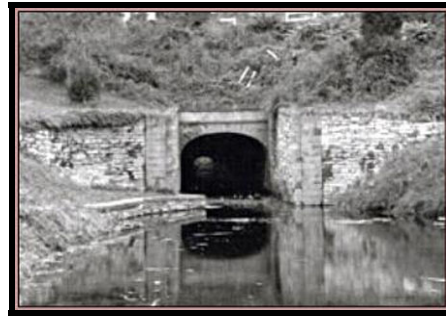


Şekil 2.4 Tranguay-en Bony tüneline görünüm (www.france-pittoresque.com;
http://en.structurae.de)



Şekil 2.5 Bourgogne kanalındaki Poulli tüneline görünüm (www.larousse.fr;
http://members.home.nl)

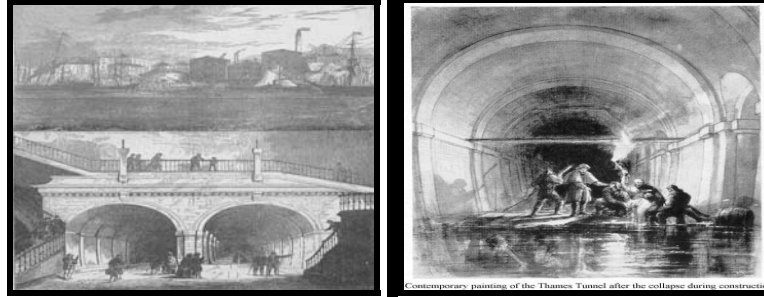
Avrupa kıtasındaki tüneline inşasına dair gelişmeler çok geçmeden Amerika kıtasına da geçmiş, **1818** yılında Pennsylvania, Schuylkill kanalı üzerinde tüneline inşaatına başlanmıştır. İki yılda tamamlanan tüneline 5.49 m genişliğinde, 6.1 m yüksekliğinde ve 250 m uzunluğundadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Pennsylvania, Schuylkill kanalındaki tüneline görünümü (www.dep.state.pa.us)

1800'lerin başlarına dek sert kayadaki tüneller, arında (ayna, kaya yüzeyi) ateş yakılarak kaya ısıtıldıktan sonra, oluşan sıcak yüzeye su ve sirke püskürtülmesi ile kazılmaktaydı.

1811 yılında Fransız mühendis *Brunel*, Bukliye (kalkan) yöntemini geliştirmiş ve patentini almıştır. Brunel, yöntemini ilk kez Thames nehri (Londra) altında açılan tünelde (**1823-1843**) uygulamıştır (Şekil 2.7). Bu tünel, boyutları 4.2 ve 4.8 m çaplarında bir ikiz tünel olup halen kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 Thames nehri altından geçen tünel görünümü (www.uh.edu ; www.pbs.org)

1826'da *ilk demiryolu tüneli* Fransa'da St.Etienne ve Lyon şehirleri arasında Terre Noire hattında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8).



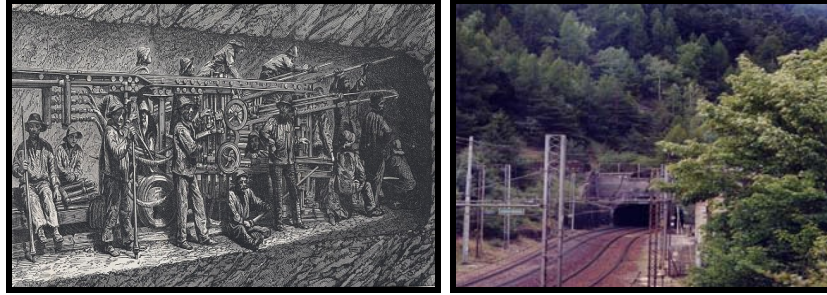
Şekil 2.8 Terre Noire hattındaki tünel görünümü (<http://en.structurae.de>)

Fransa'yı İtalya'ya bağlayan (Fransızlar Mont Cenis, İtalyanlar Cenisio tüneli adını vermişlerdir) diğer önemli bir demiryolu tüneli 13 yılda bitirilmiştir. Uzunluğu 12.2 km ve kotu 1600 m olup, ilk etapta elle açılmaya başlanmış, daha sonra basınçlı hava yardımıyla çalışan aletler kullanılmıştır.

1830 yılında Lord Cohrane; sulu zeminlerde basınçlı havanın kullanıldığı bir kuyu ve galeri açma yöntemi geliştirmiş ve patent almıştır. Bu yöntemle tünel açma ilk kez **1939**'da Hersent tarafından Fransa'nın Loire şehrinde, **1879** yılında da Anverste şehrinde uygulanmıştır.

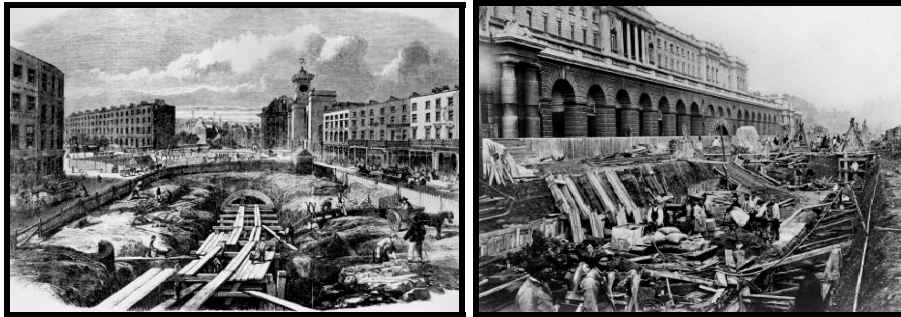
1846'da İtalya'da Maus tarafından tam cephe kazı yapmak üzere *ilk kazı makinesi* (TBM) geliştirilmiştir (Bkz. Bölüm 2.4).

1857-1872 yılları arası Fransa'nın Modane ve Bardonecchia arasında inşa edilen Mont C nis demiryolu tüneli, 13.7 km uzunluğunda ve yüzeyden maksimum 1600 m derinliğindedir ( ekil 2.9).



Şekil 2.9 Mont C nis tüneli görünümü (<http://en.structurae.de>)

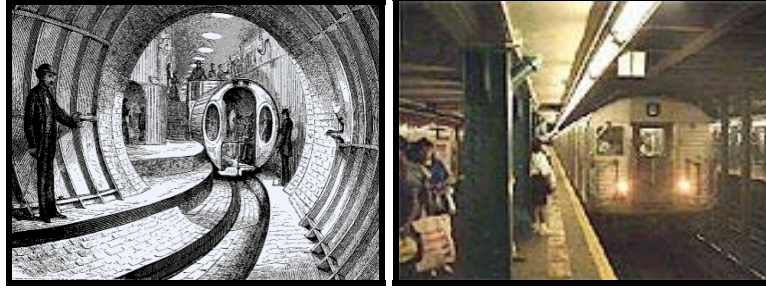
1863 yılında dünyanın *ilk metrosu* Londra'da hizmete açılmıştır. İşletmeye alınan 6 km uzunluğundaki hattın yapımında ‘‘Aç-Kapa Yöntemi’’¹ uygulanmıştır (Bkz. Bölüm 2.6), ( ekil 2.10). Bu yöntem bazı farklılıklarla günümüzde de kullanılmaktadır. Sonraki yıllarda yapılan ekler ve yeni hatlarla genişleyen Londra Metrosu, bugün 12 hat ve 455 kilometrelik bir ağ üzerinde çalışan 457 metro treni ile günde 3 milyon yolcu taşımaktadır.



Şekil 2.10 Londra Metrosu'nda aç-kapa yöntemi uygulaması (www.ltmcollection.org)

1868 yılında New York Metrosu Amerika kıtasının *ilk* yeraltı demiryolu ulaşım sistemi olarak hizmete açılmıştır. New York Metrosu, her yıl 1 milyardan fazla yolcuyu taşıyan ve 24 saat hizmet veren 23 hattıyla dünyanın en yoğun metrosudur. Bu metroda, 220.5 km'si yeraltında, 150.6 km'si yerüstünde olmak üzere toplam 371 km' lik hatta 456 istasyon bulunmaktadır ( ekil 2.11).

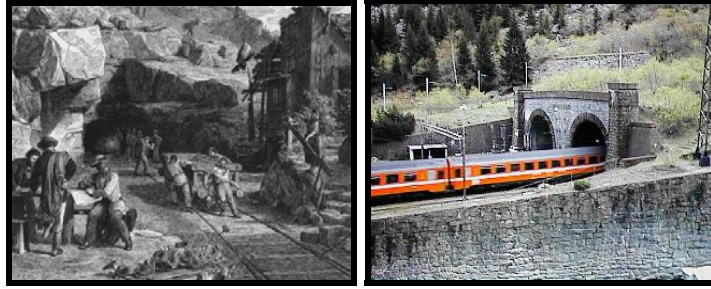
¹ Metro hattının geçeceği yol boyunca derin bir hendek kazılıp, hendeğin iki yanı duvarla  r l p üstü tuğla tonozla  rt l rek tünel yapılıyor, sonra tünelin üstü toprakla doldurulup kapatılarak yol eski durumuna getiriliyordu.



Şekil 2.11 New York Metrosundan görünüm (www.cable-car-guy.com)

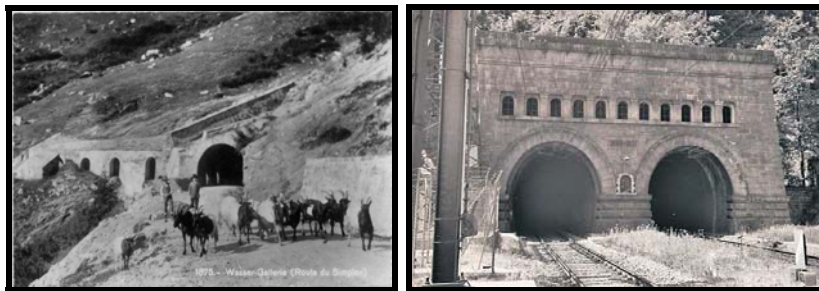
1872'de tünellerde ahşap destek yerine *çelik destek elemanları* kullanılmıştır.

Yine **1872** yılında yapımına başlanan ve 7.5 yılda İtalya ile İsviçre'yi birleştiren Saint-Gothard çift hat demiryolu tüneli 15 km uzunluktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Saint-Gothard çift hat demiryolu tüneline görünüm (www.affordable-cruises-tours.com ; www.superseal.ca)

1898'de İtalya'yı İsviçre'ye bağlayan *dünyanın en uzun tüneli* 19825 m uzunluğundaki Simplon-I tüneline inşaatına başlanmıştır (Şekil 2.13). Kaya litolojisini açıklamak için yapılan ilk teorik çalışmalardan biri, maksimum derinliği 2.1 km'lik kısımdaki Simplon tüneline yapımıyla yakından ilişkilidir (Kovari, 2003). Daha sonra bu tünelden biraz daha uzun olan Simplon-II ve Apeninler tünelleri inşa edilmiştir.



Şekil 2.13 Simplon-I tüneline görünüm (www.delcampe.net ; www.britannica.com)

1912’de Simplon tünel inşaatında danışman mühendis olarak  alışan Wiesman, kaya basıncı ile deformasyon arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur (Kovari, 2003).

Ayrıca;

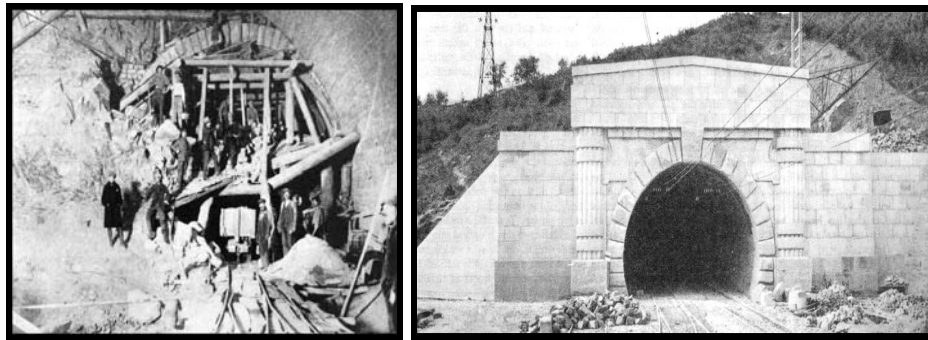
1892-1924 döneminde Chicago, Budapeşte, Boston, Berlin, Philadelphia, Hamburg, Buenos Aires, Madrid ve Barcelona Metroları hizmete girmiştir.

1925-1929 yılları arasında Washington Skykomish’de inşa edilen New Cascade tüneli, 12.5 km uzunluğunda ve A.B.D’nin o dönemdeki en uzun demiryolu t nelidir (şekil 2.14).



şekil 2.14 New Cascade tüneli (www.cccrow.com ; www.flickr.com)

1934’de *dünyanın en uzun ikinci tüneli* olarak bilinen Apennine Tüneli, 35 km uzunluğundaki eski demiryolu bağlantı hattını kısaltmak için inşa edilmiştir. 18.5 km uzunluğundaki Direttissima hattını Floransa ve Bologna ’ya bağlamaktadır (şekil 2.15).



şekil 2.15 Apennine tüneli (http://mikes.railhistory.railfan.net)

1936’da yapımı tamamlanan Utah tüneli (East Rim Road, California, ABD) en önemli karayolu tünellerinden biri olup 1720 m uzunluğundadır (şekil 2.16).



Şekil 2.16 Utah tüneline görünüm (www.pbbase.com)

1950'de Avusturyalı Stini ve Rabcewicz, sonraları *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)* olarak isimlendirilecek ve yaygın şekilde tüm dünyada kabul göreceği olan yeni tünel açma yöntemini tanıtmıştır (Bkz. Bölüm 2.3).

TBM'ler ise 150 yıllık bir gelişmeden sonra her türlü tünel şartında mekanik kazının yapılabildiği bir noktaya gelmiştir. Eskiden sadece Delme-Patlatma Yöntemi ile açılacak formasyonlar bile artık TBM ile açılabilir.

1960'lı yıllarda lifli betonlar üzerine ilk çalışmalar beton içerisine cam liflerin katılmasıyla başlamıştır.

1970'li yıllardan sonra ise püskürtme beton uygulamalarında çelik lifler, hasır donatının yerini almaya başlamıştır.

1987-1993 yılları arasında Avrupa'daki büyük projelerden birisi de, Manş denizinin demiryolu tüneli ile geçilmesi projesidir. Manş tüneli 37.7 km deniz altında olmak üzere toplam 50.5 km uzunluğunda, deniz yüzeyinden 100 m, deniz tabanından ise 40 m derinlikte inşa edilmiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Manş tüneline görünüm (http://tempsreel.nouvelobs.com)

1988 yılından bu yana hizmet vermekte olan, dünyanın *en uzun demiryolu tüneli*, 53.85 km uzunluğundaki Seikan tünelidir (Japonya). Bu tünel aynı zamanda *deniz tabanı altından geçen ilk demiryolu tüneli* ünvanına da sahiptir, tünelin 23.3 km'si deniz tabanı altındadır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Seikan tüneli (www.tat-ti.ch)

Ayrıca proje çalışması 1988'de İsviçre'de başlayan ve hala devam eden San Gottardo tünelinin 2015'te bittiğinde, 56 km'lik uzunluğuyla dünyanın *en uzun ve en derin tüneli* olması hedeflenmektedir (Şekil 2.19). Ortasına yerleştirilen asansör sistemi Alp dağlarındaki kayak pistlerine ulaşım hizmeti verebilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.19 San Gottardo tüneli (www.tat-ti.ch)

İlk tünelin inşasından günümüze kadar dünyanın çeşitli yerlerinde tüneller inşa edilmiştir. Günümüzde dünyada ilk 10'a girmiş demiryolu, metro ve karayolu tünellerine ait bilgiler Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Dünya çapında inşa edilen en önemli ilk 10 Demiryolu, Metro ve Karayolu tüneli, (<http://en.wikipedia.org>)

Tünel	Yer / Ülke	Uzunluk (km)	İşletmeye açıldığı yıl
Demiryolu Tünelleri			
Gotthard Base Tunnel	Alpler, İsviçre	57	2018
Seikan Tunnel	Japonya	53.9	1988
Channel Tunnel	Manş Kanalı, İngiltere/Fransa	50.5	1994
Lötschberg Base Tunnel	Bernese Alpleri, İsviçre	34.5	2007
Guadarrama Tunnel	İspanya	28.4	2007
Iwate-Ichinohe Tunnel	Ou Mountains, Japonya	25.8	2002
Daishimizu Tunnel	Mount Tanigawa, Japonya	22.2	1982
Wushaoling Tunnel	Wuwei, Çin	20.1	2006
Simplon	Lepontine Alpler, İtalya/İsviçre	19.8	1906/1922
Vereina	İsviçre	19.1	1999
Shin Kanmon	Kanmon Straits, Japonya	18.7	1975
Metrolar			
Seoul Subway Line 5	Seul Metro su	47.6	1990-1996
Serpukhovsko-Timiryazevskaya Line	Moskova Metro su	41.5	1983-2002
Metro Madrid L-12	Madrid Metro su, İspanya	40.9	1999-2003
Kaluzhsko-Rizhskaya Line	Moskova Metro su	37.6	1958-1990
Seoul Subway Line 6	Seul Metro su	35.1	2000
Metro Madrid L-7	Madrid Metro su / İspanya	32.9	1974-2007
U7	Berlin, U-Bahn	31.8	1924-1984
Moskovsko-Petrogradskaya Line	San Petersburg Metro su	30.1	1961-2006
Kirovsko-Vyborgskaya Line	San Petersburg Metro su	29.6	1955-1978
Northern Line	Londra Metro su	27.8 (17.2)	1890-1940

Çizelge 2.1' in devamı;

Karayolu tünelleri			
Tünel	Yer / Ülke	Uzunluk (km)	İşletmeye açıldığı yıl
Laerdal	Laerdal - Aurland, Norveç	24.51	2000
Zhongnanshan	Zhongnanshan, Çin	18.04	2007
St. Gotthard	Uri - Ticino, İsviçre	16.92	1980
Arlberg	Vorarlberg - Tyrol, Avusturya	13.97	1979
Hsuehshan	Tayvan	12.94	2006
Frejus	Fransa- İtalya	12.89	1980
Mt. Blanc	Alpler, Fransa- İtalya	11.61	1965
Gudvangen	Gudvangen - Flam, Norveç	11.43	1991
Folgefonn	Odda - Gjerde, Norveç	11.15	2001
Kanetsu	Gunma - Nigata, Japonya	11.05	1985,1991

2.1.1 Türkiye’de Tünel Tarihinin Gelişimi

Türkiye’de gelişen nüfus ile birlikte kolay ulaşımın olan ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyacı kullanılan zamanı aza indirerek daha konforlu hale getirebilmek için, gerek demiryolu gerekse de karayolu tünelleri inşası yaygın bir şekilde ilerlemektedir. Ayrıca yurdumuzda tüneller, yeraltında doğal kaynakların çıkarılması amaçlı olarak da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar inşa edilen önemli tüneller, özellikleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

1871’de Türkiye’de demiryolu ağının oluşturulmasıyla birlikte tünel açma işlemleri de artmıştır ve İstanbul-İzmit arasında tüneller hizmete açılmıştır² (Şekil 2.20).

² 1871 yılında saraydan çıkarılan bir karar ile plansız şekilde devlet tarafından inşaatına başlanan Haydarpaşa-İzmit hattının tamamlanamayacağını anlaşıldıktan sonra, Rumeli demiryollarında görev yapmış olan Alman mühendis Wilhelm von Pressel, 1872 yılında padişahın hedefleri doğrultusunda yeni bir proje hazırlamakla görevlendirilmiştir. 1873’de Padişah’a sunduğu proje 4670 km uzunluğunda olup, Haydarpaşa’dan başlayıp Ankara-Sivas-Musul ve Bağdat üzerinden Basra’ya uzanmaktaydı. İlave bağlantı hatları ile Akdeniz ve Karadeniz’e bağlanıyordu. Haydarpaşa demiryolu 1873 yılında İzmit’e ulaşmış, ancak teknik ve mali yetersizlikler nedeniyle o yıllarda hat daha ileriye götürülemedi.



Şekil 2.20 Türkiye demiryollarına ait tünellerden görünüm (www.turkiyetanitim.net)

1875 yılında Türkiye’de *ilk yeraltı metrosu (dünyanın en eski 2. metrosu)* Galata–Pera (Beyoğlu) arasında hizmete açılmıştır³ (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Galata-Pera arasındaki tünel (<http://galeri.netfotograf.com> ; <http://e-imo.imo.org.tr>)

1982 yılında, Mersin’in 20 km kuzeyinde inşa edilen ve o tarihlerde Türkiye’nin *en uzun tüneli* olan Kadıncık-I tüneli 7127 m uzunluğundadır.

20 Nisan 2000 tarihinde açılan İzmir-Aydın Otoyolu üzerinde, Belevi mevkinde bulunan 75.Yıl Selatin Tüneli, 3'er şeritli 3043 ve 3048 metre uzunluğunda iki tüpten oluşmaktadır (Şekil 2.22).

³1860'lı yıllarda Galata bölgesinde, ticari faaliyetlerin giderek artması nedeniyle, Karaköy'den Pera'ya çıkış amacıyla bir "iner-çıkır" asansör yapma fikri doğmuştur. 30 Haziran 1871 tarihinde başlayan tünel ve kazı çalışmaları 3.5 yıl içinde tamamlanarak tünel 5 Aralık 1874 tarihinde hizmete girmiştir. Vagonlarla birlikte toplam 350.000 sterlin'e mal olan tünelde, önceleri sadece eşya ve hayvanlar taşınmış, 17 Ocak 1875 tarihinden itibaren yolcu taşınmasına başlanmıştır. Atlı tramvayın ilk işletilmeye başladığı yıllarda, İstanbul halkına toplu taşıma hizmeti verdiği atlı tramvay sayısı, 14 adedi yazlık türü olmak üzere toplam 45 adet idi.



Şekil 2.22 75. Yıl Selatin tüneline görünüm (www.ubak.gov.tr ; http://wowturkey.com)

29 Aralık 2006 'de karayolu ulaşımı amacı ile açılan Türkiye'nin *en uzun tüneli* Ordu Nefise Akçelik (Hapan) tüneli 3825 m. uzunluğundadır. İki tüpten oluşan bu tünel, 2 gidiş 2 geliş 1'er emniyet şeridine sahiptir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 Nefise Akçelik (Hapan) tüneline görünüm (http://wowturkey.com)

Ankara - İstanbul Otoyolu üzerindeki Bolu Dağı tüneli iki tüpten oluşur. **23 Ocak 2007** tarihinde 2952 m uzunluğundaki sağ tüp, **08 Mayıs 2007** tarihinde ise 3140 m uzunluğundaki sol tüp hizmete açılmıştır (Şekil 2.24). Türkiye de *ilk defa* Bolu tüneline hasır donatı yerine, *çelik lifli* püskürtme beton uygulanmıştır.



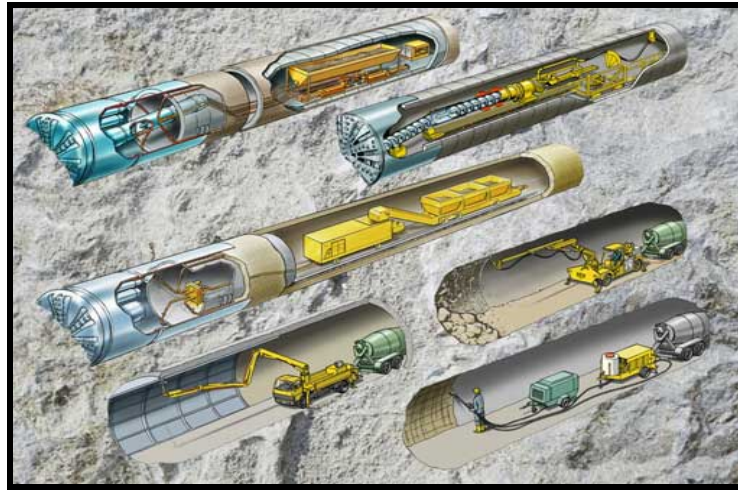
Şekil 2.24 Bolu dağı tüneline görünüm (http://wowturkey.com)

2.2 Tünel Açma ve İksa (Destekleme) Teknolojileri

Tünel açma yöntemi ve iksa (destekleme) sistemlerinin belirlenmesinde güzergah topoğrafyası, zemin koşulları ve tünel geometrisine ait parametrelerin yanında hız, maliyet, zaman, emniyet ve işlevsellik faktörleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzde tünellerin açılması, inşaat teknikleri açısından beş grup halinde incelenebilir (Şekil 2.25). Bunlar;

- Delme - Patlatma Yöntemi,
- Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)
- Tünel Delme Makinesi Yöntemi (TBM)
- Zemin Basınç Dengeleme Makinesi Yöntemi (EPBM)
- Aç - Kapa Yöntemi,



Şekil 2.25 Tünel açma tekniklerinden genel bir görünüm (www.putzmeister.com.tr)

2.2.1 Delme Patlatma Yöntemi

Yeraltı kazılarında uzun süreden beri kullanılan bu yöntem, tünel duvarlarındaki kayalara ve tünel çeperine zarar vermeden, açılacak yerdeki kayaları, hızlı ve ekonomik şekilde çıkarmayı amaçlamaktadır (Palmstorn, Berthelsen, 1988).

Delme Patlatma yönteminin bazı olumlu ve olumsuz özellikleri şöyle özetlenebilir (Çizelge 2.2) :

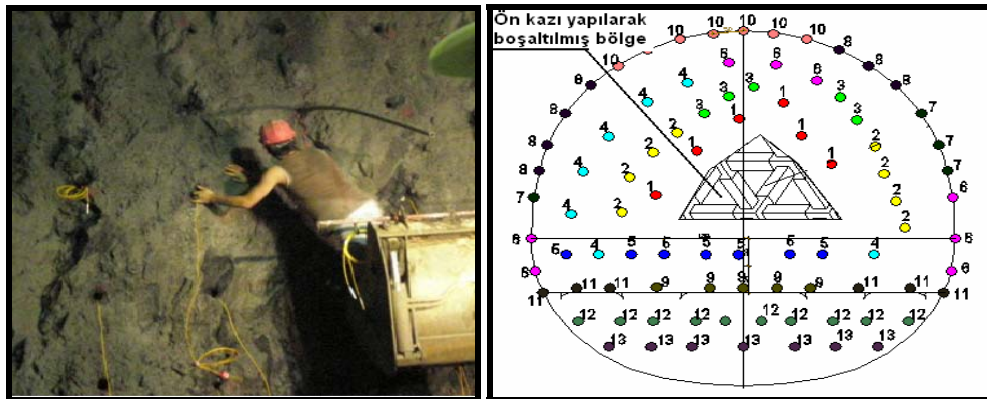
Çizelge 2.2 Delme Patlatma yönteminin özellikleri (Palmstorn, Berthelsen, 1988).

Olumlu özellikler	Olumsuz özellikler
- o Büyük miktarda ilk yatırım maliyeti gerektirmez. - o Piyasadan temin edilmesi hızlı ve kolaydır. - o Makine ile kazıdaki gibi enerji ve güç teminine ihtiyaç yoktur.	- o Duraklamalı üretim söz konusudur. - o Metan tehlikesi olan işletmelerde kullanılamaz. - o İşyeri emniyeti açısından risklidir. - o Galeri iç cidarlarında önemli çatlak ve kırıklar geliştiğinden iyi bir tahkimata gerek vardır. - o Fazla söküm dolayısıyla pası nakli artar. - o İlerleme hızı düşüktür. - o Yerleşim bölgelerindeki tünelticilik faaliyetlerinde kullanımı sakıncalıdır.

Delme patlatma yöntemi patlatılan kayaların kemerlenme durumuna ve patlatılacak kayanın sağlamlığına göre *Tam Kesit*, *Kalot-Stross* ve *Çok Galeri Yöntemi* olarak 3 kısımda incelenir.

2.2.1.1 Tam Kesit (Full-Face)Yöntemi

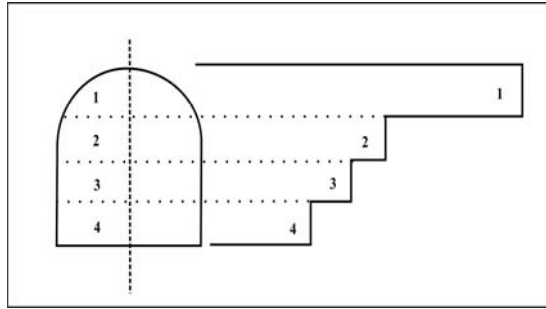
Patlatmadan sonra, formasyon kendisini tutuyorsa, kemerlenme söz konusudur ve destek sistemine ihtiyaç yoktur. Parçalanmış kısımlar kaya bulonları ile sağlamlaştırılır ve sonra gerekli yerlere kaplama yapılır. Kemerlenme süresine bağlı olarak patlatma yöntemi uygulanır. Kemerlenme süresi uzun olan *sert kayalar ve küçük çaplı tüneller* için uygun bir çözüm yöntemi olup, aynı zamanda *en ekonomik* tünel açma şeklidir. Söz konusu yöntemin uygulamasında çeşitli geçici destek ve nervür elemanları kullanılır (Erguvanlı, 1982). Tam kesit yönteminde patlayıcıların deliklere yerleştirilmesi işlemi ve İstanbul Metrosu'nda uygulanan tipik patlatma şeması Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26 Deliklere patlayıcı yerleştirilmesi ve tam kesit (full-face) patlatma şeması (H.İ.Ayış arşivinden)

2.2.1.2 Kalot-Stross Yöntemi

Kemerlenme süresi *kısa, masif, çatlaklı kayaçlarda* Kalot-Stross yöntemi uygulanmaktadır (Erguvanlı, 1982). Bu yöntemde öncelikle tünelin üst kısmında (*Kalot-Heading*) (Şekil 2.27; 1 nolu bölge) dinamitle ilerlenir, daha sonra alt kısım (*Stross*) (Şekil 2.27; 2, 3 ve 4 nolu bölgeler) açılır. Bazen de, bütün tünel boyunca önce üst kısımda ilerlenir ve sonra alt kısım açılır, buna üst kalot (*top heading*) yöntemi denir. İki aşama halinde patlatma yapıldığı için *maliyeti yüksek* ve tam kesit yöntemine göre *daha zahmetli* bir tünel açma yöntemi olup, çok tercih edilen bir yöntem değildir.

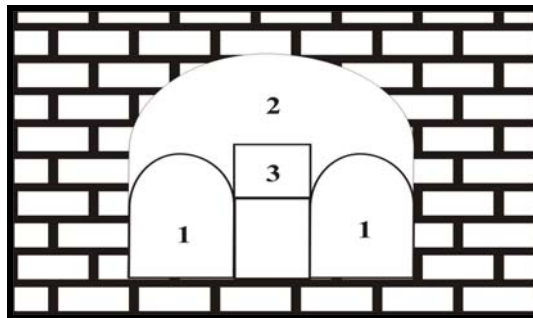


Şekil 2.27 Kalot-Stross tünel açma yöntemi (Erguvanlı, 1982)

2.2.1.3 Çok Galeri Yöntemi

Daha zayıf kayaçlarda Çok Galeri Yönteminin (*multiple-drift*); yan galeri (*side-drift*), orta galeri (*central drift*), kemer galeri (*arch-drift*) sistemleriyle tünel açılır.

Bu yöntemlerde aynanın iki yanında öncelikle ufak yan galeriler açılır (Şekil 2.28; 1 nolu bölgeler), dinamitlemeden önce yan galerilerin destekleri kaldırılır. Bütün bu yöntemlerde, yerli kaya ile destek arasında boşluk kalmamasına dikkat edilmeli, boşluklar beton veya kaya parçaları ile doldurulmalıdır; aksi halde, tavan desteksiz kalır ve düşer.



Şekil 2.28 Çok galeri yöntemi (Erguvanlı, 1982)

2.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi” (NATM) klasik tünel açma tekniklerinin *en deneysel ve esnek* olanı, *en optimum* destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Ünlütepe, 2005). Bu yöntem, kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taşıttırılması esasına dayanmaktadır (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 NATM ile inşa edilen tünelden görünüm (www.marmaray.com.tr)

2.3.1 NATM’ın Tarihsel Gelişimi

1950’de Stini ile geliştirdikleri yöntemi, *Rabcewicz*, **1962** yılında, Salzburg’da düzenlenen XIII. Geomekanik konferansında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method) olarak tanıtmış (Karakuş ve Fowell, 2004) ve **1964** yılında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi’nin kısaltılmış adını “NATM” olarak belirlemiştir. Yöntemi şu şekilde tarif etmiştir (www.maden.org.tr): *“İnce ve geçici bir destek uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak. Böylelikle son destekleme daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve teorik değerlerle karşılaştırılacaktır.”*

1966’da ilk defa Avusturya’da, daha sonra yayılımı hızla gelişerek, Fransa, Almanya ve İtalya’da uygulanmıştır.

1969 yılında yöntem, *resmi olarak ilk defa* Frankfurt Metrosu inşaatında kullanılmış; iç içe tabakalı kil, marn, tebeşir ve kum taşı geçilmiştir (Şekil 2.30).



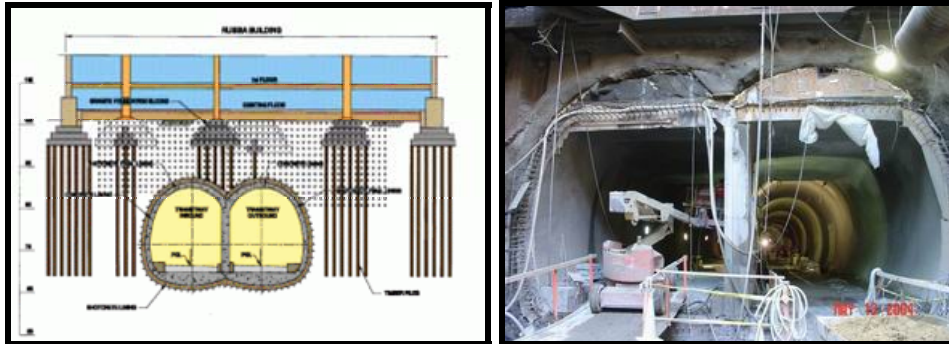
Şekil 2.30 Frankfurt Metrosu, NATM ile yapım aşamalarından görünüm (http://aic-anthes.com)

1987'de NATM, İngiltere'nin Barrow şehrinde *ilk defa* maden arama amaçlı kazı işlemlerinde kullanılmıştır (Karakuş ve Fowell, 2004).

1988'de yöntem, dünyanın *en uzun demiryolu tüneli* olan Seikan tüneline (Japonya) de başarı ile uygulanmıştır. Tsugaru Boğazı'nın yatağı boyunca uzanan Seikan Tüneli, 23.3 km'si yeraltında olmak üzere 53.85 km uzunluğa sahiptir.

Bir başka başarılı uygulama da Mexico şehrindeki Emisor Central kanalizasyon tüneline olmuştur.

2004 yılında yapımı tamamlanan Boston demiryolu tünelinin, 100 yıllık tarihi 7 katlı Russia Wharf Binası altından geçerek Logan Havaalanı ile güney Boston'u birbirine bağlaması hedeflenmiştir. Yumuşak organik silt ve kil formasyonda, tarihi bina altından geçildiğinde riskli bir durum oluşmasını önlemek için tünel kesitinin dürbün şeklinde tasarımı yapılmış ve NATM ile açılması planlanmıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Russia Wharf Binası altından geçen Russia Wharf tüneli (www.dr-sauer.com)

Söz konusu tüneller açılırken mevcut binanın temel kazıkları kırılarak, kırılan kazıklar tünel kemer yapısına oturacak biçimde tünellerin tasarımı yapıp, binaya olası bir zararın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. NATM ile açılan bu tünellerde parçalı kazı destekleme sistemi tasarlanmış, kazı destekleme sırasında bina temeli ile tünel arasındaki organik siltli zemine, dondurma özelliğine sahip bileşiklerin (CaCl_2 veya MgCl_2) enjekte edilmesi ile zemin stabilitesi sağlanmıştır (www.dr-sauer.com).

2006'da açılan Fort Canning karayolu tüneli (Singapur), 15 m eninde ve 11 m yüksekliğinde olup; killi silt, kil ve kum merccekleri içeren formasyonda NATM ile açılmıştır. Tünelin kötü zemin formasyonunda açılması ve geniş kesitli olması nedeniyle Şemsiye boruları (*umbrella arch*) kullanılmış ve geçici alt yarı desteklemesi uygulanmıştır (Şekil 2.32), (Bkz. Ek-2).

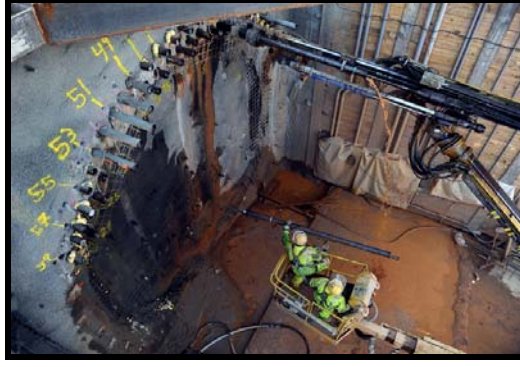


Şekil 2.32 Fort Canning karayolu tüneline görünüm (www.laabmayr.com)

2007 yılında, Londra Metro Sisteminin bir parçası olan Kings Cross İstasyonu'nda Londra kili (katı kil) formasyonunda açılmış olan tünelde pilot tünel (üst yarıda yapılan küçük çaplı tünel) uygulaması yapılmış, daha sonra 7 m çapında normal boyutlarına getirilerek açılmıştır. Tarihi duvar altından geçilmesi sırasında şemsiye boruları da kullanılmıştır.

2008 yılında, Washington Metro sistemine bağlı Dulles Corridor Metrorail projesi kapsamında Tynols Corner çift hat tüneline, silt ve düşük kil içerikli formasyonda, 8 m çaplı tüneller NATM ile açılmıştır. Tüneller kötü zemin şartlarında açılacağı için, hat boyunca tünel üst yarısına şemsiye boruları uygulaması yapılmıştır (Şekil 2.33).

2009 yılında, Londra Metro Sistemi'nin bir parçası olan Victoria İstasyonu'nda, Londra kili formasyonunda açılmış olan mevcut dar kesitli 6 m çapındaki tüneller, NATM ile 10 m çapına çıkarılarak genişletilmiştir. Genişletme yapılacak olan tünellerde öncelikle yüzeyden zemin içerisine basınçlı çimento harcı enjeksiyonu (jet grout) ile zemin iyileştirildikten sonra, hat boyunca tünel üst yarısına şemsiye boruları uygulanmıştır (<http://books.google.com.tr>).

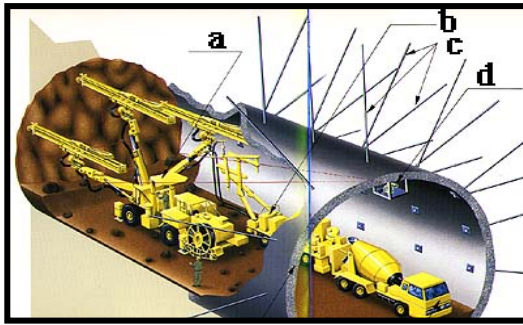


Şekil 2.33 Tynols Corner tüneli şemsiye borusu uygulamasından görünüm (www.dr-sauer.com)

2.3.2 NATM ile Tünel Açma ve Kazı İksa (Destekleme) Sistemleri

NATM’de ana ilke; en uygun kazı ve destekleme yönteminin seçilerek, kazı sonrası oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak; boşluğu çevreleyen bölgede kaya/zemin kütlesi ve destekleme elemanlarının doğrudan teması ile kendini tutan ve taşıyan *kompozit* bir statik sistem oluşturmaktır. NATM ile açılan tüneller genellikle iki aşama halinde (alt yarı ve üst yarı) açılmaktadır. Öncelikle üst yarı kısmında kazı destekleme işlemi yapıldıktan sonra belli bir mesafe aralığında alt yarının kazı destekleme işlemi gerçekleştirilir. Böylece tünelde kazı iksa işlemi tamamlanmış olur.

NATM detayları, tünel güzergahı boyunca topoğrafya, zemin etütleri ve tünel geometrisine bağlı olarak belirlenir. Ayrıca zemin gözlemleri ve deformasyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre, kazı destek ve inşa tipi ekipmanı uygulama sırasında sürekli gözden geçirilir. Böylece gerektiği kadar destekleme yapılarak, iyi bir zamanlama ve optimum maliyetle gerek duyulduğu ölçüde yapı emniyeti sağlanır (Ünlütepe, 2005),(Şekil 2.34).



- a) 3 kafalı Jumbo delgi makinesi
- b) Yaş püskürtme beton makinesi
- c) Kaya bulonları
- d) Otomatik jeodezik ölçüm sistemi

Şekil 2.34 NATM’ da kullanılan bazı ekipmanlar (www.civil.nagasaki-u.ac.jp)

NATM’ de tünel kazı destekleme sistemindeki uygulama aşamaları genel olarak sırasıyla;

- o Uygun açıklık aralığında kazı yapılması,
- o Hasır elik donatısının yerleştirilmesi,
- o elik iksanın yerleştirilmesi,
- o İlk kademe püskürtme betonun atılması (yaklaşık 15 cm kalınlığında),
- o İkinci kat elik hasır donatısının yerleştirilmesi,
- o Püskürtme betonun projede belirtilen nihai kalınlığının tamamlanması,
- o Püskürtme betonun priz almasının ardından tünel cidarına kaya bulonu çakılması.

aşamalardan oluşmaktadır.

NATM’de kaya sınıflarına göre kazı destek sistemleri (ÖNORM B2203, 1994) ayrıntılı olarak Ek-1’de verilmiştir.

2.3.2.1 NATM ile İstanbul Metrosu’nda Uygulanan Tünel Kesitleri ve Kazı İksa (Destekleme) Sistemleri

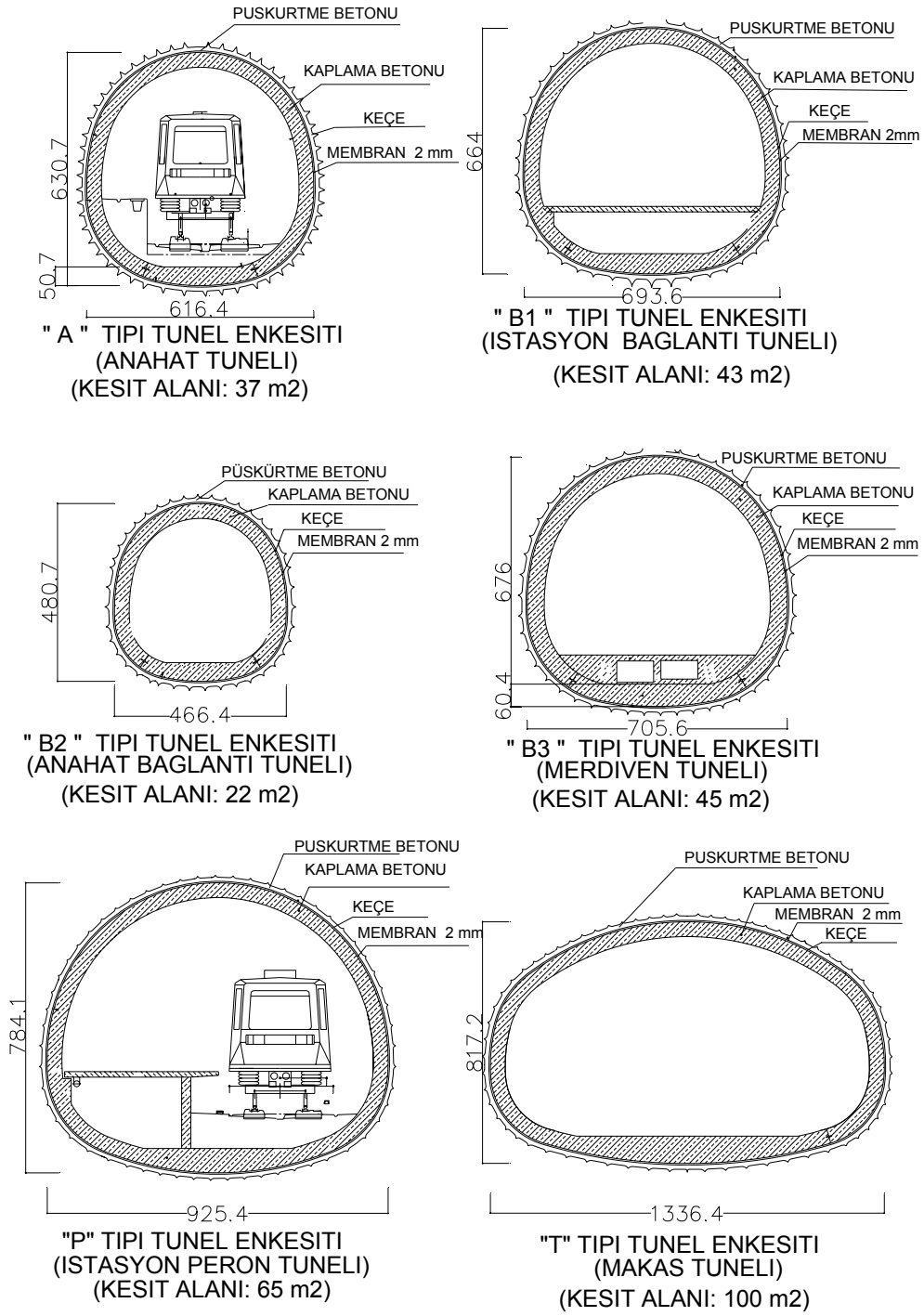
Tünel enkesiti; hatta çalıştırılacak trenlerin maksimum kapasitesi, tren ticari hızı, koltuk sayısı, konfor derecesi, araç sayısı, araç kapı sayısı, istasyon uzunluğu, tren dizilerinin takip aralıkları, sinyalizasyon durumu ve ücret toplama sistemlerine bağlıdır (Arıoğlu, 2008).

İstanbul Metrosu tünelleri gidiş-dönüş olmak üzere iki ayrı hat olarak açılmakta olup, 4 farklı tünel kesiti kullanılmaktadır. Bunlar, A (ana hat tünelleri), P (peron tünelleri), T (makas tünelleri) ve B tipi (bağlantı tünelleri) tnellerdir. Bu tünellerin tip kesitleri ve ortalama alanları şekil 2.35’te verilmiştir.

Kazı yapılan kayanın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapıların veya yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içindeki gerilmelerin özellikle yoğunlaştığı bölgeler, kazı destekleme tipinin belirlenmesinde temel parametrelerdir.

Aynayı teşkil eden kayacın yapısal özellikleri ve su durumu stabilizeyi belirler. Eğer stabilize düşükse, buna bağlı olarak destekleme artırılır. Aynı şekilde örtü kalınlığı da, kazı destek oranıyla ters orantılıdır. Tünel içi gerilmelerin yoğunlaşması ve yüzeydeki yapı yoğunluğu ise destekleme oranı ile doğru orantılıdır.

İSTANBUL METROSU TUNEL TIP ENKESİTLERİ



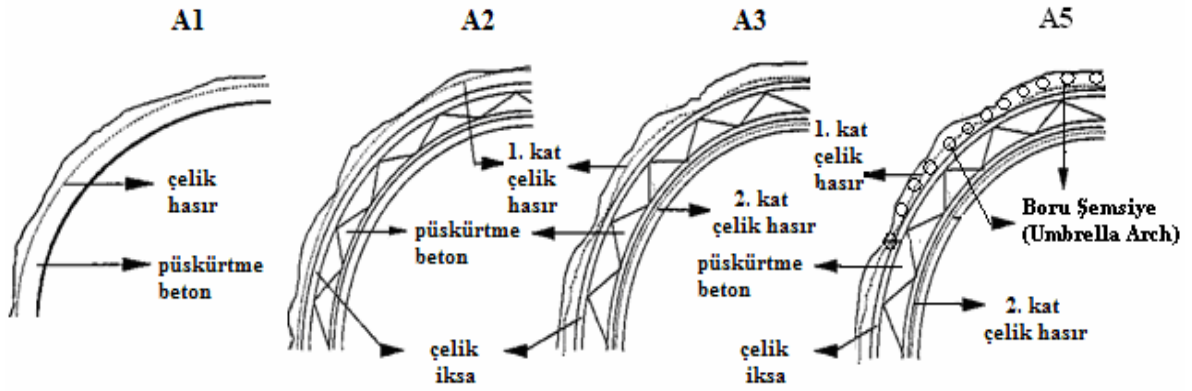
Şekil 2.35 İstanbul Metrosunda uygulanan farklı tünel tip kesitleri ve ortalama alanlar (H.İ.Ayış arşivinden)

İstanbul Metrosu NATM ile açılan tünellerde zemin durumuna göre uygulanan kazı iksa tipleri dört grupta toplanabilir. Uygulanan kazı iksa sistemlerinin mühendislik özellikleri özet olarak Çizelge 2.3'te, detaylı olarak ise Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 İstanbul Metrosunda uygulanan kazı iksa sistemleri

	A1	A2	A3	A5
ORTAM	Sağlam kaya	Orta-sağlam kaya	Zayıf kaya	Zemin
ÇELİK İKSA (kafes kiriş)	Yok	Var	Var	Var
ÇELİK HASIR	Tek kat (Q221/221)	Tek kat (Q221/221)	Çift kat (Q221/221)	Çift kat (Q377/221)
PÜSKÜRTME BETON	d=10-15 cm	d=20 cm	d=20 cm	d=25 cm
KAYA BULONU (adet) (şasırtmalı)	4-5	6-7	7-8	—
ZEMİN ÇİVİSİ (adet)	—	—	—	Aynaya: 8-20 Yanlara: her iksada (3 sağ, 3 sol)
SÜREN (adet)	Yok	12 (ort.)	20 (ort.)	—
ŞEMSİYE BORUSU(adet)	—	—	—	23-27
KAZI ANO BOYU	1.5 m (maks.)	1-1.2 m	0.8-1 m	0.8 m

A1, A2, A3 kazı iksa (destekleme) sistemlerinin şematik gösterimi ise Şekil 2.36'da verilmiştir.



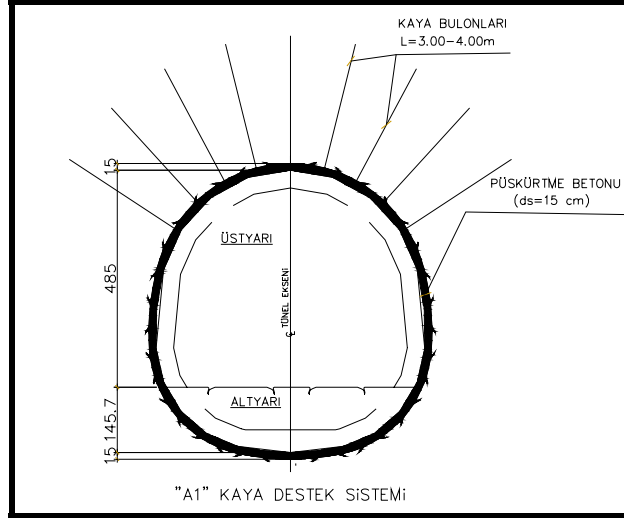
Şekil 2.36 A1, A2, A3 ve A5 tipi kazı iksa sistemlerinin şematik gösterimi

A5 tipi kazı iksa sistemine ait ayrıntılı bilgiler (Şemsiye borusu, Zemin çivisi, Süren Uygulamaları) Ek-2'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 İstanbul Metrosunda NATM kazı iksa sistemleri

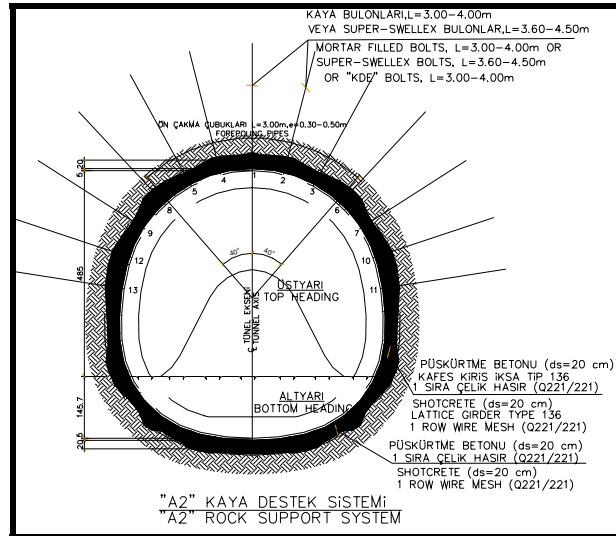
• A1 tipi kazı iksa sistemi

A1 kazı iksa sistemi *sağlam kaya* ortamını karakterize eder. Destekleme elemanları azaltılmıştır, kazı boyu maksimum 1.5 m olarak belirlenmiştir. Kazı tamamlandıktan sonra doğrudan çelik hasır montajı yapılmakta ve çelik iksa kullanılmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Çelik hasır kaya yüzeyine maksimum oranda yaklaştırılıp, yatay ve düşey yönde 30 cm bindirme ile bağlantılar yapılmaktadır. Daha sonra püskürtme beton uygulanır. Kayanın duraylılığı yüksek olduğundan, ilerleme yapılırken süren kullanımına ihtiyaç yoktur. Kaya bulonları ise şaşırtmalı olarak 4–5 adet çakılır.



• A2 tipi kazı iksa sistemi

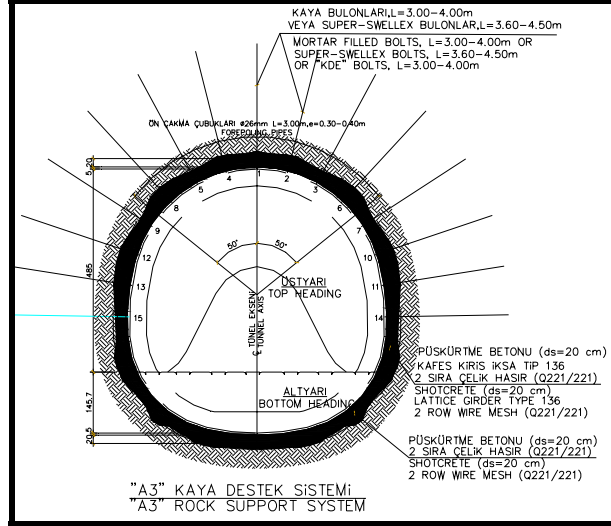
A2 tipi kazı iksa sistemi *orta sağlam-orta zayıf kaya* ortamını karakterize eder. A1 kazı tipinde aynada göbek bırakılmamasına karşın, bu sistemde uygun göbek bırakılarak kazı çalışmaları yürütülür. Kazı ano boyu 1–1.2 m arasında değişebilir, kazı sonunda çelik hasır montajını takiben iksa montajı yapılarak püskürtme beton uygulamasına geçilir. Bir sonraki kazı adımını güvenli yapabilmek, olası aşırı sökülme önlemek ve çalışma emniyeti sağlamak amacıyla gerekli görülürse her iki çelik iksada bir olmak üzere süren çakılır. 6–7 adet şaşırtmalı olarak uygulanan kaya bulonları, aynayı maksimum 3 m geriden takip edecek şekilde çakılır.



Çizelge 2.4'ün devamı

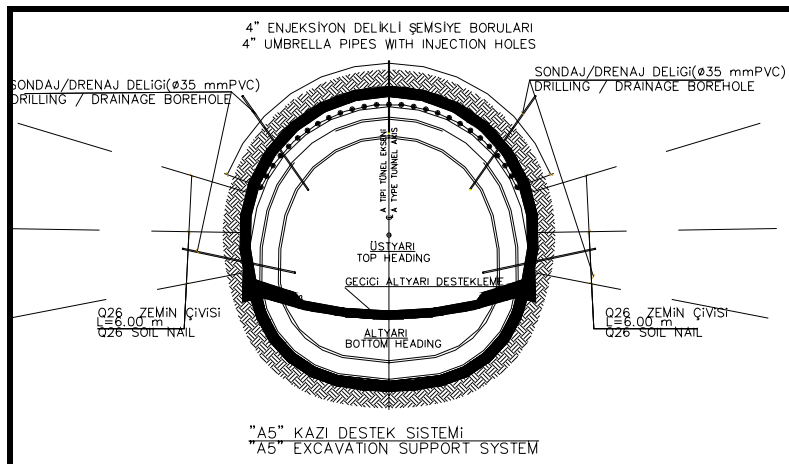
• A3 tipi kazı iksa sistemi

A3 tipi kazı iksa sistemi *duraylılığı düşük, zayıf kaya* ortamını karakterize eder. Kazı adımı 1 m' den düşüktür. Kazı sonrası çelik hasır ve çelik iksa montajı yapıp, 20 cm püskürtme beton atılır. Her iki çelik iksada bir kazı işlemine başlamadan önce süren uygulaması yapılır. Kaya bulonları ise 7–8 adet şaşırtmalı olarak çakılır.



• A5 tipi kazı iksa sistemi

Kaya formasyonda geniş kullanım alanı bulan A1, A2, A3 tipi iksa sistemlerinin, kohezyonu düşük zeminlerde istenilen performansı sağlayamadığının görülmesi üzerine, zayıf formasyonda uygulanabilmesi amacıyla A5 tipi iksa sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde, zayıf formasyondaki aynanın stabilitesi, yüzey oturmaları ve çalışma güvenliğini sağlamak amacıyla şemsiye boruları (*umbrella arch*) tünel üst yarısı boyunca uygulanmaktadır. Bu sistem ile tünel ve yüzey emniyeti, verimlilik ve ilerleme hızı performans verileri en üst düzeye çıkartılabilmektedir (İlk defa İtalya'da kullanılan ve çeşitli projelerde de yeterliliğini kanıtlayan bu yöntem İtalya'dan sonra Japonya'da da birçok tünel projesinde kullanılmıştır), (Kurt, vd., 1994). Kohezyonu düşük zeminlerde uygulama alanı bulan diğer iksa elemanı ise zemin çivisidir, A5 sisteminde ayna göbek kısmı ve tünel çeperine uygulanmaktadır. Zemin çivisinin uygulanmasındaki öncelikli amaç, zayıf formasyonlarda ayna stabilitesini sağlamak ve tünel çeperinde oluşabilecek deplasmanları önlemek için sürtünme kolonları oluşturmaktır. Şemsiye borusu ve zemin çivisi uygulaması A5 tipi kazı iksa (destekleme) sisteminde birbirini tamamlayan iki ana unsurdur.



2.3.2.2 İstanbul Metrosunda NATM ile açılan tünellerde alınacak önlemler

İstanbul Metrosu tünelleri inşaatı boyunca yüzeyde oluşabilecek oturmalarından dolayı, binaların hasar görmelerini önlemek amacıyla yüzeyde, binalarda ve tünel galerisi içinde jeoteknik ölçümler, gözlem ve kontroller yapılmakta, bunlara bağlı olarak kazı ve destekleme aşamalarında gerekli önlemler alınmaktadır. Tünel açma işlemleri yapılmadan önce, hat üzerinde veya yakınında bulunan binaların mevcut durumu tespit edilmektedir. Tünel aynası hat güzergahı boyunca, yeryüzünde düzenli olarak nivelman (tasman) ölçümleri yapılmalıdır. Bina üzerinde ve yeryüzünde yapılacak olan nivelman ölçümlerine en geç ayna kazısına 30 m kadar yaklaşıldığı andan itibaren başlanılmaktadır. Kritik binaların bulunduğu bölgelerin geçişinde kontrollü olarak uygun kazı iksa tipinin seçilerek uygulanması, jeolojik belirlemelerin ve jeoteknik ölçümlerin hassasiyetle yapılması büyük önem taşımaktadır. Tünel kazısı kritik binalara yaklaştığı sırada, jeolojik verilerin daha detaylı tespiti amacıyla, aynadan ilerleme yönüne doğru deneme amaçlı sondaj delikleri açılabilir. Söz konusu kritik kısımlarda kaya bulonlarının çakılmasına itina gösterilerek, jeolojik duruma göre yerleri, uzunlukları ve yönleri ayarlanmalıdır. Jeolojik durum ve jeoteknik ölçüm değerlendirmelerine göre kazı ve iksa sisteminde aşağıda belirtilen önlemlere başvurulmalıdır.

Bu önlemler;

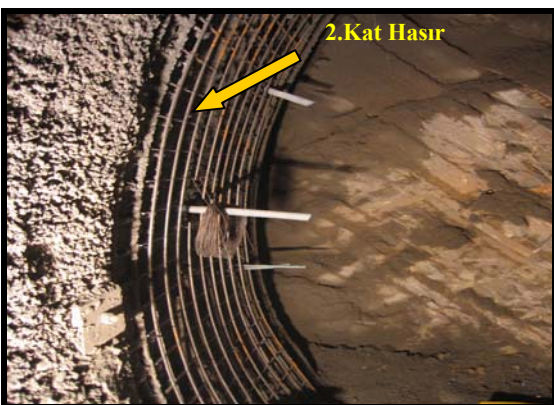
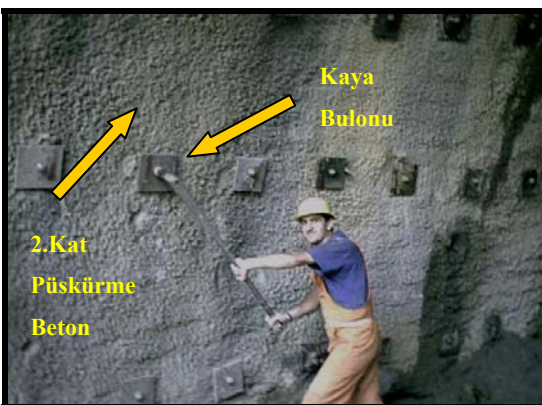
- o Kazı adımlarının küçültülmesi,
- o Ayna kazı kesitinin daha küçük parçalara bölünerek açılması,
- o Süren aralıklarının küçültülmesi,
- o Püskürtme betonu kalınlığının artırılması,
- o Üst yarıda geçici alt yarı iksa işleminin yapılması,
- o Alt yarı kazı iksa işleminin daha hızlı ve kısa adımlarla (3-4m) uygulanması,

gibi sıralanabilir.

NATM ile açılan tünellerde kazı iksa uygulama aşamalarına ait görünüm Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Ek-3'te ise İstanbul Metrosu NATM ile açılan tünel güzergahındaki inşaat aşamaları genel hatlarıyla anlatılmıştır.

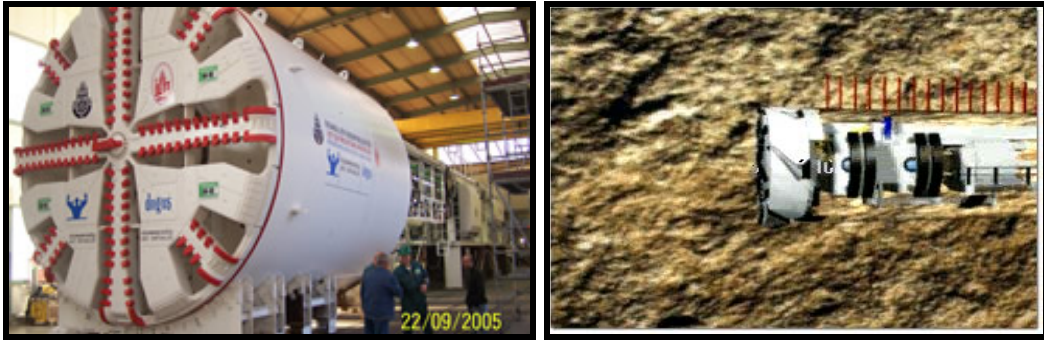
Çizelge 2.5 NATM kazı destekleme sisteminin uygulama aşamalarına ait görünümeler
(H.İ.Ayış arşivinden)

 1.adım : Tünel kazısının yapılması	 2.adım : Kazı işlemini takiben 1.kat çelik hasırın yerleştirilmesi
 3.adım: Çelik hasır uygulamasından sonra çelik kafes iksaların yerleştirilmesi	 4.adım : Çelik kafes iksalarının yerleşimini takiben, ilk tabaka püskürtme betonun uygulanması
 5.adım: İlk kat püskürtme betondan sonra ikinci kat hasır çeliğinin yerleştirilmesi	 6.adım : Çelik hasır üzerine ikinci tabaka uygulanan püskürtme betondan sonra kaya bulonlarının yerleştirilmesi ile kazı destekleme işleminin sonlanması

2.4 Tünel Delme Makinesi (TBM) Yöntemi

İnşaat ve madencilik sektöründe yeraltı yapılarının önemi, teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yerüstü yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. TBM'ler genel olarak sert ve orta sert zeminlerde, EPBM'ler ise yumuşak zeminlerde uygulanmaktadır.

Tünellerin hızlı, ekonomik, emniyetli bir şekilde açılması esaslarına dayanan bir sistem de Tünel Delme Makinesi Yöntemidir (*Tunnel Boring Machine Method*) (TBM). *İlk yatırım maliyeti yüksek* de olsa tam cepheli tünel açma özelliğine sahip TBM'ler; çökme (*tasman*) önleme kabiliyeti, *daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı* çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Tipik bir TBM' in görünümü Şekil 2.37'de verilmiştir.



Şekil 2.37 TBM görünümü (www.dogusinsaat.com.tr)

2.4.1 TBM'in Tarihsel Gelişimi

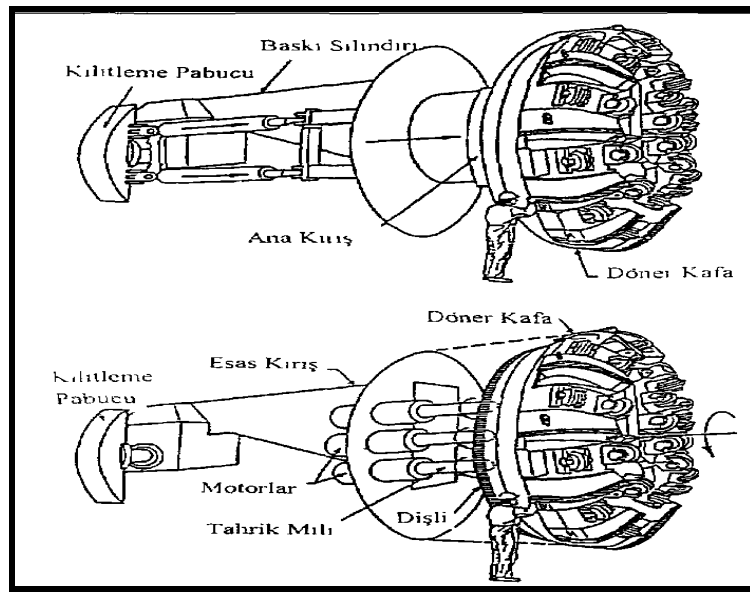
1846'da İtalya'da Maus tarafından tam cephe kazı yapmak üzere *ilk kazı makinesi* geliştirildi.

1847'da ABD'de Talbot tarafından makine için disk kesicilerden istifade edilerek gelişim süreci başlatılmıştır.

1851'de *ilk tünel açma makinesi* A.B.D'de Hoosac tüneline kullanılmıştır (Şekil 2.38). Bu makine daire şeklinde döner bir kesme kafasına sahip olup, keskin konsantrik daireler çizerek kazı yapacak şekilde dizilmişlerdi. Bu makine, tutunma mekanizması, itme (baskı) mekanizması ve pasa uzaklaştırma sistemlerinden oluşmaktaydı (Şekil 2.39).



Şekil 2.38 Hoosac tüneline görünüm (http://etc.usf.edu ; www-tc.pbs.org)



Şekil 2.39 İlk zamanlarında TBM makinesinin elemanları (Çınar ve Feridunoğlu, 1994)

1856'ya gelindiğinde, metalürjik ve yapısal tasarım henüz sert kayalarda başarıyla çalışabilecek seviyede değildi. H.Haupt bu makine ile kaya gibi sert yüzeylerde 3m/gün'lük bir ilerleme yapmayı başarmıştı (Friant ve Özdemir, 1994).

TBM' in esasını oluşturan sert kayalarda delgi işlemi, izleyen 100 yıl için yetersiz kalmış ve hiçbir gelişme olmamıştır. Bazı keski ve kesme cihazları ile donatılmış TBM' ler yumuşak kayalar ve kömür damarlarında denenmek istenmiş, fakat tatminkar sonuçlara ulaşılamamıştır.

1856-1857 yıllarında TBM, Wilson tarafından geliştirilmiş ve patentleri alınmıştır.

1871'de Brunton *disk keskilere* sahip ilk tam cephe kazı makinesini tasarladı (Stack,1982).

1875'de tamamıyla döner bir sistem ile donatılmış, sert zeminlerde üstün bir performans sergileyen ve tam cephe kazı yapabilen TBM tasarımı *Beaumont* tarafından yapılmış ve patenti alınmıştır. Bu tasarım İngilizler tarafından geliştirilmiş, 1880 yılında İngiliz kanal tüneli olan 38 km uzunluğundaki Manş tüneli kazısında (*en uzun su altı tüneli*) kullanılmıştır.

1950'lerin başında J.S. Robbins tarafından tasarlanan *ilk TBM* (Robbins makinesi) Washington'da Robbins şirketi tarafından üretilmiştir. Robbins, **1956** yılında kalem kesiciler yerine döner disklerin kullanılma fikrini de ortaya atmıştır.

1956'da Robbins tarafından Toronto'da gerçekleştirilen uygulamada ilerleme hızı 38 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Bu uygulama, TBM'lerin yumuşak ve orta sert kayalarda ekonomik olarak kullanılabileceğinin *ilk göstergesi* olmuştur (Friant ve Özdemir, 1994).

Toronto'daki uygulamayı izleyen 26 yıl boyunca teknoloji oldukça yavaş ilerlemiştir. TBM imalatçıları dene gör politikası izleyerek, makinelerin daha sert ve aşındırıcı kayalarda kullanılmasını sağlamaya çalışmışlardır.

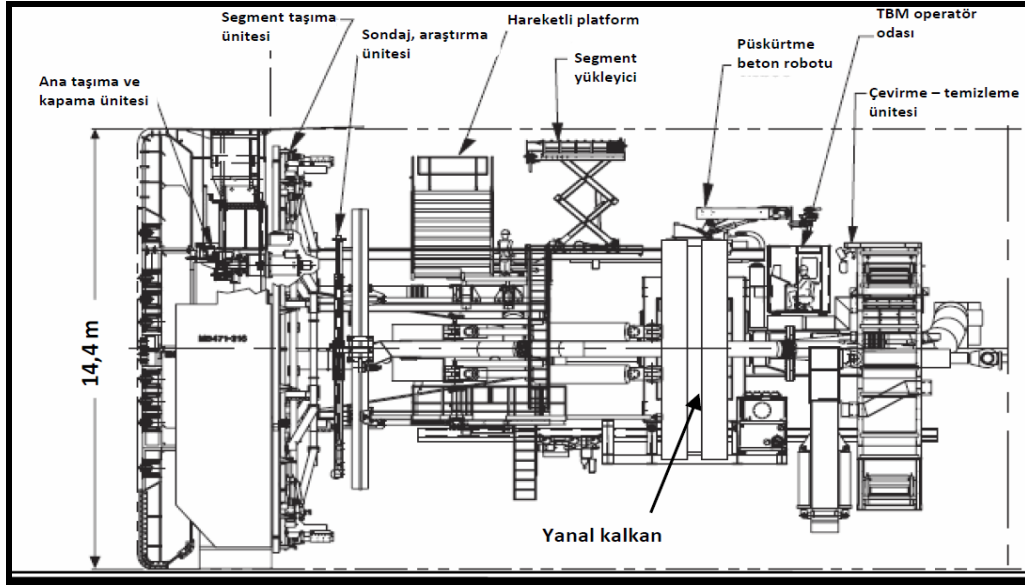
1953-1960 yılları arasında Güney Dakota, Oahe barajında ve 1965 yılında Toronto, Humber nehrinde kullanılmış; geniş çaplı kazıda verimli olarak kullanılabileceği görülmüştür.

1970-1980 yılları arasında dünyada birçok üniversite ve araştırma kurumunda disk kesicilerin sert kayalardaki performansı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır.

2006 yılında yapımına başlanan Niagara tünel projesinde kayada çalışan dünyanın en büyük kazı çapına (14.4 m) sahip TBM kullanılmıştır (Şekil 2.40). TBM'in disk kesici kafa sayısı 85, diske etki eden normal kuvvet 39 t/kesici, kesici kafa gücü 6330 HP, döndürme momenti 18800 kNm, hidrolik iticilerin (pistonların) maksimum uzunluğu 1.72m, kesici kafa itme basıncı 275.7 bar, delme ünitesi hariç TBM ağırlığı 1100 ton' dur (Şekil 2.41).



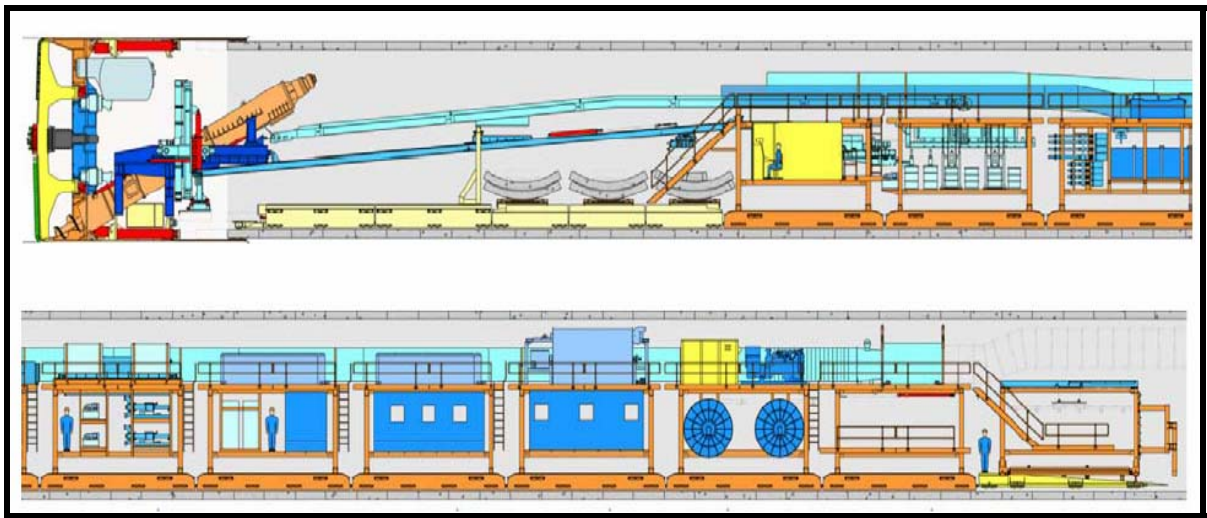
Şekil 2.40 Niagara projesinde kullanılan TBM'den görünüm (www.infobatt.com)



Şekil 2.41 Niagara tünel projesinde kullanılan TBM enkesiti (Arioğlu, 2009)

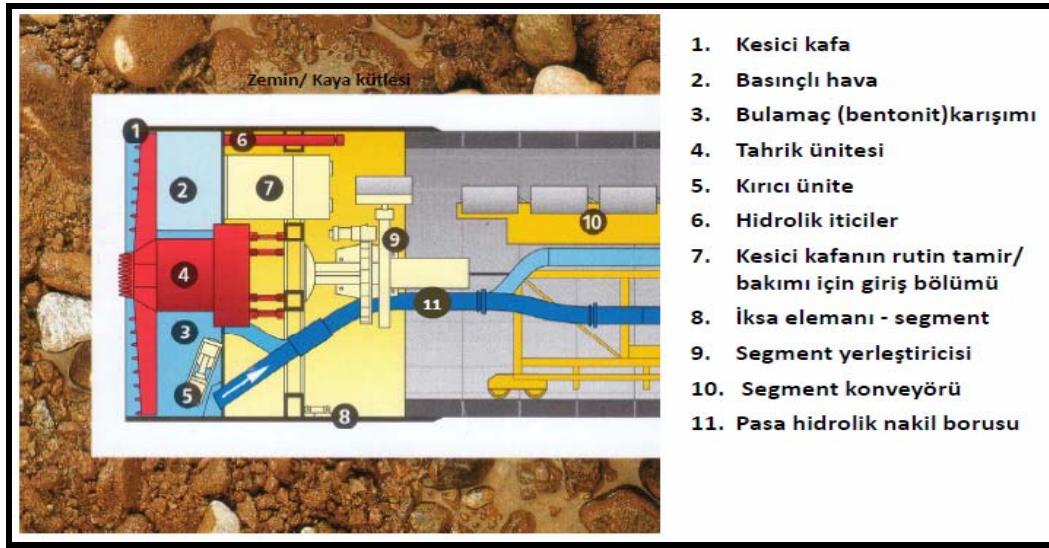
2.4.2 TBM ile Tünel Açma ve Kazı Destekleme

TBM; kesici kafa, itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kilitleme pabuçları (*gripper*), kesici kafayı döndüren motorlar ve beton tahkimat elemanlarını yerleştiren erektörlerden meydana gelir. TBM arkasında bulunan back-up sistemler olarak adlandırılan kısımda ise hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, tavan civataları için bir delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyörler, vagonlar bulunmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 1994). Tipik bir TBM boykesiti Şekil 2.42’ de verilmiştir.



Şekil 2.42 TBM boy kesit görünümü (Ünlütepe, 2005)

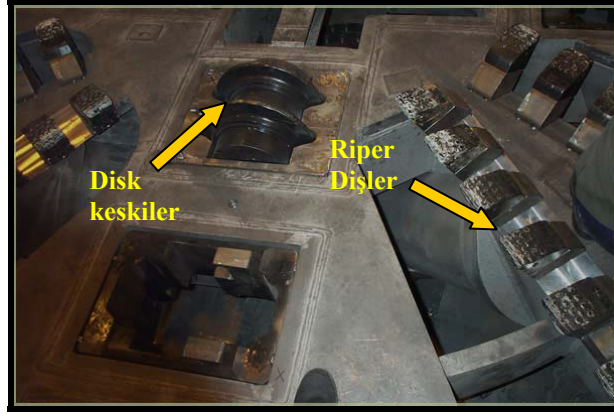
Sistem; inşa edilmesi tasarlanan boyutta dairesel bir silindirik formu olan ring içerisinde tünel yapımı için gerekli teknolojiyi barındırır (Şekil 2.43). Makinenin silindirik formu, kazılan zemin stabilitesinin korunmasını sağlar. Kazma işleminin gerçekleşmesi için iki önemli kuvvet vardır. Kesici kafanın aynaya doğru itilmesi ve bu ileri itilme sırasında kafanın dönmeye başlaması kazı işlemini gerçekleştirir. Tam cephe tünel açma makineleri aynayı kesikleri ile tamamen kavrar. Aynadan kazılan malzeme, kesici kafa üzerinde bulunan kanatçıklar tarafından kesici kafa arkasındaki hazneye aktarılır. Hazne içerisinde bulunan burgu konveyör, çıkan kazı malzemesinin (*pasa*) nakliyatını yapar.



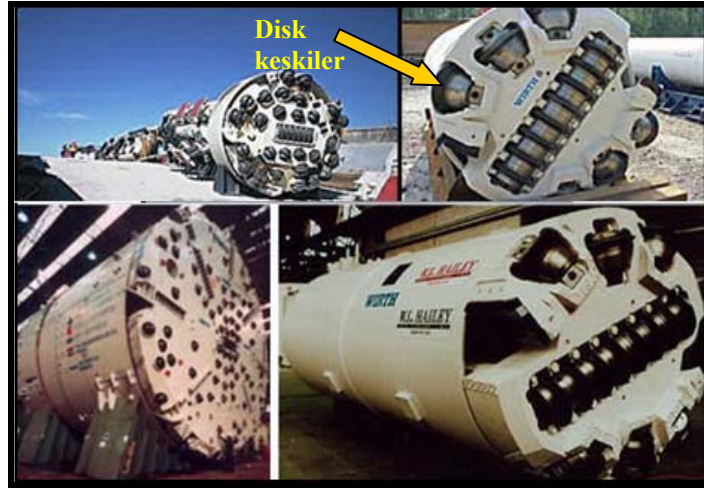
Şekil 2.43 TBM' in kısımları (Zhao, 2008., Arıoğlu, 2009)

TBM' ler genel olarak çalıştığı zemin formasyonuna göre sınıflandırılır (Çizelge 2.6). Sert, orta sert, yumuşak ve zayıf formasyonlar için kullanılacak kafa tasarımları ve keski tipleri, makineyi dengeleme sistemleri, destekleme (tahkimat) sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri farklılıklar göstermektedir.

Yumuşak formasyonlarda kesici kafa tasarımında, *riper (manivela) dişler* ve *kalem keskiler* kullanılır. Sert ve zayıf kayacın bir arada olduğu durumda ise kesici kafa, hem riperler hem de disk keskilerden oluşur (Şekil 2.44). Disk keskiler, olası sert damarları ve kayaları kesmek için kesici kafaya yerleştirilmiştir. Sert kayada kesici kafada sadece *disk keskiler* bulunur (Şekil 2.45) (Çınar ve Feridunoğlu, 1994).



Şekil 2.44 Farklı formasyonlara sahip zeminlerde kullanılan, ripper dişler ve disk keskili TBM tasarımı (www.jointech.net.cn)



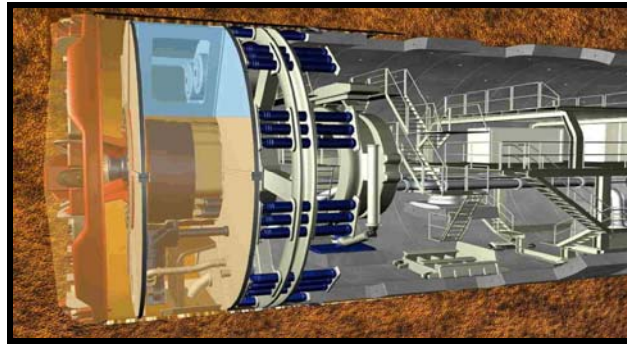
Şekil 2.45 Sert kayalarda kullanılan disk keskili TBM tasarımları (www.americancommercial.com)

Kazı işleminin gerçekleşmesi için TBM üzerinde bulunan itme silindirleri beton segmentlere dayanarak, kesici kafayı aynaya doğru iter ve kafa dönmeye başlar. Kazı işlemi, beton segmentlerin yerleştirilmesi için gerekli açıklık sağlandıktan sonra durdurulur. TBM üzerindeki basınçlı erektörler yardımıyla, beton segmentler tünel çeperine yerleştirilir ve civata (bulon) vasıtası ile birbirlerine montajı yapılır. Kazı yüzeyi ile segmentler arasında beton enjeksiyonu yapılarak tahkimat işlemleri bitirilir (Çınar ve Feridunoğlu, 1994).

TBM yönteminde geçici kazı destekleme sisteminin oluşturulmasına gerek duyulmadan, ilk destek yerine nihai iç kaplama betonu oluşturularak, ilk destekleme ve kalıcı destekleme imalatları tek seferde yapılabilir. TBM ile açılan bir tünelde ilk ve nihai destekleme uygulamasından detaylar Çizelge 2.7' de verilmiştir.

2.5 Zemin Basıncı Dengeleme Makinesi (EPBM) Yöntemi

TBM teknolojisinde, kohezif olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altındaki zeminlerde ilerleme sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Kendini kısa süreli bile tutamayan gevşek formasyon kazılarında ayna stabilitesini sağlamak ve sistemi dengede tutmak için *zemin denge basıncından* yararlanılır (Kesici kafanın ilerlemesiyle ön kısmın stabilitesi de hemen gerisindeki çok sayıda piston tarafından sağlanır). Bu yöntem, *Zemin Basıncı Dengeleme Makinesi Yöntemi (Earth Pressure Balance Machine Method) (EPBM)* ismi verilir.

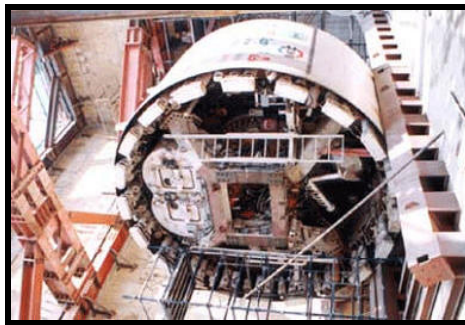


Şekil 2.46 Yeraltında EPBM’den görünüm (www.tunnelseis.com)

2.5.1 EPBM’in Tarihsel Gelişimi

1824-1840 yılları arasında zayıf formasyonda TBM ile tünel açma teknolojisi, Thames nehrinin geçildiği Brunel şiltinden başlayarak, gelişim göstermiştir.

1864’de Peter Parlow, Brunel’in tasarımlarını geliştirerek dairevi şilt (kalkan) patenti aldı. Bu şilt içine yerleştirilen ön üretimli beton elemanların itilmesi suretiyle, basınç uygulanması ve ön tarafında çamur (pasa) akışı-uzaklaştırmayı temin edecek açıklığa sahiptir. Söz konusu makine, Arazi Basınç Dengeleme Makinesi’nin (EPBM) *ilk örneğidir* (Bu şiltin bir benzeri ile **1869** yılında Thames nehri bir yılda geçilmiştir).



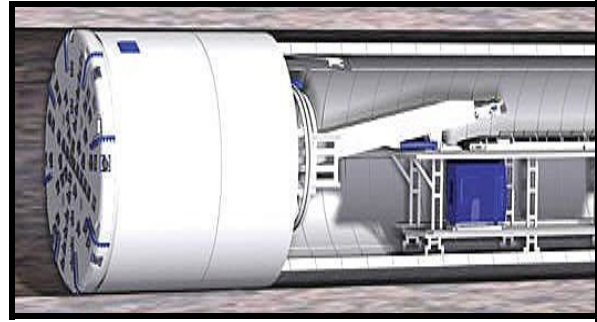
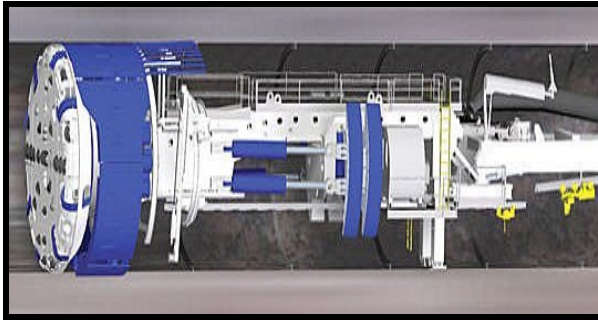
Şekil 2.47 İlk üretilen EPBM’den bir görünüm (<http://indiagovernance.gov.in>)

Çizelge 2.6 Zemin formasyonuna göre TBM sınıflandırması (www.directindustry.com ; www.robbinstbm.com);

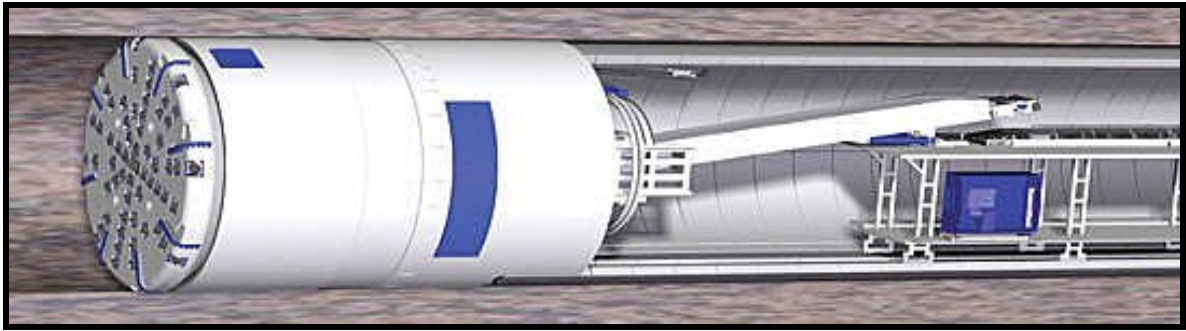
Sert kaya, yumuşak formasyon (kendini tutabilen) ve her iki formasyon türünün bir arada olduğu zeminlerde kullanılan TBM'lerin özellikleri

Şiltsiz TBM; sert ve kendini tutabilen formasyonda kullanılır. TBM arkasından tavan civataları veya dairevi destekleme (tahkimat) yapılır.

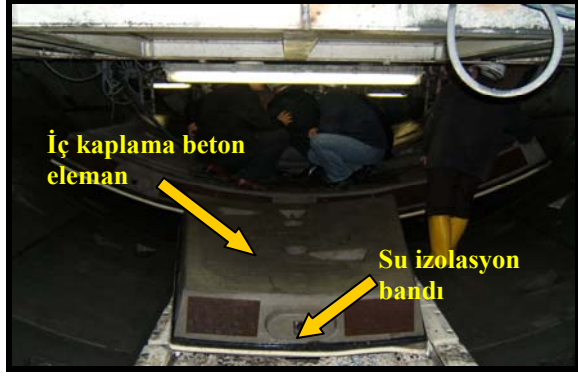
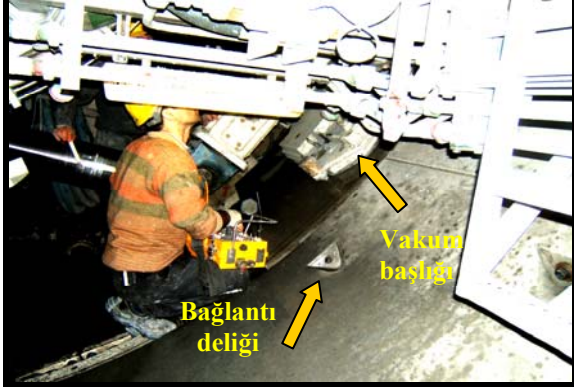
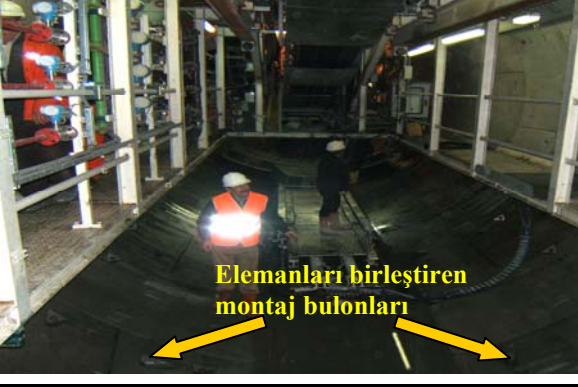
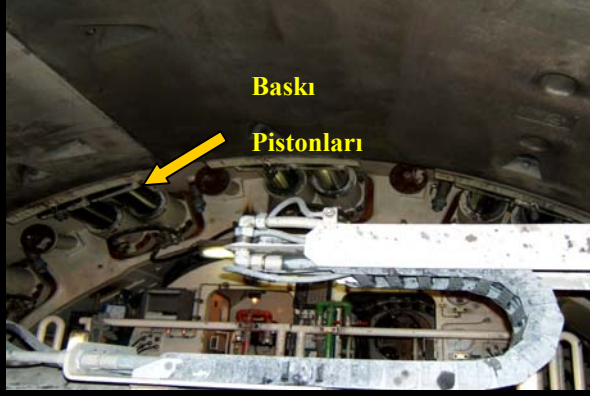
Tek Şiltli TBM; tam daire şeklinde komple bir şilt mevcuttur. Tek şiltli TBM'ler yumuşak zeminlerde, kompleks zeminlerde ve kaya içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilir. İlk destekleme ve son kaplama için ön üretilmiş beton elemanlar (*segment*) kullanılır.



Çift Şiltli TBM; kavrayıcı düzeneği ve ana şilt içerisine uzanabilen ikinci şilt sayesinde delme işlemi ile birlikte aynı anda kaplama betonu imalatlarının yapılması mümkündür. Sert ve kompleks zeminlerde kullanılır. Çift şiltli TBM'in, tek şiltli TBM'den daha yüksek ilerleme hızına sahip olması gereklidir.



Çizelge 2.7 TBM’de ön üretimli beton eleman uygulama aşamaları (H.İ.Ayış arşivinden)

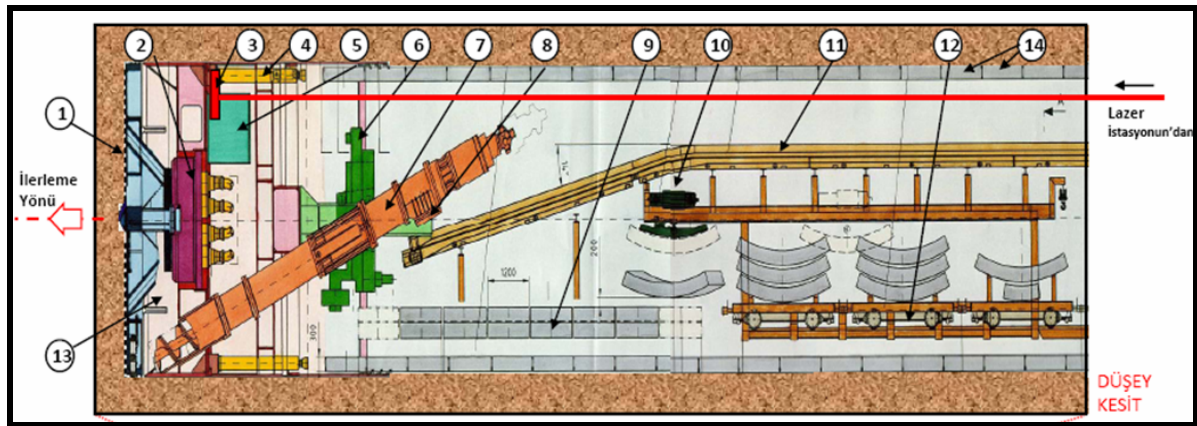
Ön üretimli (Segment) beton elemanlar	TBM içine alınan iç kaplama beton eleman
	
İç kaplama beton eleman, vakumlu ekipman yardımıyla şilt içerisine yerleştirildikten sonra, montaj bulonları ile bağlantısı yapılır.	Montaj tamamlandıktan sonra silindirik formlu şilt ilerleyerek çekilir. Hemen ardından iç kaplama ile zemin arasındaki boşluk, basınçlı çimento harcı enjeksiyonu ile doldurulur.
	
Kazı aşamasında itme kuvvetini sağlayan pistonlar, iç kaplama elemanlarına daimi bir baskı yaparak iç kaplama formunu korur.	İmalatları tamamlanan tünelden bir görünüm.
	

EPBM ve biraz daha karmaşık yapılı çamur basınçlı makineler Avrupa'da üretilmiş ancak, asıl gelişimleri Japonya'da gerçekleşmiştir.

1960-1980 yılları arasında Japonya'da yeraltında nakliye ağı genişletilirken, şilt türlerinden yüzlercesi üretilmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 1994).

2.5.2 EPBM ile Tünel Açma ve Kazı Destekleme

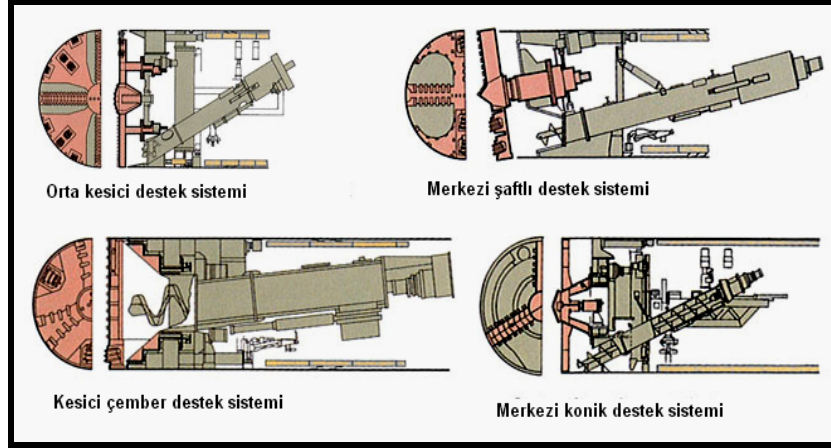
Temel çalışma prensibi, “kesici kafa ve ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması” olarak tanımlanabilir. Akıcı formasyon, döner kafadaki kesiciler tarafından kazılır. Formasyonu destekleme basıncı, kesici kafa haznesinin kazılan malzeme ile doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla aynaya transfer edilir. Ayna, daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanmış olur (Şekil 2.48). EPB makineleri destekleme sistemine ait tipler Şekil 2.49’da verilmiştir.



- | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1-Kesici Kafa | 6-Montaj Aparatı | 11-Konveyör |
| 2-Tahrik Ünitesi (Motor) | 7-Vidalı Konveyör | 12-Taşıma Dekovili |
| 3-Elektronik Hedef Panosu | 8-Vidalı Konveyör Kapağı | 13-Basınçlı Bölüm |
| 4- İtici Silindir | 9-Segment Besleme Ünitesi | 14-Yerleştirilmiş Segmentler |
| 5-Hava Kilidi | 10-Segment Vinci | |

Şekil 2.48 EPBM kısımları (Arıoğlu vd., 2002)

EPB makineleri çalışma prensiplerine bağlı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme Hapsedici Şiltleri (*Soil Confinement Shields*), Su Basıncını Destekleme Şiltleri (*Water Pressure Balance Shields*), Yüksek Yoğunluktaki Çamur Şiltleri (*High Density Slurry Shields*) ve Çamur Şiltleri (*Mud Shields*).



Şekil 2.49 EPB makinelerine ait destek sistemleri (www.p3planningengineer.com)

EPB makineleri aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- o 10 bar (1 MPa)'a kadar ulaşan basınç altında çalışabilir.
- o Formasyonu destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarsa formasyon çok daha sağlam bir hale gelecektir. Tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan basınç nedeni ile yüzeyde kabarmalar görülebilir.
- o Kazılan malzeme, bir vida (burgu) konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Malzeme çıkış hızı, makine ilerleme hızına eşit olmalıdır; zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez.
- o Malzeme, basıncı sağlayabilecek ve konveyörle taşınacak kıvamda değilse, ya kazı aynasında iken doğrudan ya da kesici kafa haznesine alındıktan sonra kıvamlaştırıcı katkı maddeleri enjekte etmek gerekebilir.
- o Tünel boyunca taşıma, bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi eklendikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir.
- o Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerin (*slurry machines*) yerlerini almaktadır.
- o En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının % 10-15 veya daha az olduğu durumlardır.

EPBM yöntemi ile ilgili diğer detaylar için bkz. Ek-4.

2.6 Aç-Kapa Yöntemi

Metro tünellerinin güzergah itibariyle ana yolların altından geçtiği yüzeye yakın kısımları, çıkış tünelleri, kanalizasyon ve içme suyu tünelleri ile yer altı geçitlerin (yaya, menfez vb.) inşası, aç-kapa yöntemi ile açılabilir. Aç-kapa yöntemi, diğer yöntemlere nazaran daha basit ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde önce kazı boşluğu çevresi betonarme kazık veya betonarme perde duvar ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır. Yeraltı suları yüzeye yakınsa yeraltı su seviyesi düşürülür veya su, derin kuyulara drene edilir. Tamamen açık havadaki duvar, örme usullerine göre yapılır. Tavanın oluşturulmasında eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur ve bu kemer kısmı da açık havada oluşturulacağından fazla güçlüklerle karşılaşmaz. Eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir. Yerleşim alanları içerisinde yapılan kazı çalışmaları, gürültü ve trafiğin engellenmesi gibi zararları nedeniyle pek tercih sebebi değildir. Trafik gidişatını engellemek için seyyar köprüler kullanılabilir. Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen bir tünelden görünüm Şekil 2.50’ de verilmiştir.



Şekil 2.50 Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen tünel

Aç-Kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı, tavanda çökme (tasman) oluşmamasıdır. Bu nedenle çevredeki yapılara zarar vermeden geçilmesi mümkündür. Ayrıca diğer yöntemlerle yeteri kadar yapılamayan izolasyon işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilir (Palmstorn vd., 1988).

3. PÜSKÜRTME BETON TEKNOLOJİSİ

Püskürtme beton; agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı karışımının boru hattı içerisinde basınçlı havayla taşındığı, püskürtme ile yerleşen beton olarak tanımlanır. Standart betona göre kalıp gerektirmeden yerleştirilmesi, priz hızlandırıcı katkıları yardımıyla taşıyıcılık görevini hemen yerine getirmeye başlaması gibi avantajları nedeniyle yeraltı mühendislik yapılarında vazgeçilmez hale gelmiştir. Püskürtme beton ayrıca baraj yapıları, şevler, hasarlı binaların onarımı ve güçlendirilmesi vb. alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Püskürtme beton uygulama alanlarından görünümeler Şekil 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1 a) Tünel kazı destekleme b) Şev stabilitesi c) Kazı-iksa sistemi d) Bina güçlendirme uygulamalarında püskürtme beton (www.admixtures.org)

3.1 Püskürtme Betonun Tarihsel Gelişimi

1907 yılında, Carl Ethan Akeley⁴, ismini verdiği püskürtme beton aleti (Şekil 3.2) ve tabancasının (Cement Gun) ilk modelini bir dinazor iskeletini kaplamak üzere geliştirdi (Karakuş ve Fowell, 2004).

⁴ Doğabilimci, avcı, kaşif ve bilim adamı özelliklerine sahip Carl Ethan Akeley ilk püskürtme beton makinesi ve tabancasını hayvan iskeletlerinin gerçek modellerini yaratmak üzere tasarlamıştır.



Şekil 3.2 Akeley'in 1907'de geliştirdiği püskürtme beton aleti (www.shotcrete.org)

Akeley tarafından geliştirilen iki bölümlü çimento tabancası ile **1910** yılında püskürtme beton ilk defa inşaat sektörüne girmiştir. Püskürtme beton, tabanca sistemi kullanılarak basınçlı hava yardımıyla yüzeye püskürtülerek uygulanmıştır (Şekil 3.3). Ekipmanın **1911** yılında patenti alınmış, kum-çimento karışımına *gunite* adı verilmiştir. Takip eden yıllarda, *cuncret*, *pneocret*, *plascirete*, *letcrete* gibi isimler verilmiş ve küçük çapta üretime başlanmıştır.



Şekil 3.3 Tabanca sistemi kullanılarak püskürtme betonun yüzeye uygulanması (www.allentownshotcrete.com)

1930'lu yılların ilk döneminde, Amerikan Demiryolları Mühendisler Birliği (American Railway Engineering Association, AREA) gunite üretimine *shotcrete* adını vermiştir, günümüzde de bu isim aynen kullanılmaktadır.

1931 yılında, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), *kuru üretim püskürtme beton* tarifini yapmıştır. Kuru üretim püskürtme beton, ince ve iri agrega ile çimento karışımından oluşmaktadır.

1950 yılından bu yana, besleme bandı, kuru üretim miktarı, yaş üretim ve püskürtme ekipmanlarında önemli gelişmeler olmuştur.

1960’lardan sonra ilkeleri Rabcewicz ve arkadaşları tarafından ortaya konulan *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi* (NATM)’nde püskürtme beton; hızlı yerleştirilebilmesi, değişik zemin koşulları ve kesit geometrilerine kolaylıkla uyum sağlaması nedeni ile hasır çelik ve kaya bulonundan oluşan destekleme sisteminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. 1970’lerden sonra hasır çeliğin yerine çelik lifte kullanılmaya başlanmıştır.

3.2 Püskürtme Betonun Tünel Kazı İksa (Destekleme) Sistemindeki İşlevsel Özellikleri

Gelişen teknolojiyle birlikte tünellerin kazı destek sisteminde hız, maliyet ve güvenlik açısından uygun çözüm imkanı sunan püskürtme beton, her geçen gün daha fazla kullanıcı tarafından tercih edilip uygulanmaktadır.

Püskürtme beton, yeraltı yapılarında başlıca şu işlevleri yerine getirmektedir; (Mahar vd., 1975; Cecil, 1970), (Çizelge 3.1).

Kaya mekaniği açısından yukarıda belirtilen avantajların yanı sıra püskürtme betonun uygulama açısından sağladığı yararlar (Arioğlu vd., 2008) ise şöyle özetlenebilir :

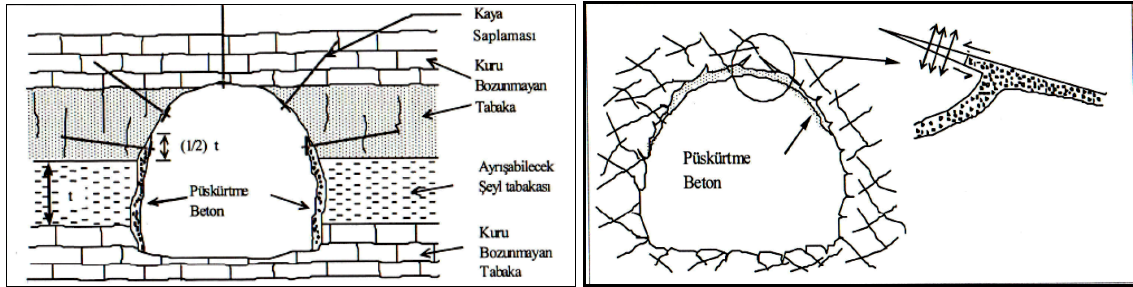
- o Kazı yüzeyine açılır açılmaz hemen uygulanabilir,
- o Betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması bir arada yapılır,
- o Kalıp gerektirmeden yerleştirildiği için malzeme ve işçilik tasarrufu sağlar,
- o Yüksek uygulama hızına sahiptir ve farklı çalışma koşullarında istenilen kalınlık sağlanabilir,
- o Farklı boyut ve geometrideki açıklık kesitlerinde uygulanabilir.

İstanbul Metrosunda uygulanan farklı geometriye sahip tünel tiplerinde püskürtme beton uygulamasına ait kesitler Şekil 2.35’te verilmiştir.

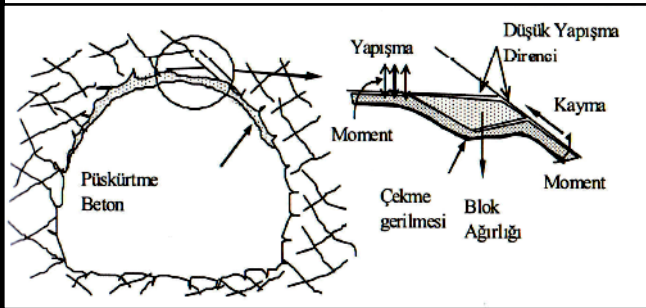
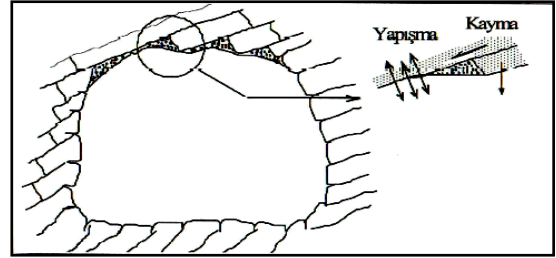
Çizelge 3.1 Püskürtme beton kaplamanın işlevleri (Mahar vd., 1975; Cecil, 1970)

o Püskürtme beton kaplaması, kazılan yüzeylerin hava ve su ile temasını keserek yüzeyin bozulmasını ve gevşemeleri önler.

o Püskürtülen taze beton, kırık ve çatlaklar arasına girerek süreksizlik noktalarındaki gerilme yoğunluklarını azaltırken, kayacın yerindeki kayma dayanımını artırır.

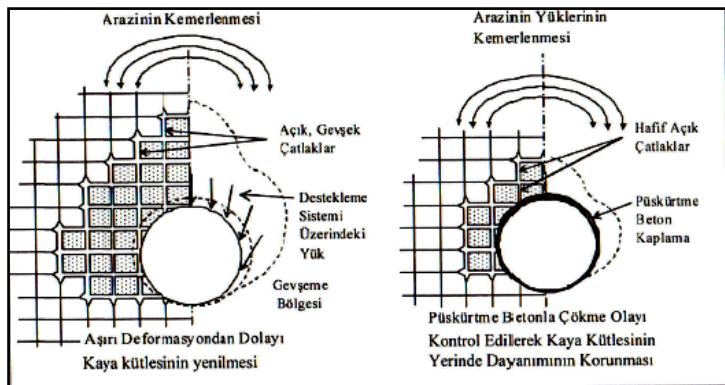


o Püskürtme beton sağladığı yapışma ve kayma direnci vasıtası ile, kırık ve çatlaklarla sınırlanmış kaya bloklarının oluşturduğu yük çevresindeki kaya kütlelerine aktararak kayanın kendi kendini taşıması sağlanmış olur.



o Kaya parçaları arasındaki bağlayıcılık oldukça düşük ise, yüzeye uygulanan püskürtme beton kaplaması statik bakımdan bir kabuk gibi çalışarak taşıyıcılık sağlar.

o Çöken, gevşeyen arazi tabakalarına karşı erken dayanım göstererek iyi bir kemerleşme sağlar ve dayanımının zamanla artmasıyla gevşemeleri önleyip deformasyonları minimize eder.



3.3 Püskürtme Betonun Uygulama Yöntemleri

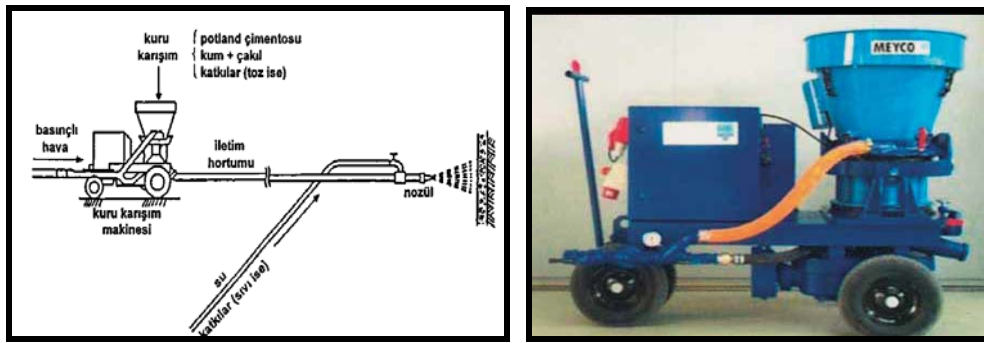
Karışım tasarımı, taşıma ve yerleştirmede kullanılan ekipman, karışım bileşenlerinin ilave edilme şekli ve zamanı açısından farklılıklar gösteren püskürtme beton, Kuru Karışım Sistemi ve Yaş Karışım Sistemi olarak iki şekilde uygulanır.

Püskürtme beton kalitesini genel olarak etkileyen faktörler şunlardır:

- o Agrega gradasyonu ve ince/iri agrega oranı,
- o Çimento cinsi ve kalitesi,
- o Su/çimento oranı,
- o Priz hızlandırıcı katkı cinsi ve dozajı,
- o Geri sıçrama oranı,
- o Püskürtme uzaklığı ve açısı,
- o Püskürtme basıncı

3.3.1 Kuru Karışım Sistemi

Belirlenen oranlarda hazırlanan çimento ve agrega karışımı, püskürtme beton makinesine kuru olarak beslenir. Beton santralinden kuru olarak alınan karışıma, tabanca ucundan basınçlı su ilave edilerek uygulama yapılır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Kuru karışım püskürtme beton makinesi kısımları (www.beksa.com.tr)

Kuru karışım püskürtme beton sisteminin başlıca özellikleri şunlardır (www.beksa.com.tr ; Gürol ve Doyuran, 2009) :

- Bu yöntem küçük ve basit ekipmanlar kullanılması nedeniyle düşük hacimli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

- Karışıma eklenecek olan priz hızlandırıcı sıvı halde ise tabanca ucundan su ile birlikte, toz halde ise püskürtme beton makinesine besleme sırasında dozaj ünitesi ile ilave edilir.
- Çimentonun agregayı iyice sarması ve toz oluşumunun önlenmesi açısından agreganın, ağırlığının % 3-8' i oranında nem içermesi istenir.
- Su/çimento oranı, 0.40–0.45 aralığında olmalıdır.
- Karışıma lif eklenecekse, karışım hazırlama aşamasında ilave edilmelidir.
- Kuru karışım, tabancadan geçerken tamamen ıslanmalı ve su basıncı (en az 6 kg/cm²) bunu sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Püskürtme ucuna malzeme taşıyan hortum çapı, en büyük agrega çapının (maks.19 mm) en az 3 katı olmalıdır.
- Nozül genellikle elle tutularak, yüzeye operatör tarafından yönlendirilmektedir.

Dezavantajları ise şunlardır :

- Püskürtme sırasındaki toz oluşumu, iş yeri güvenliği ve işçi sağlığı açısından olumsuz bir durumdur.
- Karışıma ilave edilen su miktarı iyi ayarlanmalıdır, az su verilmesi durumunda, toz problemi, fazla su verilmesi halinde ise betonun yüzeyden akma sorunu yaşanır.
- Uygulama ekonomisini etkileyen en önemli unsur, geri sıçrama oranının yüksek olmasıdır. Geri sıçrama miktarı; karışım bileşenleri, uygulama yüzeyinin konumu ve operatörün deneyimine bağlı olarak % 15-35 arasında değişebilmektedir (Malbye,2006).

Son yıllarda, su girişinin tabanca ucundan 1-3 m geriye alınması sonucu, kuru karışımın daha homojen ıslandığı, toz oluşumunun ve geri sıçramanın azaldığı gözlenmiştir (www.beksa.com.tr).

3.3.2 Yaş Karışım Sistemi

Yaş püskürtme beton uygulamasında karışım, beton santralinde ıslak olarak hazırlanıp, beton pompasına beslenir. Karışım, yüzeye püskürtülmesi için gerekli hava miktarının seçimine bağlı olarak pompa çıkışında veya püskürtme ucunda verilebilir. Yaş karışım püskürtme beton makinesi görünümü Şekil 3.5' te verilmiştir.



Şekil 3.5 Yaş karışım püskürtme beton makinesi (www.mekanikmakina.com.tr)

Bu sistemde püskürtülen beton yüzeyi ile püskürtme beton tabancası arasındaki mesafe (0.6–1.8 m) betonun kıvamına göre en iyi sonucu alacak şekilde operatör tarafından ayarlanır. Amaç, geri sıçramayı en aza indirmek ve en iyi yerleşimi sağlamaktır.

3.3.3 Kuru ve Yaş Püskürtme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Kuru karışım sistemi; yaş karışım sistemine göre küçük çaplı üretimlerde daha ekonomik olduğundan yaygın kullanılmaktadır. Buna karşılık; kalite, geri sıçramanın az olması (% 5-10) ve kapasite (10-18 m³/saat) bakımından büyük çaplı üretimlerde, yaş sistemin kuru sisteme göre üstünlükleri bulunmaktadır. Kuru ve yaş püskürtme beton sistemleri, maliyet, ekipman, uygulama, geri sıçrama, kalite, toz ve kapasite faktörleri göz önüne alınarak Çizelge 3.2’de karşılaştırılmıştır.

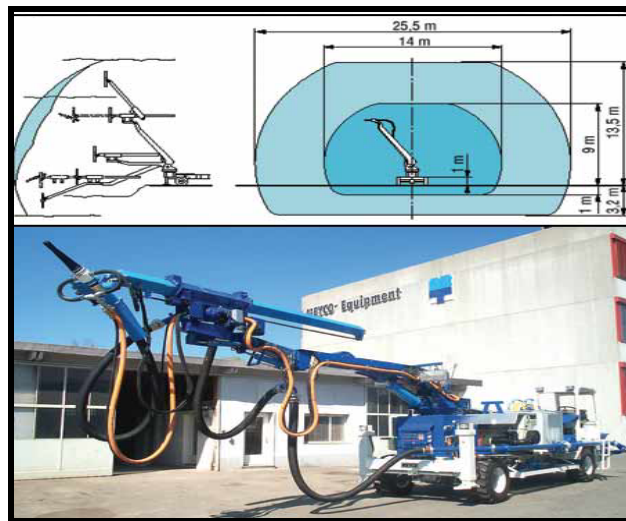
3.3.4 Püskürtme Beton Ekipmanları

Kuru karışım sisteminde; *silindir hazneli* ve *tekerlek* tipi olmak üzere iki çeşit makine mevcuttur. Yaş karışım sisteminde ise *pistonlu*, *sıkıştırılmalı*, *pnömatik* olmak üzere üç tip pompa makinesi vardır. İletim hatlarında aşınmaya daha dayanıklı olması bakımından sabit olan kısımlarda çelik boru, püskürtme ucuna yakın olan kısımlarda ise esnek olması nedeniyle kauçuk hortumlar kullanılmaktadır. Püskürtme ucu, kuru yöntemde karışıma suyun ilave edildiği kısımdır. Kuru karışım sisteminde; püskürtme kapasitesi 0.6-11.5 m³/saat aralığında olup, bu sınırlar içerisinde kapasite, motorun gücü ile ayarlanabilmektedir. İletim borusu (hortum) çapı (25-75 mm) seçiminde iletim mesafesi, uygulama kapasitesi ve maksimum agrega çapı dikkate alınır. Yaş karışım sisteminde beton, pompa yardımıyla püskürtme ucuna iletilir. Püskürtme kapasitesi (2-15 m³/saat) pompa başında bulunan operatör tarafından kontrol edilir. Bu sistemde basınçlı hava gereksinimi ~1m³/saat olup priz hızlandırıcı, basınçlı hava ile püskürtme ucunda verilmektedir (Doyuran ve Köksal, 2000).

Çizelge 3.2 Kuru ve yaş püskürtme sistemlerinin karşılaştırılması (Girgin vd., 1998)

FAKTÖR	KURU SİSTEM	YAŞ SİSTEM
UYGULAMA	-Küçük ölçekli sık ve değişken destekleme işlemlerinin yer aldığı uygulamalar için daha elverişlidir.	-Büyük ölçekli ve daha rutin işlemlerin yer aldığı destekleme için daha elverişlidir.
EKİPMAN	-Daha ekonomik ve küçük yapıda, esnek donanımlara sahiptir. -Toplam yatırım maliyeti daha az, bakımı kolaydır.	-Daha büyük yapılarda, az sayıda fakat toplam yatırım maliyeti 3-10 kat fazla olan makineler gerektirir.
KAPASİTE, VERİM	-Küçük kapasiteli (5 m ³ /saat) ise düşük verimlidir. -İletim mesafesi daha kısadır (50-100m)	-Büyük kapasiteli (10-18m ³ /saat) -Daha verimli ancak iletim mesafesi kısadır.
KARIŞIM HAZIRLAMA	-Küçük kapasiteli karışım hazırlama ekipmanları ile yerinde hazırlanabilir. -Islak ortamda fazla bekletilmez.	-Beton santralinde daha denetimli beton hazırlanabilir. -Hazır beton kullanılabilir. -İletim süresi kısadır.
TOZ OLUŞUMU	-İş yeri çalışma konforunu azaltır. İşçi sağlığı problemlerine yol açar. -Nemli agrega ve toz azaltma katkıları ile azaltılabilir.	-Çok az toz meydana gelir.
KALİTE KONTROL	-Düşük su/çimento oranlarında üretim yapılabilir. -Su miktarı ayarlanabilir, ancak bu operatörün deneyimine bağlıdır.	-Su miktarı sabit olup, daha üniform bir karışım uygulanır. -Pompalanabilirlik koşullarından dolayı düşük su/çimento oranlarında çalışmaz.
GERİ SIÇRAMA	Duvarda % 15-40 Tavanda % 20-50	Her yüzeyde % 5-10

Püskürtme beton robot makinesi görünümü Şekil 3.6'da, uygulama görünümleri ise Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.6 Püskürtme beton robot makinesi (www.aykimtas.com)



Şekil 3.7 Püskürtme betonun robot makinesiyle uygulanması (www.putzmeister.com.tr)

3.4 Püskürtme Betonda Priz Hızlandırıcı Kullanımı

3.4.1 Genel

Priz hızlandırıcılar kuru ve yaş püskürtme beton uygulamalarında gittikçe daha sık kullanılmaktadır. Hızlandırıcılar priz süresini kısaltmak, erken dayanımı arttırmak, püskürtme betonun yüzeye yapışma kalitesini iyileştirmek ve geri sıçramayı azaltmak amacıyla kullanılır. Priz hızlandırıcıların performansı; çimentonun kimyasal bileşimi, mineral katkıların cinsi ve dozajı, beton ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir.

Püskürtme betonda kullanılan priz hızlandırıcı katkı türleri;

- Alkali İçeren Priz Hızlandırıcılar,
- Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcılar,

olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Alkali içeren hızlandırıcı kullanılması durumunda söz konusu bazı problemler şunlardır :

- o Artan kullanım dozajına da bağlı olarak, 28 günlük dayanımda kontrol numunesine oranla, % 20-50 oranında azalma görülmesi,
- o Yüksek pH seviyesinin deri, solunum yolları ve gözde şiddetli tahriş ve yanıklar oluşturması,
- o Alkali-agrega reaksiyon riski,

Bu sorunlara çözüm olarak son dönemlerde alkali içermeyen priz hızlandırıcılar geliştirilmiştir. Buna paralel olarak şartnamelerine ve yönetmeliklere alkali içeren hızlandırıcılar için sınırlamalar getirilmiştir.

Çizelge 3.3 Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri (Arioğlu vd., 2008)

Özellik	Değer	Kaynak
Priz Süresi: Priz Başlangıcı Priz Sonu	≤ 10 dk. 3-10 dk. ≤ 60 dk. 9-30 dk.	EN 196-3 Malmberg, 1993 EN 196-3 Malmberg, 1993
Alkali İçeren Priz Hızlandırıcı Priz Başlangıcı Priz Sonu	< 60 sn. < 3.5 dk.	Melbye, 2006
Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcı Priz Başlangıcı Priz Sonu	< 4 dk. < 8 dk.	Melbye, 2006
Al_2O_3 içeriği	Hızlandırıcı dozajı x Al_2O_3 içeriği < 115	
Basınç Dayanımında Azalma	$\leq \% 45$ -toz katkı- $\leq \% 30$ -sıvı katkı- $\leq \% 25$	ACS, 1990 EFNARC, 1999
Suda Çözünebilir Maddeler: Alüminat Klorür	$\leq \% 3$ (püskürtme betonla temasta suda $SO_4 > 600$ mg/l) $< \% 1$	ACS, 1990
Sülfat içeriği (SO_3)	$< \% 4.8$	ACS, 2006
Eşdeğer Na_2O içeriği	$< \% 1$	ACS, 2006
pH	$3 < pH < 8$	ACS, 2006
Uygunluk Testi: Proktor testi	≥ 110 N, (10 dk'da)	EFNARC, 1992
ACS=Avusturya Beton Birliği, EFNARC=Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu		

3.4.1.1 Alkali İçeren Priz Hızlandırıcı Türleri

Alkali içeren priz hızlandırıcı türleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler Çizelge 3.4'te verilmiştir. Alkali içeren priz hızlandırıcılar ile ilgili deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular ve üretilen grafikler ise aşağıda verilmiştir.

- Prudencio vd., 1996 çalışmasında karbonat (% 0-10) ve alüminat (% 0-3.8) bazlı iki tip hızlandırıcı PÇ42.5 eşdeğeri çimento (Tip I) ile denenmiş, üç ayrı karışım yapılmıştır (C1, C2 ve A), (Çizelge 3.5). Çimento dozajı 400 kg/m^3 ve su/çimento oranı 0.35' tir.

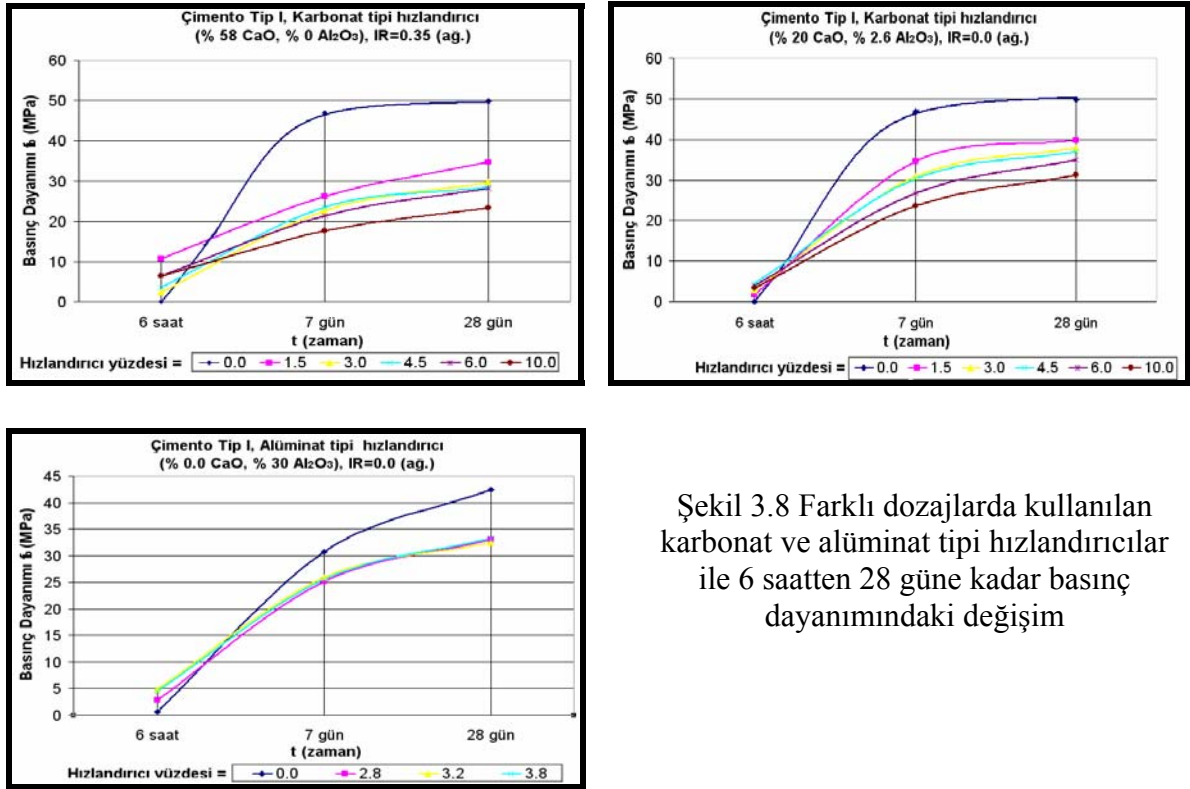
Çizelge 3.4 Alkali içeren priz hızlandırıcı katkıların özellikleri

Toprak Metallerin Karbonat ve Hidroksit Bileşimleri	- o Toz haldedir, genellikle kuru karışım püskürtme betonda kullanılır. - o C_3S'in hidratasyonunu hızlandırarak etkisini gösterir. - o Kullanım dozajı, çimento ağırlığının % 2.5- 6'sı düzeyindedir. - o Performansı, çimentonun kimyasal bileşimi, mineral katkıları ve ortam sıcaklığından çok etkilenir. - o 28 günlük dayanımda % 30-40 oranında azalma olağan bir durumdur (Prudenico vd., 1996). - o Yakın zamana dek, kuru karışımda en sık kullanılan priz hızlandırıcı tipiydi.
Sodyum ve Potasyum Alüminatlar	- o Sıvı formda olup, kuru ve yaş püskürtme betonda kullanılır. - o Kullanım dozajı genellikle çimento ağırlığına oranla % 2.5-5.5 düzeyindedir. - o Alçı taşıyla reaksiyona girerek çimentonun priz hızını ani bir şekilde artırır. - o Potasyum alüminat bazlı olanlar sodyum alüminat bazlılara göre genellikle daha iyi sonuç verir. - o Etkinliği, çimento ve mineral katkının inceliği ve bileşiminden karbonat bazlı olanlara göre daha az etkilenir. - o Kontrol betonuna kıyasla dayanımdaki azalma 28 gün bazında %20-25 düzeyindedir. - o Yaş karışım püskürtme betonda erken dayanım, kuru karışıma oranla daha yüksektir. - o Püskürtme beton kaplaması 20 cm'ye kadar tek kademede uygulanabilir. (Huber, 1995) - o Alkali oranı yüksek olduğu için deri sağlığına olumsuz etkileri mevcuttur.
Sodyum Silikatlar (Cam suyu)	- o Sodyum silikat (Na_2SiO_3) bazlıdır. - o Sıvı oldukları için genellikle yaş karışım püskürtme betonda % 4-6 oranında kullanılır (Melbye, 1996; Hobart vd., 2001). - o Püskürtme betonun yüzeye yapışma özelliğini artırır, - o Tüm çimento tipleri ile uyumudur, - o Alüminat bazlı olanların tersine, erken hidratasyon sürecinde yer almama ve 28 günlük dayanımda daha düşük oranda azalma, - o 8-15 cm püskürtme beton kalınlığında uygulanabilir, - o $pH < 12$ olduğundan deride tahrişe neden olmaz, - o Yüksek dozaj kullanımı; kuruma rötresinde artışa, püskürtme betonun yüzeye yapışma dayanımında azalmaya neden olur (Lukas ve Kusterle, 1990) - o Kullanım dozajının, çimento ağırlığının (veya toplam bağlayıcı miktarı) % 15'ini geçmemesi ve bu durumda 28 günlük dayanımda en fazla % 20 dayanım azalmasına izin verilmesi tavsiye edilmiştir (Austrian Concrete Society, 1990). Bu hızlandırıcı yakın zamana dek, kuru karışımda en sık kullanılan priz hızlandırıcı tipiydi.

Çizelge 3.5 Kullanılan hızlandırıcı katkıları

Karışım Sınıfı	Kimyasal Özellik	Karışım Cinsi	Kimyasal İçerik	
			CaO	Al ₂ O ₃
C1	Karbonat	Toz	58	0
C2	Karbonat	Toz	20	2.6
A	Alüminyum	Sıvı	0	30

DeneySEL verilerden hareketle bu tezde üretilen grafikler ve değerlendirmeler şunlardır:



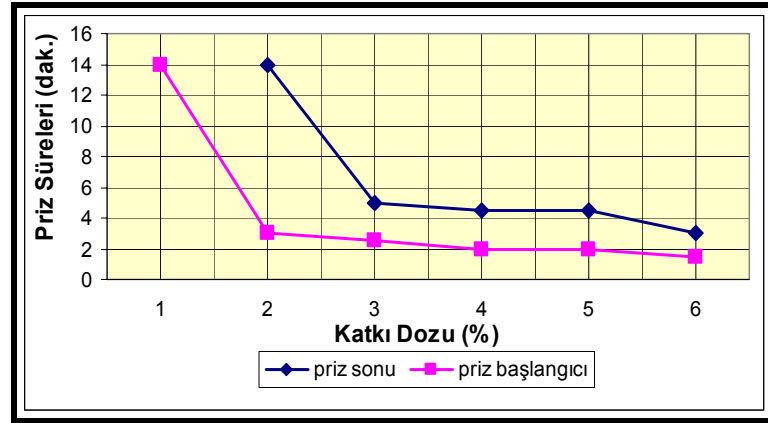
o Katkısız betonla kıyaslandığında; karbonat ve alüminat bazlı -alkali- hızlandırıcı içeren betonların 28 günlük dayanımlarında önemli kayıpların olduğu gözlenmektedir. Kayıp oranı CaO yüzdesindeki artış ile artmaktadır.

o I.tip çimento için 6 saatlik erken dayanımdaki en önemli artış % 58 CaO içeren karbonat tipinin (C1) % 1.5 oranında kullanımı ile ortaya çıkmıştır; daha fazla dozaj, erken dayanımı olumsuz etkilemektedir. Düşük CaO içerikli (C2) hızlandırıcının, dozajı arttırılsa bile, erken dayanıma etkisi zayıftır. Alüminat tipinin (A) değişik dozajları da erken dayanım açısından C1 kadar etkin olamamıştır.

o Karbonat bazlı hızlandırıcılar kullanıldığında, nihai dayanımda dozaj ile orantılı olarak azalma gözlenirken; alüminat hızlandırıcı içeren numunelerin nihai dayanımı dozajdan etkilenmemiştir.

- Sodyum alüminat (%2-4) bazlı hızlandırıcıların priz süresi ve beton dayanımına etkisinin araştırıldığı bir deneysel çalışmada (Yıldırım vd., 2002), üç tip çimento (PÇ42.5, KÇ32.5 ve TÇ32.5) ile altı farklı karışım (çimento miktarı: 425 kg/m³, su/çimento oranı: 0.48) hazırlanmıştır. Çalışmadaki deneysel verilerden bu tez kapsamında üretilen diyagramlar ve sonuçlar aşağıda verilmiştir:

o % 2'lik katkı kullanımı priz başlangıcını, % 3'lük katkı kullanımı ise priz sonunu dramatik bir şekilde azaltmıştır. Katkı dozundaki daha fazla artışın priz süresi açısından etkisiz olduğu söylenebilir (Şekil 3.9).



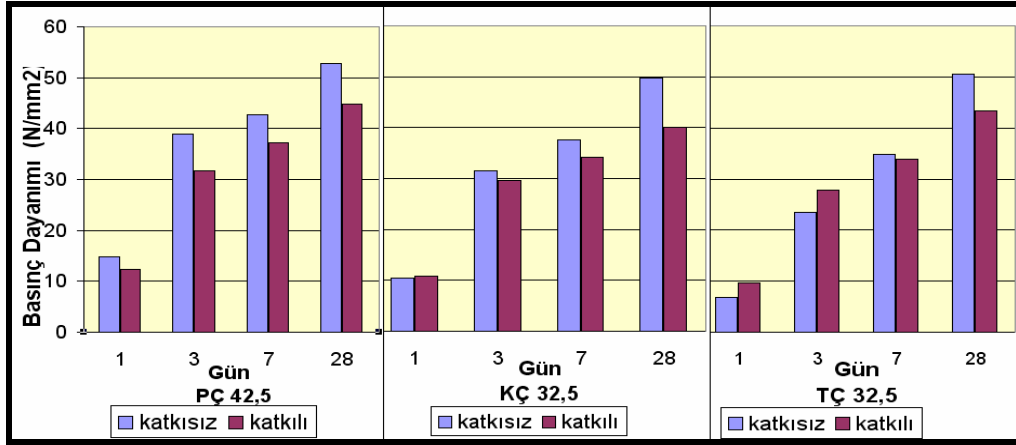
Şekil 3.9 Çimento uyuşum deneyleri

o Hızlandırıcıların çimentolar ile uyuşum deneyleri sonucunda, priz başlangıcı ve sonu için gerekli 3 ve 12 dk. şartları tüm katkı dozajları için sağlanmıştır (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6 Çimento - Katkı uyuşumu için priz deneyleri

Çimento Cinsi	Katkı Yüzdesi	2%	3%	4%
TÇ 32.5	Priz başlangıcı	61 sn.	55 sn.	35 sn.
	Priz sonu	190 sn.	92 sn.	64 sn.
KÇ 32.5	Priz başlangıcı	55 sn.	60 sn.	-
	Priz sonu	130 sn.	130 sn.	-
PÇ 42.5	Priz başlangıcı	47 sn.	50 sn.	-
	Priz sonu	185 sn.	155 sn.	-

o Ekonomik ve optimum katkı oranı açısından % 3'lük katkı oranı seçilmiştir. Her karışım için 15x15x15 cm boyutunda küp numuneler üretilerek 1, 3, 7 ve 28. günlerde basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Farklı çimentoların deney sonuçları Şekil 3.10'da karşılaştırmalı olarak topluca verilmiştir. Buna göre,



Şekil 3.10 Basınç dayanımı-kür süresi ilişkisi

- o PÇ42.5 tipi çimento, priz hızlandırıcı katkı ile kullanıldığında dayanım, 1.günden itibaren, katkısız olana kıyasla azalmaktadır.
- o Priz hızlandırıcı KÇ32.5 tipi çimento ile kullanıldığında, katkısız betona göre dayanımdaki azalma 3.günden itibaren başlamaktadır.
- o TÇ32.5 çimentolarda ise dayanımlar 1-3. günde katkısız olana kıyasla daha yüksek olup 7.günden itibaren azalmaktadır.
- o %3 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanmak PÇ ve TÇ çimentosu ile üretilen betonların 28 gündeki basınç dayanımlarını % 15, KÇ ile üretilenlerde %20 oranında mukavemeti düşürmektedir. Ancak bu azalım standardın öngördüğü sınırlar içindedir.

3.4.1.2 Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcı Türleri

Alkali içermeyen priz hızlandırıcı katkıları, alkali içerenlerin aksine pH<12 olması nedeniyle deri sağlığına olumsuz bir etkisi yoktur. Alkali içermeyen priz hızlandırıcılar, toz veya sıvı olarak iki grupta incelenir.

Alkali İçermeyen Toz Hızlandırıcılar

1990'lı yıllarda geliştirilen alkali içermeyen toz hızlandırıcılar, genellikle kalsiyum alüminat bazlı katkılardır (Lukas vd., 1995).

Temel özellikleri şunlardır;

- Kullanım dozajı çimento ağırlığının % 6-12'si düzeyindedir (Hirose and Yukinori, 1993) , %7'nin altındaki dozajlarda ise etkin değildir (Tazawa, 1995).
- Priz hızlandırma işlemi; hızlandırıcı-çimento reaksiyonuna müdahale etmeden su ile reaksiyon sonucu meydana gelir.
- Nihai dayanımdaki azalma, alkali içerenlere göre daha düşüktür.

Günümüzde de kullanılmaya başlanan tamamen alkalisiz hızlandırıcılarda gerekli erken dayanım için düşük dozajlar (%4) yeterli olmaktadır. %8 dozajına kadar nihai dayanımda bir azalma gözlenmez; ancak %10 düzeyinin aşılması durumunda ciddi bir dayanım kaybı oluşur (Lukas vd., 1995).

Ancak;

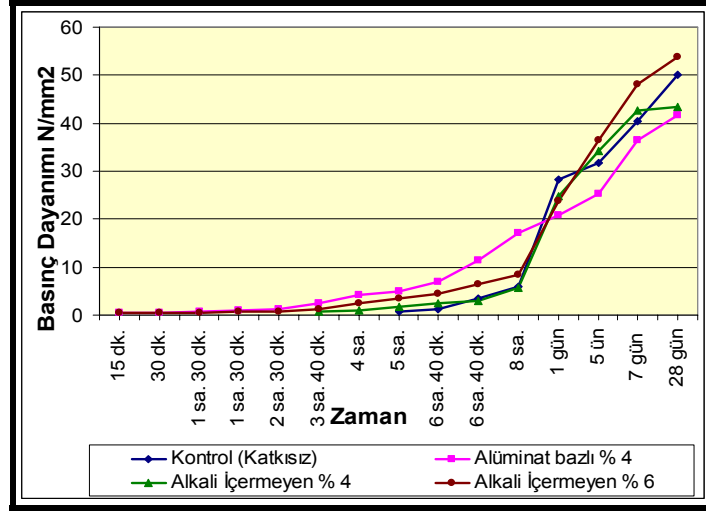
- Homojen karışım elde etmek için karışımda özel değişiklikler gereklidir.
- Geri sıçrama miktarının alkali içermeyen sıvı katkılara göre %10-15 oranında daha fazla olduğu belirtilmiştir.
- Neme karşı duyarlıdır. Bu durumda karışıma kurutucu öge eklenmesi önerilmiştir. (Melbye, 1996)

Alkali İçermeyen Sıvı Hızlandırıcılar

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, bu tip hızlandırıcı ile üretilen püskürtme betonda, çimento hidratasyon ürünlerinin özelliklerinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. (Ipswich, 1996). Sıvı hızlandırıcıların pH değeri 3–5.5 olup, alkali oranları %0.3'ün altındadır ve bağlayıcının %3–10'u oranında kullanılır. Kontrol numunesine göre 28 günlük dayanımda azalma oluşmaz, tünel tavan kısımlarında 30 cm kalınlığa kadar izin verilir. Alkali içeren ve alkali içermeyen alüminat bazlı hızlandırıcıların performansı aşağıda karşılaştırılmıştır (Garshol, 1996):

- Alüminat bazlı alkali içeren hızlandırıcı (%4) erken dayanımda (1 güne kadar), alkali içermeyen hızlandırıcıya göre daha iyi sonuçlar vermektedir. 1 günden sonra ise alkali içermeyen hızlandırıcı, alkali içeren (alüminat bazlı) hızlandırıcının dayanımını aşmaktadır.
- Alkali içermeyen %6 hızlandırıcı kullanımı ile 5 günden itibaren kontrol betonundan bile daha yüksek dayanım elde edilmektedir.

Deneysel verilerden faydalanılarak (Prudencio, 1998), alkali içermeyen hızlandırıcı katkılı betonlar ile alüminat bazlı hızlandırıcı katkılı betonların basınç dayanımları arasındaki elde edilen ilişki aşağıdaki verilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Farklı dozajlardaki alkali içermeyen hızlandırıcı katkıları ile alüminat bazlı hızlandırıcı katkılı betonların kıyaslanması

3.4.2 Priz Hızlandırıcıların Genel Değerlendirilmesi

Bu çalışmada incelenen priz hızlandırıcı toplu olarak Çizelge 3.7' de değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.7 Katkı türü ve özelliklerine göre priz hızlandırıcı katkıların genel değerlendirilmesi

Özellikler	Katkı Türü				
	Alkali İçeren			Alkali İçermeyen	
	Toprak Metallerin Karbonat ve Hidroksit Bileşimleri	Sodyum ve Potasyum Alüminatlar	Sodyum Silikatlar (Cam Suyu)	Toz Hızlandırıcılar	Sıvı Hızlandırıcılar
Kullanılan miktar (çim. ağı. %)	2.5- 6	2.5- 5.5	4 - 6	6 -12	3- 10
Erken dayanım	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
28 günlük dayanımdaki azalma	% 30- 40	% 20- 25	% 20 -30	Alkali içerenlere göre daha düşük	28 günlük dayanımda azalma yoktur
Kaplama kalınlığı (cm)	5-10	10-20	8-15	25	30
Deri sağlığı	Sağlıklı değil.	6<pH<7.5 Tahrişe neden olmaz.	pH <12 Tahrişe neden olmaz.	Tahrişe neden olmaz.	3<pH<5.5 Tahrişe neden olmaz.

3.5 Püskürtme Betonda Pozzolanik Katkı Kullanımı

Pozzolanik katkıları püskürtme betonda;

- o agrega boyut dağılımını optimize etmesi,
- o bağlayıcı madde içeriğinin artırılması,
- o taze veya sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığının artırılması,
- o geri sıçrama oranının azaltılması,
- o priz hızlandırıcı miktarının değiştirilmesi

amacıyla kullanılırlar.

Pozzolanik katkı maddesi olarak püskürtme betonda;

- o Silis Dumanı,
- o Uçucu Kül,
- o Öğütülmüş Fırın Cürufu

kullanılmaktadır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımı aynı zamanda çimento maliyetinde tasarruf sağlamaktadır.

3.5.1 Silis Dumanı Kullanımı

Silis dumanı, yüksek maliyetine karşın; çok ince dane boyutu (0.1-0.2 μm), yüksek özgül yüzey (20-35 m^2/g), mikro boşlukları doldurma yeteneği, erken dayanımda artış, betonda geçirimsizliğinde azalma, dayanım ve dayanıklılığı artırma, donma-çözülme dayanımında iyileşme, kimyasal etkilere karşı dayanıklılıkta artış, elektrik iletkenliğinde azalma, lif kullanılması halinde lifler ile çimento harcı arasındaki yapışma özelliğini artırma özelliklerine sahiptir.

Silis dumanı çimento ağırlığının;

- o yaşı karışım püskürtme betonda % 3-5'i oranında,
 - o kuru karışım püskürtme betonda % 8-10'i oranında,
 - o uçucu kül ile birlikte % 4-8'i oranında,
 - o sülfata dayanıklı çimento ile birlikte % 6-10'i oranında,
- kullanılmaktadır (Arıoğlu vd., 2008).

Püskürtme beton karışımına eklenmesi durumunda ilave olarak; tek seferde 20 cm' lik tabakalar halinde uygulama yapılması, yapışmayı arttırdığından priz hızlandırıcı tüketiminde azalma, geri sıçrama oranında azalma gibi özellikleri betona kazandırmaktadır (Arioğlu vd., 2008).

3.5.2 Diğer Mineral Katkıların Kullanımı

o Termik santrallardan elde edilen uçucu küller beton üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu kül, püskürtme betonda; dayanımı artırma, hidrasyon ısını düşürme, donatıda korozyon etkisini azaltma, işlenebilirliği artırma, dayanıklılığı yüksek ve düşük maliyetli beton üretimi gibi özelliklere sahiptir (Aruntaş, 2006).

o Çelik üretim tesislerinde, yüksek fırında yan ürün olarak meydana gelen yüksek fırın cürufu, değirmenlerde çimento inceliğine kadar öğütülerek çimentoya katılabilir. Uçucu kül kullanımına benzer özellikleri yanında betona sülfata karşı dayanım artışı ve maliyet tasarrufu sağlar. Kimyasal katkıların bir çoğu ile kullanımı da mümkündür (Arioğlu vd., 2008)

Puzzolanik katkıların çimento ile ikamesi için önerilen maksimum oranlar Çizelge 3.8'de verilmiştir (Melbye and Dimmock, 2001).

Çizelge 3.8 Çimento ile ikame edilen puzzolanik katkı miktarları

Puzzolanik Katkılar	Maksimum Katkı Miktarı
Silis Dumanı	% 15 Portland Çimento
Uçucu Kül	% 30 Portland Çimento
	% 15 Portland / Uçucu kül
	%20 Portland/Yüksek Fırın Cürufu.
Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	% 30 Portland Çimento

3.6 Püskürtme Betonda Lif Kullanımı

Günümüzde betonun değişik alanlarda kullanılma ihtiyacının ortaya çıkması, beton teknolojisinde gelişmelerin yaşanmasına neden olmuştur. Özellikle 1800'lü yılların ikinci yarısından itibaren, çeliğin beton içerisinde kullanılması ile gelişen betonarme teknolojisi, bir yapı malzemesi olarak betonun kullanım alanlarını oldukça genişletmiştir. Beton teknolojisinde lif malzemeler, betonun çekme dayanımını arttırmak amacıyla ilk olarak 1900'lü yılların başında kullanılmıştır (Yurdakul, 2001).

Taze beton içerisine değişik miktarlarda katılan lifler; çelik, plastik ve cam gibi değişik malzemelerden oluşan farklı tip ve boyutlarda üretilebilir. Çizelge 3.9’ da görülen lif tipleri içinde en yaygın kullanılan çelik lif olmakla birlikte sentetik lifler (polipropilen, polivinil alkol vb.) de püskürtme betonda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 3.9 Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler (DSİ, 1994)

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Şekil Değişirme (%)	Yoğunluk (ton/m ³)
Çelik	1100-2760	200	0.5-35	7.8
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.9
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-35	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5

3.6.1 Çelik Lifli Püskürtme Beton

Çelik lifli püskürtme beton, içinde homojen dağılmış çelik lifler bulunan ve basınçlı hava ile uygulanacak yüzeye, yüksek hızla püskürtülen harç veya betondur. Püskürtme betonda çelik liflerin kullanımındaki öncelikli amaç, çelik hasır donatısının yerleştirilmesindeki zorlukların ve zaman kayıplarının azaltılması, hatta ortadan kaldırılmasıdır.

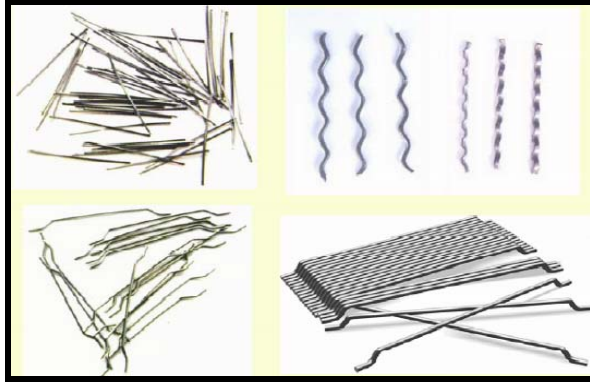
Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme betonun yeraltı tahkimatlarında ilk uygulamaları, Kuzey Amerika’da **1970**’li yıllarda başlamıştır. İlk uygulamalarda, çelik lif olarak 0.25 mm çapında ve 25 mm uzunluğundaki düzgün teller kullanılmış, çimento ile agrega karışımına ağırlıkça % 3-6 arasında katılmıştır (Yurdakul, 2001). Çelik lif, **1973** yılında ilk kez bir yaklaşım tüneline (Rivie Barajı, Idaho, ABD) uygulanmıştır (Özbayoğlu ve Kenet, 1989). **1980**’lerden sonra, çelik lifli püskürtme betonun mühendislik özellikleri üzerinde yapılan çok sayıda araştırmaya paralel olarak üniform karıştırmayı sağlayan besleme ekipmanlarının da geliştirilmesiyle, çelik lifin betonda kullanımı yaygınlaşmıştır.

EFNARC (Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu), 1999'da çelik lifleri üretim şekline göre;

- o soğuk çekilmiş tel,
- o levhadan kesilmiş lif,
- o çelikten haddelenmiş lif,
- o diğer çelik lifler

olmak üzere dört gruba ayırmıştır.

Yüksek sıcaklık ve korozyon etkilerine maruz uygulamalarda galvanizli çelik lifler tercih edilmektedir. Çelik liflere dairesel, kare veya dikdörtgen kesitlerde; düz, dalgalı veya kanca biçiminde bükülerek şekil verilmektedir (Şekil 3.12 ; Şekil 3.13).



Şekil 3.12 Kullanılan çelik lif tipleri (www.beksa.com.tr)

L ₁			(mm)
L ₂			(mm)
L ₃			(mm)
L ₂			(mm)
L ₅			(mm)

Şekil 3.13 Tipik çelik lif tipleri ve boyutları (Banthia vd., 1994)

Betonda çelik lif kullanımının başlıca beş yararı vardır. Bunlar;

- o yüksek taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton elde edilmesi,
- o donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi,
- o etkin çatlak kontrolünün yapılabilmesi,
- o dayanıklılığın artırılması,
- o donatı işçiliğinde belirgin azalma olması,

şeklinde sıralanmaktadır.

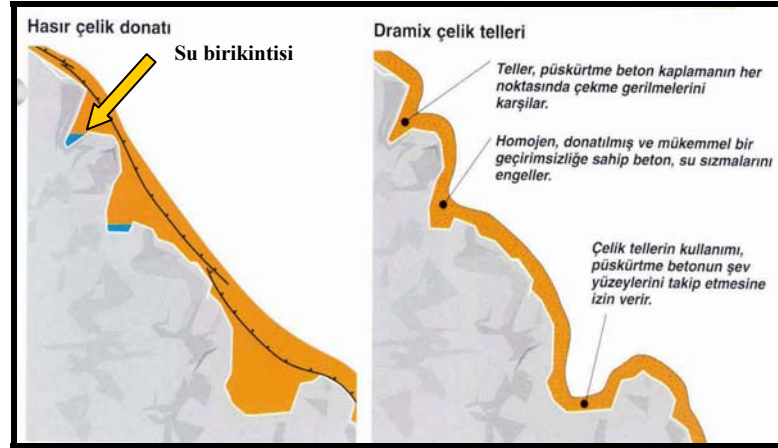
Çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlarda dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında hidrasyon süreci, malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik liflerin karşı koyması; rötre çatlaklarının oluşması, şekillenmesi veya oluştu ise daha fazla büyümesini engellemektedir (Taşdemir vd., 2007)

Çelik lif donatılı püskürtme betonun performansı, lifin uzunluk/çap oranı (l/d), dozajı (% 0.4-1), geometrik biçimi ve kopma dayanımına bağlıdır. Püskürtme betonda çelik liflerin uzunluk/çap oranı ve dozaj arttıkça eğilme dayanımı, darbe ve çatlak dayanımı ile enerji yutma kapasitesi artar. Buna karşın liflerin betona karıştırılması ve püskürtülmesi zorlaşır. Lifler, betondan kolayca sıyrılmanın engellenmesi ve matrisin mekanik büyüklüklerin artırılması açısından yeterli uzunlukta olmalıdır. Lif çapı, lifler arası boşluk ile doğru orantılıdır. Lif çapındaki azalma, birim hacim ve birim ağırlığa düşen lif adedini artırır. Çelik lif uzunluğu, çatlak başladığında iki komşu agrega arasındaki boşlukta köprü oluşturabilmesi için, maksimum agrega boyutunun ~3 katı olmalıdır. Püskürtme beton karışımlarında seçilen maksimum agrega boyutu genellikle 10-12 mm, çelik lif uzunluğu ise 30-35 mm' dir (ITA Report WG12).

Çelik lifli püskürtme beton, uluslararası tünel uygulamalarında çelik hasırlı püskürtme betonun yerini almaya başlamıştır. Bu olgunun temel nitelikleri şöyle özetlenebilir:

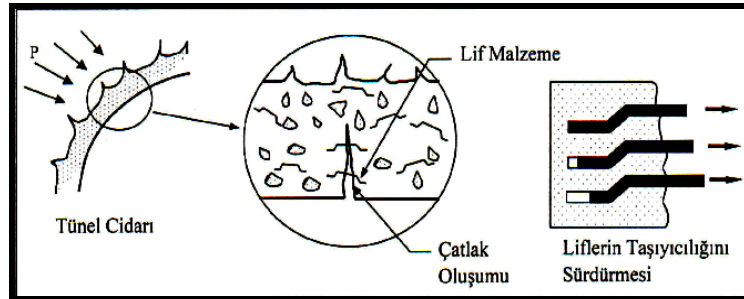
- Çelik hasırlı kaplamada, hasırdan dolayı püskürtme betonun yapışma özelliğinin çok değişken olması ve geri sıçramanın özellikle tavan bölgelerinde % 40 gibi yüksek değerlere ulaşması,
- Çelik hasır kullanıldığında, tünel cidarı ile hasır arasında kalan boşluğun doldurulamaması ve bu nedenle kaplamanın nem-su gibi dış etkenlere açık olması (Şekil 3.14),
- Çelik hasırın tünel cidarlarına tespit edilmesi ve yerleştirilmesi işlemlerinde harcanan “zaman” ve “işçilik” girdisinin tünel ilerlemesindeki yüksek payı,

- Kaya patlaması gibi ani ve tahripkar özellik sergileyen dinamik zorlamalarda, yaşamsal işlevi olan “süneklik özelliği” nin çelik lifli püskürtme beton kaplamalarında daha iyi gerçekleştirilmesi,
- Çelik lifli püskürtme betonun taşıyıcılık özellikleri nedeni ile “kaplama kalınlığı” hasırlı kaplamaya kıyasla daha düşük olması, böylelikle anlamlı boyutta “kazı ekonomisi” yaratması (Arioğlu ve Girgin, 1998),



Şekil 3.14 Çelik hasırlı ile çelik lifli püskürtme betonun karşılaştırması (www.beksa.com.tr)

- Püskürtme betonda, ilk mikro çatlakların oluşumunu takiben çatlak yüzeyine dik olan çelik lifler, uzarken kancalı biçimleri nedeniyle taşıyıcılığını devam ettirmekte ve bir miktar daha deformasyon yapabilme yeteneğine sahip olmaktadır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Püskürtme betonda liflerin çatlak gelişimini önlemesi ve ilave taşıyıcılık işlevi (Arioğlu vd., 2008)

3.6.2 Sentetik Lifli Püskürtme Beton

Sentetik liflerin betona katılması dayanıklılık, süneklik ve darbe direncini belirli bir ölçüde artırır. Buna karşın rötire çatlakları ve geri sıçrama miktarında önemli azalma söz konusudur. Artan uygulama verimliliği, güvenlik ve kolaylaşan lojistik de diğer önemli özellikleridir.

Madencilik uygulamaları için püskürtme betonda sentetik liflerin kullanılma potansiyeli, yüksek performanslı polimer liflerin geliştirilmesi ile birlikte önemli ölçüde artmıştır. Yüksek çekme dayanımı ve bazı durumlarda sıkıştırılmış şekil performansı sonuçları, çelik lifli püskürtme betona benzer özellik göstermektedir. Sentetik lifler, püskürtme betona ağırlıkça 7.0-13.5 kg/m³ (hacimce % 0.75-1.5) oranında katılmaktadır (Spearing and Hague, 2003).

3.6.3 Çelik Lifli ve Lifsiz Betonda Karışım Tasarımı

Literatürde püskürtme beton üzerine yapılmış bazı çalışmalar derlenerek kullanılan karışım tasarımları Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Yapılan çalışmaların karışım tasarımlarında;

- o çimento dozajı 350-500 kg/m³,
- o su/çimento oranı 0.39-0.61,
- o toplam agrega miktarı 1462-1773 kg/m³,
- o çelik lif miktarı 30-102 kg/m³

aralıklarında kullanılmıştır.

3.6.4 Çelik Lifli Püskürtme Betonda Geri Sıçrama

Püskürtme beton uygulamalarında, yüksek hızla yüzeye püskürtülen malzemenin bir kısmı yüzeye çarpma anında geri sıçrayarak yere dökülür. Uygulamaların kaçınılmaz bir parçası olan geri sıçrama (*rebound*) olgusu, gerek maliyet, gerekse de püskürtme betonun kalitesi açısından çok önemlidir.

Geri sıçrama miktarı aşağıdaki faktörlere bağlıdır :

- o püskürtmenin kuru veya yaş yöntem ile olması,
- o su/çimento oranı,
- o agrega gradasyonu,
- o kullanılan katkıların cinsi ve miktarı,
- o püskürtme ağzındaki basınç ve tanelerin hızı,
- o püskürtme mesafesi ve açısı,
- o püskürtülen yüzeyin temizliği ve ön hazırlığı,
- o operatörün tecrübesi,
- o püskürtme beton tabakasının kalınlığı.

Çizelge 3.10 Püskürtme beton üzerine yapılmış bazı deneysel çalışmalarda kullanılan karışım tasarımları

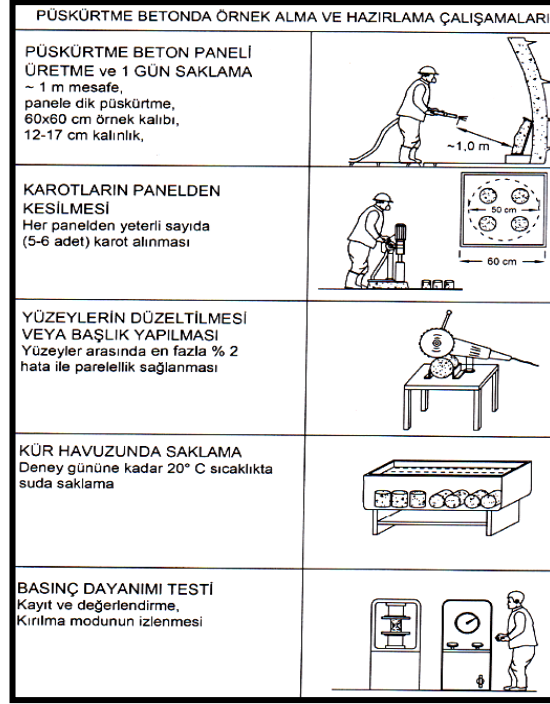
	Msu/ Mç (Msu/Mç+Msf)	Mç (Mç+Msf) (kg)	Toplam Agrega Miktarı (ince+iri) (kg)	Mp (Ms) (lt)	Lif Tipi* (Boy/Çap) (mm)	Mf (kg)	Va (%)	Kaynaklar
1	0.40-0.55	500	1773	—	—	—	—	(Pfeuffer ve Kusterle, 2001)
2	0.40 (0.35)	400 (400+50)	1600-1670	—	—	—	—	(Armelin ve Banthia, 1998)
3	0.64 (0.59)	430 (430+65)	1462 (1097+365)	—	—	—	—	(Leung vd., 2004)
4	0.54-0.61 (0.49-0.55)	350-450 (400+40)	1667 (1037+630)	—	30/ 0.55-0.75	30-60	—	(Jeng vd., 2001)
5	0.46	442	1618	—	30/ 0.4-0.5	46.5-102.5	5	(Ramakrishnan vd., 1981)
6	0.45 (0.41)	400 (400+40)	1700 (1225+475)	(1-1.5)	—	50	3	(Schallom ve Ballou, 2003)
7	0.45 (0.40)	400 (400+40)	1570 (1110+460)	1.5 (4)	—	—	—	(Jolin ve Beaupre, 2003)
8	0.43 (0.39)	420 (420+40)	1600	13 kg (6)	—	60	—	(Wood vd., 1993)

Msu = Karışımdaki su miktarı
Mç = Karışımdaki çimento miktarı
Mp = Karışımdaki priz hızlandırıcı katkı miktarı
Ms = Karışımdaki süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı

Mf = Karışımdaki çelik lif miktarı
Msf = Silis dumanı
Va = Karışımın hava miktarı yüzdesi
* = Kullanılan lif kancalı tiptir.

3.6.5 Püskürtme Betonda Karot Alma İşlemleri

Püskürtme betonun mukavemetinin belirlenmesi için betonun panellere püskürtülmesi, numune alma, kür uygulama ve dayanımın belirlenmesi aşamaları Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Panellere betonun püskürtülmesi ve numune alma aşamaları (Arioğlu vd., 2008)

ACI 506.2-95 Standardına göre karotların kalite bakımından sınıflandırılması Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 ACI 506.2-95 standardına göre karot kalite sınıflandırması

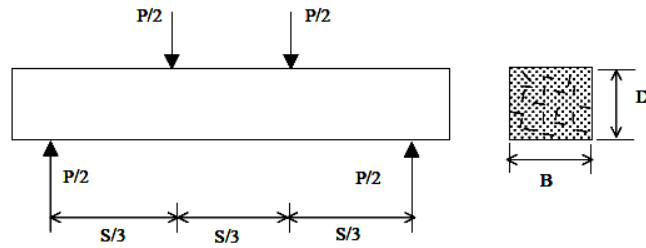
1.Kalite	2.Kalite	3.Kalite	4.Kalite	5.Kalite
				
d=3.18	d=9.53	d=15.9	d= 25.4	>d=25.4

d= maksimum ortalama hava boşluğu çapı (mm)

3.6.6 Çelik Lifli Betonun Tokluk İndeksi ile Değerlendirmesi

Çelik lifle güçlendirilmiş betonun sertlik deneyi ASTM C 1018'e (*American Society for Testing Materials*) göre belirlenmiş olup, çoğu kez aynı deney çelik lifle güçlendirilmiş püskürtme beton için de kullanılmaktadır (TS 10515 Standardı, ASTM C 1018 Standardına benzer özelliktedir).

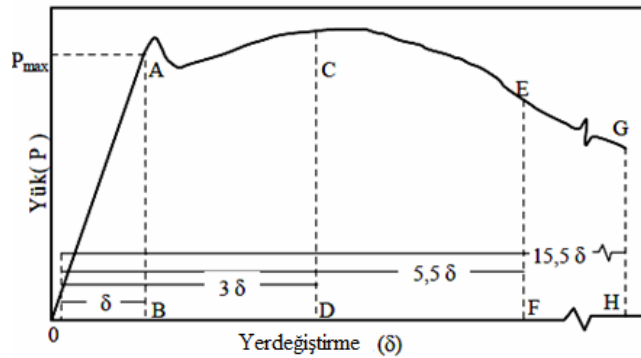
Çelik lifli püskürtme beton ile üretilen kirişe iki noktadan yük uygulanması sırasında (ASTM C 1018 Standardına göre), ilk çatlak ve sehim için gereken enerji ve ilk çatlaktaki sehimin birkaç katı olan sehimler için gereken enerji belirlenmektedir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 ASTM C 1018'e göre deney düzeneği

Bu deney yöntemine göre ilk çatlak, yük-sehim eğrisinin yükselen kısmının doğrusallıktan saptığı nokta ile belirlenmektedir. Malzemenin süneklik özelliğini karakterize eden “tokluk faktörü”, enerji yutabilme kapasitesi olup, gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanı ifade etmektedir. Liflerin en önemli katkısı tokluk üzerinde olmaktadır. Artan lif dozajları statik ve özellikle dinamik etkiler altındaki enerji yutma kapasitesini artırarak yapıya sünek davranış kazandırırken, bu artışın mertebesi üzerinde lif tipinin püskürtme beton ile arasındaki yapışma dayanımının etkin olduğu unutulmamalıdır (Yurdakul, 2001).

ASTM C 1018’de tanımlanmış olan I_5 , I_{10} , I_{20} tokluk indeksleri, seçilen yerdeğiştirme değerine kadar malzemenin elastik-plastik davranışını açıklamak için kullanılır.



Şekil 3.18 Tokluk hesaplamalarında kullanılan yük-yerdeğiştirme eğrisi (Çivici, 2004)

Şekil 3.18'e bağlı olarak yazılabilecek denklemler,

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB}, I_{10} = \frac{OAEF}{OAB}, I_{20} = \frac{OAGH}{OAB}$$

olarak hesaplanır.

I_5 , I_{10} ve I_{20} indeksleri ilk çatlak anına kadar doğrusal elastik davranışı, daha sonra da plastik davranışı açıklamakta ve bu indeksler değerlendirilirken Çizelge 3.12'deki değerler dikkate alınmaktadır.

Çizelge 3.12 I_5 , I_{10} , I_{20} İndeksleri için ölçütler (Uğurlu,1994)

Baz alınan tokluk alanı	İndeks	Eğilme gerilmesi ölçütü	Normal beton	Elastik- Plastik malzeme	Çelik lifli beton için aralık
OACD	I_5	3.0	1.0	5.0	1-6
OAEF	I_{10}	5.5	1.0	10.0	1-12
OAGH	I_{20}	15.5	1.0	30.0	1-40

Burada; I_{10} / I_5 oranı için 2, I_{20} / I_{10} oranı için 3 değeri mükemmel plastik malzeme hareketini, yani yükte herhangi bir değişiklik olmaksızın eğilmedeki artışı gösterir. I_{20}/I_{10} 'un 3'ten küçük değerleri ise düşük performansı ifade etmektedir (Yurdakul, 2001).

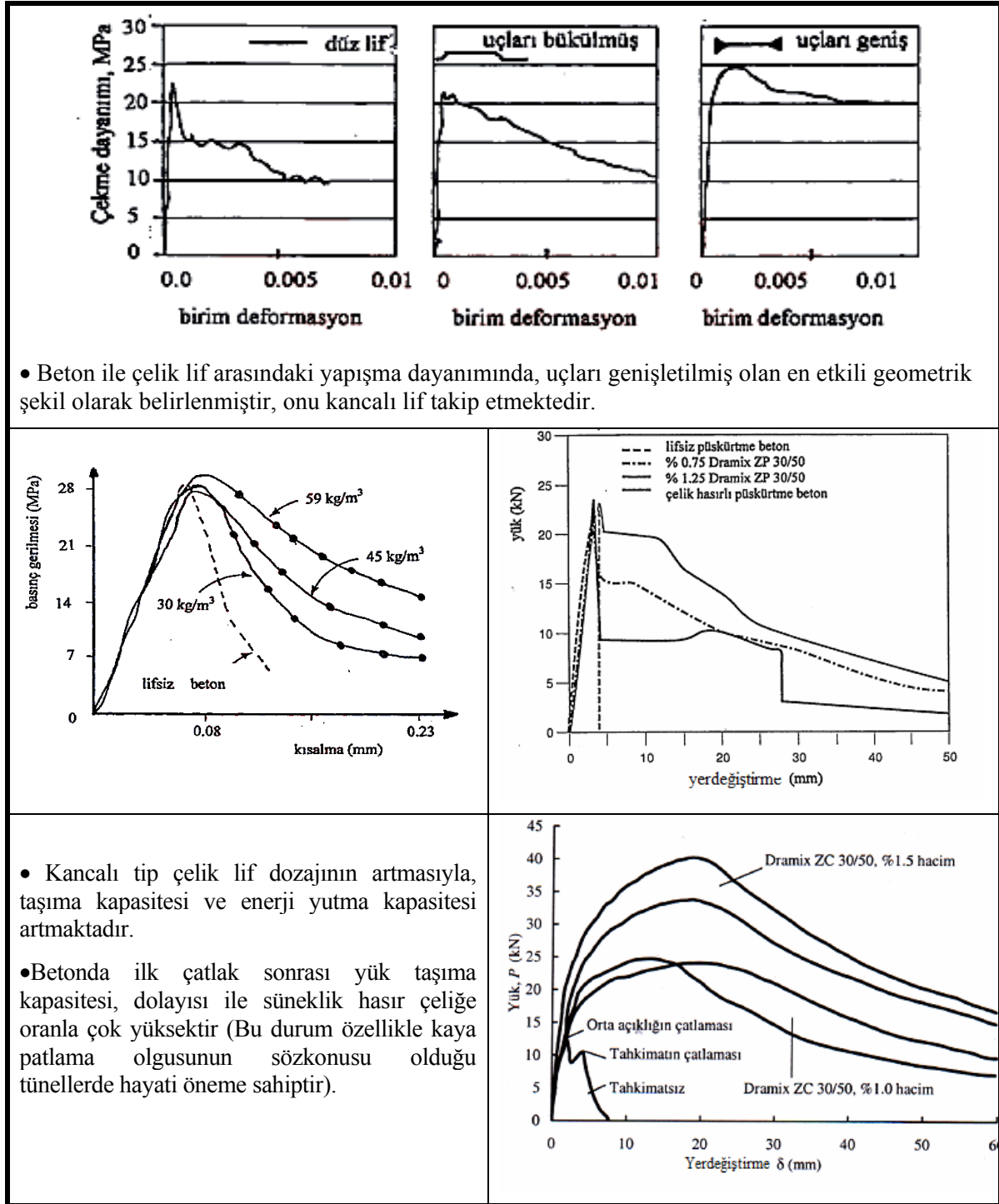
Tokluk indeksi değerlerinin düşük oluşu, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük, enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu göstermektedir. Çelik lifin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi ile tokluk indekslerinin 5, 10 ve 20 gibi değerlere ulaşması ve hatta aşılması da mümkün olmaktadır.

Tokluk indekslerinin yanı sıra çelik lifli püskürtme betonun tokluğunu değerlendirebilmek için, R dayanım faktörü kullanılır. Başka bir deyişle, dayanım farkı faktörü R, Şekil 3.18' de CE ve EG deplasman aralıkları için ilk çatlak dayanımının bir yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra malzemede mevcut olan ortalama dayanım seviyesini gösterir. Bu değer 100 olması mükemmel bir plastik davranışı, daha düşük değerler ise plastik davranışa göre ikinci derece önemi olan davranışları ifade etmektedir. Katkısız betonun dayanım faktörü ise sıfırdır (Çivici, 2004).

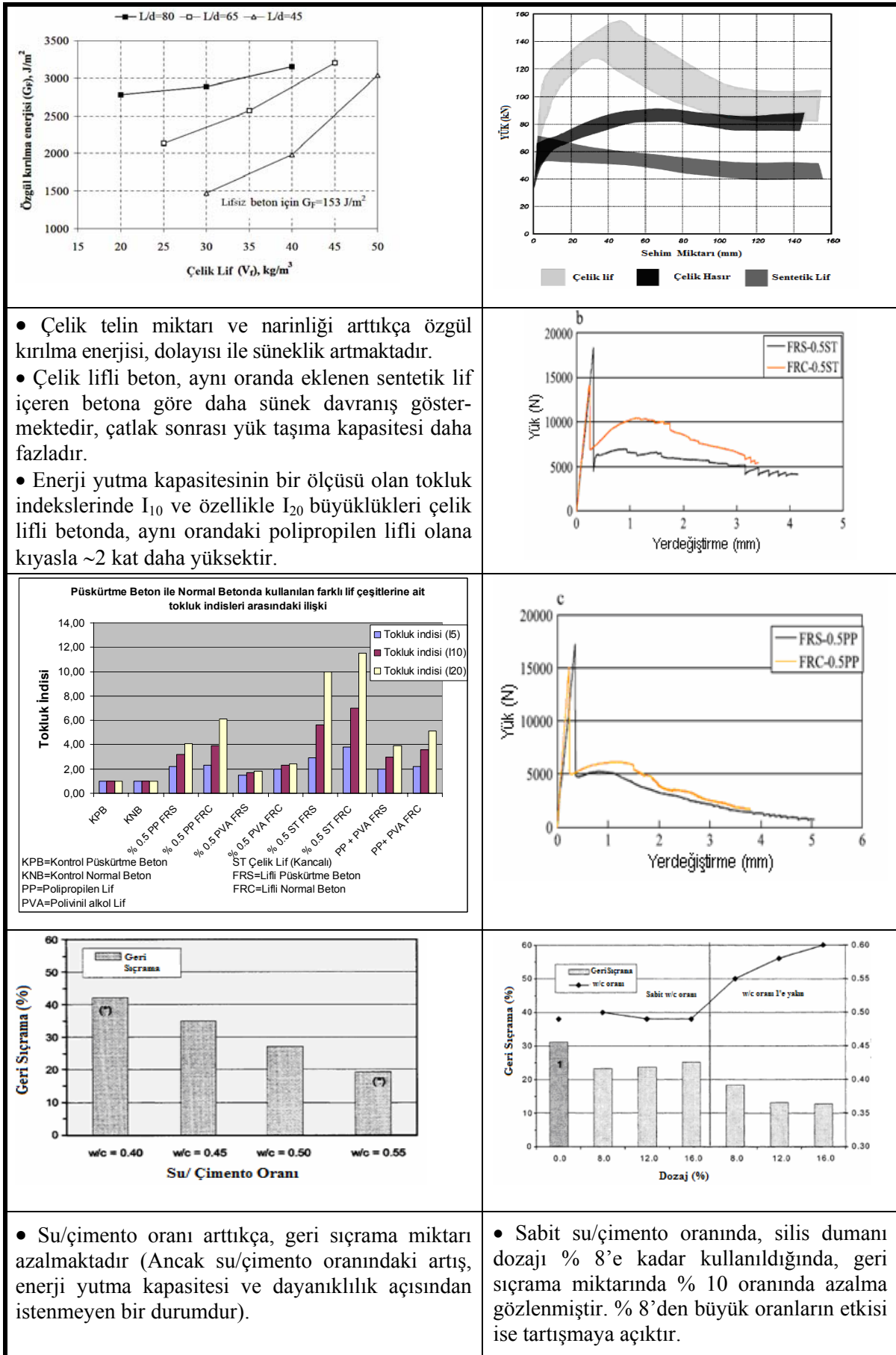
3.6.7 Lifli Betonun Performansı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde çelik lifli beton üzerine yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar irdelenerek Çizelge 3.13’ te verilmiştir.

Çizelge 3.13 Çelik lifli betonun mekanik büyüklükleri üzerinde yapılan deneylere ait sonuçlar [(Yurdakul, 2001; Jeng vd., 2001; ITA Report, 2006; Leung vd., 2004; Taşdemir vd., 2007; Hoek vd., 2006; Pfeuffer and Kusterle, 2001) kaynaklarından yararlanarak oluşturulmuştur].



Çizelge 3.13'ün devamı



4. PÜSKÜRTME BETON TASARIMININ OPTİMİZASYONUNA YÖNELİK DENEYSEL PROGRAM

4.1 Genel

Deneysel bir çalışma kapsamında NATM yönteminin temel ögesi olan püskürtme betonun bileşenleri ve püskürtme işlemi sırasındaki hava basıncının değişimi sonucu; yerleşebilirlik, geri sıçrama ve basınç dayanımının incelenmesiyle optimum şartların belirlenmesi hedeflenmiştir. İkinci aşamada ise Türkiye’de tünellerde nadir kullanım imkanı bulan çelik liflerin püskürtme betonda uygulanabilirlik şartları deneysel olarak incelenmiştir.

4.2 Deney Programı ve Deneyde Kullanılan Malzemeler

İstanbul Metrosu III. Aşama 4.Levent-Ayazağa-Haciosman kesimi metro projesi kapsamındaki tüneller Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemiyle açılmaktadır. Deneyler, 09.10.2009-17.11.2009 tarihleri arasında, inşaatı devam eden Haciosman şantiyesi tünellerinde yapılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 4.Levent-Ayazağa-Haciosman kesimi metro projesine ait güzergah planı (H.İ.Ayış arşivinden)

Devam eden tünel inşaatında temin edilen püskürtme beton, Yolaşan Hazır Beton firmasının Haciosman tesislerinde üretilmektedir. Üretilen püskürtme betonun bileşenleri ile ilgili

detaylar aşağıda verilmiştir.

o Hazır Beton firmasının püskürtme betonda kullandığı agregalar ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Agregalara ait fiziksel özellikler

Agrega	En Büyük Dane Çapı (mm)	Su Emme Oranı (%)	Birim Ağırlık (t/m^3)	Cinsi	Kaynağı
No 1 mıcır (5-12.5 mm)	12.5	1.02	2.68	Kireçtaşı	Yolaşan maden
Kırma kum (0-8 mm)	8	1.30	2.66	Kireçtaşı	Yolaşan maden
Doğal kum (0-5 mm)	5	2.60	2.61	Dağ kumu	Vizeler kum ocağı

o Çimento olarak Nuh Çimento A.Ş tarafından üretilen (TS EN 197-1’e uygun) ($\gamma=3.13 t/m^3$) katkılı Portland Çimentosu PÇ 42.5R kullanılmıştır. Çimentoya ilave herhangi bir mineral katkı (uçucu kül vb) kullanılmamıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi ile 7. ve 28. günlere ait harç basınç dayanımları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Kullanılan çimentonun özellikleri

SiO ₂ (%)	20.30
Al ₂ O ₃ (%)	4.50
Fe ₂ O ₃ (%)	3.47
CaO (%)	64.76
MgO (%)	1.11
SO ₃ (%)	2.45
f ₇ (MPa)	48.7
f ₂₈ (MPa)	61.9

o Çalışmada kullanılan beton karma suyu içilebilir nitelikte olup, şehir su şebekesinden sağlanmıştır.

o Karışımlarda uygun su/çimento oranı ve işlenebilirliği sağlamak amacıyla TS EN 934-2 (2002) standardına uygun naftalin sülfonat bazlı (Rheobuild 737) süper akışkanlaştırıcı katkı ($\gamma=1.178-1.23 t/m^3$) kullanılmıştır.

o Yüzeye püskürtülmüş betonun erken priz almasını sağlamak için çimentonun ağırlıkça %7’si oranında alkali içermeyen priz hızlandırıcı katkı (Meyco SA160) kullanılmıştır. Priz hızlandırıcı, püskürtme betonun robot makinesiyle püskürtülmesi sırasında nozulda eklenmektedir. Deneylerde kullanılan sıvı priz hızlandırıcıya ait teknik özellikler Çizelge

4.3'te yer almaktadır.

Çizelge 4.3 Meyco SA160 tipi sıvı priz hızlandırıcıya ait teknik özellikler

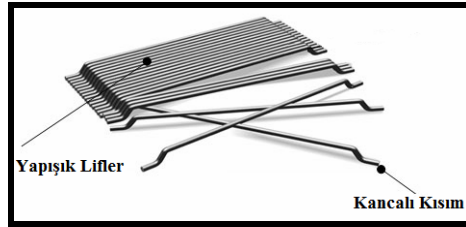
Malzemenin Yapısı	Yoğunluk	pH değeri	Viskozite	Termal Stabilitesi	Klor İçeriği (EN 480-10)
Alüminyum sülfat	1.43 kg/lt	2.5	500-1200 mPa.s	+5 °C +40 °C	< %0.1

o Bazı deneylerde süper akışkanlaştırıcı katkının yanında hava sürükleyici katkı (Micro Air 200 tipi yağ alkollü ve amonyum tuzu) da kullanılmıştır. Kullanılan hava sürükleyici katkıya ait teknik özellikler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Micro air 200 tipi hava sürükleyici katkıya ait teknik özellikler

Malzemenin yapısı	Yoğunluk	Klor içeriği (%) (EN 480-10)	Alkali içeriği (%) (EN 480-12)
Yağ alkollü ve amonyum tuzlu	1.00-1.02 kg/lt	< 0.1	< 10

o Deneylerin ikinci aşamasında Dramix ZP305 tipi çelik lif⁵ kullanılmıştır (Şekil 4.2) Deneyde kullanılan çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.2 Kullanılan çelik lif tipine ait görünüm (www.beksa.com.tr)

Çizelge 4.5 Dramix ZP305 çelik lif tipine ait fiziksel ve mekanik özellikler

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik Oranı (l/d)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kg' daki Lif Sayısı (adet)	Yoğunluk (t/m ³)
ZP 305	30	0.5	55	1100	16750	7.48

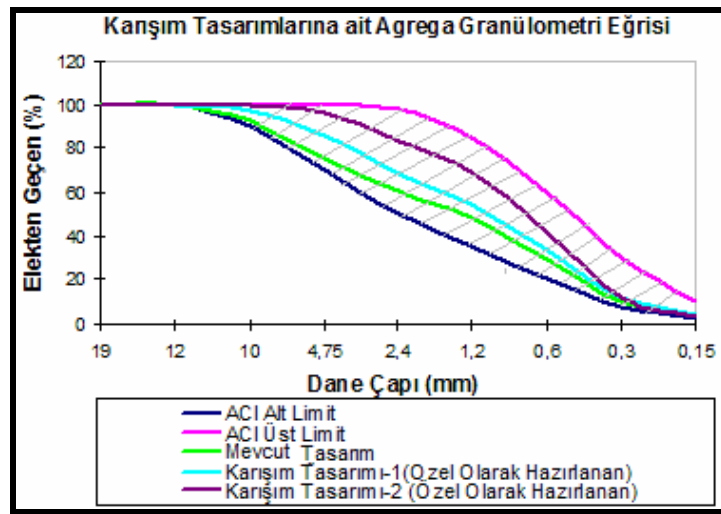
⁵ Lifler birbirlerine özel tutkalla yapıştırılmış demetler halinde olup, 20 kg'lık ambalajlarda piyasaya verilmektedir. Lif demeti su ile temas ettiğinde süratle tel tel ayrılır. Liflerin birbiri arasında yapışkan olmaları kendi içinde topaklanma yapmasını önlemektedir.

4.3 Deneysel Çalışmada Geliştirilen Püskürtme Beton Tasarımı

Deneysel çalışmanın başlangıç aşamasında mevcut üretimlerde uygulanmakta olan agrega gradasyonu esas alınmıştır. Ancak bu gradasyonun özellikle iri agregalarda ACI tarafından önerilen sınırların (Çizelge 4.6, Şekil 4.3) dışına çıktığı fark edilmiş, hazır beton firmasından ACI'da önerilen aralığa uygun yeni gradasyon oluşturması istenmiştir.

Çizelge 4.6 ACI kriterlerine göre agrega gradasyonu

Elek çapı (mm)	Elekten geçen %	
	Alt sınır	Üst sınır
19	100	100
12	100	100
10	90	100
4.75	70	100
2.4	50	98
1.2	35	85
0.6	20	60
0.3	8	30
0.15	2	10



Şekil 4.3 Karışım tasarımlarında kullanılan agregalara ait granülometri eğrisi

Firma, iki farklı gradasyon üretmiş (Şekil 4.3) ve bunlar, ilk deneylerde mevcut tasarım ile birlikte denenmiştir. Mevcut üretimlerde kullanılan karışım tasarımı ve yeni hazırlanan karışım tasarımları (KT) sırasıyla; Mevcut Tasarım, Karışım Tasarımı-1 (KT-1), Karışım Tasarımı-2 (KT-2) şeklinde isimlendirilmiştir (Çizelge 4.7). Yeni hazırlanan her iki agrega gradasyonu da ACI sınırları içinde kalmıştır.

Çizelge 4.7 Agregaların elek analizi sonuçları ve karışımın gradasyonu

Mevcut Karışım Tasarımı elek analizi sonuçları					
Elek çapı (mm)	Kırma kum %	Doğal kum %	No I Mıcır %	Mevcut Tasarım %	
16	100.0	100.0	100.0	100	
12.5	100.0	100.0	96.9	100	
8	100.0	100.0	46.4	89.3	
4	83.8	99.1	0.7	72.5	
2	49.0	96.0	-	55.7	
1	29.2	81.3	-	41.6	
0.5	18.6	48.4	-	25.3	
0.25	10.8	10.6	-	8.6	
İncelik modülü	4	2.6	6.5	3.7	
ACI yönetmeliğine uygun olarak düzenlenmiş yeni karışım yüzdeleri					
Elek çapı (mm)	Kırma kum %	Doğal kum %	No I Mıcır %	Karışım Tasarımı I %	Karışım Tasarımı II %
16	100.0	100.0	100.0	100	100
12	100.0	100.0	100.0	100	100
10	100.0	100.0	63.4	97.4	100
4.75	99.3	85.2	2.1	86.3	95.7
2.4	95.8	48.4	0.5	68.4	83.6
1.2	82.4	30.6	-	54	69.1
0.6	49.3	20.1	-	33.1	41.8
0.3	11.2	14.0	-	11.6	11.9
0.15	2.1	6.9	-	4	3.3
İncelik modülü	3.6	4.9	2.34	3.4	2.95

Karışım tasarımlarına ait 1 m³ betonun karışım bileşenleri ve oranları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Deneylerde mevcut kullanılan su/çimento oranına (0.45) devam edilmesi benimsenmiştir. Bu oranın arttırılması seçeneği, geri sıçramayı azaltacağı bilinse de dayanıklılıktan ödün vermemek için benimsenmemiştir. Bazı deneylerde su/çimento oranı azaltılmak istenmiş (0.40), ancak firmanın kullandığı akışkanlaştırıcı türü hiperakışkanlaştırıcı olmadığı için bu istek gerçekleştirilememiştir (Su/çimento oranının düşük olması, priz süresinin azalması, erken ve nihai dayanımların artması, daha düşük hızlandırıcı dozajı ile tek seferde daha kalın katmanların uygulanmasına olanak sağlamaktadır).

Çizelge 4.8 Deneylerde kullanılan püskürtme beton karışım bileşenleri

	Mevcut Karışım Tasarımı	KT-1	KT-2
Malzemeler	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Çimento	400	400	400
Su	180	180	180
Su/çimento	0.45	0.45	0.45
No 1 mıcır (5-16)	344 (%20)*	—	—
No 1 mıcır (5-12.5)	—	123 (%7)	—
Kırma kum (0-8)	596 (% 34)	756 (% 44)	443 (% 26)
Doğal kum (0-5)	796 (% 46)	857 (% 49)	1282 (% 74)
Toplama agrega/çimento	4.3	4.3	4.3

* Toplam agrega içinde hacimce oranıdır.

Hava sürükleyicinin püskürtme betonun donma-çözünme dayanımında yaratacağı katkının yanında taze betonun daha iyi yerleşimi konusundaki etkisi de önemlidir (Jolin and Beaupre, 2003). Ayrıca karışım aşamasında hava sürükleyici katkının etkisiyle oluşan hava kabarcıklarının büyük bir kısmı püskürtme sırasında basıncın etkisiyle kaybolmaktadır. Dolayısı ile hava sürükleyici katkının kullanımı, dayanımda azalmaya neden olmadığı gibi, yerleşmeyi de olumlu etkilemektedir.

4.4 Üretilen Beton Karışımları ve Deneylerin Yapılışı

Deney için hazırlanan püskürtme beton karışımları santralda üretildikten sonra şantiyeye getirilmiş ve deneyin yapılacağı tünele indirilmiştir. Tünel içerisinde deneyin yapılacağı mekanda püskürtme betonun uygulanacağı paneller, yerden belli bir mesafe yüksekte ve dik konumda sabitlenerek hazırlanmıştır. Santraldan uygulama yerine gelen taze püskürtme betonun çökme değeri ve püskürtmeye uygunluğuna bakıldıktan sonra beton, yaş sistem püskürtme robotuna aktarılmıştır (Şekil 4.4). Robot makinesine bağlı olan püskürtme hortumunun uzunluğu 10 m, çapı 54 mm ve nozul çapı ise 50 mm dir. Deneylerde kullanılan yaş sistem püskürtme beton robot makinesine ait özellikler Çizelge 4.9’da verilmiştir. Nozul panele dik konumda ve panele olan mesafesi 1-1.1m olacak şekilde ayarlandıktan sonra, beton püskürtülmüştür (Şekil 4.5). Testler 50x50x25 cm boyutlarında 3 adet panel üzerinde gerçekleştirilmiştir.

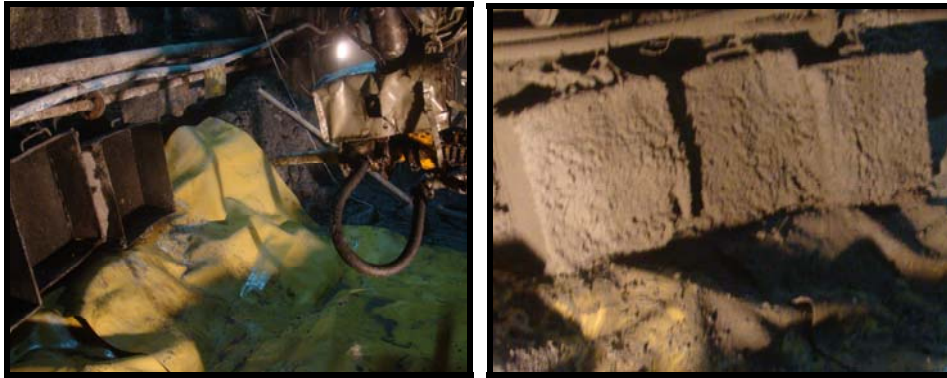
09.10.2009-09.12.2009 döneminde tünelde yerinde yapılan deneylerde kullanılan püskürtme beton karışım bileşenleri ve diğer karakteristik özellikleri Çizelge 4.10'da topluca verilmiştir.



Şekil 4.4 Uygulama yerindeki paneller ve çökme ölçümünden bir görünüm.

Çizelge 4.9 Sika PM 407 P tipi yaş sistem robot makinesine ait teknik özellikler

					
Pompa Türü	Püskürtme Kapasitesi	Maksimum Püskürtme Basıncı	Huni Hacmi	Sıvı katkı kapasitesi (200 lt tank)	Makine Ağırlığı
Pistonlu	4-20 m ³ /sa	70 bar	205 lt	30-700 lt/sa	6159 kg



Şekil 4.5 Paneller ile nozul arasındaki mesafenin ayarlanması ve püskürtme betonla doldurulmuş paneller.

Çizelge 4.10 Yaş karışım püskürtme beton deneylerinde kullanılan karışımlar ve uygulama koşulları

Yapılan Deneyler	Yaş Karışım (KT)	Panel No	Karışım Tasarımı (KT)	Püsk. Basıncı (Bar)	Tesis Çıkış Çökme Miktarı (cm)	Yerinde Çökme Miktarı (cm)	Msu/ Mç Su/Çimento Oranı	Ms (%) [*]	Ma (%) [*]	Va (%)	Mp (%) [*]	Çelik lif Miktarı (kg/m ³)	Panelden Geri Sıçrama Miktarı (kg/panel)
1.Deney (09.10.2009)	YK-1	1	Mevcut	4	17	17	0.45	1.5	—	—	7	—	1.0
	YK-2	2	KT-1	4	16	16	0.45	1.5	—	—	7	—	0.5
	YK-3	3	KT-2	4	16	10	0.45	1.5	—	—	7	—	0.5
2.Deney (15.10.2009)	YK-4	1	KT-1	4	12	6	0.45	1.6	—	—	7	—	0.8
	YK-4	2	KT-1	4.5	12	6	0.45	1.6	—	—	7	—	0.5
	YK-5	3	KT-1	4.5	14	16	0.45	1.2	0.4	13	7	—	0.6
3.Deney (23.10.2009)	YK-6	1	KT-1	4.5	14	9	0.45	1.9	0.5	15	7	—	0.6
	YK-6	2	KT-1	5	14	9	0.45	1.9	0.5	15	7	—	0.4
	YK-7	3	KT-1	5	10	8	0.45	1.6	—	—	7	—	0.6
4.Deney (10.11.2009)	YK-8	1	KT-1	4	12	6	0.45	1.6	—	—	7	40	2.0
	YK-8	2	KT-1	4.5	12	6	0.45	1.6	—	—	7	40	1.2
	YK-8	3	KT-1	5	12	6	0.45	1.6	—	—	7	40	2.5
5.Deney (17.11.2009)	YK-9	1	KT-1	5.5	15	10	0.45	1.5	0.8	15	7	40	0.77
	YK-9	2	KT-1	5	15	10	0.45	1.5	0.8	15	7	40	0.3
	YK-9	3	KT-1	4.5	15	10	0.45	1.5	0.8	15	7	40	0.2
Msu = Karışımındaki su miktarı Mç = Karışımındaki çimento miktarı Ms = Karışımındaki akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi					Ma = Karışımındaki hava sürükleyici katkı yüzdesi Mp = Karışımındaki priz hızlandırıcı katkı yüzdesi Va = Ölçülen hava hacmi yüzdesi					* = Ağırlıkça çimento			

Geri sıçrama için, çelik lifsiz üretimlerde iri agreganın sıçraması, çelik lifli olanlarda ise çelik lifin sıçraması esas alınmıştır.

Üretimden 48 saat sonra, her bir panelden 6 adet silindir karot numunesi alınarak ($d=10$ cm, $L=10$ cm), nemini muhafaza edecek şekilde, tünel şartlarında korunmuştur. Deney tarihinde kalite kontrol laboratuvarına nakledilen karotlarda birim ağırlıklar hesaplanmış, 3, 7 ve 28. günde 2'şer adetleri kırılarak basınç dayanım testleri yapılmıştır. Panellerden alınan tipik silindir karot numunelere ait görünüm Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Panellerden alınan silindir karot numunelere ait görünüm

Deneylerde panellerden alınan karotlar ACI 506.2-95 Standardında tanımlanmış olan kalite sınıflandırmasına (Çizelge 3.11) göre değerlendirildiğinde genellikle 1., nadiren de 2. kalite sınıfında olduğu görülmüştür.

Alınan karotların ($h/d=10/10$, $\lambda=1$) dayanımı 15 cm' lik küp numune dayanımına eşdeğerdir (Neville, 1995). Karotların panelden kesimi karotlara sülfür başlık yapma imkanı bulunmaması nedeni ile özel itina gerektirmiştir.

4.4.1 Yapılan Deneylere Ait Bulgular ve Yorumlar

1. Deney : Mevcut Karışım Tasarımı ile yapılan ilk denemede öncelikle robot püskürtme basıncı 5 bar olarak seçilerek beton püskürtülmüş (yerinde çökme 17 cm), fakat betonun panel yüzeyinden aktığı görülmüştür. Bunun üzerine robot püskürtme basıncı 4 bar'a düşürülerek panel tekrar doldurulmuştur. Bu durumda püskürtülen betonun panele yerleşimi gerçekleşmiştir. Ancak yüksek çökme düzeyi nedeni ile yine tam anlamıyla iyi bir yerleşim elde edilememiştir.

Daha ince granülometriye sahip KT-1 ve KT-2 ile püskürtme yapılan diğer panellerde geri sıçramanın Mevcut Karışım Tasarımı ile yapılan betona göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.

(Not: KT-1 ile hazırlanan püskürtme betonda önceki panelden farklı olarak şantiyeye getirilen betonun çökme miktarı başlangıçta 17 cm olmasına rağmen, bekleme sürecinden dolayı nihai çökme 1 cm'e kadar azalmıştır). Yerleşim ve erken dayanım (3 gün) sonuçlarına bakıldığında en iyi sonuç KT-1 ile hazırlanan betonda elde edilmiştir. KT-2 ile üretilen beton çok ince görünümlü olup, en uygun karışım tasarımına sahip malzeme olarak KT-1 seçilmiştir. Bundan sonraki deneylerde sadece KT-1 ile üretilen beton karışımlarına eklenen katkı oranları ve hava basıncının, geri sıçrama ve basınç dayanımına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca akma nedeni ile bundan sonra yapılacak deneylerde çökme değerinin azaltılması hedeflenmiştir.

2. Deney : Bu deneyde 6 cm yerinde çökme ve 4.5 bar basınç ile Panel-2 (YK-4) üzerine püskürtülen betonun, 4 bar basınç ile püskürtülen Panel-1 (YK-4)'dekinden daha iyi yerleştiği ve geri sıçrama miktarının daha az olduğu tespit edilmiştir. Panel-1 ve 2'deki geri sıçrama miktarının ise yine, 1.deneydeki Mevcut Karışım Tasarımı ile yapılan betona oranla daha az olduğu görülmüştür. Panel-3'te (YK-5) ise ilave olarak hava sürükleyici katkı kullanılması ve yerinde çökme değerinin yüksek olması (16 cm) öngörülmüştür. Yüksek çökme değerine karşın Panel-1 ve Panel-2'de görülen akma durumu yaşanmamış olup, daha iyi bir yerleşim olduğu görülmüştür. Bu sonuç Jolin ve Beupre (2003) tarafından gözlenen ve önerilen çözüm ile örtüşmektedir.

3. Deney : Bu deneyde su/çimento oranının 0.45' den 0.40' ye düşürülmesi amaçlanmış, ancak mevcut kullanılan süper akışkanlaştırıcı ile bu mümkün olamamıştır. Hava sürükleyici katkılı Karışım (YK-6), yerinde 9 cm çökme değeri ile Panel-1 üzerine 4.5 bar, Panel-2 üzerine ise 5 bar basınçla uygulanmıştır. Panel-2'deki beton yerleşiminin Panel-1'dekinden daha iyi, geri sıçramanın ise daha az olduğu gözlemlenmiştir. Geri sıçrama ve yerleşme bakımından hava sürükleyicisiz Panel-3'ün (YK-7) Panel-1'e benzer özellik gösterdiği görülmüştür. Dolayısı ile 2. ve 3.deneyde 4.5 bar basınç ile uygulamanın, hava sürükleyicinin varlığından bağımsız olarak en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir (Hava sürükleyici kullanımı geri sıçramaya etki etmemiştir).

4. Deney : Bu deneyde püskürtme beton içerisine santralde eklenen çelik liflerin (40 kg/m^3), beton dayanımına ve geri sıçrama miktarına etkisi araştırılmıştır. Çelik lifsiz üretimlerin ışığında çelik lifli püskürtme beton (YK-8) Panel-1 üzerine 4 bar, Panel-2 üzerine 4.5 bar, Panel-3 üzerine ise 5 bar ile püskürtülmüştür. Panel 2'deki yerleşimin Panel-1'dekinden daha iyi, geri sıçramanın ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Panel-3'te ise Panel-1'e oranla geri sıçramanın daha fazla olduğu görülmüştür. 4.5 bar hava basıncı yine optimum değer olarak belirlenmiştir.

5. Deney : Çelik lifli (40 kg/m^3) püskürtme beton içerisine hava sürükleyici (% 0.8) katkı katılarak, katkı ve hava basıncının çelik lifli püskürtme betonun dayanımı ve geri sıçrama miktarına etkisi araştırılmıştır. Çelik lifli püskürtme beton (YK-9), Panel-1, Panel-2, Panel-3 üzerine sırası ile 5.5, 5 ve 4.5 bar basınçla uygulanmıştır. Panel-1’deki beton yerleşiminin Panel-2 ve Panel-3’dekinden daha iyi, geri sıçramanın ise daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

4.5 Deney Sonuçları

Yapılan deneylerden alınan karot numuneleri tünel ortamında nemli olarak korunmuş, 3,7 ve 28. günlerde laboratuvara getirilerek yoğunlukları tayin edildikten sonra basınç dayanım testleri yapılmıştır. Test sonuçları Çizelge 4.11’de, iki karot numunesinin ortalama dayanım sonuçları ise Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 09.10.2009-09.12.2009 tarihleri arasında yapılan püskürtme beton deneylerinin sonuçları

Tarih	Yaş Karışım (YK)	Panel No	Püsk. Basıncı (Bar)	s (cm)	M_{su}/M_c	M_a^*	Numune	γ_3 (t/m^3)	f_3 (MPa)	γ_7 (t/m^3)	f_7 (MPa)	γ_{28} (t/m^3)	f_{28} (MPa)
1.Deney (09.10.2009)	YK-1	1	4	17	0.45	-	1. Karot	2.16	5.88	2.18	10.04	2.11	#
							2. Karot	1.89	#	2.06	9.35	2.12	13.59
	YK-2	2	4	16	0.45	-	1. Karot	2.12	9.44	2.07	#	2.11	14.51
							2. Karot	2.10	8.95	2.13	14.70	2.18	16.14
	YK-3	3	4	10	0.45	-	1. Karot	1.92	4.30	2.09	9.21	1.80	11.03
							2. Karot	1.87	#	2.19	10.53	1.83	#
2.Deney (15.10.2009)	YK-4	1	4	6	0.45	-	1. Karot	2.22	11.43	2.14	14.16	2.07	18.47
							2. Karot	2.08	11.10	2.20	16.24	2.17	21.63
	YK-4	2	4.5	6	0.45	-	1. Karot	2.18	11.96	2.21	18.76	2.16	22.45
							2. Karot	2.17	12.75	2.19	17.19	2.14	21.87
	YK-5	3	4.5	16	0.45	0.4	1. Karot	2.21	11.20	2.11	14.45	2.12	20.04
							2. Karot	2.12	13.10	2.19	16.92	2.12	23.50
3.Deney (23.10.2009)	YK-6	1	4.5	9	0.45	0.5	1. Karot	2.18	11.57	2.22	17.26	2.39	20.00
							2. Karot	2.15	10.27	2.25	18.27	2.14	21.48
	YK-6	2	5	9	0.45	0.5	1. Karot	2.11	#	2.12	#	2.01	#
							2. Karot	2.20	12.07	2.06	#	2.09	17.59
	YK-7	3	5	8	0.45	-	1. Karot	2.07	8.66	2.11	16.90	2.16	18.13
							2. Karot	2.15	10.32	2.15	17.90	2.12	20.88
4.Deney (10.11.2009)	YK-8	1	4	6	0.45	-	1. Karot	2.04	8.95	2.14	17.48	2.05	21.73
							2. Karot	2.05	10.78	2.12	15.20	2.07	24.68
	YK-8	2	4.5	6	0.45	-	1. Karot	2.07	14.02	2.01	#	2.06	23.57
							2. Karot	2.13	15.53	2.12	17.51	2.06	25.88
	YK-8	3	5	6	0.45	-	1. Karot	2.11	15.91	2.10	#	2.07	18.34
							2. Karot	2.07	14.12	2.12	16.04	2.10	#
5.Deney (17.11.2009)	YK-9	1	5.5	10	0.45	0.8	1. Karot	2.19	13.24	1.98	#	2.21	20.81
							2. Karot	2.14	13.14	2.13	15.16	2.23	19.50
	YK-9	2	5	10	0.45	0.8	1. Karot	2.20	13.03	2.24	17.87	2.14	20.10
							2. Karot	2.19	15.03	2.26	17.71	2.18	19.31
	YK-9	3	4.5	10	0.45	0.8	1. Karot	2.17	15.69	2.17	15.69	2.22	20.98
							2. Karot	2.07	12.33	2.13	#	2.17	18.52

$\gamma_3, \gamma_7, \gamma_{28}$ = 3, 7 ve 28. gün birim hacim ağırlıkları, f_3, f_7, f_{28} = 3, 7 ve 28. gün basınç dayanımları

M_{su}/M_c = Su/çimento oranı (ağ.), M_a = Hava sürükleyici miktarı, %, s = Yerinde çökme miktarı (cm)

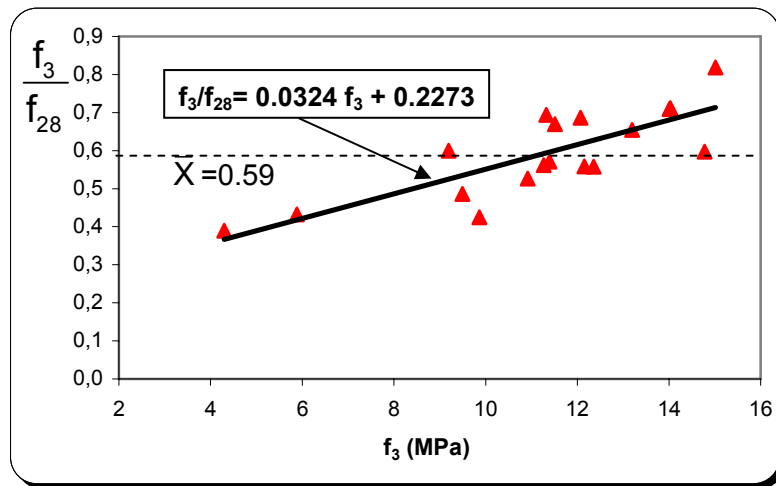
* Hava sürükleyici katkı miktarının çimento miktarına ağırlıkça oranı

Basınç dayanımı testleri yapılırken karot numunelerinin bazılarında birtakım nedenlerden dolayı aksaklık tespit edilip sağlıklı sonuç alınamadığından çizelgede bu sonuçlar “#” ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 Püskürtme beton deneylerinin ortalama dayanım sonuçları

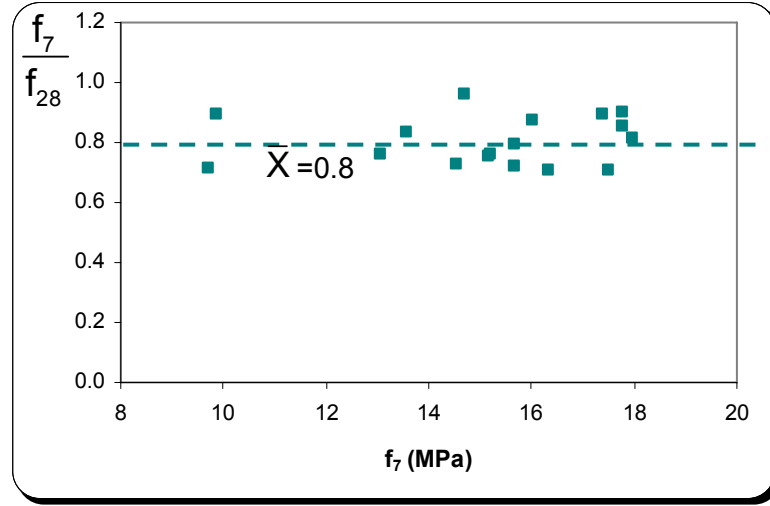
Tarih	Yaş Karışım (YK)	$f_{3,ort}$ (MPa)	$f_{7,ort}$ (MPa)	$f_{28,ort}$ (MPa)	f_3/f_{28}	f_7/f_{28}
1.Deney (09.10.2009)	YK-1	5.88	9.70	13.59	0.433	0.713
	YK-2	9.20	14.70	15.33	0.600	0.959
	YK-3	4.30	9.87	11.03	0.390	0.895
2.Deney (15.10.2009)	YK-4	11.27	15.20	20.05	0.562	0.758
	YK-4	12.36	17.98	22.16	0.558	0.811
	YK-5	12.15	15.69	21.77	0.558	0.720
3.Deney (23.10.2009)	YK-6	10.92	17.77	20.74	0.527	0.857
	YK-6	12.07	#	17.59	0.686	#
	YK-7	9.49	17.40	19.51	0.487	0.892
4.Deney (10.11.2009)	YK-8	9.87	16.34	23.21	0.425	0.704
	YK-8	14.78	17.51	24.73	0.598	0.708
	YK-8	15.02	16.04	18.34	0.819	0.875
5.Deney (17.11.2009)	YK-9	13.19	15.16	20.16	0.654	0.752
	YK-9	14.03	17.79	19.71	0.712	0.903
	YK-9	14.01	15.69	19.75	0.709	0.794
Aritmetik Ortalama ($\bar{X}$)					0.59	0.80

Mevcut 3, 7 ve 28 günlük karot basınç dayanımları arasında korelasyon kurulması amaçlanmıştır. Böylece belirlenememiş dayanımların da kestirimi mümkün olacaktır.



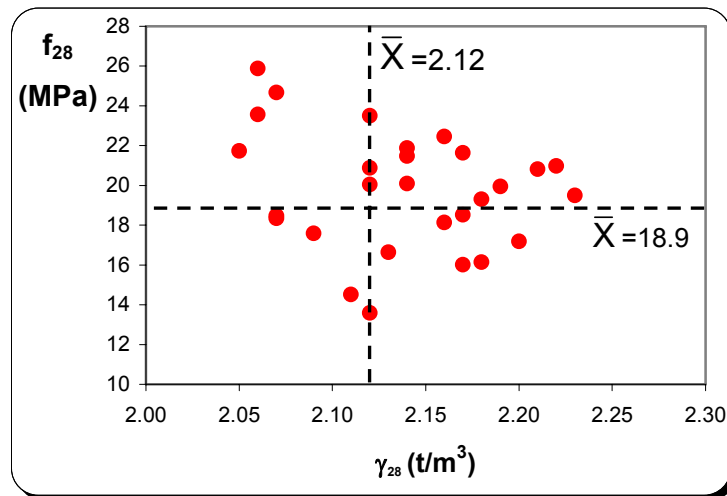
Şekil 4.7 f_3/f_{28} oranı ile f_3 basınç dayanım sonuçları arasındaki ilişki

Yapılan istatistik inceleme neticesinde 3 ve 28 günlük dayanımlar (f_3 , f_{28}) arasında korelasyon katsayısı $R=0.87$ olan lineer bir ilişki elde edilmiştir (Şekil 4.7). Buna karşın 7 ve 28 günlük basınç dayanımı (f_7 , f_{28}) sonuçları arasında bir korelasyonun oluşmadığı (Şekil 4.8), bu durumun priz hızlandırıcı katkının etkisi olduğu ileri sürülebilir. f_7/f_{28} oranı ortalama $\bar{X}=0.8$ değeri Girgin vd. (1998, Şekil 3) kaynağında verilen f_7/f_{28} oranı ortalama $\bar{X}=0.818$ değeri ile örtüşmektedir.



Şekil 4.8 f_7/f_{28} oranı ile f_7 basınç dayanım sonuçları arasındaki ilişki

28 günlük basınç dayanımı ile yoğunluk arasında doğrudan bir korelasyon elde edilmemiştir, bu durum betonun klasik bir laboratuvar betonu değil, pek çok faktöre bağlı püskürtme beton olmasından kaynaklandığı düşünülebilir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Basınç dayanımı (f_{28}) ile yoğunluk (γ_{28}) değerleri arasındaki ilişki

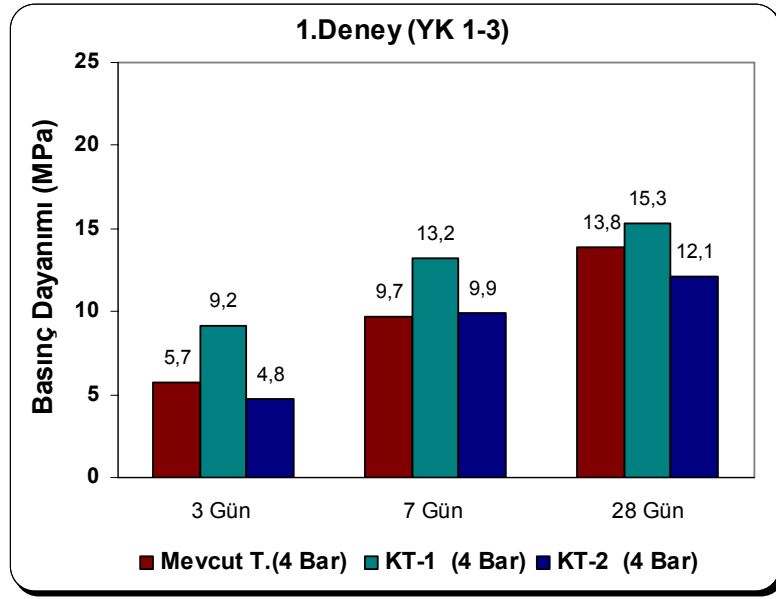
f_3 ve f_{28} arasında elde edilen korelasyon ve f_7/f_{28} oranından faydalanılarak sonuç alınamayan karotlar için basınç dayanımları hesaplanmıştır (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13 Belirlenememiş karotlara ait kestirimler de dahil edilmiş dayanım değerleri

Tarih	Yaş Karışım (YK)	Püskürtme Basıncı (Bar)	s	Msu/Mç	Ma*	f_3 (MPa)	f_7 (MPa)	f_{28} (MPa)
1.Deney (09.10.2009)	YK-1	4	17	0.45	—	5.88	10.04	14.07
						5.52	9.35	13.59
	YK-2	4	16	0.45	—	9.44	11.68	14.51
						8.95	14.70	16.14
	YK-3	4	10	0.45	—	4.30	9.21	11.03
						5.21	10.53	13.16
2.Deney (15.10.2009)	YK-4	4	6	0.45	—	11.43	14.16	18.47
						11.10	16.24	21.63
	YK-4	4.5	6	0.45	—	11.96	18.76	22.45
						12.75	17.19	21.87
	YK-5	4.5	16	0.45	0.4	11.20	14.45	20.04
						13.10	16.92	23.50
3.Deney (23.10.2009)	YK-6	4.5	9	0.42	0.5	11.57	17.26	20.00
						10.27	18.27	21.48
	YK-6	5	9	0.42	0.5	12.07	14.07	17.59
						8.66	16.90	18.13
	YK-7	5	8	0.45	—	10.32	17.90	20.88
						8.95	17.48	21.73
4.Deney (10.11.2009)	YK-8	4	6	0.45	—	10.78	15.20	24.68
						14.02	18.86	23.57
	YK-8	4.5	6	0.45	—	15.53	17.51	25.88
						15.91	14.67	18.34
	YK-8	5	6	0.45	—	14.12	16.04	20.62
						13.24	16.65	20.81
5.Deney (17.11.2009)	YK-9	5.5	10	0.45	0.8	13.14	15.16	19.50
						13.03	17.87	20.10
	YK-9	5	10	0.45	0.8	15.03	17.71	19.31
						15.69	15.69	20.98
	YK-9	4.5	10	0.45	0.8	12.33	14.82	18.52

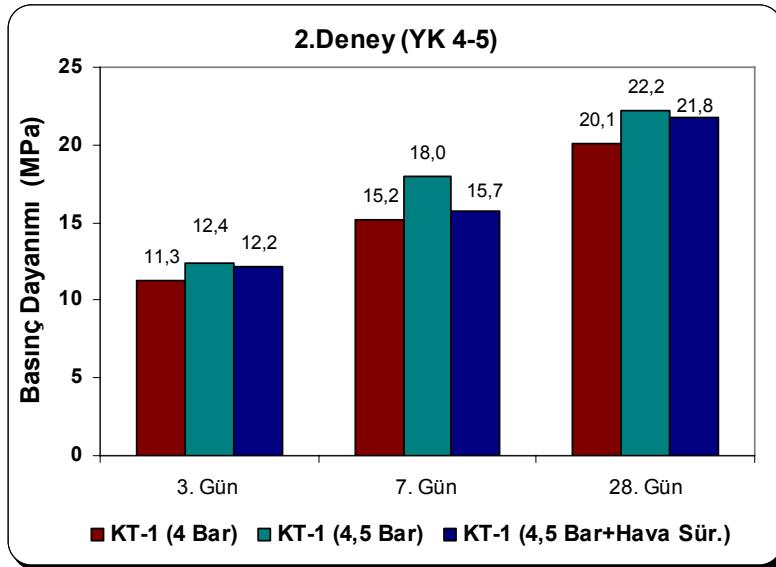
Elde edilen basınç dayanımlarından aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

o Aynı püskürtme hava basıncı için farklı karışım tasarımlarıyla yapılan betonun 3, 7 ve 28 günlük dayanım sonuçlarına bakıldığında KT-1 ile elde edilen püskürtme beton basınç dayanımının Mevcut Karışım Tasarımı ve KT-2 ile yapılan betonlardan daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.10).



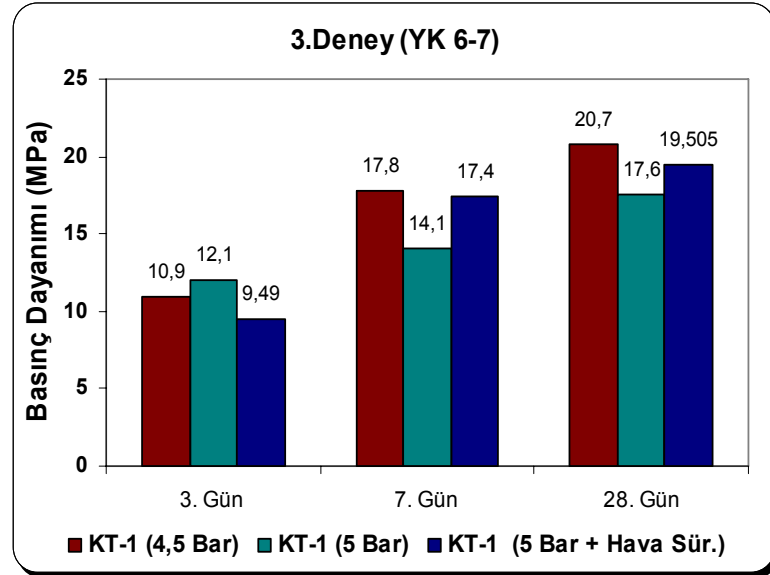
Şekil 4.10 Farklı karışım tasarımlarına ait basınç dayanım sonuçları arasındaki ilişki

o KT-1 ile üretilen betonun farklı püskürtme basınçları ile uygulanmasından elde edilen beton basınç dayanımlarına ait sonuçlar incelendiğinde en verimli sonucun 4.5 bar hava ile püskürtülen panelden elde edildiği görülmüştür. Bu hava basıncı ile üretilen beton numuneler incelendiğinde, hava sürükleyici katkı kullanılan betonda, hava sürükleyici katkısız betona oranla basınç dayanımında önemli bir değişim gözlenmemektedir (Şekil 4.11),(Dayanım değerlerindeki küçük değişimlerin püskürtme betonun klasik beton döküm işlemine göre daha değişken doğasından kaynaklandığı düşünülebilir).



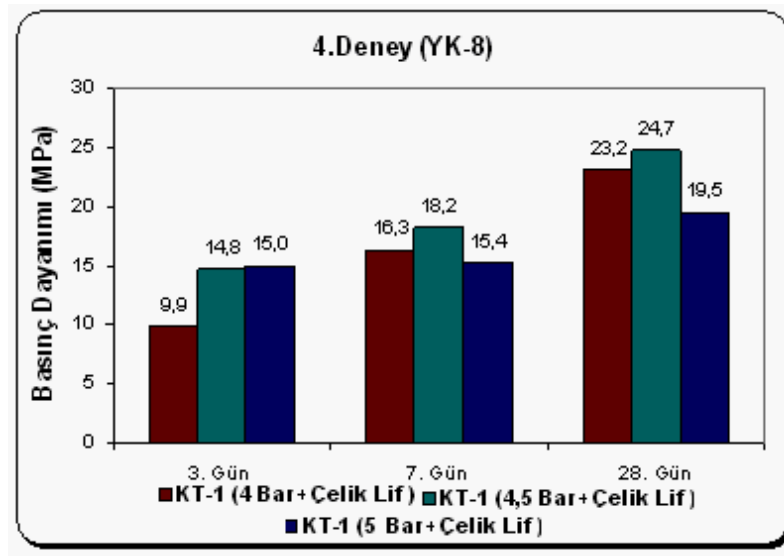
Şekil 4.11 Aynı karışım ve farklı hava basıncı ile uygulanan püskürtme betonda basınç dayanımları arasındaki ilişki

o 4.5 bar basınçla püskürtülen betonda, 5 bar ile püskürtülen betona göre daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.12). Hava sürükleyici kullanımının negatif bir etkisi izlenmemektedir.



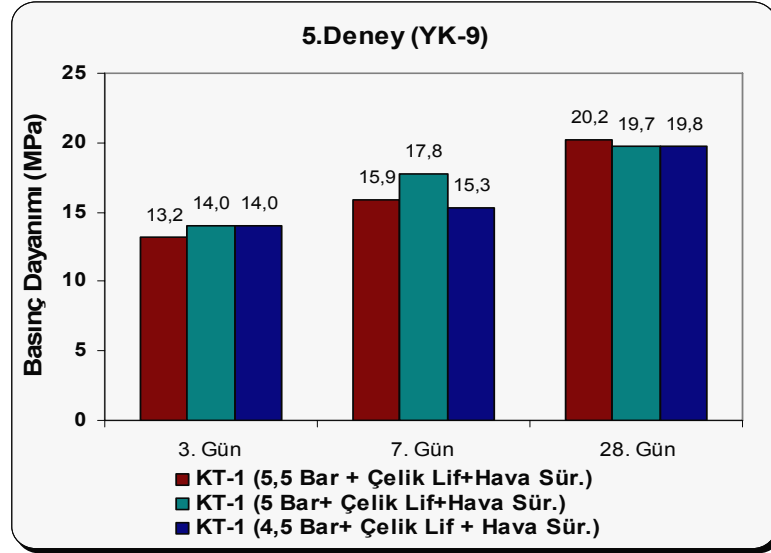
Şekil 4.12 Aynı karışım ve farklı hava basıncı ile uygulanan püskürtme betonda basınç dayanımları arasındaki ilişki

o Çelik liflerin 40 kg/m^3 oranında eklenmesiyle hazırlanan püskürtme betonda basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, yine en iyi sonucun 4.5 bar ile püskürtülen betonda elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.13). Çelik lifler, 4.5 bar ile püskürtülen lifsiz betona kıyasla basınç dayanımında ~% 16 oranında artış sağlamıştır.



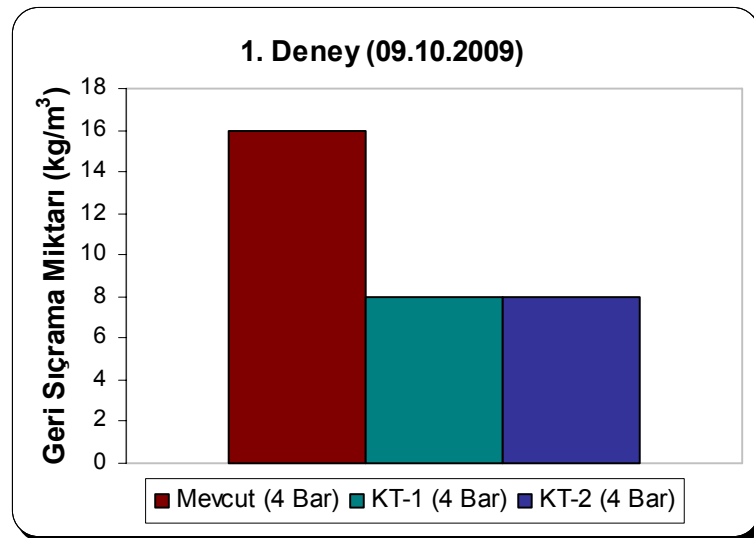
Şekil 4.13 Çelik lif katılarak hazırlanan püskürtme betonda farklı hava basınçları için sonuçların kıyaslanması

o Bir önceki deneye kıyasla, çelik lif katkılı betona hava sürükleyici eklenmesi durumunda, farklı hava basıncı ile elde edilen basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, hava sürükleyici katkının çelik lifli püskürtme beton dayanımını olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.14).



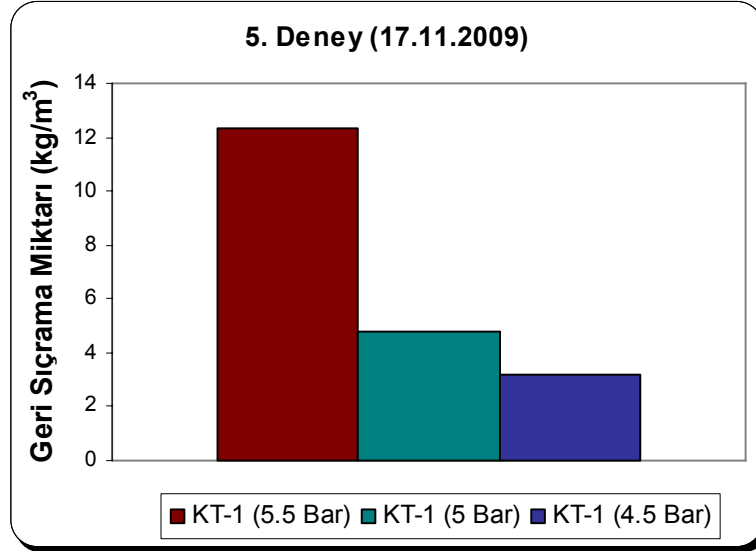
Şekil 4.14 Çelik liflerin ve hava sürükleyici katkının eklenmesiyle hazırlanan betonlarda farklı hava basınçları için dayanımların karşılaştırılması

o Geri sıçrama açısından sonuçlar incelendiğinde; 1. deneyde aynı püskürtme basıncı altında Mevcut Karışım Tasarımı ile püskürtülen betonun KT-1 ve KT-2 ile püskürtülen betona kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla sıçradığı ölçülmüştür (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Aynı püskürtme basıncı ve farklı karışım tasarımları ile denenen püskürtme betonların geri sıçrama miktarı arasındaki ilişki

o 5.deneyde ise aynı karışım tasarımının farklı püskürtme basıncı altında (5.5, 5, 4.5 bar) püskürtülmesi sonucunda, en düşük geri sıçramanın 4.5 bar basınçla püskürtülen panelde olduğu görülmüştür (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Aynı karışım tasarımı ve farklı püskürtme basıncı (5.5, 5, 4.5 bar) altında denenen püskürtme betonların geri sıçrama miktarı arasındaki ilişki

4.6 Çelik Lifli Betonun Karşılaştırmalı Maliyet Analizi

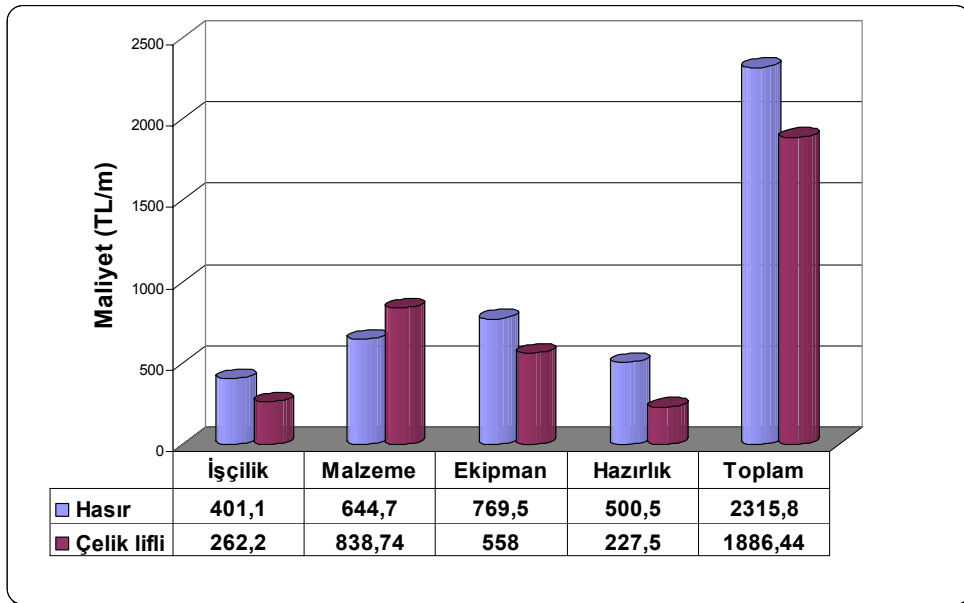
Bu bölümde, yapılan deneylerin ışığında, NATM ile açılan tünellerde uygulanan çelik hasır yerine çelik lifin kullanılabilirliği konusunda maliyet ve zaman analizleri gerçekleştirilecektir. Analizlerden elde edilecek sonuçlar çelik lifin ekonomik uygulanabilirliğinin mevcut olup olmadığı konusunda gerçekçi sonuçlar verecektir.

Çelik lifli ve lifsiz püskürtme betona ait maliyetler hesaplanarak Çizelge 4.14’te verilmiştir. Maliyetler incelendiğinde, çelik liflerin 1 m³ püskürtme beton maliyetinde önemli bir artışa neden olduğu görülmektedir. Ancak bu artışın klasik sistemde hasır yerleştirme işçilik maliyetleri ile birlikte değerlendirilmesi zorunludur. 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi Anahat (A tipi) tüneli üst yarı kısmının hasır ve çelik lifle desteklenme maliyeti Çizelge 4.15’te karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar topluca Şekil 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.14 1m³ çelik lifli ve lifsiz püskürtme betona ait maliyetler

	Lifsiz Püskürtme Beton Bileşenleri	Çelik Lifli Püskürtme Beton Bileşenleri	Birim Maliyet	Lifsiz Püskürtme Beton Maliyeti	Çelik Lifli Püskürtme Beton Maliyeti
Malzemeler	(kg/m ³)	(kg/m ³)	TL/ton	TL/m ³	TL/m ³
Çimento	400	400	80	32	32
Su	180	180	4.8	0.86	0.86
No 1 mıcır (5-16)	344 (%20)	—	10.5	3.61	—
No 1 mıcır (5-12.5)	—	123 (%7)*	10.5	—	1.29
Kırma kum (0-8)	596 (% 34)	756 (% 44)	10.5	6.26	7.94
Doğal kum (0-5)	796 (% 46)	857 (% 49)	15.5	12.34	13.28
Süper akışkanlaştırıcı	6 (% 1.5)	6 (% 1.5)	750	4.5	4.5
Priz hızlandırıcı	28 (% 7)*	28 (% 7)*	680	19.04	19.04
Çelik lif	—	40	2520	—	100.8
Toplam Fiyatı				78.61	179.7

Çelik lifli püskürtme beton, tüm maliyetler dikkate alındığında hasır donatılı püskürtme beton uygulamasına göre % 23 oranında daha ekonomik sonuç vermektedir (Çizelge 4.15, Şekil 4.17). Aynı zamanda % 52 oranında da zaman tasarrufu söz konusudur. Çelik lifli püskürtme beton ile desteklemenin kazıdan hemen sonra yapılabilmesi, emniyet ve güvenlik düzeyini de azami ölçüde arttırmaktadır.



Şekil 4.17 A tipi tünel üst yarı kısmının hasır çelik veya çelik lifle desteklenmesi sonucunda m' lik ilerleme maliyetlerinin kıyaslanması

Çizelge 4.15 İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi Anahat (A tipi) tünelde üst yarı kısmının hasır ve çelik lifle desteklenmesi sonucunda 1 m'lik ilerleme maliyetlerinin kıyaslanması (2010 yılı güncel fiyatlarla)

Hasır Çelikli Püskürtme Betonla Destekleme Yapılması							Çelik Lifli Püskürtme Betonla Destekleme Yapılması						
	Yapılan İmalatlar	Miktar	İşlem Süresi (Saat)	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	İmalat Tutarı (TL/m)		Yapılan İmalatlar	Miktar	İşlem Süresi (Saat)	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	İmalat Tutarı (TL/m)
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0.5	saat/m	182	91	Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0.5	saat	182	91
1.Aşama	1.Kat Çelik Hasır maliyeti	14	2	m ² /m	4.1	58	1.Aşama	Çelik İksa	181	1.5	kg/m	1.5	278
	Çelik İksa Maliyeti	181	2	kg/m	1.5	278		İş Makinesi	1	1.5	saat/m	141	211.5
	İş Makinesi	1	2	saat/m	141	282		Makine Operatörü	1	1.5	saat/m	21	31.5
	Makine Operatörü	1	2	saat/m	21	42		Düz İşçi	5	1.5	saat/m	14.3	107.3
	Düz İşçi	5	2	saat/m	14.3	143	Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0.75	saat	182	136.5
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0.75	saat	182	136.5	2.Aşama	Toplam Püskürtme Beton (20 cm)	2.9	1.75	m ³	179.7	521.2
2.Aşama	1.Kat Püskürtme Beton (15 cm)	2.1	1	m ³	78.6	165.1		Geri Sıçrama Miktarı (% 7.5)	0.22	1.75	m ³	179.7	39.5
	Geri Sıçrama Miktarı (% 10)	0.21	1	m ³	78.6	16.5		Püskürtme Robot Makinesi	1	1.75	saat/m	198	346.5
	Püskürtme Robot Makinesi	1	1	saat/m	198	198		Robot Operatörü	2	1.75	saat/m	21	73.5
	Robot Operatörü	2	1	saat/m	21	42		Düz İşçi	2	1.75	saat/m	14.3	50.1
	Düz İşçi	2	1	saat/m	14.3	28.6							
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0.75	saat	182	136.5							
3.Aşama	2. Kat Çelik Hasır	14	1	m ² /m	4.1	58							
	Makine	1	1	saat/m	141	141							
	Makine Operatörü	1	1	saat/m	21	21							
	Düz İşçi	5	1	saat/m	14.3	71.5							
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0.75	saat	182	136.5							
4.Aşama	2.Kat Püskürtme Beton (5 cm)	0.8	0.75	m ³	78.6	62.9							
	Geri Sıçrama Miktarı (% 10)	0.08	0.75	m ³	78.6	6.3							
	Püskürtme Robot Makinesi	1	0.75	saat/m	198	148.5							
	Robot Operatörü	2	0.75	saat/m	21	31.5							
	Düz İşçi	2	0.75	saat/m	14.3	21.5							
	Toplam Süre		9.5	Toplam Maliyet		2315.75		Toplam Süre		4.5	Toplam Maliyet		1886.54

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tünel açma teknikleri geçmişten günümüze ciddi oranda değişim göstermiştir. Genellikle, tünel açılacak güzergahın topoğrafyası, zemin koşulları ve açılacak tünelin geometrisi gibi parametreler değerlendirilerek tünel açım teknikleri belirlenmektedir. Tünel açma makinelerinin hızlı gelişimi de, zemin şartlarından nerede ise bağımsız şekilde, tünel açılabilmesini beraberinde getirmiştir.

Günümüzde tünel açma yöntemlerinden en deneysel ve en esnek olanı NATM yöntemidir. Bu yöntemin iksa sisteminde kullanılan püskürtme beton, standart betona göre kalıp gerektirmeden yerleştirilmesi, priz hızlandırıcı katkıları yardımıyla taşıyıcılık görevini hemen yerine getirmeye başlaması gibi avantajları nedeniyle yeraltı mühendislik yapılarında vazgeçilmez hale gelmiştir. Püskürtme beton kaplamada donatı olarak kullanılan hasır çeliğin yerini dünyada son yıllarda gittikçe daha fazla uygulamada çelik lif almaktadır. Türkiye’de püskürtme betonda çelik lif kullanımı konusu henüz yaygın uygulama alanı bulamamıştır. Bu tez kapsamında, püskürtme beton kaplamada çelik liflerin kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacı ile deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle, mevcut uygulanan karışım tasarımı standartlara uygun olacak şekilde modifiye edilmiştir. Daha sonra geri sıçramayı minimum, yerleşebilirliği maksimum yapacak şekilde püskürtme hava basıncı ve hava sürükleyicinin etkisi araştırılmıştır. Bütün bu parametreler belirlendikten sonra çelik liflerin dayanım ve geri sıçramaya etkisi incelenmiş, deneyler tamamlandıktan sonra da maliyet faktörü değerlendirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışma kapsamında, ACI Standardına uygun olarak maks. agrega boyutu 12 mm alınmıştır. Dayanıklılığı azaltmamak açısından su/çimento oranı olarak mevcut kullanılan oran (0.45) benimsenmiştir. Bu oranın < 0.40 seçilmesi geri sıçramada artış riskinden dolayı tercih edilmemiştir (0.40 oranı ise denenmek istenmiş, ancak süperakışkanlaştırıcı tipi bu işleme uygun olmadığından tüm deneylerde 0.45 oranı esas alınmıştır).

Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Püskürtme betonda yerinde çökme miktarının 10 cm’den fazla olması uygun değildir, yüzeyden akmaktadır. Bu değer ideal olarak 4-7 cm seçilebilir, mikserin santraldan çıkış çökme değeri de bu düzeye göre belirlenmelidir. Hava sürükleyici katkı kullanımı durumunda hava sürükleyicinin yerleşime, çökme miktarı > 12 cm ise, olumlu katkısı vardır, ayrıca bu durumda yüzeyde akma da gözlenmemektedir. Dayanım üzerinde negatif etki söz konusu değildir. Hava sürükleyici katkının < 10 cm çökme ile uygulanması ise yerleşime katkı

sağlamamaktadır.

- Deneylerde nozul yüzeye dik olarak, optimum olarak belirlenen 1.0-1.1 m mesafede tutulmuştur. Geri sıçrama miktarı ve beton basınç dayanımı açısından en iyi sonuç 4.5 bar'lık hava basıncı ile elde edilmiştir.
- Çelik liflerin betona katılmasıyla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmektedir.
- Çelik liflerin sadece 1m³ betonun maliyetine etkisi düşünüldüğünde gayri ekonomik olduğu, ancak malzeme, ekipman, işçilik maliyetleri birlikte düşünüldüğünde %23 daha ekonomik sonuç verdiği, ayrıca ~% 50 oranında da zaman tasarrufu sağladığı belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar çelik liflerin Türkiye'de tünel kaplama tasarımında uygulanması için ümit vericidir.

Bu çalışma, Türkiye'de NATM püskürtme beton uygulamalarında, çelik liflerin kullanılabilirliği hakkında bir öncü çalışma niteliğinde olup, bundan sonraki çalışmalarda aşağıdaki faktörler de dikkate alınarak karışım tasarımı, dayanım ve geri sıçrama faktörlerinin daha detaylı şekilde belirlenmesi önerilir :

- 1) Su çimento oranının 0.40 olması durumu
- 2) Priz hızlandırıcının farklı düzeylerde (% 0, 5, 10) denenmesi ve hızlandırıcı miktarının optimizasyonu
- 3) Panelde değil tünel cidarında denenerek kalınlık, dayanım ve geri sıçrama performansının belirlenmesi

KAYNAKLAR

- ACI 506.2-95 (1995) "Specification for Shotcrete", American Concrete Institute.
- Armelin, H.S., Banthia, N., (1998) "Steel Fiber Rebound in Shotcrete", Concrete International 78, September 1998.
- Arioğlu, B., Yüksel, A., Kurtuldu, S., Arioğlu, E., (2002) "İzmir Metro Projesinde Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu Zemin Basıncı Dengeleme Tünel Metodu Uygulamaları", Yapı Dünyası, Nisan 2002, 35-49.
- Arioğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A.O., (2008) "Püskürtme Beton Bilgi Föyleri – Çözümlü Problemler Kitabı", Mayıs 2008 İstanbul.
- Arioğlu, E., (2009) "Tüneller", Y.T.Ü Ders Notları 1, Yapı Merkezi AR&GE Bölümü, İstanbul.
- Arioğlu, E., (2009) "Klasik Kazı Yöntemleri", Y.T.Ü Ders Notları 6, Yapı Merkezi AR&GE Bölümü, İstanbul.
- Arioğlu, E., Yüksel, A., (1999) "Tünel ve Yeraltı Mühendislik Yapılarında Çözümlü Püskürtme Beton Problemleri", TMMOB Maden Müh. Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- Arioğlu, E., Girgin, C., (1998) "Çelik Lifli Püskürtme Beton Kaplama Tasarımı Kaya Patlama Olayına Maruz Tünellerde Kullanım", 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 22-23 Ekim 1998, Zonguldak.
- Aruntaş, H.Y., (2006) "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli", Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Ankara.
- ASTM C 1018 Standardı, (1997) "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete", 10 December 1997.
- Austrian Concrete Society, (1990) "Guideline on Shotcrete", Vienna, 35 pp.
- Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D., (1994) "Steel-Fiber Reinforced Wet-Mix Shotcrete: Comparisons With Cast Concrete", Canada, 431.
- Bozkurt, M., (1987) "Tüneller Ders Notları", İ.T.Ü Mühendislik Mimarlık Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Cecil, O.S., (1970) "Correlation of Rock Bolt-Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels", Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana.
- Christopher, K., Loung, Y., Lai, R., Augustus, Y.F. Lee, (2004), "Properties of Wet-Mixed Fiber Reinforced Shotcrete and Fiber Reinforced Concrete With Similar Composition", Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, 10 May 2004, Hong Kong.
- Çınar, M., Feridunoğlu, C., (1994) "Tünel Açma Makineleri (TBM)" Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, 343-367, İstanbul.
- Çivici, F., (2004) "Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu", Beton Kongresi, 10-12 Haziran 2004, İstanbul.
- DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi, (1994) "Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton" MLZ-878: 9-75, Ankara.

Doyuran, C., Köksal, A., (2000), “Püskürtme Beton, Şantiye Dergisi, Şubat 2000”,140: 69-70, İstanbul.

Erguvanlı, K., (1982) Mühendislik Jeolojisi, İ.T.Ü Yayını, İstanbul.

Friant, J.E., Özdemir, L., (1994) “Tünel Açma Teknolojisi Bugün ve Yarın”, İTÜ Maden Fakültesi Tünel ve Galeri Açma Meslek İçi Semineri, İstanbul.

Fukushima, H., (1975) “History of Tunneling”

Garshol, K.F., Austin S.A., (1996) “New Admixtures for High Performance Shotcrete”, Proc. ACI/SCA Int. Conf. Sprayed Concrete/Shotcrete, 26-38, London.

Girgin, C., Yüksel, A., Arıoğlu, E., (1998) “Tünellerde Püskürtme Betonun Mekanik Büyüklükleri ve Kalite Kontrol İlkeleri”, 4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 22-23 Ekim 1998, Zonguldak.

Gürol, G., Doyuran, C., (2009), “Püskürtme Beton, Şantiye Dergisi, Nisan 2009”,250: 96-100, İstanbul.

Hirose, S., Yamazaki,Y., (1993) “Hydration Properties of Shotcrete With an Accelerator Based on Calcium Aluminate” Shotcrete for Underground Support VI. Proceedings Engineering Foundation Conf. Niagara on the lake, 26 May 1993, Canada, American Society of Civil Engineers, 25-32, New York.

Hoek, E., Karakuş, M., Başarır, H. (2006), Kaya Mühendisliği, 283, Ümit Ofset Matbaacılık, Ekim 2006, Ankara.

Huber, H.,(1995) “Practical Experiences With Shotcrete Containing Alkali-Free Accerelation”, Shotcrete for Undergroud Support VII Proceedings of the Engineering Foundation Conference Telfs, Austria, 11-15 June 1995, American Society of Civil Engineers, 165-169, New York.

ITA Working Group N 12, (2006) “Shotcrete Use”, ITA/AITES REPORT February 2006, Lausanne, Switzerland, 16.

Jeng F., Lin, M.L., Yuan, S.C., (2001) “Performance of Thoughness Indices for Steel Fiber Reinforced Shotcrete”, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, 24 September 2001, 76, Taipei, Taiwan.

Jolin, M., Beaupre, D., (2003) “Understanding Wet-Mix Shotcrete: Mix Design, Specifications and Placement”, 25-26 August 2003, Quebec City, Canada.

Karakuş, M., Fowell, R.J., (2004) “An Insight Into the New Austrian Tunnelling Method”, Kayamek, 2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / Rockmec, VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas.

Kovari K., (2003) “Tunnelling and Underground Space Technology”, Volume 18, Issue 5, November 2003, 555.

Kurt, C., Yılmaz, Ö., Şimşek, S., (1994) “İstanbul Metrosu Tünellerinde Boru Şemsiye (Umbrella Arch) Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları”, Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, 331-342, İstanbul.

Lukas,W., Kusterle W., (1990) “The Influence of Water Glass on the Technological Parameters of Shotcrete”, Shotcrete for Underground Support V Proceedings of the

Engineering Foundation Conference Uppsala, Sweden, 3-7 June 1990, American Society of Civil Engineers, 197-212, New York.

Lukas, W., Kusterle, W., Pichler, W., (1995) "Innovations in Shotcrete Technology", Shotcrete for Underground Support VII Proceedings of the Engineering Foundation Conference Telfs, Austria, 11-15 June 1995, American Society of Civil Engineers, 155-164, New York.

Mahar, J.W., Parker, H.W., Wuellner, W.W., (1975) "Shotcrete Practice in Underground Construction", Department of Civil Engineers, University of Illinois, Final Report, August 1975.

Melbye, T.A., Dimmock, R.H., (2001) "Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete" Keynote Paper Given at the International Conference on Engineering in Shotcrete, Hobart, Tasmania, 2-4 April, 2001, Australia.

Melbye, T.A., (2006) "Sprayed Concrete for Rock Support", UGC International Division of BASF Construction Chemical, 11th Ed, 279, Zurich.

Melbye, T.A., (1996) "Sprayed Concrete for Rock Support", MBT International Underground Construction Group, Switzerland, 5th Ed, 1996, 188, Zurich.

Neville, A.M., (1995) "Properties of Concrete" Fourth and Final Addition, Longman Group Limited, 1995, London.

Özbayoğlu, F., Kenet, L., (1989) "Püskürtme Beton Uygulamalarında Çelik Fiber Kullanımının Dayanım Üzerindeki Etkileri", Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, 9 -12 Ekim 1989 Ankara T.M.M.O.B İnşaat Mühendisleri Odası Cilt 2.p 507-522.

Özyüksel, M., (1988) "Osmanlı-Alman İlişkilerinin Gelişim Sürecinde Anadolu ve Bağdat Demiryolları", Arba Yayınları, İstanbul.

Pfeuffer M., Kusterle W., (2001) "Rheology and Rebound Behaviour of Dry-Mix Shotcrete" Institute for Building Materials and Building Physics, University of Innsbruck, 9 July 2001, Innsbruck, Austria.

Prudenico, L.R.J., Armelin, H.S., Helene, P., (1996) "Interaction Between Accelerating Admixtures and Portland Cement for Shotcrete: the Influence of the Admixture's Chemical Base and the Correlation Between Paste Tests and Shotcrete Performance" ACI Material Journals 93, 1 November 1996, 619-628.

Prudencio, L.R.J., (1998) "Accelerating Admixtures for Shotcrete", Cement and Concrete Composites, Volume 20, Number 2, April 1998, 213-219.

Rabcewicz, L., (1964) "The New Austrian Tunnelling Method", Part one, Water Power, November 1964, 453-457.

Rabcewicz, L., (1964) "The New Austrian Tunnelling Method", Part two, Water Power, December 1964, 511-515.

Ramakrishnan, V., Coyle, W.V., Dahl, L.F., Schrader, E.K., (1981) "A Comparative Evaluation of Fiber Shotcretes", American Concrete Institute, 1 January 1981.

Schallom, R., Ballou, M., (2003) "What You Need to Know About Wet- Mix Shotcrete"

Schmidt, M., (1995) "Research and Latest Development of Materials for Shotcreting",

Shotcrete for Underground Support VII. Proceedings of the Engineering Foundation Conference Telfs, Austria, 11-15 June 1995, American Society of Civil Engineers, 44-52, New York.

Spearing A.J.S., Hague I., (2003) "The Application of Underground Support Liners Reaches Maturity", Technology Roadmap for Rock Mechanics, South Africa Institute of Mining and Metallurgy.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., (2007) "Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler", İstanbul.

Tazawa, Y., (1995) "Admixtures and Fibres for Shotcrete in Japan", Shotcrete for Underground Support VII. Proceedings of the Engineering Foundation Conference Telfs, Austria, 11-15 June 1995, American Society of Civil Engineers, 127-136, New York.

TS 10515 Standardı, (1992) "Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu", 12 Ağustos 1992.

Uğurlu, A., (1994) "Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Özellikleri ve Su Yapılarında Kullanılması", DSİ Teknik Bülteni, 80, 18-22.

Ünlütepe, A., (2005) "Marmaray BC1 Projesi ve Ölçme Çalışmaları", Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İ.T.Ü-İstanbul.

Ünlütepe, A., Messing, M., (2005) "Tünel Ölçme Uygulamalarında Son Yenilikler", Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İ.T.Ü, İstanbul.

Ünlütepe, A., (2003) "Tünel İnşaatı Sırasında Uygulanan Ölçme Yöntemleri ve Bu Yöntemlerin Değişik Tünel Metotları İçin Karşılaştırması" 1.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 30-31 Ekim 2003, Y.T.Ü, İstanbul.

Stack, B., (1982) "Handbook of Mining and Tunnelling Machinery", John Wiley & Sons, New York.

WHD Microanalysis Consultants Ltd, (1996) "Long Term Durability of Concrete Incorporating a New Admixture: A Study Using Scanning Electron Microscopy". Technical Report, Ipswich, UK, January 1996, 12.

Yaşar, E., (1988) "Tüneller, Tünel Açım Teknikleri, Tünel Açımında Kullanılan Makineler, Kullanıldığı Yerler" Sanat Yapıları Dönem Ödevi, İstanbul.

Yerlikaya, M., (2006), "Endüstriyel Zemin Betonları", 450, İMO İstanbul Şubesi, İstanbul.

Yıldırım, H., Uyan, M., Kemerli, M.K., (2002) "Priz Hızlandırıcı Püskürtme Beton Katkılarının Dayanıma Etkisi, Şantiye Dergisi, Temmuz 2002", 169: 82-84, İstanbul.

Yurdakul, Ş., (2001) "Püskürtme Beton Teknolojisinin TTK Ocakları Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması", Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Eylül 2001, Zonguldak.

Zhao, J., (2008) "Education and Training" (<http://lmr.epfl.ch/page57658.html>)

EKLER

- Ek 1 NATM' de kazı iksa (destekleme) sistemi hakkında detaylı bilgiler
- Ek 2 A5 tipi kazı iksa sistemine ait ayrıntılı bilgiler (Şemsiye borusu, Zemin çivisi ve Süren Uygulamaları)
- Ek 3 İstanbul Metro Projesi NATM yöntemiyle açılan tünel güzergahındaki inşaat çalışmalarının genel hatlarıyla tanıtılması
- Ek 4 EPB makineleri ile ilgili detaylı bilgiler
- Ek 5 Uygun yöntemin belirlenmesinde önemli faktör olan saha araştırmasının yapılması

Ek 1 NATM’de kazı iksa (destekleme) sistemi hakkında detaylı bilgiler

NATM’de kazı iksa (destekleme) sistemleri;

Genel olarak delme tüneller Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Australian Tunnelling Method – NATM) ile inşa edilmektedir. NATM hem emniyetli hem de ekonomik bir şekilde tünel açılmasına imkân veren bazı prensipleri içermektedir. NATM’ da kazı iksa (destekleme) sistemlerinin oluşturulmasında, Uluslararası kabul görmüş Avusturya standartlarına (ÖNORM 2203, 1994) göre tanımlı kaya sınıflandırma sistemlerinden yararlanılmıştır. Bu sınıflandırma sistemi Çizelge 1.1’de verilen kaya destek sınıfları (Q) ve (RMR) değerlerine göre bulunmaktadır.

Çizelge 1.1 Avusturya Standartları ÖNORM 2203’e göre kaya sınıflama sistemlerinin karşılaştırılması ve kaya sınıfları;

	BARTON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BIENIAWSKI KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (RMR)	ÖNORM B2203 Ekim 1994 öncesi	ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrası
10000		100		
400	Son derece iyi	94	A1 Stabil	A1 Sağlam
	Pek çok iyi			
100	Çok iyi	82.7 80	A2 Aşırı sökülen	A2 Sonradan az sökülen
40	İyi	76		
10		65	B1 Gevrek	B1 Gevrek
4	Orta	60 58		
	Zayıf		B2 Çok gevrek	B2 Çok gevrek
1		47		
	Çok zayıf	40	B3 Taneli	B3 Taneli
0.1		29		
	Çok fazla zayıf	20	C1 Baskılı	C1 Dağ atma
0.01		17		
	Çok derece zayıf	5	C2 Çok baskılı	C2 Baskılı
0.001		2.5		
			L1 Gevrek zemin yüksek kohezyon	C3 Çok baskılı
			L2 Gevrek zemin düşük	C4 Akıcı
				C5 Şişen

Örnek: Barton kaya kütleli niteliği “çok zayıf” olarak tanımlanmışsa ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrasına göre bu kaya “B3 kaya kütleli” olarak tanımlanmaktadır. Böyle bir kaya kütleli’nin genel özellikleri ve kullanılması gereken iksa sistemiyle ilgili bilgiler ilerleyen sayfalarda ayrıntılı bir şekilde bulunabilir. (Karayolları Türkiye Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No: 267, Ankara, 2006, s. 312-325’ den özetleyerek

alıntıl原因 Yüksel.Proje, 2007, Ankara,) (www.dlh.gov.tr);

1. ÖNORM B2203'te tanımlanan kaya sınıfları ve özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

1.1 “A” Kaya Sınıfı :

A kaya sınıfı “Stabil-Hafif Aşırı Sökülen kaya Kütleleri” olarak tanımlanmaktadır. Bu cins Kaya kütleleri genellikle stabil olup elastik davranış gösterirler. Yerel destek uygulanmaması halinde, yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler meydana gelebilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deformasyonlar hızla azalır. A kaya sınıfı kendi içinde A1 (stabil) ve A2 (sonradan az sökülen) olmak üzere iki tipe ayrılır.

a) A1 Destek Sınıfı :

“Stabil” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Deformasyonlar küçük olup, çok hızlı azalır. Serbest kaya parçaları temizlendikten sonra sökülme eğilimi yoktur. Suyun kaya stabilitesine olumsuz bir etkisi yoktur. Tünel kazısı teorik olarak “tam ayna” olarak yapılabilir. Kazı profilinin büyük olması halinde, kazı genellikle üstyarı ve altıyarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

b) A2 Destek Sınıfı :

“Sonradan Az Sökülen” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında süreksizlikler ve kaya kütlesi zati ağırlığından dolayı sığ sökülmelerin olma eğilimi vardır. Suyun kaya stabilitesine etkisi gözardı edilebilecek durumdadır. Tünel kazısı teorik olarak “tam ayna” olarak yapılabilir. Kazı profilinin büyük olması halinde, kazı genellikle üstyarı ve altıyarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Üstyarı kazısında 2.5-3.5 m, altıyarıda 4 m ile sınırlanmaktadır. Bu tip destek sınıfında sadece bölgesel olarak tünel tavanında/yan duvarlarda yersel blokların stabil hale getirilmesi amacıyla kaya bulonları kullanılabilir. Bu durumda kullanılacak kaya bulonları, aynadan itibaren en çok bir ilerleme adımı geriden uygulanacaktır. Kaya bulonlama yönü süreksizliklerin yönelimlerine göre seçilecektir. Bulonlama ve diğer destekler projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

1.2 “B” Kaya Sınıfı :

B kaya sınıfı “Gevrek Kaya Kütleleri” olarak tanımlanmaktadır. “B” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetlenme ve/veya çekme mukavemeti azlığından ötürü hızlı

gevşeme ve ayrışmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk civarındaki ikincil gerilmeler, kaya kütlesinin mukavemetini biraz aşmakta, bununla beraber bu zafiyet mekanizması içerilere ulaşmamaktadır. Destek yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler meydana gelir. B kaya sınıfı kendi içinde B1 (gevrek), B2 (çok gevrek) ve B3 (taneli) olmak üzere üç tipe ayrılır.

a) B1 Destek Sınıfı :

“Gevrek” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Patlatmadan kaynaklanan kayadaki gevşemeler ve kaya kütlesinin düşük dayanımı tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında sökülmelere neden olur. Suyun kaya stabilitesine etkisi genelde önemsiz olarak nitelenebilir. Tünel kazısı üstyarı ve altyarı olmak üzere iki kademede yapılır. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 2.0-3.0 m arasında, alt yarıda ise 4.0 m olacaktır. İlerleme adımı uzunluğu zeminin desteksiz durma süresine, desteksiz açıklığa, destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Kazı için delme patlatma gereklidir. Sınırlı bölgelerde sistematik destekleme gereklidir. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir. Destekleme aynadan en fazla bir ilerleme adımı geriden monte edilecektir. Tehlikeli alanlar derhal desteklenecektir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

b) B2 Destek Sınıfı :

“Çok gevrek” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Tünel desteklemesinin zamanında yapılması halinde deformasyonlar hızla azalır. Zamanında destekleme yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması halinde derinlere ulaşan gevşemeler ve buna bağlı olarak kopmalar meydana gelir. Bozuşmuş veya ayrışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır. Kazı tünel kesitine bağlı olarak bölünür. İlerleme adımı uzunluğu, desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığına bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üstyarı kazısında 1.5-2.0 m altyarıda ise 3.0- 3.5 m’den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerektiğinde tavanda süren kullanılacaktır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önleneyecektir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

c) B3 Destek Sınıfı :

“Taneli” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Bölünmüş kazıda bile kaya kütlesinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az olması ve az çimentolaşma kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur. Bozuşmuş veya ayrışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin

dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bölünmüş kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütlesini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 1.25-1.50 m, altyarıda ise 3 m'den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır, titreşime hassas kaya kütlelerinde mekanik kazı metotları kullanılacaktır. Taban kazısı ve bir taban beton kemeri yapılması gerekli olabilir. Tünel tavanı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Sistematik çelik iksa kullanılacaktır. Jeolojik şartlara göre, üstyarı aynasından 75-100 metreden daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

1.3 “C” Kaya Sınıfı :

C kaya sınıfı “Baskılı Kaya Kütleleri” olarak tanımlanmaktadır. “C” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı genellikle, kaya basıncının yeniden dağılımı süreci ve/veya deplasman sınırlamaları sonunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu göstermektedir. Kaya kütlesinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmaları oluşur. Kaya kütlesinin plastisite ve viskozitesi, zamana bağlı belirgin deformasyon davranış göstermesine ve sonuçta büyük deformasyonlara yol açar. Kaya zati ağırlık yüklerinin aktif hale geçmesi ve önemli miktarda gevşeme basıncı, sadece büyük deformasyonlara izin verildiğinde meydana gelir. Bu durum kaya kütlesine zarar verecek derecedeki gevşeme ve ayrışma, kaya dayanımında büyük miktarda azalmaya yol açar. Açılan boşluktaki büyük deformasyonlar ve uzun dönemde zamana bağlı deplasman davranışı, zeminin elastik olmayan, plastik ve viskoz davranışına bağlıdır. Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu gruba girer. Bu grup, aynı zamanda ayrışmış veya bozuşmuş kayalar, gevşek zemin ve organik zeminler gibi kaya kütlelerini kapsamaktadır. Kaya kütlesinin düşük özellikleri nedeniyle kohezyon miktarına ve/veya gevşeme basıncını takiben aşırı gerilmelere bağlı olarak, elastik veya plastik aşırı gerilme oluşur. C kaya sınıfı kendi içinde C1 (dağ atma), B2 (baskılı), C3 (çok baskılı), C4 (akıcı) ve C5 (şişen) olmak üzere beş tipe ayrılır.

a) C1 Destek Sınıfı :

Yüksek örtü kalınlığı altında masif kayada yüksek ön gerilmeler kırılğan kaya kütlesinde elastik enerji depolanmasına neden olur. Bu enerjinin aniden yer değiştirmesiyle kayada kesme ve kaya yapısının ezilmesi ile birlikte kırılmalar olur. Desteksiz bırakılan kısımlarda

fırlayan kayalar parçalanmaya müsaittir. Kaya kütleindeki kırılmalar derinlere ulaşır. Bozuşmuş veya ayrıışmış kaya kütlei içerisine fazla su akışının kaya kütleinin dayanımı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Bölünmüş kazı ile ilerlenmelidir. Taban kazısı gereklidir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarıda 1.5-2.0 m altyarıda 3 m’den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma veya mekanik kazı metotları ile yapılabilir. Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş kaya bulonları, elik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya kütleindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle dağ atmaları da önlenabilir. Jeolojik şartlara göre üstyarı aynasından 50-75 m’ den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

b) C2 Destek Sınıfı :

“Baskılı” kaya kütlei olarak adlandırılmaktadır. C2, çevreleyen kaya kütlei içerisinde derine uzanan plastik zonlar ve basınç veren davranış ile karakterize edilir. Bu kaya kütleinde orta derecede fakat belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir. Kazı çevresindeki deformasyonların mertebe ve hızları orta derecededir. Plastik davranışlı yüksek kohezyonlu kaya kütlelerinde gerilme gözlenir. Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütlei üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Tünel kazısının, üstyarı, altyarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Portal bölgelerindeki özel durumlar hariç, üstyarı kazısı kendi içerisinde bölümlere ayrılacaktır. Üstyarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarıda 0.75-1.25 m, altyarıda 2 m’den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma ve mekanik kazı metotlarıyla yapılabilir. Traşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Genellikle tünel aynası stabildir. Tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gereklidir. Her ilerleme adımında destekleme sistemi tamamlandıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilecektir. Tünel tavanında süren uygulaması gerekecektir. Süren uygulaması için delgi sırası ve sonrasında imalatın ayna ve tavandaki kaya kütleinin olumsuz etkilenmesi önlenmelidir. Destekleme elemanlarının görevi derin plastik kırılmaları sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üstyarı aynasından 50 m’den daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

c) C3 Destek Sınıfı :

“ok baskılı” kaya kütlei olarak adlandırılır. C3, derin zayıflık zonlarının oluşması, başlangıçta yüksek ve hızlı deformasyonlar ile karakterize edilir. Deformasyonlar uzun sürer ve yavaş son bulur. Derine inen kırılma ve plastik bölgeler gözlenir. Su sızıntıları ve

konsantre su akışının kaya kütlesinin davranışı üzerinde önemli etkisi olmaktadır. Tünel kazısının üst yarı kazısı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Genellikle üst yarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. Aynada sistematik destekleme gerekebilecektir. İlerleme adımı uzunluğu, üst yarı kazısında 1.2 metreden, alt yarıda ise 2.0 metreden fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma veya mekanik kazı metotlarıyla yapılacaktır. Traşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Yoğun bir destekleme paterni tüm kazı aynalarında gerekecektir. Deformasyon mertebeleri, deformasyon boşlukları ve/veya büyük deformasyonlara cevap verebilecek destek elemanlarının kullanımı gibi özel bir tertibat gerektirecektir. Destekleme elemanları, kaya kütlesinin üç eksenli gerilme durumunu idame ettireceklerdir. İlerleme adımı uzunluğunun kısaltılması, süren boyunun uzatılması ve üstyarı kazısı aynasında büyük bir merkez destekleme gövdesinin bırakılmasının yeterli olmaması halinde ayna kazısının ayrıca alt kısımlara bölünmesi gerekebilir. Muhtemel çözümler, üstyarı kazısının yarı taraf kazılar veya yan galeriler halinde yapılması olabilir. Komple kazı bölümünün aşırı düşey hareketleri olması halinde, kaplama temelini genişletilmesi, püskürtme beton kabuğunun temel bölgesinin bulonlanması ve enjeksiyonlanması veya geçici taban kemerleri gerekli olabilir. Tüm tünel desteklemesi sistematik olarak, üst yarı ve alt yarı kazı aynasının daha fazla ilerletilmesinden önce tatbik edilir. Tüm tavan kesimi üzerinde süren boru kullanımı gerekecektir. Süren için delme veya benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenecektir. Üst yarı kazısında alt bölümlere ayrılmış enkesit ve geçici ring yapıları gerekli olabilir. Üst yarı kazısı aynasından 25-50 metre geride taban kemerinin ring kapaması gerekebilecektir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

d) C4 Destek Sınıfı :

“Akıcı” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Çok az kohezyon ve sürtünme, kaya kütlesinin az plastik davranışı kısa süre desteksiz bırakılan bölünmüş kazıda bile tünel içine malzeme akışına sebep olur. Düşük kohezyon kazıda birçok alt bölünmeyi gerektirmektedir. Önceden süren montajı yapılmadan veya süren ve kazı ile birlikte püskürtme betonu kaplaması yapılmadan zeminin kendini tutma süresi yoktur. Su sızıntıları ve konsantre su akışlarının açığa çıkan zeminin davranış ve özelliklerinde önemli etkisi olabilecektir. Bu nedenle kayanın ortamının dayanımını iyileştirici önlemlerin alınması düşünülebilir. Aynada stabilite problemlerini önlemek için yan galeriler şeklinde bir alt bölünme gerekecektir. İlaven üstyarı kazısı aynaları destekleme gövdeleri gereklidir. Önden yapılan desteklemeler veya özel destekleme önlemleri ile tünel aynasının destek etkisi sayesinde sınırlı kazı yapılmasına

olanak verilmesi mümkündür. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 1.5 m altyarıda ise 2.0 m'den fazla olmayacaktır. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılacaktır. Kazı ile birlikte püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Tünel desteklemesi, üstyarıda ve altyarıda her bir ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Süren boru veya çelik levha süren tabiki, tavan kesiminin büyük kısmında gerekecektir. Kazı aynasında, püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulonu, drenaj elemanlarından oluşan destekleme sisteminin, kazı sırasında veya hemen sonrasında kullanılması gerekebilecektir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır. Süren uygulanması zorunludur. Üst yarı kazısının alt bölümlere ayrılmış kesimlerinde geçici ring kapama gerekebilir. Taban kemerinde ring kapaması, üstyarı kazı aynası gerisinde 25 ile 50 metre arasındaki kısa mesafelerde gerekli olabilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

e) C5 Destek Sınıfı :

“Çok kohezyonlu, kısa süreli stabil” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Şişme potansiyelli kil minerali, tuz, anhidrit içeren kaya kütlelerinde su alımıyla meydana gelen hacim artışı sebebiyle gevşemeler olur. Kemer ve aynada serbest açıklıkların sınırlanmasıyla kaya kütlesi sınırlı bir sürede stabil kalabilir. Sızıntı ve konsantre su akışının, kazılan zeminin davranışı ve özelliklerinde büyük etkisi vardır. Şişme başlatılmış olabilir. Üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Pek çok halde üst yarı kazısı aynası için bir destekleme gövdesi gerekecektir. İlerleme adımı uzunlukları üst yarı kazısında 1.5 metreyi, alt yarı kazısında 3.0 metreyi geçmeyecektir. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılabilir. Büyük kayaların veya mevzii olarak sert kaya kısımlarının kazısında patlatma gerekebilir. Tünel desteklemesi, üstyarıda ve altyarıda her ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Süren boru veya çelik levha süren uygulaması, tavan kesiminin büyük kısmında gerekecektir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır. Geoteknik ihtiyaçlara uygun olarak üstyarı aynasından 25 metreden daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir. Tünel güzergâhı üzerinde yapılan sondajlar ve sondaj numuneleri üzerinde yerinde ve laboratuarda yapılan testler sonucunda elde edilen verilerin ışığında ÖNORM B 2203'e göre tünel yukarıda tanımı yapılan çeşitli kaya sınıflarına ayrılır. Her bir kaya sınıfı için kazı sistemi birincil destekleme elemanlarının (püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa, süren, bulon vb.) ve ikincil destekleme elemanlarının (kaplama betonu) tasarımı gerçekleştirilecektir.

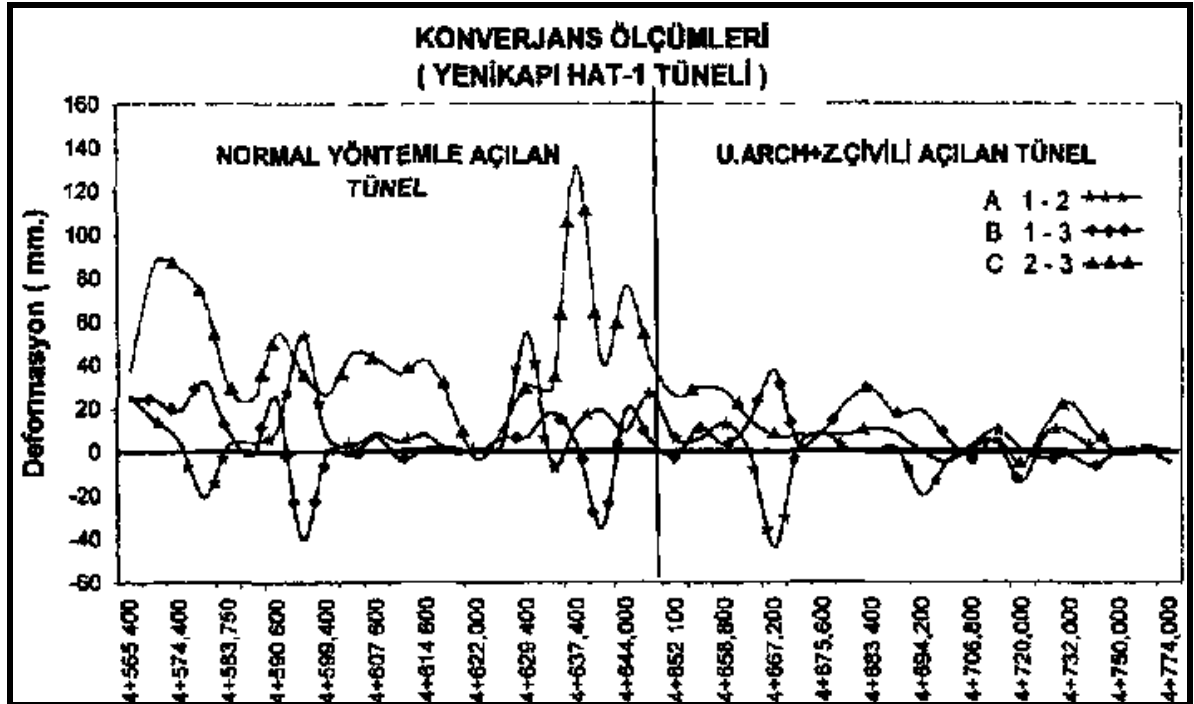
Ek 2 A5 tipi kazı iksa sistemine ait ayrıntılı bilgiler (Şemsiye borusu, Zemin çivisi ve Süren Uygulamaları)

A5 kazı iksa (destekleme) sisteminin sağladığı yararlar;

A1-A2-A3 destek sistemi ile duraylılığın sağlanamadığı kohezyonu düşük zeminlerde uygulama alanı bulmuş olan sistem incelendiğinde şemsiye borusu uygulaması ile mevcut zemin yükünün destekleme kabuğuna homojen bir şekilde yayılabilmesi sağlanabilmektedir. Böylece birbirini izleyen çelik iksalar arasında bile görülebilen farklı kapanma ve oturma değerleri, çelik iksa elemanlarına zemin yükünün homojen dağılımı ile önlenabilmektedir (Kurt vd., 1994).

Şemsiye borusu İstanbul Metrosunda ilk olarak, tünel içi deformasyon ve yüzey oturma değerlerinin kabul edilebilir sınırların üzerine çıkması nedeni ile İstanbul Metrosu Yenikapı Şaftı tünellerinde uygulanmaya başlanmış ve başarıya ulaşmıştır. Daha sonra A5 tipi kazı iksa sistemi ile Taksim bölgesinde, Fransız Sarayının altından başarıyla geçilmiştir. Yenikapı şaftı hat-1 tüneline uygulanan A3 ve A5 tipi kazı iksa (destekleme) sistemlerinde oluşan deformasyon ölçümleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.1’ de verilmiştir. Görüldüğü gibi A5 destek sisteminde kullanılan destek elemanlarının deformasyon üzerindeki olumlu etkileri, A3 destek sisteminin bu tür zeminlerde yetersizliğini ispatlamıştır.

Şekil 2.1 A3 ve A5 tipi kazı iksa sisteminin uygulandığı bölümlere ait deplasman (konverjans) değerleri

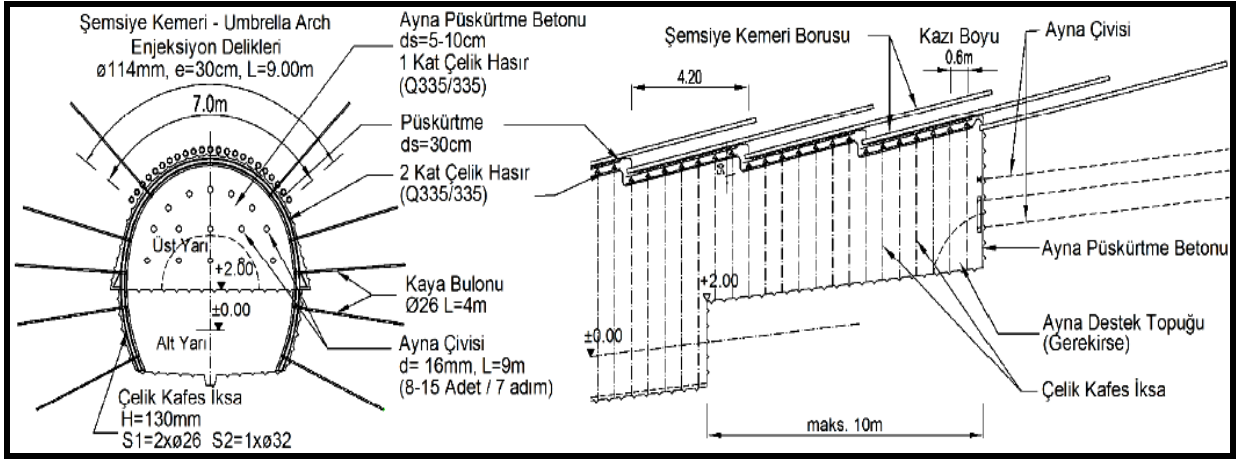


A5 tipi kazı iksa sistemine ait değerlendirmeler sonucunda;

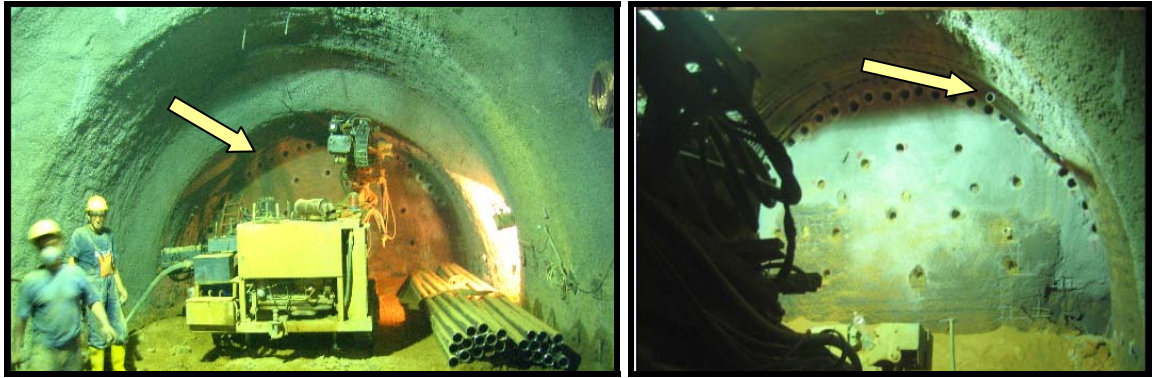
- Bu sistemin kohezyonu düşük ortamlarda, deplasmanların düşük olması istenen bina ve yol altı tünel geçişlerinde başarıyla uygulanmaktadır.
- Kil ortamında açılan tünelde yüzey oturmasının tünel içi deformasyondan daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Göbek zemin çivisi bindirme boylarının belirlenmesinde yüzey oturmasının başladığı nokta ile kazı aynası arasındaki mesafenin önem arz ettiği görülmüştür.
- Ölçülen yüzey oturma miktarı, aynaya uygulanan zemin çivisi sayısı ile ters orantılıdır.
- Tünel kazısının yüzeydeki ölçüm istasyonu altına ulaşınca kadar oluşan oturma değerleri ile nihai oturma değerleri arasında doğru orantı mevcuttur.
- Killi ortamda açılan tünellerde yüklerin kazı iksa (destekleme) kabuğuna dengeli yayılmasını sağlayacak önlemler alınması gerekmektedir.
- Yerleşim birimi altında açılan tünellerde kazı iksa (destekleme) imalat hızının önemli olduğu anlaşılmaktadır.

• **Şemsiye borusu (umbrella arch) uygulaması;**

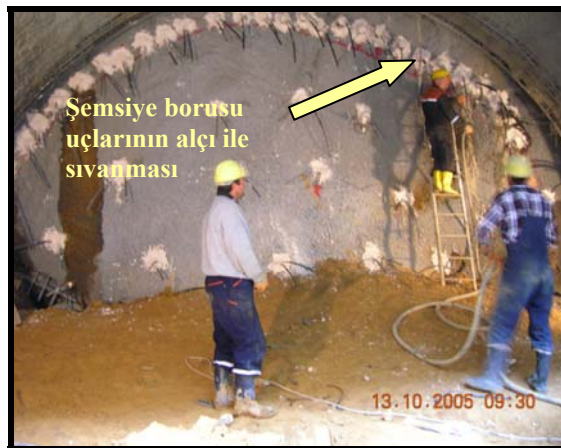
Şemsiye borusu uygulaması, delik çapı 130 mm, delik açısı 6-8° olacak şekilde delgi yapılarak içerisine et kalınlığı 6.3 mm, boyu 9 m olan, 11.6 cm çapındaki boruların yerleştirilmesi suretiyle sağlanmaktadır. Montajı yapılan şemsiye borularının baş kısmı alçıyla sıvandıktan sonra boru içine çimento şerbeti enjeksiyonu verilir. Geri dönüş borusundan çimento şerbeti gelinceye kadar çimento enjeksiyonuna devam edilir. Bu işlem ile hem borunun içi hem de boru ile delik arasında kalan boşluk kısım basınçlı çimento şerbeti ile doldurulmuş olur. Tipik bir şemsiye borusu uygulamasının şematik gösterimi Şekil 2.2’ de verilmiştir. Şemsiye borusunun uygulama detaylarına ait görünümeler ise sırasıyla Şekil 2.3, ve 2.4’ te verilmiştir.



Şekil 2.2 Şemsiye borusu uygulamasının şematik gösterimi (Arıoğlu, 2008)



Şekil 2.3 Şemsiye borusu delgisinin yapılması ve açılan delgilere yerleştirilmesi (H.İ.Ayış arşivinden)



Şekil 2.4 Şemsiye borusu içine basınçlı çimento şerbeti enjeksiyonunun yapılması (H.İ.Ayış arşivinden)

• **Zemin çivisi uygulaması;**

Zemin çivisi İstanbul Metrosu zemin formasyonunda açılan tünellerde geçici ayna yüzeylerinde ve yan yüzeylerde tünel stabilitesinin sağlanması amacıyla uygulanmaktadır.

1) Ayna zeminini konsolide etmenin en etkili yolunun sürtünme kolonları (zemin çivisi) oluşturmak olacağı düşüncesinden hareketle, tünel aynasına 9-12 m uzunluğunda 130 mm çapında delikler delinerek, içerisine $\Phi 14$ BÇ-III donatı yerleştirilerek çimento şerbeti ile doldurulmaktadır. Zemin durumuna göre bu destek elemanının yaklaşık 3-6 m'si ayna içerisinde bindirme yapılarak uygulanmaktadır (Kurt vd., 1994). Ayna zemin çivisi uygulamasına ait görünüm Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 0.5 Ayna zemin çivisi delgisinin yapılması ve boru ucunun alçı ile sıvanarak çimento şerbeti enjeksiyonu yapılması (H.İ.Ayış arşivinden)

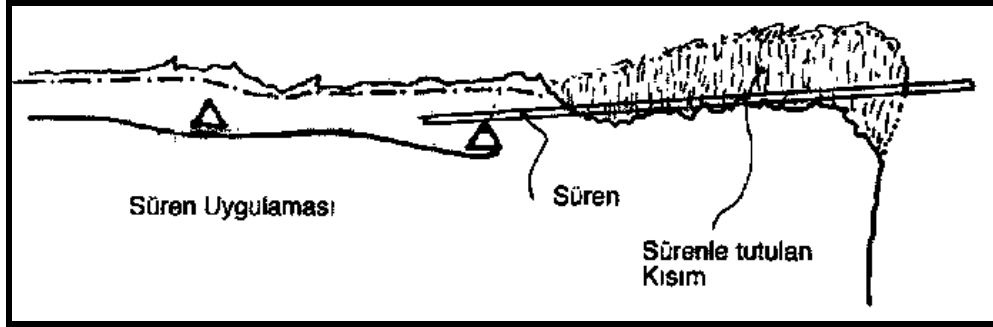
2) Kaya bulonunun ($d=50$ mm, $l=3-4$ m) yetersiz olduğu konsolide olmayan formasyonlarda, her iki çelik iksa arasına 3 sıra halinde ($d=125$ mm, $l=6$ m) yan zemin çivisi uygulaması yapılır. Uygulamaya ait görünüm Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 0.6 Yan zemin çivisi delgisinin yapılması ve boru ucunun alçı ile sıvanarak çimento şerbeti enjeksiyonu yapılması

- **Süren uygulaması;**

NATM ile açılan İstanbul Metrosu tünellerinde, kazı aşamasında yaşanabilecek aşırı sökülmelerin önlenmesi amacıyla tünel üst yarısına süren uygulaması yapılmaktadır. Süren çubuğu genelde 4 m boyunda, 3.18 cm çaplı boru veya Φ 26'lık nervürlü donatıdan oluşturulur. Açılan delginin ardından süren çubuğu yerleştirilerek içerisine çimento şerbeti enjeksiyonu yapıldıktan sonra uygulama tamamlanır. Süren uygulamasına ait şematik gösterim Şekil 2.6'da, tünel uygulamasından bir görünüm ise Şekil 2.7'de verilmiştir.



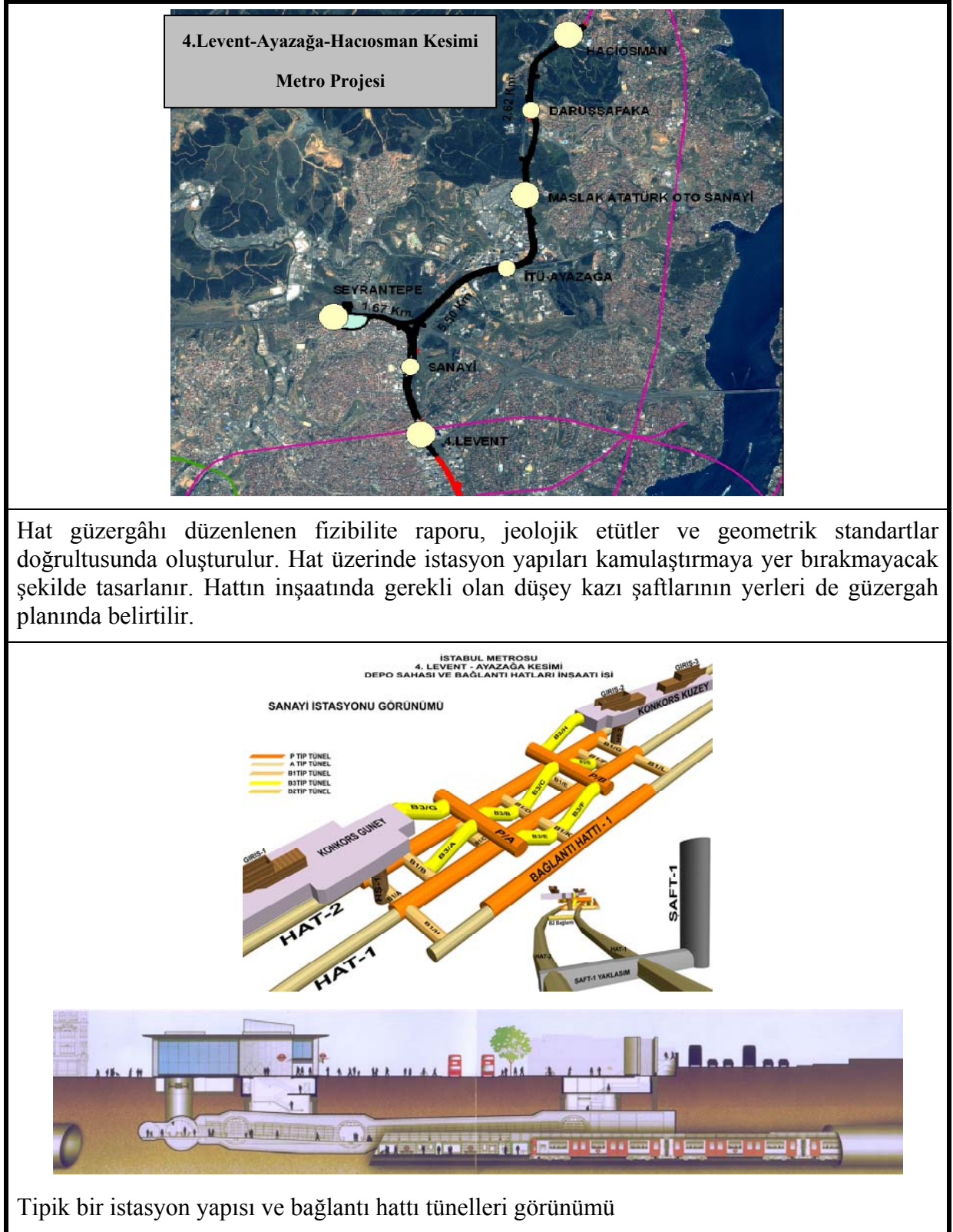
Şekil 2.6 Süren uygulamasının şematik gösterimi



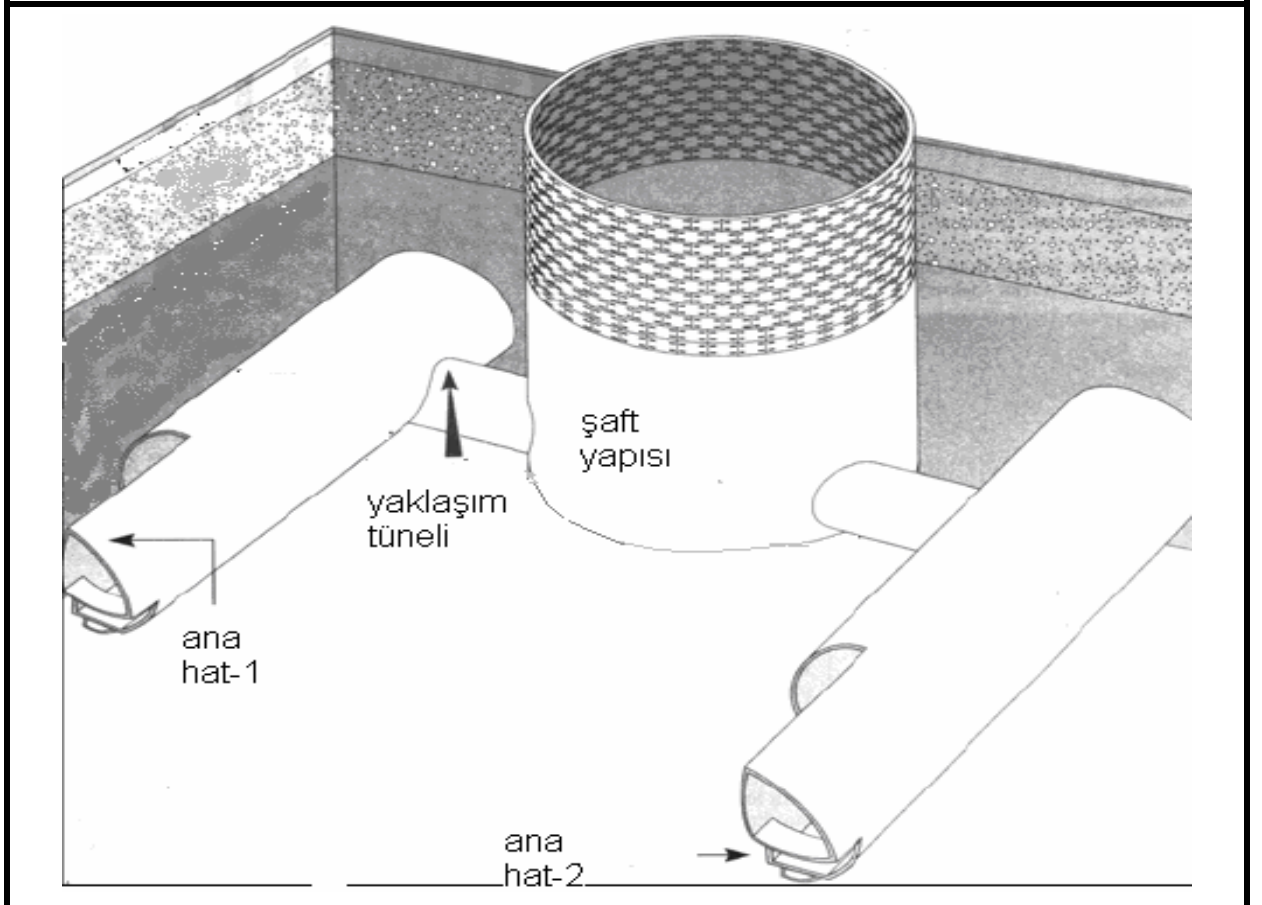
Şekil 2.7 Tünelde süren uygulamasından bir görünüm

Ek 3 İstanbul Metro Projesi NATM yöntemiyle açılan tünel güzergahındaki inşaat çalışmalarının genel hatlarıyla tanıtılması

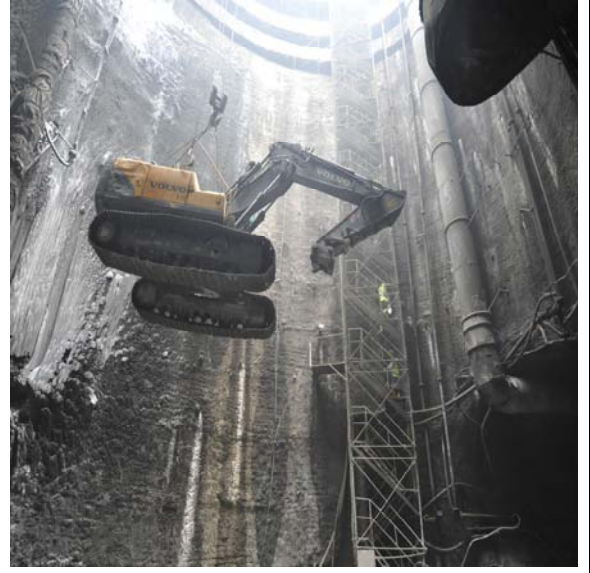
Çizelge 3.1 Hat güzergahının belirlenmesi



Çizelge 3.2 Şaftın tanımı

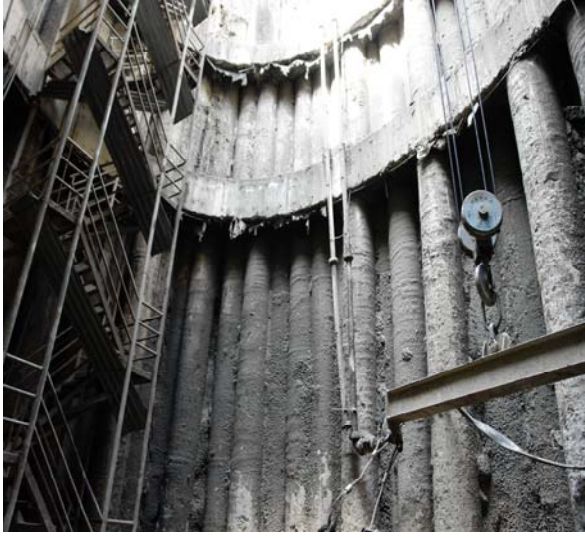


Şaft; tünel kazı inşaatı sırasında ana hatlara ulaşabilmek için düşey olarak açılan tünellerdir.



Bu yapılardan, ana hat tünel kazılarının yapılabilmesi için, makine, malzeme ve çalışanların nakli gerçekleştirilir.

Çizelge 3.3 Şaft inşası



Şaftlar teğet veya kesişen fore kazıkların eliptik bir düzlemde çakılmaları ile oluşturulur.



Çakılan bu fore kazıkların birlikte çalışmasını sağlamak amacıyla önce başlık kirişi ve şaft kazısı ilerledikçe de ring kirişleri oluşturulur.

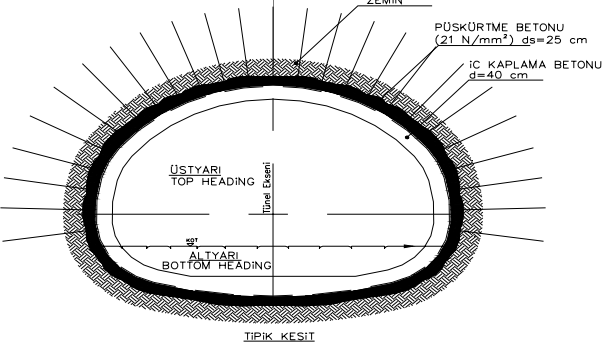
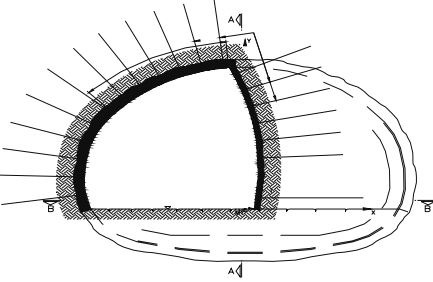
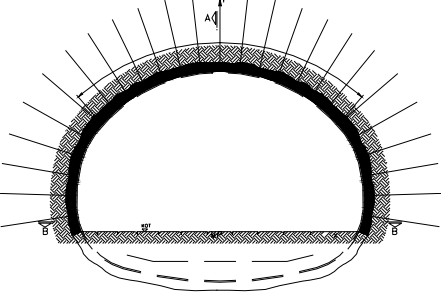
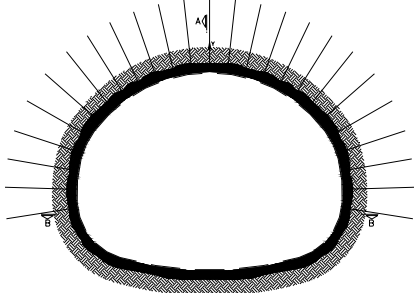


Bu eliptik bölge kazılarak şaft tabanı olarak belirlenmiş olan kota ulaşılır.



Şaft tabanına ulaşıldığı anda ana hatlara ulaşabilmek için yaklaşım tüneli oluşturulur.

Çizelge 3.4 Tünel kazı imalatı

	Tünel kazısı genelde üst yarı ve alt yarı olarak adlandırılan iki aşamada yapılır. Tünel çapının büyümesi durumunda kazı güvenliğini sağlamak amacıyla aşağıda görüldüğü gibi tünel kazı aşamaları artırılabilir.
1.Aşama kazısı 	
2.Aşama Kazısı 	
3.Aşama Kazısı 	



Yaklaşım tüneline ana hat tüneline geçişte önce tünel üst yarısı tünel çapına bağlı olarak tek veya birkaç kademede kazı makinesi ile kazıldıktan sonra destekleme yapılır.



İstenilen kazı kesitinin elde edilmesinden sonra birinci kat çelik hasır donatısı yerleştirilerek iksa montajı yapılır.



İksa montajının tamamlanması ile iksa yüzeyine kadar birinci kademe püskürtme beton uygulaması gerçekleştirilir.



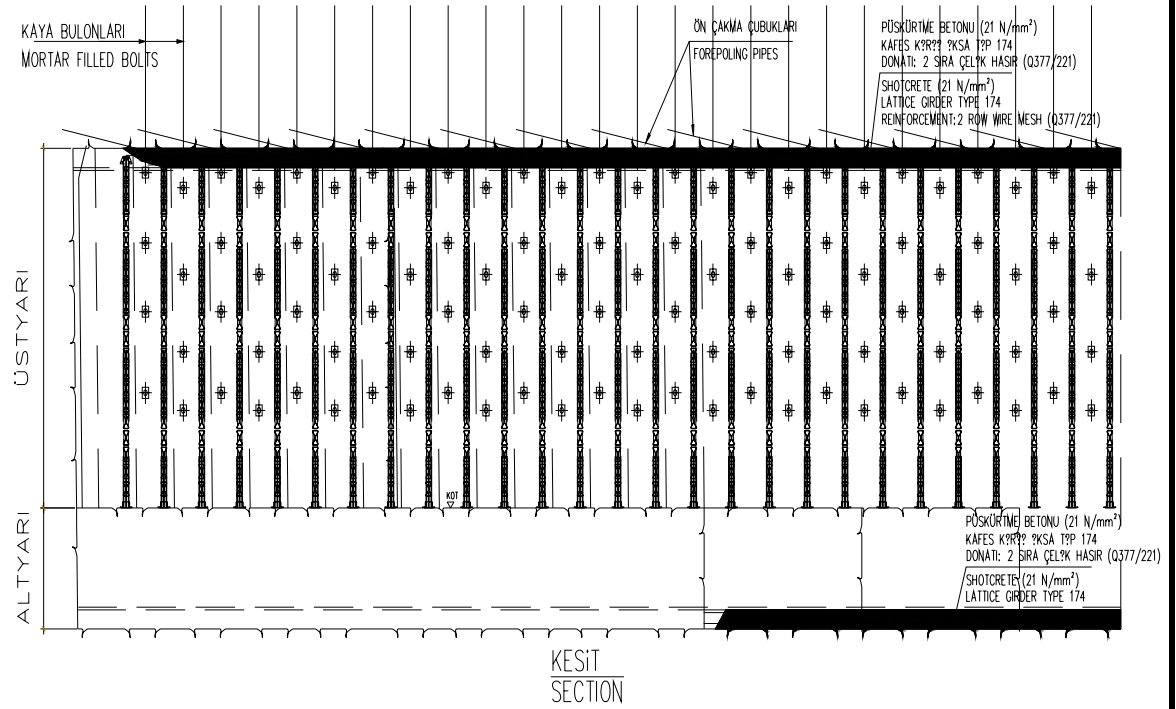
Daha sonra ikinci kademe elik hasır donatısı yerleştirilip püskürtme beton kalınlığı projede belirtilen değerlere göre tamamlanır.



Püskürtme betonun priz süresinin tamamlanmasının ardından, delgi makineleri ile tünel cidarına dik bir açı oluşturacak şekilde bulon delgileri açılır. Bu delgilerin içine imento enjeksiyonu yapıldıktan hemen sonra delgi içine genelde 3-4 m boyunda nervürlü donatı yerleştirilir. Uçlarına elik plakaların (12x200x200mm) yerleştirilmesinin ardından bulon civataları 50 kN'a sıkılır.



Üst yarı kazı ve destekleme imalatları biten tünelin ortalama 10–15 m gerisinden alt yarı kazısı yapıp, üst yarıdaki gibi çelik hasır ve püskürme beton uygulaması ile, destekleme işlemi tamamlanarak ring oluşturulur.

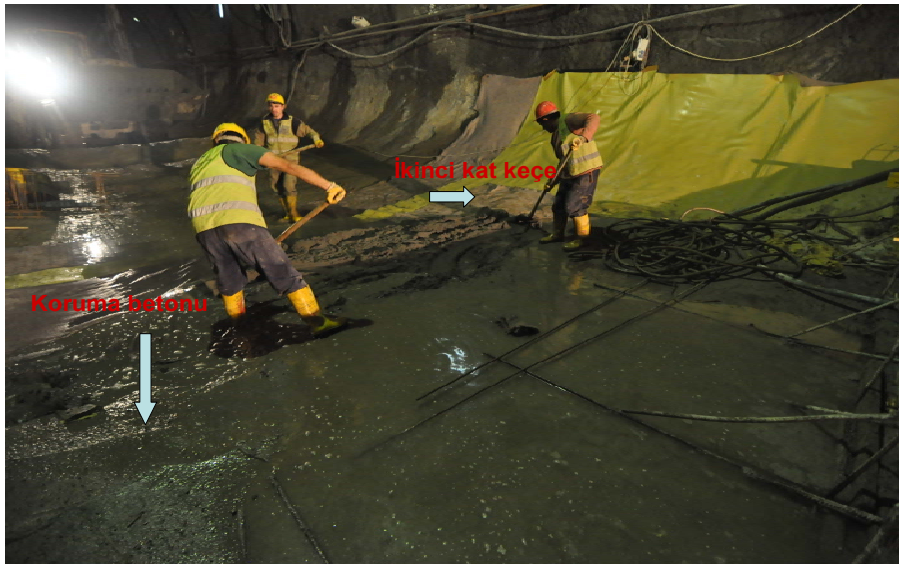


Çizelge 3.5 İç kaplama betonu imalatı

Tünel kazı destek çalışmalarının bitirilmesinin ardından tünel içi nihai kaplama betonu imalatına geçilir. Kplama beton imalatına başlanabilmesi için tünel içi deformasyon ölçümlerinin sönümlenmesi gerekmektedir. Deformasyonların sönümlenmesinin ardından tünel gabarisi taranarak geometrik kesitin uygun olup olmadığı kontrol edildikten sonra, kaplamanın yapılacağı bölgenin temizliği yapılarak nihai kaplama betonu imalatına geçilir.

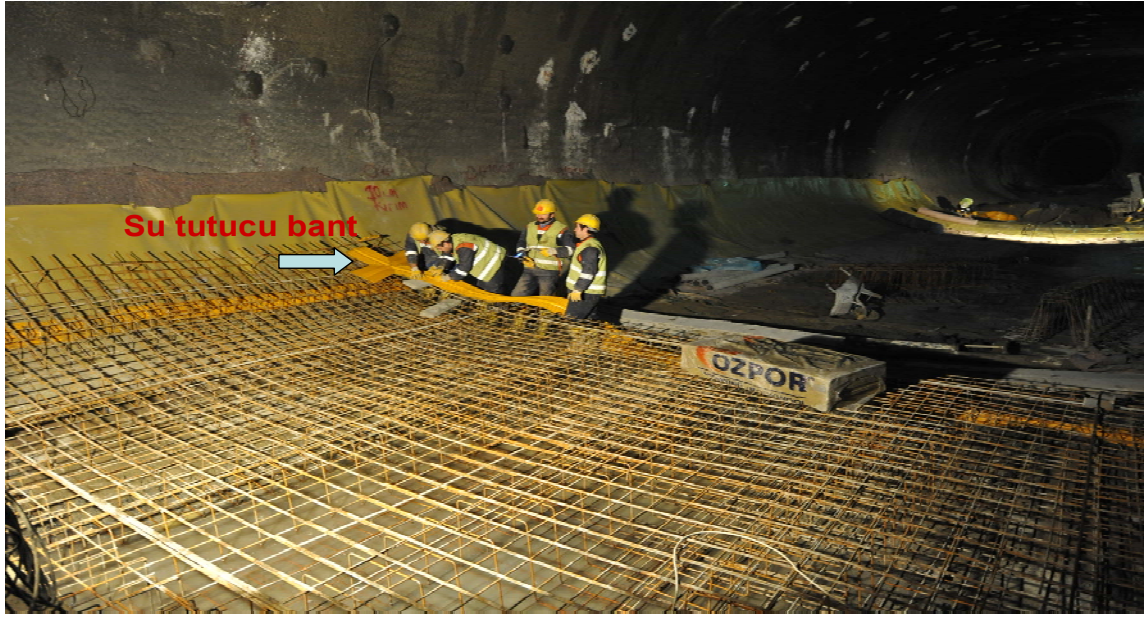


Kaplama imalatına alt yarı (invert) kaplamasından başlanır. Alt yarı kaplamasının ilk aşaması ise yalıtımdır. İzolasyon amacıyla tünel çeperine PVC membran tabakası serilir. Membrana zarar verecek sert cisimlerden koruyabilmek için ise altına ve üstüne geotekstil keçe tabakası serilir.



Membran tabakasının donatı yerleşimi sırasında zarar görmesini önlemek amacıyla membran üzerine ikinci kat keçe ve 5 cm'lik koruma betonu uygulaması yapılır.

Kaplama betonlarının dökümü projede belirtilen genleşme derzi aralıklarına göre yapılır. Ana hat tünellerinin hidrolik kalıp boyu yaklaşık 12 m olup, büyük kesitli tünellerde ise daha kısa kalıp boyları ile döküm yapılır.



Belirlenen kalıp ilerleme adımı boyunca döşenen alt yarı (invert) donatısının yerleştirilmesinde sonra derz kısımlarına boyuna ve enine su tutucularının konmasıyla tamamlanır. Daha sonra alın kalıbı kapatılarak beton dökülür. Alt yarı betonunun tamamlanmasının ardından üst yarı (kemer) betonu yaklaşık 3-4 ano geriden alt yarı betonunu takip edecek şekilde dökülür.



Kemer betonu öncesinde de tek kat keçe ile üzerine membran uygulaması gerçekleştirilir. Membran tabakası alt yarıda bırakılan membran ile birleştirilerek su sızdırmayacak şekilde kaynak yapılır.



İç kaplama kısmına yerleştirilen donatıların bağlantılarının yapılması



Donatıların yerleştirilmesinin ardından çelik gövdeden hazırlanmış olan üst yarı (kemer) hidrolik kalıbı çekilerek betonun dökülmesi ile bir anoluk kısmın nihai kaplama betonu imalatı tamamlanmış olur.



Ek 4 EPB makineleri ile ilgili detaylı bilgiler

A. EPB makinesinin kazı anında çalışma aşamaları şu şekilde gerçekleşmektedir;

Bir EPB makinesinde öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itirme silindirleri ile araziye destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı alüvyal zemin kazı haznesine dolmaya başlar. Kazı haznesi tamamen dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme vida (burgu) konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır. Konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır. Konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme, kuyruk bölümünde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da shaft ağızına taşınır.

Eğer kazı sırasında istenilen miktarda malzeme geliri olmuyorsa yani malzeme yerine-su geliyor veya zeminin fazlasıyla kuru olması nedeniyle konveyörden malzeme geçişi mümkün olmuyorsa, kazı aynasına doğru malzemeyi daha kaygan yapan ve böylece su geçişini engelleyen bir katkı maddesi enjekte edilmesi gerekebilir.

Kazı ilerlerken şiltin tam arkasına taşıyıcı raylarla getirilen beton segmentler, erektörler yardımıyla yerleştirilirler. Bu arada segmentler ve zemin arasında kalan boşluklar, çimento-bentonit karışımı enjeksiyon ile doldurularak kapatılırlar.

A.1 Çamur Şilti (*Slurry Machine*) Makinesi

Bu tip şiltler, formasyonun çok akıcı olduğu veya tünel güzergahı boyunca akıcı formasyonlara da rastlanabileceği durumlar için yapılmışlardır (Şekil 4.1). Makine, değişken devirli tam cephe kesme kafasına sahip, astarlara dayanarak itmek suretiyle kuvvet oluşturan tam bir şilt tasarımıdır. Genel olarak kalem keskil kullanılmakla birlikte, bazen disk keskilere de kullanılabilir (Diskler kalem keskilere nazaran biraz daha öne çıkar. Böylece, büyük bloklara rastlandığında disklerin onları parçalaması ve kalem keskilin kırılması önlenir). Akıcı çamur, (genellikle, bentonit) ayna ile kesme kafası arasındaki boşluğa pompalanmaktadır. Bu sıvı, aynadan sıyrılarak kazılıp çıkarılan malzeme ile karışır ve bu karışım bir çamur pompası ile geri tarafa alınıp yeryüzüne pompalanır. Yeryüzünde süzülüp temizlenen sıvı, yeniden devreye sokularak kullanılır. Çalışma esnasında dikkat edilecek başlıca hususlar;

- o Aynaya gereğinden fazla basınç vermemek (bu durumda yeryüzünde kubbeler oluşabilir),
- o Yeryüzüne ulaşacak şekilde baca oluşmasını önlemek için kazılan malzeme miktarını dikkatle ölçmek.

Bu tip makineler derinliği az olan yerlerde kullanılmakta olup, uygulanan basınç değeri 3 bar mertebesinde dir.



Şekil 4.1 Tipik bir çamur şiltli TBM

Ek 5 Uygun yöntemin belirlenmesinde saha araştırmasının önemi

Tünel açma tekniklerinin seçiminden önce saha araştırması yapılmalıdır. Kazıdan önce yapılan arazi çalışmalarının amacı, saha koşullarını güzergah boyunca belirleyerek, aşağıda verilen planlama, tasarım ve inşaat kavramları üzerindeki etkisini değerlendirmektir.

- Tünel güzergâhı ve eğimi, boyut şekli, portal ve shaft lokasyonları
- İnşaat öncesinde, sırasında ve sonrasında tünel zemininin stabilitesinin sağlanması
- Kazı yöntemleri ve ilerleme hızı
- Emniyet, stabilite hızı, yeraltı suyu akışı, çürütücü veya sıcak su kaynakları, patlayıcı veya toksik gazlarla karşılaşma riski
- Tünel açma esnasında üstte bulunan yapılara ve bölgesel yeraltı suyu rejiminde oluşacak çevresel etkiler.

Uzunluklarında dolayı, her bir kilometre göz önüne alındığında tüneller düşük araştırma bütçesine sahiptir. İyi araştırılmış, üniform yapılı formasyonlardaki sık tüneller için yapılan tahminler kesin sonuç verirken, iyi araştırılmayan dik ve değişken yapılı formasyonlarda gerçekçi sonuçlar elde etmek zordur. Sık tüneller için ayrıca ayrıntılı bir araştırma programı uygulanmalıdır, çünkü ince örtünün göçme riski fazladır. Daha derine inildikçe araştırmalar daha pahalı olurken, kesin bilgi elde etme olasılığı da azalır. Çoğu zaman jeoteknik bilgiler gerekli detayı sağlamamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, kazılan tünelin kendisi kullanılabilir. Tasarım için en çok kullanılan “gözlemsel yöntem”, iksa sistemleri ve kazı yöntemlerinin inşaat aşamasında düzenlenmesinde esneklik sağlamaktadır (ancak pratikte düzenlemeler sınırlıdır, çünkü önemli kararların hemen verilmesi gerekebilir).

Genel Olarak Uygulanan Saha Araştırma Yöntemleri

a) Sığ ve Derin Araştırma

Sığ tüneller için araştırma sondajları araştırmanın temelidir ve ana kaya topoğrafyasının ortaya konması en önemli amaçtır. Yüzlerce metre derinlikten alınan karotlar yeraltının yapısı hakkında önemli bilgiler verir. Tünel yüksekliği, tamamen zemin veya tamamen kayadan geçecek şekilde belirlenmelidir. Koşulların lokasyondan lokasyona değiştiği ayırım yüzeyleri tercih edilmemelidir. Zayıf tünel zemini koşulları veya karmaşık ayna tünel koşulları belirlenmeli ve

eğer mümkünse bu tip yerlerden uzak durulmalıdır. Ciddi sorunlu yerlerde enjeksiyon veya drenaj işlemleri yapılarak zemin iyileştirilmelidir.

Derin tünellerde sondajlar pahalıdır ve güzergahtan onlarca metre sapma gösterebilirler. Maliyet sınırlaması açısından, sondajlar arasındaki mesafe çok fazla seçilebilmektedir. Bu yüzden, sondajlardan elde edilen sonuçlar tam kapasite ile kullanılmalıdır. Karot elde etme dışında, sondaj kuyusu gözlemleri ve deneyleri yapılmalıdır. Jeofiziksel yöntemler ve jeolojik yorumlama gerek yeraltı gerekse yerüstü verileri arasındaki ilişki kurmak için kullanılmalıdır. Yüksek topoğrafyaya sahip dağlık bölgelerde kıvrımlanma ve faylanma bu işleri zorlaştırabilir.

b) Denizaltı Araştırmaları

Su üstünden yapılan sondajlar platform ve mavnalı gerektirdiğinden oldukça pahalıdır. Ayrıca suyun dalgalı olmasından dolayı çıkacak gelişmelerde maliyeti artırır. Su yüzeyindeki dalgalanmalar, sondaj yerinin, güzergah kenarlarında olmasına neden olabilmektedir. Ayrıca tünel açımı esnasında kazıya girecek suyun engellenmesi için enjeksiyon yapılması maliyeti artırmaktadır.

Jeoteknik tecrübesi olan dalgıçlar, sualtındaki kaya mostralarının yayılımı ve özelliklerini araştırırken, sedimanların kalınlık ve tiplerini de belirleyebilirler. Kıyıdaki mostralardan da araştırma safhasında faydalanılabilir. Sondaja olan gereksinimi azaltmak için, özellikle sismik profillemeye ve sidescan sonar gibi jeofiziksel yöntemler kullanılarak, suyun derinliği ve tünelin üstünde yer alacak kaya ve zemin kalınlığı belirlenebilir.

c) Yatay Sondajlar

Uzun yatay sondajlar, gereksiz yere düşey sondaj yapılmasını engellemektedir. Bilgiler, itme ve rotasyon hızının bir fonksiyonu olan delme oranının izlenmesi, yeraltı suyu basıncı ve debisinin izlenerek yüksek su basıncının araştırılması ve sondaj kuyusu duvarlarının TV kameraları veya ultrasonik tarayıcılarla incelenmesi ile elde edilir. Güzergah boyunca açılan sondaj kuyuları yerinde deneyler için de kullanılır.

d) Pilot Tüneller

Esas tünel kazısı yapılmadan önce, karşılaşılabilecek sorunları önceden görmek için açılan küçük çaplı tüneller pilot tünel olarak isimlendirilir. Düşey veya düşeye yakın olarak açılanlar da araştırma şaftı olarak isimlendirilir. Sadece sondajlarla yapılacak araştırmalara nispeten,

araştırma veya pilot tünellerinin kullanılmasının çok daha önemli avantajları vardır. Pilot tüneller veya araştırma şaftları kayaların doğal durumunun izlenmesi açısından, karot ve sondaj kuyusu kenarlarına oranla daha olumlu sonuçlar verirler. Bu yöntemlerle, eklem yönelimleri, devamlılığı, pürüzlülüğü ve dolgu malzemeleri daha iyi değerlendirilir. Büyük ölçekli kaya deneylerinin yapılması, su akışın incelenmesi, deneme amacıyla yapılacak patlatma ve iksalar pilot tünellerde gerçekleştirilebilir.

Pilot tüneller aynı zamanda enjeksiyon, drenaj ve bulonlama gibi tünel zemin ıslah çalışmalarında kullanılırlar. Pilot kuyu ile aşırı su basıncı olan zonları kesilerek su basıncı azaltılabilir.

Pilot tüneller, tam ölçekli esas tünel kesitinin tavan, taban veya merkezinde olabilirler. Böylece final kesitinde yer alan pilot çukuru, uygun bir şekilde gevşek tünelle uyum sağlayacak şekilde genişletilerek, nihai tünel kesitinde oluşabilecek zarar riskini azaltır.

Alternatif olarak, pilot tünel, esas tünelin bir kenarında veya üstünde açılabilir. Eğer esas tünelin tabanı altında açılmışsa inşaat esnasında drenajın yapılmasını sağlar. Aynı zamanda tünele giren taşıtların ulaşım problemlerini çözerken, tünele yerleştirilecek mekanik ve elektrikli teçhizatın uygulanmasına olanak verir. Tamamlanmış bir pilot tünel uzun dönemli servis tüneli veya havalandırma sisteminin bir parçası olarak görev yapabilir.

TERİM AÇIKLAMALARI

Yer altı Kaya Açıklığı Terimleri;

Tünel: Yeraltında iki ucu açık yer altı yapısıdır. Eğimi yataya yakındır.

Ayna (arın): Tünel kazı yüzeyine denir.

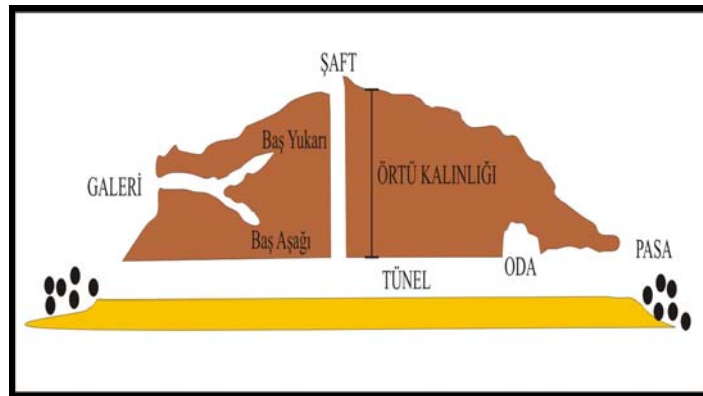
Galeri: Bir ucu açık yeraltı yapısıdır. Galerinin tünelden farkı tünelin giriş ve çıkışının bulunmasıdır. Yukarıya eğimli olanlara baş yukarı, aşağıya eğimli olanlara baş aşağı denir.

Oda: Aynı tünel ya da galeride normal genişlik ve yükseklikten fazla kazılmış kısımlara denir.

Şaft (kuyu): Düşey yöndeki yer altı yapılarına denir.

Örtü: Tünel tavanından yeryüzüne kadar olan kısma denir. Kalınlığa da örtü kalınlığı denir.

Pasa: Kazılarla çıkan malzemedir.



Yeraltı kaya açıklığı genel terimleri

Tünellerde Kısımlar;

Taban (radye): Kazı boşluğunun alt kısmıdır.

Tavan (kemer): Kazı boşluğunun üst kısmıdır.

Ayak (duvar): Kazı boşluğunun yan kısımlarıdır.

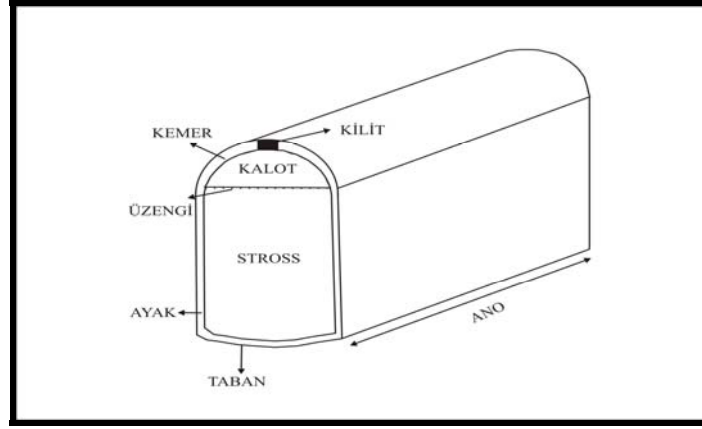
Üzengi: Tavanın ayaklarla birleştiği kısımdır.

Üzengi düzeyi: Üzengileri birleştiren çizgidir.

Kalot: Üzengi düzeyi ile tavan arasında kalan kısımdır.

Stros: Üzengi düzeyi ile taban arasında kalan kısımdır.

Ano: Bir kerede açılan tünel uzunluğudur. Kazı yapılan kayacın özelliğine, uygulanan kazı yöntemine bağlı olarak, 1-9 metre arasında değişir.



Tünel enkesiti ve kesitin çeşitli kısımlarına verilen isimler

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 09.10.1984

Doğum yeri Batman

Lisans 2002-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006- Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Yapı Ana Bilim Dalı Programı

Çalıştığı kurum

2006- Devam ediyor İBB Raylı Sistem Müdürlüğü, Kontrol Mühendisi
(4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Kesimi Metro Hattı Projesi)