

95009

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPOZİT BETON YAPI ELEMANLARININ  
BASİT EĞİLME ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Fatih ALTUN**

**F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi  
Tez Danışmanı  
Juri Üyeleri**

**: 31 Mayıs 2000**

**: Prof. Zekeriya POLAT (Y.T.Ü.)**

**: Prof. Dr. Metin AYDOĞAN (İ.T.Ü.)**

**: Prof. Dr. Feridun ÇILI (İ.T.Ü.)**

*Handwritten signatures and dates:*  
Zekeriya Polat  
Metin Aydoğan 21.06.2000  
Feridun Çili

**İSTANBUL,2000**

**İÇİNDEKİLER.....Sayfa**

SİMGE LİSTESİ.....	VII
ŞEKİL LİSTESİ.....	XII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XIV
TEŞEKKÜR.....	XVI
ÖZET.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII

1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT BETON YAPI ELEMANLARI VE HAFİF BETON KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Genel Bilgi.....	5
2.2. Kompozit Yapı Elemanları ve Kullanım Alanları.....	5
2.2.1. Kompozit kolonlar.....	6
2.2.2. Kompozit kirişler.....	7
2.2.3. Kompozit döşemeler.....	8
2.2.3.1.Kompozit döşeme plakları.....	8
2.2.3.2.Kompozit döşeme panelleri.....	9
2.3. Hafif Beton .....	10
2.3.1. Hafif agregalar.....	10
2.3.1.1.Türkiye'nin doğal hafif agrega durumu.....	11
2.3.1.2.Hafif agregaların sınıflandırılması.....	12
2.3.1.3.Hafif agregaların betonun davranışı üzerindeki etkileri.....	12
2.3.2. Hafif betonlar ve sınıflandırılması.....	13
2.3.3. Hafif agrega ile üretilen hafif betonlar.....	13
2.3.3.1.Hafif agregalı betonun karışım hesabı.....	14
2.3.4. Taşıyıcı hafif betonun avantaj ve dezavantajları.....	15
2.3.5. Taşıyıcı hafif betonun uygulama alanları.....	16

2.3.6.	Taşıyıcı hafif betonarme dikdörtgen kesitlerin basit eğilme etkisi altında taşıma gücüne göre tasarlanması .....	16
2.4.	Betonarme Elemanlarda Şehimlerin ve Çatlakların Hesabı.....	17
2.5.	Kirişlerin Göçme Modu Tanımı ve Kompozit Betonarme Hafif Kirişlere Uyarlanması.....	21
3.	EĞİLME TEORİSİNİN KOMPOZİT KİRİŞLERE UYGULANMASI.....	22
3.1.	Eğilme Hali.....	22
3.1.1.	Basit eğilmede yapılan varsayımlar.....	23
3.2.	Kompozit Kirişlerde Basit Eğilme Hali ve Yapılan Varsayımlar.....	25
3.2.1.	Basınç bölgesi hafif beton olan iki tabakalı kompozit kesit hâli.....	26
	a.Çatlama öncesi .....	27
	b.Çatlamış kompozit kesitte gerilmeler.....	30
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
4.1.	Deney Araçları.....	35
4.2.	Malzemeler.....	35
4.2.1.	Agrega özellikleri.....	35
4.2.2.	Beton karma suyu ve çimento özellikleri.....	36
4.2.3.	Donatının özellikleri.....	36
4.3.	Yöntemler.....	36
4.3.1.	Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler .....	36
4.3.2.	Beton numunelerin hazırlanmasında uygulanan yöntemler.....	37
4.3.2.1.	Agrega oranları.....	37
4.3.2.2.	Çimento dozajı ve su miktarı.....	37
4.3.2.3.	Hafif ve normal beton karışım hesapları.....	39
4.3.2.4.	Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve bakımı (kür).....	41
4.3.2.5.	Deney programları, numune boyutları ve sayıları.....	41
4.3.3.	Beton silindir numuneler üzerinde yapılan deneyler.....	42
4.3.3.1.	Basınç deneyleri.....	42

4.3.3.2.Elastisite modülünün normal ve hafif beton için tayini.....	43
4.3.4. Kompozit betonarme plakların hesabı.....	45
4.3.4.1.Betonarme kompozit plakların boyutları ve bazı özellikleri.....	45
4.3.4.2.Üretilen kompozit plakların beton özellikleri.....	45
4.3.4.3.Normal ağırlıklı betonarme plak numunelerin teorik taşıma gücü hesabı.....	46
a.Çekme kırılması.....	47
b.Denge kırılması.....	51
c.Basınç kırılması.....	52
4.3.4.4.Kompozit betonarme plak deney numunelerinde teorik taşıma gücü hesabı.....	54
a.Çekme kırılması.....	54
b.Denge kırılması.....	56
c.Basınç kırılması.....	57
4.3.4.5.Deney düzeni.....	59
5. DENEY SONUÇLARI.....	61
5.1. Agrega Deneyleri .....	61
5.2. Hafif ve Normal Beton Deney Sonuçları.....	66
5.2.1. Birim hacim ağırlığı deneyleri .....	66
5.2.2. 28 günlük normal ve hafif beton silindir numune basınç mukavemeti deneyi sonuçları.....	67
5.3. Normal ve Kompozit Betonarme Elemanlarla İlgili Deneyler .....	73
5.3.1 Kompozit betonarme plakların basit eğilme deneyleri .....	74
5.3.1.1.Çekme kırılması ile göçmesi beklenen kompozit betonarme plak deneyleri .....	74
5.3.1.2.Denge kırılması ile göçmesi beklenen kompozit betonarme plak deneyleri .....	75
5.3.1.3.Basınç kırılması yapması beklenen kompozit betonarme plakların eğilme deneyleri .....	76
5.3.2. Normal betondan imal edilen betonarme plakların eğilme deneyleri.....	77
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	78
6.1. Agrega Deney Sonuçları .....	78
6.2. Hafif ve Normal Beton için Elde Edilen Deney Sonuçları.....	78



6.3.	Normal ve Kompozit Betonarme Plaklarla İlgili Deney Sonuçları.....	78
6.3.1	Taşıma gücü.....	79
6.3.2.	Plaklarda çatlama ve çatlak düzeni.....	79
7.	SONUÇLARIN YORUMU VE ÖNERİLER.....	81
	KAYNAKLAR.....	84
	EKLER.....	88
Ek 1.	Numunelere ait okunan deplasman değerleri.....	88
Ek 2.	Kuvvet-deplasman grafikleri.....	115
Ek 3.	Kırılma çizgileri teorisi (KÇT) ile deney plakları kırılma yüklerinin hesaplanması.....	118
Ek 4.	Deneylere ait fotoğraflar.....	121
Ek 5.	Elastisite modülü için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	130
	ÖZGEÇMİŞ.....	131

## SİMGE LİSTESİ

$A_s$	: Donatı kesit alanı	$\text{cm}^2$
$A_{sb}$	: Dengeli donatı kesit alanı	$\text{cm}^2$
$a$	: Dikdörtgen gerilme bloğu derinliği	cm
$b$	: Döşeme numunesi genişliği	cm
$b_h$	: Hafif beton plak numune genişliği	cm
$b_n$	: Normal beton plak numune genişliği	cm
$b_w$	: Betonarme kesitin genişliği	cm
$c_{\min}$	: minimum çimento dozajı	kg
$c$	: Dozaj	kg
$c_{örtü}$	: Dış yüzeye en yakın çekme çubuğu için örtü betonu kalınlığı	mm, cm
$D$	: En büyük dane çapı	mm
$\Delta_{\max}$	: Kirişte oluşan maksimum sehim	cm, mm
$d$	: Etkili derinlik	mm, cm
$d'$	: Pas payı	cm, mm
$E$	: Kiriş malzemesinin elastisite modülü	$\text{N/mm}^2$
$E_c$	: Beton elastisite modülü	$\text{N/mm}^2$
$E_s$	: Çelik elastisite modülü	$\text{N/mm}^2$
$E_h$	: Hafif beton elastisite modülü	$\text{N/mm}^2$
$E_n$	: Normal beton elastisite modülü	$\text{N/mm}^2$
$E_{su}$	: Beton agregasını ıslatmak için gerekli su miktarı	kg
$F_c$	: Betonun karşıladığı basınç kuvveti	kN
$F_s$	: Çeliğin karşıladığı çekme kuvveti	kN
$f_c$	: Karışımdan beklenen basınç dayanımı	$\text{N/mm}^2$
$f_{cc}$	: Çimento standart dayanımı	$\text{N/mm}^2$
$f_{cd}$	: Hesapta kullanılacak beton basınç dayanımı	$\text{N/mm}^2$
$f_{ck}$	: 28 günlük betonun silindir basınç dayanımı (karakteristik)	$\text{N/mm}^2$
$f_{ckh}$	: 28 günlük hafif betonun silindir basınç dayanımı (karakteristik)	$\text{N/mm}^2$
$f_{ctk}$	: Betonun çekme dayanımı (karakteristik)	$\text{N/mm}^2$
$f_{yd}$	: Hesapta kullanılacak çelik dayanımı	$\text{N/mm}^2$
$f_{yk}$	: Donatı çeliğinin akma dayanımı (karakteristik)	$\text{N/mm}^2$

$f_{su}$	: Çelik çekme dayanımı	N/mm <sup>2</sup>
$G_i$	: i nolu agrega ağırlığı	kg
$h$	: Kesit yüksekliği	cm
$h_o$	: Kompozit kesitte tarafsız eksenin basınç yüzüne uzaklığı	cm
$h_u$	: Kompozit kesitte tarafsız eksenin çekme yüzüne uzaklığı	cm
$h_{hava}$	: Betondaki havanın hacmi	dm <sup>3</sup>
$I$	: Kesit atalet momenti	m <sup>4</sup> , cm <sup>4</sup>
$I_c$	: Çatlamamış beton kesit atalet momenti	m <sup>4</sup> , cm <sup>4</sup>
$I_t$	: Kompozit kesit atalet momenti	m <sup>4</sup> , cm <sup>4</sup>
$I_{cr}$	: Çatlamış beton kesit atalet momenti	m <sup>4</sup> , cm <sup>4</sup>
$I_{ef}$	: Kesitin etkili atalet momenti	m <sup>4</sup> , cm <sup>4</sup>
$J_x$	: x-x eksen kesit atalet momenti	m <sup>4</sup> , cm <sup>4</sup>
$K_G$	: Beton dayanımı katsayısı	
$k$	: Kiriş elemanlarında sınır koşullarına ve yükün açıklık boyunca dağılımına bağlı katsayı	
$k_1$	: Ortalama basınç gerilmesinin maksimum gerilmeye oranı	
$k_2$	: Basınç bileşkesinin basınç kenarına uzaklığının tarafsız eksen derinliğine oranı	
$k_3$	: Maksimum basınç gerilmesinin beton silindir dayanımına oranı	
$k_z$	: Moment kolu katsayısı	
$k_s$	: Kesitteki birim deformasyon dağılımı ile donatının yüzey biçimine bağlı katsayı	
$k_{ag}$	: Karışım agregası incelik modülü	
$L$	: Kiriş açıklığı	cm, m
$l_0$	: Kompresometre boyu	mm
$M$	: Eğilme momenti	kNm
$M_u$	: Kesit eğilme momenti taşıma gücü	kNm
$M_{ub}$	: Denge donatılı kesit eğilme momenti taşıma gücü	kNm
$M_x$	: x-x eksen eğilme momenti	kNm
$M_{cr}$	: Kesit için çatlama eğilme momenti	kNm
$M_{mak}$	: Kesit için en büyük eğilme momenti	kNm
$m$	: Kırılma çizgisi birim genişliğinde eğilme momenti değeri	kNm

$n$	: Es/Ec oranı	
$P$	: Silindir numuneye uygulanan kuvvet	kN
$P_a$	: Numune orta noktasına uygulanan tekil kuvvet	kN
$P_{au}$	: Numune orta noktasına uygulanan tekil kuvvetin nihai değeri	kN
$P_{aub}$	: Dengeli donatılı halde numune orta noktasına uygulanan tekil kuvvetin Nihai değeri	kN
$P_b$	: Numune L/3 mesafesine uygulanan tekil kuvvet	kN
$P_{bu}$	: Numune orta noktasına uygulanan tekil kuvvetin nihai değeri	kN
$P_{bub}$	: Dengeli donatılı halde numune orta noktasına uygulanan tekil kuvvetin nihai değeri	kN
$P_u$	: Göçme yükü	kN
$P_{ut}$	: Teorik göçme yükü	kN
$P_{ue}$	: Deneysel göçme yükü	kN
$P_i$	: i nolu agreganın agrega toplam hacmi içerisindeki yüzdesi	
$s$	: Beton karma suyu miktarı	dm <sup>3</sup> , lt
$t_h$	: Hafif beton kalınlığı	
$t_n$	: Normal beton kalınlığı	
$t_{no}$	: Basınç bölgesi normal beton kalınlığı	
$t_{nu}$	: Çekme bölgesi hafif beton kalınlığı	
$V_a$	: Agrega toplam hacmi	dm <sup>3</sup>
$w$	: Ağırlıkça etkin su/çimento oranı	
$W$	: 1 m <sup>3</sup> betondaki su miktarı	lt
$W_k$	: Karakteristik çatlak genişliği	mm
$W_m$	: Donatı ağırlık merkezindeki çatlak ortalama genişliği	mm
$W_{nor}$	: Normal beton numune ağırlığı	kN
$W_{kom}$	: Kompozit beton numune ağırlığı	kN
$x$	: Tarafsız eksen derinliği	cm, mm
$x_b$	: Dengeli donatılı kesitte tarafsız eksen derinliği	cm, mm
$y$	: Kesitte bir noktanın tarafsız eksene olan uzaklığı	cm
$z$	: Moment kolu	
$\alpha$	: Kompozit kesitte malzeme elastisite modülleri oranı	
$\alpha_{su}$	: Beton karma suyu tayini katsayısı	

$\varepsilon$	: Birim boy değişimi	
$\varepsilon^{\bar{}}$	: Ortalama birim boy değişimi	
$\varepsilon_b$	: Basınç lifi birim boy değişimi	
$\varepsilon_c$	: Beton birim boy değişimi	
$\varepsilon_s$	: Donatı birim boy değişimi	
$\varepsilon_z$	: z-z eksenine boyunca birim boy değişimi	
$\varepsilon_{cu}$	: Beton basınç lifindeki nihai birim boy değişimi	
$\varepsilon_{su}$	: Çelik kopma uzaması	
$\varepsilon_{yd}$	: Donatı çubuğu tasarım birim boy değişimi	
$\varepsilon_{yk}$	: Donatı çubuğu karakteristik birim boy değişimi	
$\varepsilon_{min}$	: Minimum birim boy değişimi	
$\varepsilon_{mak}$	: Maksimum birim boy değişimi	
$\varepsilon_{hb}$	: Hafif beton birim boy değişimi	
$\varepsilon_{nb}$	: Normal beton birim boy değişimi	
$\sigma$	: Normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_c$	: Betonda normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma^{\bar{}}$	: Ortalama gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_h$	: Hafif betonda normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_b$	: Basınç lifi beton gerilmesi	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_o$	: Kompozit kesitte üst lif beton gerilmesi değeri	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_u$	: Kompozit kesitte alt lif beton gerilmesi değeri	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_m$	: Ortalama beton gerilmesi	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_n$	: Normal beton gerilmesi	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_s$	: Donatıda normal gerilme değeri	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_z$	: z-z eksenine dik düzlemde normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{nb}$	: Normal betonda normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{hb}$	: Hafif betonda normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{min}$	: Minimum normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{mak}$	: Maksimum normal gerilme	N/mm <sup>2</sup>
$\rho$	: Donatı oranı	

$\rho_b$	: Dengeli donatı oranı	
$\rho_m$	: Azaltılmış dengeli donatı oranı	
$\rho_r$	: Çatlak genişliği için donatı yüzdesi	
$\rho_x$	: Elastik eğrinin eğrilik yarıçapı	
$\theta$	: Kuvvetler çizgisi ile asal eksen arasındaki açı	derece
$\phi$	: Donatı çapı	mm
$\delta$	: Genel olarak deplasman	
$\delta_c$	: Çimentonun özgül ağırlığı	kN/dm <sup>3</sup>
$\delta_{ai}$	: i nolu agreganın birim hacim ağırlığı	kN/dm <sup>3</sup>
$\Delta$	: Komprosometrede okunan deplasman	
$\partial$	: 1 m <sup>3</sup> taze betondaki hava hacmi	dm <sup>3</sup>



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Gömme kompozit kolonlar..... 6
Şekil 2.2.	Dolma kompozit kolonlar..... 7
Şekil 2.3.	Çekme bölgesi normal beton kompozit eğilme elemanı..... 8
Şekil 2.4.	Orta tabakası hafif beton ile üretilen kompozit eğilme elemanı..... 8
Şekil 2.5.	Kompozit prekast döşeme..... 9
Şekil 2.6.	Kiriş kesitlerde çatlama genişliklerinin hesabı için dikkate alınan alan..... 20
Şekil 3.1.	Kuvvetler düzlemi ve kuvvetler çizgisi..... 22
Şekil 3.2.	Kuvvetler çizgisinin asal eksenlerle çakışması: Basit düz eğilme ..... 23
Şekil 3.3.	Basit eğilmeye maruz bir eleman: (a) eğilme öncesi, (b) eğilme sonrası . 24
Şekil 3.4.	Farklı beton tabakalarının kenetlenmesi ..... 25
Şekil 3.5.	Basınç bölgesi hafif ve çekme bölgesi normal beton olan kompozit kiriş kesiti ..... 26
Şekil 3.6.	Basınç bölgesi hafif ve çekme bölgesi normal beton olan kompozit kiriş kesitinde birim boy değişimi ve gerilme yayılımı ..... 26
Şekil 3.7.	Normal betona dönüştürülmüş eşdeğer kompozit kesit..... 27
Şekil 3.8.	Tarafsız eksenin hafif-normal beton arakesitinde bulunması hâli..... 29
Şekil 3.9.	Tarafsız eksenin normal beton içerisinde bulunması ..... 29
Şekil 3.10.	Çatlamış kesitte tarafsız eksenin hafif beton içerisinde bulunması hâli..... 31
Şekil 3.11.	Çatlamış kesitte tarafsız eksenin normal beton içerisinde bulunması hâli.. 32
Şekil 3.12.	Hafif beton için kabul edilen gerilme-şekil değiştirme modeli (basınç)..... 33
Şekil 3.13.	Basit eğilme altındaki kompozit kesitte gerilme ve iç kuvvetler ..... 33
Şekil 4.1.	Betonarme döşemelere ait deney programı şeması..... 42
Şekil 4.2.	Silindir numunelere ait deney programı şeması..... 42
Şekil 4.3.	Beton numuneye basınç yükü uygulamadan önce takılan kopressometre ..... 43
Şekil 4.4.	Kompozit beton numunelerin geometrik boyutları..... 45
Şekil 4.5.	Üç noktalı eğilme deneyi ..... 46
Şekil 4.6.	Deneylerde uygulanan yükleme biçimi ..... 46
Şekil 4.7.	Betonarme bir kesitte basınç gerilme bloğu parametreleri..... 47
Şekil 4.8.	Betonarme bir kesitte eşdeğer gerilme bloğu ..... 48

Şekil 4.9.	Donatı düzeni .....	54
Şekil 4.10.	Hafif betonarme kesitte eşdeğer gerilme dağılımı ve eşdeğer gerilme bloğu .....	55
Şekil 4.11.	Eğilme deneylerinde kullanılan yükleme düzeni .....	59
Şekil 4.12.	Kompozit betonarme elemanda deplasman ölçümü yapılan noktalar.....	60
Şekil 5.1.	Standart granülometri sınır değerleri ve hafif agrega karışımının granülometri eğrisi.....	64
Şekil 6.1.	Deney plaklarında tipik çatlak düzeni.....	79
Şekil 6.2.	Kesmeli eğilme bölgesinde asal gerilmeler .....	80





## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Betonarme elemanlarda izin verilen karakteristik çatlak genişlikleri.....	19
Çizelge 4.1. Kullanılan betonarme çeliğinin mekanik özellikleri.....	36
Çizelge 4.2. Beton karma suyu tayininde kullanılan $\alpha_{su}$ katsayısı değerleri.....	38
Çizelge 4.3. Normal beton numuneler için eğilme taşıma gücü momenti ve mukabil yükleri.....	51
Çizelge 4.4. Normal beton deney numunelerinin dengeli kırılma durumunda eğilme taşıma gücü momenti ve mukabil yükleri.....	51
Çizelge 4.5. Normal beton deney numunelerinin basınç kırılması durumunda eğilme taşıma gücü momenti ve mukabil yükleri .....	53
Çizelge 4.6. Normal betonarme deney elemanlarında denge kırılma durumunda seçilen donatılar .....	53
Çizelge 4.7. Normal betonarme deney elemanlarında çekme kırılması durumunda seçilen donatılar .....	53
Çizelge 4.8. Normal betonarme deney elemanlarında basınç kırılması durumunda seçilen donatılar .....	54
Çizelge 4.9. Basınç bölgesi hafif beton tabakada kalan kompozit beton deney elemanlarının eğilme taşıma gücü momentleri ve mukabil kuvvetleri .....	56
Çizelge 4.10. Basınç bölgesi hafif beton kompozit deney elemanlarında dengeli kırılma durumunda eğilme taşıma gücü momenti ve göçme yükleri .....	57
Çizelge 4.11. Basınç bölgesi hafif beton olan kompozit elemanlarda basınç kırılması halinde eğilme taşıma gücü momenti göçme yükleri .....	58
Çizelge 4.12. Dengeli kırılma hali için kompozit betonarme elemanlarda donatı alanı ve seçilen donatı.....	58
Çizelge 4.13. Çekme kırılması hali için kompozit betonarme elemanlarda donatı alanı ve seçilen donatı .....	58
Çizelge 4.14. Basınç kırılması hali için kompozit betonarme elemanlarda donatı alanı ve seçilen donatı.....	59
Çizelge 5.1. Kullanılan Kocahacılı kumu granülometri deneyi sonuçları.....	62
Çizelge 5.2. Kullanılan Ür-Pa ince çakılına ait granülometri deneyi sonuçları.....	62
Çizelge 5.3. Kullanılan Ür-Pa iri çakılına ait granülometri deneyi sonuçları.....	63

Çizelge 5.4.	Karışım da kullanılan agregaların granülometri değerleri .....	63
Çizelge 5.5.	Standart granülometri sınır değerleri ile karışım sonuçları .....	64
Çizelge 5.6.	350 Dozlu deney betonu birleşenleri .....	65
Çizelge 5.7.	400 Dozlu deney betonu birleşenleri .....	65
Çizelge 5.8.	450 Dozlu deney betonu birleşenleri .....	66
Çizelge 5.9.	Değişik dozajlardaki hafif beton numunelerinin birim hacim ağırlıkları....	67
Çizelge 5.10.	350 Dozlu deney betonunun kompressometre okumaları.....	68
Çizelge 5.11	28 Günlük 350 dozlu hafif beton silindir numunelerin basınç Deneyi .....	69
Çizelge 5.12.	400 Dozlu hafif beton deney numunelerde kompressometre okumaları ....	70
Çizelge 5.13.	28 Günlük 400 dozlu hafif beton silindir numunelerde basınç deneyi sonuçları .....	71
Çizelge 5.14.	450 Dozlu hafif beton numunelerde kompressometre okumaları .....	72
Çizelge 5.15.	28 Günlük 450 dozlu hafif beton silindir numunelerde basınç deneyi sonuçları.....	73
Çizelge 5.16.	Çekme kırılması yapması planlanan kompozit numunelerin eğilme deneyi teorik ve deneysel göçme yükleri.....	75
Çizelge 5.17.	Denge kırılması yapması planlanan kompozit numunelerin eğilme deneyi teorik ve deneysel göçme yükleri.....	76
Çizelge 5.18	Basınç kırılması yapması planlanan kompozit numunelerin eğilme deneyleri teorik ve deneysel göçme yükleri.....	77
Çizelge 5.19.	Normal beton numunelerin eğilme deneyleri teorik ve deneysel göçme yükleri .....	77

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmama imkan sağlayan, değerli fikir ve görüşleri ile her zaman yol gösteren hocam Sayın **Prof. Zekeriya POLAT** 'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her kademesinde desteğini gördüğüm, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Başkanı Öğretim Üyesi Sayın **Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR** 'a, Yapı Anabilim Dalı Başkanı **Yrd. Doç. Dr. Canan YILMAZ** 'a, Araştırma Görevlisi **Erkan BEŞDOK** 'a ve İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı Görevlisi İnşaat Teknikeri **Mustafa GEZER** 'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bana her zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.



## ÖZET

Ham madde rezervlerinin kısıtlı olması, insanoğlunu, (1) Mevcut rezervleri olabildiğince ekonomik olmaya, (2) Yeni malzemeler keşfetmeye zorlamaktadır. Bu bağlamda yerel malzemelerin kullanılabilirliklerinin araştırılması, özellikle inşaat mühendisliği uygulamaları bakımından önem taşımaktadır. Yerel yapı malzemeleri rezervleri ve çeşitliliği bakımından oldukça zengin bir potansiyele ve yapı geleneklerine sahip Anadolu'da, hafif yerel tabii agregalar kullanarak taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanları üretmek ve bunların özelliklerini ve performanslarını test etmek, son zamanlarda gittikçe yaygınlaşan bir araştırma ve uygulama alanıdır.

Bu çalışmada; Kayseri Develi yöresinde bol miktarda bulunan tabii bims kumu ve agregası kullanılarak üretilen "hafif beton-beton" kompozit betonarme döşeme elemanlarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, "120\*220\*h" cm. boyutunda, normal+hafif beton kalınlıkları 5+5 cm., 5+8 cm. ve 5+10 cm. olan 24 adet betonarme kompozit kesitli plak elemanlar; çekme bölgesi normal beton ve basınç bölgesi hafif beton olacak şekilde, donatı yüzdeleri ise çekme kırılması, denge kırılması ve basınç kırılması verecek şekilde boyutlandırılmak suretiyle üretilmişlerdir. Ayrıca kompozit elemanlarda rijitlik değişimini kıyaslayabilmek amacıyla, yine kalınlıkları 10 cm., 13 cm., 15 cm. olan 3 adet betonarme normal beton kesitli plak elemanlar üretilmiştir. Numuneler 1/3 noktalarından yüklenerek kırılmış ve önerilen kompozit döşeme elemanlarda sağlanan ağırlık tasarrufu ve kullanılabilirlikleri deneysel verilere dayandırılarak gösterilmiştir.

Sonuç olarak; Hafif beton için 400 dozaj ile C16 kalitesinde beton imal edilirken, normal betonda 300 dozaj ile aynı beton kalitesi elde edilebilmiştir. Hafif beton ve normal betonda elastisite modülleri arasındaki oran 1/3, kompozit ve normal beton plakların eğilme rijitlikleri arasındaki oran ise 1/2 mertebelerinde bulunmuştur. Normal ve hafif beton derzinin 4-6 mm. pürüzlendirilmesinin deney sonucunda, kesit davranışı açısından yeterli olduğu tespit edilmiştir. Kompozit plak kullanımı ile yapı öz ağırlığının %20~30 daha azaldığı hesaplanmıştır. Deney sonucunda Kompozit plak elemanlarının kesme dayanımının normal beton kesitli plak elemanlara göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

## **ABSTRACT**

Because world sources of raw materials are getting depleted continuously, mankind is forced to exploit the existing reserves as economically as possible and to explore new materials. Hence, research on usability of locally available materials, especially in civil engineering applications, has become more important in the recent years. Because of widespread volcanic formations, among other geologic peculiarities of such zones, light-weight aggregates of pumice type is found abundantly at various places of Anatolia. Recently, research on practicability of using these rich natural reserves of pumice aggregates as the major constituent of either structural or nonstructural light-weight concrete has gained momentum both in academic and industrial fields in Turkey.

In this study, usability of “composite reinforced concrete” (CRC) slab units as structural elements consisting of an upper layer of light-weight concrete underlaid by a lower layer of normal-weight concrete, produced using the pumice aggregates of the Develi region, which is a district of Kayseri lying in the southern foothills of the Erciyes Mountain, is investigated. For this purpose, a total of 24 number of slab units of 120x220xh cm dimensions each are produced at varying composite depths, which had 5+5, 5+8, and 5+10cm combinations, the first 5 cm being the height of the normal-weight concrete layer and the second value being the height of the lightweight concrete layer, respectively. Some of these slabs are designed and produced to be under-reinforced, some as balanced, and some others as over-reinforced. With the purpose of comparing the behavior of all these various CRC slab units versus the conventional ones, three more normal-weight reinforced concrete (RC) slabs of 10 cm, 13 cm, and 15 cm thickness are produced using normal-weight concrete only. As a result of experiments subjecting these slabs to simple bending moments in a two-point-loading setup, it is observed that the behaviors of the CRC slab units are reasonably satisfactory with considerable savings in dead weight as compared to those of normal-weight concrete; and It is calculated that a reduction of about 20~30% in overall dead weight of a structure will result if such CRC slabs are used.

In conclusion, it is experimentally determined that the ratio of elasticity modulus of the structural light-weight concrete produced with the suitably graded Develi pumice

aggregates with a cement dosage of  $400 \text{ kgf/m}^3$  to that of normal-weight concrete having a cement content of  $300 \text{ kgf/m}^3$  is about  $1/3$ , and the ratio of flexural stiffnesses of the CRC to RC slabs is around  $1/2$ , respectively. The shear strength of CRC units is observed to be a little less than that of RC elements. It is determined that producing protrusions of approximately 5mm heights by manual trimming of top of the lower normal-weight concrete layer in fresh form is sufficient to provide sufficient bonding between the light-weight and normal-weight concrete layers.



## 1. GİRİŞ

Beton, istenilen şekil ve boyutun kolayca verilebildiği bir yapı malzemesi olması nedeniyle, çimentonun bulunmasından günümüze kadar yaygın olarak kullanılmıştır.

Yapıların projelendirilmesi ve inşaatında güvenlik, eski çağlardan beri ekonomi, estetik ve fonksiyonel olma özellikleri aranır.

Bu özelliklerden son ikisi, projelendirmeyi yapan veya yaptıran kişilerin düşüncelerine, her toplumun kendine özgü mimarî anlayışına ve ihtiyaçlarına göre değişir. Emniyetli ve ekonomik olma konusu ise iyi bir planlama ve programlama ile desteklenen çok iyi bir malzeme bilgisi gerektirir.

Bulunuşundan günümüze kadar uygulama alanı gittikçe yaygınlaşan beton; yüksek dayanım istenilen yerlerde, özellikle yük taşıyan yapı elemanlarında kullanılır. Bununla beraber, betonun birim hacim ağırlığının nispeten yüksek oluşu, betonarme yapı taşıyıcı sistemi kendi ağırlığının, yaklaşık yapıya taşıtılan faydalı yükler mertebesinde gerçekleşmesi sonucunu doğurur. Bu durum, yapıların temel sistemine ve temel zeminine büyük yüklerin gelmesi demektir. Statik açıdan yapıların boyutlandırılmaları ekonomik değer olarak pahalı temel yapılarını, gerekli hallerde zemin iyileştirme projelerini maliyet artırıcı bir unsur olarak karşımıza çıkarmaktadır. Öte yandan, ülkemiz topraklarının %90 'ının potansiyel deprem bölgesi olduğu hatırlanırsa, hafif yapıların önemi daha da iyi anlaşılacaktır (Özay, 1988).

Hafif agrega kullanılması ile elde edilen hafif betonlar, yapı ölü yüklerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Brodda, 1977; Baradan, 1985; Durmuş, 1985; Hüsem, 1997). Betonun birim hacim ağırlığının düşürülmesi, sonuçta yapıyı hafifletmekte, böylece donatı ile kolon, kiriş, döşeme ve temel kesitlerinde nispeten küçülme meydana getirebilmektedir. Ayrıca ses ve ısı yalıtımının da artması artı bir sonuçtur (Abdullayev, 1996).

Hafif malzemeler ile ilgili çalışmalar çok eskilere dayanır. Romalılar süngertaşı gibi hafif taşları inşaatlarda kullanmışlardır (Topçu, 1988; TPTS 1988). Hafif agregaların beton içinde kullanılması ise geçen yüzyılın ortalarında başlamıştır. Almanya'da süngertaşı betonda kullanılarak "Bims Betonu" yapılmış, daha sonra A.B.D., İsveç, Danimarka ve diğer bazı Avrupa ülkelerinde çeşitli hafif betonlar imal edilmiştir. Hafif betonların endüstrileşmiş yapıya girmesi ise daha çok II. Dünya Savaşı'ndan sonraya rastlamaktadır (Durmuş, 1985).

Pek çok ülkede hafif beton konusunda yapılan çalışmalar değişik özelliklere sahip çok çeşitli betonların üretimine yol açmıştır. Doğal ve yapay hafif agregaların kullanılmasıyla normal betonlara kıyasla daha hafif betonlar üretilmiştir. Günümüzde ekonomik sebepler ve yapılarda konfor taleplerinin artması da bu çalışmaların daha geniş boyutlara ulaşmasına sebep olmaktadır (Floyd, 1986).

Ülkemizde de hafif beton üretimi ile ilgili çalışma, araştırma ve uygulamalar gün geçtikçe artmakta; yurdumuzun doğal agregalar bakımından büyük rezervlere sahip olması bu konudaki çalışmaları daha anlamlı kılmaktadır. Bayındırlık Bakanlığının ve Üniversitelerimizin çalışmaları ile, ülkemizin 26 ilindeki hafif doğal agregaların %57'sinin basınç dayanımının  $11 \text{ N/mm}^2$ 'nin üstünde olduğunu; bu doğal agregalar ile orta dayanımlı ve taşıyıcı hafif beton üretilebileceği ortaya konmuştur (Baradan, 1985). Enerji kullanarak pahalı şekilde üretilen hafif yapı elemanları yerine, bu doğal malzemelerin kullanımı yoluna gidilmesinin, Ülkemiz için ekonomi sağlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca bu doğal agregaların kullanımı yapay hafif agrega sanayinde olduğu gibi büyük yatırımları gerektirmemektedir. Konunun bir diğer ilginç yanı da, bu doğal malzeme rezervlerinin pek çoğunun ısı yalıtımına daha fazla ihtiyaç duyulan Orta ve Doğu Anadolu Bölgelerimizde bulunuşudur. Ulaşım imkanlarının kolay olduğu bölgelerde, kısa bir süre içinde az bir yatırımla kurulabilecek kırma, eleme ve yıkama tesisleri bu malzemelerin yapı endüstrisinde kullanılmasını kolaylaştıracaktır.



Bu çalışmanın amacı; hafif ve normal betondan farklı kompozisyonlarda üretilen kompozit betonarme yapı elemanlarının mekanik özelliklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesi, taşıma gücü hesap yöntemlerinin bu tip elemanlarla uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır.

Burada kullanılan kompozit beton yapı elemanı ile, değişik mekanik özellikli iki ayrı beton malzemesin'den oluşan bir yapı kastedilmektedir. Beton malzemelerinden birisi normal ağırlıklı agregadan üretilen normal beton, diğeri ise Kayseri Erciyes Dağı volkanik tüflerinin hafif agrega olarak kullanılması ile üretilen hafif betondur.

Kompozit betonarme eleman olarak **beton-beton kompozitlerin** kullanılması ilk olarak 1950'li yıllarda İllinois otoyolunda prekast döşeme panellerinin uygulanması ile başlamıştır. Burada, öngerilmeli üst başlıklı kiriş köprüsü panelleri daha ekonomik ve uygulanabilir olması için yerinde dökme beton ile birlikte kullanılmıştır. Paneller genel olarak fabrikalarda önceden hazırlanır ve mesnet üzerine beton vinçler vasıtasıyla konulur. Yerinde dökme betona bu paneller kalıp vazifesi görür ve bir bütünlük arz eder. Öndöküm beton ve panel üzerine beton kaplama bir kompozit kesit oluşturur ve paneller kirişler arasındaki pozitif moment donatısını içerir (Associates, 1988; BP Committee, 1988).

Beton-beton kompozit elemanların 1990'lı yıllarda endüstriyel yapılarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle prekast plakalar üzerine yerinde dökme beton kullanılarak döşeme eleman üretimi yapılmaktadır. Bu uygulama pozitif moment bölgesinde olduğu gibi, yerinde dökme beton içerisinde donatı olmak koşulu ile negatif moment bölgesinde de uygulanmaktadır (Elliott, 1996).

Basit eğilmeye maruz bir kiriş kesitinin tarafsız eksenine yakın kısımları, yüklemenin fazla olduğu durumlarda bile, çok küçük gerilmelere maruz kalır. Bu nedenle, özellikle çelik yapılarda malzemedan optimum yararlanmak amacıyla çubuk kesitleri uygun şekilde profillendirilmektedir (İnan, 1984; Kayan, 1987). Kalıp güçlüğü yüzünden yerinde imal edilen betonarme kirişlerde, çelik profile benzer tarafsız eksen civarında bir malzeme azaltması zordur. Bu özelliklerin, kısmen, kompozit beton kesitlerle oluşturulabileceği düşünülmektedir. Normal ve hafif yapı betonlarının bir elemanda uygun kesitlerde

kullanılması ile rijitlik şartları yerine getirilirken yapı ölü ağırlığı azaltılarak, sonuçta ekonomi sağlanabilir.

Beton teknolojisindeki gelişmeler, beton üretiminin hızla hazır betona doğru kaydığını göstermektedir. Günümüz teknolojiyle; normal beton ve hafif agrega kullanmak sureti ile elde edilen hafif betonun aynı anda farklı mikserlerde üretilip, istenilen miktar ve zamanlarda rahatlıkla aynı kalıba pompalanması mümkündür.

Bu düşüncelerden hareketle beton-beton kompozit elemanlar üreterek, bu elemanların taşıma gücü kayıplarının pozitif moment bölgesi için teorik ve deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır.

Hafif betonun betonarme bir kiriş veya döşeme elemanının bir kısmı olarak kullanımını ile;

- Yapı kendi ağırlığının azalması sonucu, daha küçük kolon ve temel kesitleri kullanmak mümkün olacaktır;
- Yapı kütlelerinin azalması ile yaklaşık aynı oranda depremden dolayı yapıda oluşacak atalet kuvvetlerinde azalma olacaktır;
- Isı ve ses yalıtım kabiliyetinde artış olacaktır.

Kompozit beton kullanımını daha çok döşeme inşaatı için düşünüldüğünden, bu yüzden yapı sünekliğinin pratik olarak değişmeyeceği düşünülmektedir.

Özetle, bu çalışma ile, bu uygulamalara pratik bir kapı açmak için;

- Kompozit beton elemanların mekanik özelliklerinin incelenmesi;
- Normal beton için kullanılan "taşıma gücü" teorisinin kullanılabilirliğinin ve, gerekirse, yapılması gerekli değişikliklerin araştırılması

amaçlanmıştır. İnceleme malzeme ve yapı elemanı deneylerine dayandırılacaktır.

## **2. KOMPOZİT BETON YAPI ELEMANLARI VE HAFİF BETON KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Genel Bilgi**

Birbirinden farklı iki veya daha çok malzemeyi fiziksel olarak karıştırmak yolu ile elde edilen ve başlangıçtaki malzemelerden farklı özelliklere sahip olan malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit beton yapı elemanları ise, farklı mekanik özellik taşıyan farklı betonların tabakalar halinde kullanılması ile oluşturulan elemanlardır (Akyüz, 1976; Atan, 1980).

Beton; belirli oranlarda çimento, agrega, su ve bazen de katkı maddelerinin harman edilmesi ile hazırlanan, istenilen şekil ve boyutlarda, kalıplar içerisine boşluksuz bir şekilde yerleştirmek suretiyle üretilen bir malzemedir.

Hafif beton; beton içerisindeki agregalardan belirli çaplarda olanını, birim hacim ağırlığı az olan volkanik kökenli tüf türü agregalardan ya da yapay olarak üretilen agregalardan kullanmak sureti ile elde edilen bir betondur. Bims türü agrega kullanımı ile dayanımı makul seviyelerde korunarak hafif betonun birim hacim ağırlığı  $16 \text{ kN/m}^3$  'ün altına çekilebilmekte olup toplam yapı yüklerinde %20-25 oranlarında bir azalma sağlanabilmektedir (Wesche, 1974).

Bu kısımda, kompozit yapı elemanları ve hafif beton uygulamaları ile ilgili olarak kaynak taraması yapılmış; ayrıca kullanıldığı yapı kısımları ve uygulama alanları özetlenmiştir.

### **2.2. Kompozit Yapı Elemanları ve Kullanım Alanları**

Kompozit karma elemanlar, mühendislik yapılarında kullanılan taşıyıcı sistemlerin bütün elemanlarında farklı özellikte malzemelerin bir arada kullanılması neticesinde ortaya çıkmaktadır. Kompozit elemanların kesitlerinde betonarme, öngerilmeli beton, prefabrike kısımlar birlikte çalışabileceği gibi; beton, çelik gibi değişik mekanik özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanılması durumları da söz konusu olmaktadır.

Yapılarda betonarme niteliğinde olan temeller bir yana bırakılırsa, üst yapıda betonarme döşeme plakları ile kalıcı kalıp olarak kullanılan çelik saçların, asmolen gibi dolgu malzemelerinin veya prekast döşeme panellerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kompozit yapı elemanlarını, betonun, maliyetine nispetle basınçta büyük değerlere varan taşıma gücünden azami yararlanma düşüncesi doğurmuştur.

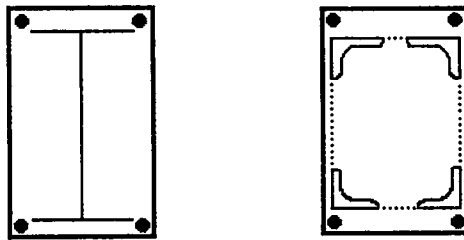
Kompozitlik, beton gibi basınca karşı dayanımı çekmeye nazaran oldukça yüksek olan elemanla, çelik gibi çekmeye karşı dayanımı yüksek malzemenin bir arada kullanılması halinde de söz konusudur. Kompozit taşıyıcı elemanlar, kullanım amaç ve yerlerine bağlı olarak çeşitli formlarda üretilirler (Yorgun, 1995).

Hâlen uygulamada kullanılan kompozit yapı elemanlarını; kompozit kolonlar, kompozit kirişler ve kompozit döşemeler olarak üçe ayırmak mümkündür.

### 2.2.1. Kompozit kolonlar

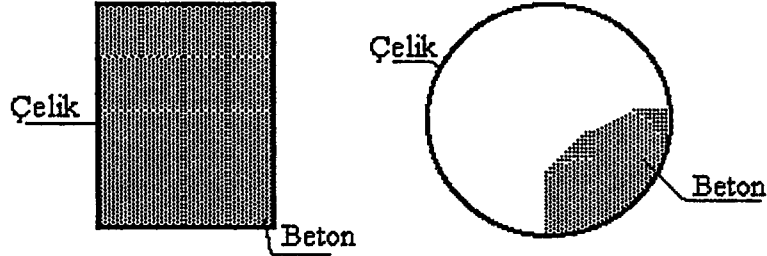
Kolonlar, mühendislik yapılarında karşımıza düşey taşıyıcı elemanlar olarak çıkmakta olup, genel anlamda, normal kuvvet etkisindeki elemanlar olarak tanımlanmaktadır. Normal kuvvet eksenel veya dış merkezli olabilir. Kolonlarda belirli bir dış merkezliğin olması, kesitte basınç gerilmeleri yanında çekme gerilmelerinin de oluşmasına neden olabilir. Dolayısıyla çekmeye karşı zayıf olan betonla, çeliğin birlikte kullanılması zorunluluğu ortaya çıkar (Berktaş, 1989; Celep, 1996; Gündüz, 1980).

Kompozit kolonlar, yüksek süneklikleri ve enerji yutma kapasiteleri ile özellikle deprem bölgelerinde kullanılmaları bakımından çekicidirler (Arda, 1991; Taylor, 1979).



Şekil 2.1. Gömme kompozit kolonlar

Kompozit kolonları, pratikte kullanım şartlarına göre, iki şekilde sıralamak mümkündür. Bunlar; betona gömülmüş çelik enkesitler ile içleri betonla doldurulmuş boru ve kutu enkesitli çelik kolonlardır (Şekil 2.1, Şekil 2.2).



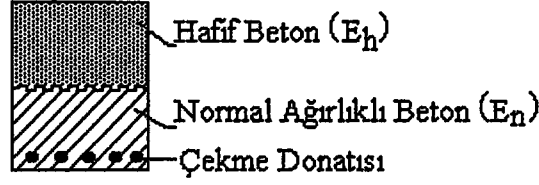
Şekil 2.2. Dolma kompozit kolonlar

Betona gömülü kompozit kolonlara, çeliğin yangın etkisine karşı korunmasını sağlamak amacıyla yapılarda sıkça rastlanılmaktadır. İçleri betonla doldurulmuş boru ve kutu enkesitli kompozit kolonların kullanımı ise, yakın zamanlarda ortaya çıkmıştır. Bu tip kompozitler, kapalı kesit içerisinde korozyondan korunması ve yerel buruşmaların önlenmesi amacı ile kullanılmaktadır (Arda, 1991).

### 2.2.2. Kompozit kirişler

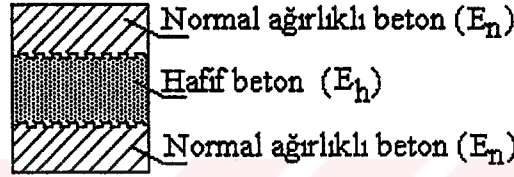
Betonarme taşıyıcı sistemde kirişler söz konusu olduğunda, kolon kesitleri normal kuvvetle eğilme momentini birlikte taşıırken, kirişlerde normal kuvvet ihmal edildiğinden, genelde eğilme momenti ve kesme kuvveti taşıyan yapı elemanı olarak ortaya çıkar (Gündüz, 1980).

Bu çalışmada iki farklı betondan oluşturulan kompozit kiriş elemanların davranışının deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. İki tür kesit öngörülmüş, fakat bunlardan birincisi gerçekleştirilmiştir. Bunların birincisi, yerinde döküm betonla tamamlanan prekast döşeme elemanlarından esinlenerek tasarlanmıştır; döşeme donatısı, uygulamada aynı zaman da kalıp görevini görecek olan normal beton kısımda bulunacak, kesitin basınç bölgesi hafif beton ile oluşturulacaktır (Şekil 2.3). Deneysel ve teorik çalışmalarda aşağıdaki şekilde verilmiş olan kesit için yapılacaktır.



Şekil 2.3. Çekme bölgesi normal beton kompozit eğilme elemanı

İkinci tür ise, duvarlarda ve kimi kere taşıyıcı olarak da kullanılan sandviç plaklardan esinlenerek üç tabakalı düşünülmüştür; orta da hafif, yüzeylerde donatılı ve/veya donatılı normal beton yer alacaktır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Orta tabakası hafif beton kompozit eğilme elemanı

### 2.2.3. Kompozit döşemeler

Hafif agregalı betonun binalarda ilk kullanıldığı elemanlar döşemeler olmuştur (Örneğin, Marina City Towers, Chicago, ABD 1961-1962). Yapı tabliyeleri hacim olarak bina taşıyıcı sisteminin önemli bir yüzdesini (%70) oluşturdukları için, toplam statik yükte önemli bir hafifleme elde edilecektir. Bu düşünceden hareketle ve sağladığı üstünlük yönünden kompozit döşeme üretiminin de yapılması imkan dahilinde olabilmektedir. Kompozit döşemeleri, kompozit döşeme plakları ve kompozit döşeme panelleri olarak ikiye ayrılabilir.

#### 2.2.3.1. Kompozit döşeme plakları

Kalınlıkları, taşıyıcı yöndeki boyutları yanında çok küçük olan iki boyutlu elemanlardır. Bu tür taşıyıcıların kalınlıklarının orta noktalarını birleştiren yüzeye “orta yüzey” denir.

Döşemeler, orta yüzeyin geometrik şekline göre plak veya kabuk adını alırlar. Orta yüzeyi düzlemsel olan sistemlere plak denir (Berktaş, 1992).

Kirişlerdekine benzer şekilde kompozit kesitli döşemeler yapılabilir. Bu amaçla, bir kısmı veya tamamı hafif betondan üretilmiş döşemeler üretilebilir. Döşemelerin bu şekilde üretilmiş olması durumunda dahi mühendislik yapısı kütlesi hissedilir oranda azalır (Açıkel, 1995; Baradan, 1985; Durmuş, 1985).

### 2.2.3.2. Kompozit döşeme panelleri

Kompozit döşeme panellerinde, paneller fabrikalarda önceden hazırlanır ve mesnet üzerine beton vinçler vasıtasıyla konulur. Yerinde dökme betona bu paneller kalıp vazifesi görür ve bir bütünlük arz eder (Şekil 2.5). Kullanılan kiriş paneller betonarme ve/veya öngerilmeli beton olup, gerekli pozitif moment donatısını da içerirler (Associates, 1988).



Şekil 2.5. Kompozit prekast döşeme

Kompozit döşeme panelleri, özellikle köprü inşaatlarında Amerikada sıkça kullanılmaktadır. Bu paneller ilk olarak 1950 'lerde İllinois Otoyolunda kullanılmıştır. Daha sonra 1960 'lı yıllarda ve özellikle 1970 'li yılların sonuna doğru çeşitli ülkelerde kullanılmaya başlanmıştır. Sanayi yapılarında kullanılmaları ise 1990'lı yılların ortalarında olmuştur. Beton-beton kompozit elemanların Endüstriyel yapılarda kullanımı; pozitif moment bölgesinde olduğu gibi, yerinde dökme beton içerisinde donatı olmak koşulu ile negatif moment bölgesinde de olmaktadır (Elliott, 1996).



Bu tür kompozit döşeme panellerinin üstünlükleri şu şekilde sıralanmaktadır (Associates, 1988) :

- a. Kompozit döşeme panellerinin kullanılması halinde pahalı çelik kalıplara olan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır.
- b. Kompozit döşeme panelleri, üretimin geliştiği ve kalite kontrol metotlarının kullanıldığı, standart özelliklere sahip üretim yapmak amacıyla kurulmuş fabrikalarda üretilmektedir. Normal köprü tabliye üretimine karşı bu teknik ekonomik bir alternatif olabilmektedir.
- c. Kompozit döşeme panelleri, genelde dayanımı yüksek betondan üretilmektedir.

### 2.3. Hafif Beton

Betonun ana bileşenlerinden olan agrega, karışım içerisinde hacim ve ağırlıkça en fazla yeri işgal eder. Bu nedenle hafif beton elde edebilmek için kullanılan agreganın düşük birim ağırlıklı olması istenir (Aydemir, 1980).

TS 2511 “Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları” nda taşıyıcı hafif beton; havada kurumuş haldeki birim ağırlığı  $19 \text{ kN/m}^3$  'den az olan ve C14 dayanım sınıfındaki beton olarak tanımlanmaktadır

#### 2.3.1. Hafif agregalar

Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan en yaygın yol hafif agrega kullanmaktır. Hafif agregalar, boşluklu yapıları nedeni ile düşük birim ağırlığa sahiptirler. Boşluklar arttıkça su emme ile birlikte ısı ve ses yalıtım özellikleri de artar buna karşılık dayanımları azalır (Neville, 1975):

Ponza taşı; birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünümlü, silikat esaslı, birim hacim ağırlığı  $10 \text{ kN/m}^3$ 'den küçük, sertliği Mohs skalasına göre 6 civarında, camsı doku gösteren volkanik bir doğal agregadır (TS 2823, 1977). Ponza taşı agregası yaklaşık %70 boşluk içermektedir.



Ponza taşına bims ya da sünger taşı da denilmektedir. Değişik yerlerde elde edilen bims agregalar, dane biçimi ve yüzey yapısı bakımından oldukça farklıdır. Bu agregaların dane biçimi ve yüzey yapısı karışım içinde ince ve iri agrega miktarlarını, betonun işlenebilirliğini, ince agrega/iri agrega oranını, su ve çimento miktarını etkiler. Ponza taşının 24 saatlik su emme yüzdeleri ince agregada %20, iri agregada %30 civarındadır. Bu değerler agreganın sağlandığı yere, granülometrisine, dane biçimi ve yüzey yapısına göre değişir. Normal depolama şartlarındaki nem yüzdesi genellikle su emme kapasitesinin 2/3 'ünü geçmemektedir. Ponza taşının su emme kapasitesi, su emme hızı ve içinde bulundurduğu nem yüzdesi beton karışım hesaplarında, betonun üretiminde ve denetiminde göz önünde bulundurulmalıdır (TS 3234, 1978).

### **2.3.1.1. Türkiye'nin doğal hafif agrega durumu**

Türkiye, doğal ve hafif agrega kaynakları bakımından oldukça zengindir. Fakat Ülkemizde yapay yolla hafif agrega üretimi henüz etkin olarak yapılamamaktadır. Doğal hafif agregalardan Ülkemizde en yaygın olanları, volkanik esaslı ponza taşı, volkanik tüf ve cüruftur. Bunlardan özellikle ponza taşının Orta ve Doğu Anadolu'da oldukça büyük rezervleri mevcuttur (Erciyes, 1963).

Hafif agregalarla taşıyıcı hafif betonların üretimi olanaklıdır. Orta Anadolu'da özellikle volkanik bir dağ olan Erciyes Dağ'ından dolayı Kayseri ve Develi yöresinde ponza taşı bulunmaktadır. Bunlarla birlikte Niğde, Nevşehir, Van ve Bitlis bölgelerinde yaklaşık 15milyar m<sup>3</sup> ponza taşı rezervi olduğu tahmin edilmektedir (Erciyes Y., 1963). Ülkemizde doğal hafif agreganın bol bulunması, üretiminde ayrıca bir enerjiye gerek duyulmaması bakımından önemli bir üstünlük kabul edilebilir.

### 2.3.1.2. Hafif agregaların sınıflandırılması

Hafif agregalar birim ağırlıkları bakımından kullanılma alanlarına göre üç grupta sınıflandırılırlar (TS 1114):

- a. Birim hacim ağırlığı  $6.50 \text{ kN/m}^3$  'den büyük olan hafif agregalar : Bunlarla taşıyıcı hafif betonlar elde edilebilmektedir.
- b. Birim hacim ağırlığı  $4-6 \text{ kN/m}^3$  arasında olan hafif agregalar : Bunlarla yalıtım betonları ve orta dayanımlı hafif betonlar üretilebilmektedir.
- c. Birim hacim ağırlığı  $4 \text{ kN/m}^3$  'den küçük olan hafif agregalar : Bunlarla sadece ses veya ısıya karşı yalıtım amaçlı betonlar üretilebilir.

### 2.3.1.3. Hafif agregaların betonun davranışı üzerindeki etkileri

Agreganın birim ağırlığı dane çapı ile değişmiyorsa, DIN 1045'deki A-B sürekli granülometreleri veya B-C süreksiz granülometreleri arasındaki granülometri bölgesi en yüksek beton dayanımlarını vermektedir (Çetmeli, 1981). Genellikle dane birim ağırlığı, maksimum dane çapı arttıkça azalmaktadır. Bu nedenle yukarıda belirtilen ideal granülometreler aynı zamanda en düşük birim ağırlığı verirler, fakat en iyi dayanımları vermezler. Agreganın kaba kısmının bir miktarı yerine ince kısım kullanılacak olursa, hem dayanımda hem de birim ağırlıkta artış elde edilir. Agreganın kaba kısmının bir bölümü yerine tabii kum kullanılacak olursa, sözü geçen artışlar daha büyük ve, aynı zamanda malzeme masrafı azalmış olur.

En büyük agregaya boyutunun beton dayanımına etkisi üzerine yapılan araştırmalarda 25mm veya 40mm 'nin üzerinde agregaya kullanılmasının özellikle ayrışmaya neden olması bakımından elverişli olmadığı savunulmaktadır (Neville, 1975).

Ponza taşı kullanarak üretilen hafif betonlarda en büyük agregaya boyutunun küçülmesi ilk 14 günde büzülmeyi artırmakta, daha sonra büzülmede bir değişiklik olmamaktadır. Düzgün yüzeyli agregaların köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip olanlardan daha dayanıklı oldukları belirlenmiştir. Bu çalışmada en uygun biçimli danelerin küreye yakın olanların olduğu ortaya çıkmıştır (Taşdemir, 1981).

ACI 211 'de, hafif agregaya beton üretiminden önce bir ön emdirme uygulamakla taşıma sırasında ufalanmanın azalacağı, agregadaki ayrışmanın önleneceği ve beton kıvamının değişmeden kontrol edilebileceği belirtilmiştir.

Alman normlarında hafif agreganın maksimum dane çapı 25mm ile sınırlandırılmıştır. Yüksek dayanım elde etmek için 16mm dane çapının geçilmemesi tavsiye edilmektedir (Çetmeli, 1981).

### 2.3.2. Hafif betonlar ve sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması, hem birim ağırlık hem de dayanım bakımından yapılmaktadır.

DIN 1045 'de betonlar birim ağırlıklarına göre sınıflandırılmıştır (Çetmeli E., 1981):

Hafif betonlar	: Birim hacim ağırlık $< 20 \text{ kN/m}^3$
Normal betonlar	: $20 \text{ kN/m}^3 \leq \text{Birim hacim ağırlık} < 28 \text{ kN/m}^3$
Ağır betonlar	: Birim hacim ağırlık $\geq 28 \text{ kN/m}^3$

TS 2511 de ise, birim ağırlık esasına göre şu sınıflandırma yapılmıştır (TS 2511, 1977):

a. Hafif betonlar	: Birim hacim ağırlık $< 19 \text{ kN/m}^3$
b. Yarı hafif betonlar	: Birim hacim ağırlık $19 - 21 \text{ kN/m}^3$
c. Normal betonlar	: Birim hacim ağırlık $21 - 24 \text{ kN/m}^3$

### 2.3.3. Hafif agregaya ile üretilen hafif betonlar

Normal betonda agreganın elastisite modülü, harcın elastisite modülünden yüksek olduğundan kırılma öncelikle harç fazında görülür. Yük iletimi agregalar vasıtasıyla olur. Ancak agregaya danelerinin birbirine yaklaştıkları noktalarda çimento hamuru yük iletimine kısmen katkıda bulunur. Normal betonlarda kullanılan çimento, su miktarı ve agregaya cinsi gibi özelliklerin bilinmesi halinde, elde edilecek olan taze veya sertleşmiş betonun bazı özellikleri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir (Dönmez, 1996; Topçu, 1988).

Hafif betonlarda ise, iç yapının normal beton iç yapısına benzememesi, agrega cinsinin değişimi, su/çimento oranındaki değişimler, agrega boşluk oranındaki değişimler normal betondan farklı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin deneylerle tespiti zorunlu olmaktadır (Neville, 1975).

Hafif agregalarda su emme fazla miktarda olduğundan, emme suyunun karışım yapılmadan önce agregaya mutlaka emdirilmesi gerekir. Aksi halde hidrasyon ve işlenebilirlik için gerekli olan yoğurma suyunun büyük bir bölümünü agregalar hemen emerek, beton bünyesinde ağ şeklinde büzülme çatlaklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu olayı betonu ıslak ortamda saklamak suretiyle önlemek de mümkün değildir (Akman, 1987).

Su/çimento oranını belirleyecek olan karışım suyu, emme suyundan ayrı olarak kullanılır ki, bu bakımdan karışım suyu iki kısımda düşünülür.

- a. Gerçek su ihtiyacı : Hidrasyon ve işlenebilirliğin sağlanması için,
- b. Emme suyu : Bu çalışmada emme suyu agregalar üzerinde 30 dakikalık su emme deneyi yapılarak % olarak belirlenmiş ve bulunan değerler esas alınmıştır.

### 2.3.3.1. Hafif agregalı betonun karışım hesabı

Agrega granülometrisi, normal betona benzemekle beraber iri ve ince hafif agrega danelerinin farklı yoğunluklara sahip olması ve dane biçimlerinin köşeli oluşu nedeni ile yüzey yapıları pürüzlü olmaktadır. Bu sebeple, hafif beton karışımları normal betonlara oranla daha fazla ince dane oranına gereksinme gösterir. İyi bir işlenebilirlik için hafif beton karışımlarında toplam agrega hacminin %40-60 'ı oranında ince agregaya gerek duyulur (Neville, 1975). Hafif betonun işlenebilmesi için gerekli su miktarı, genellikle normal beton agregasından daha fazladır. Hafif betonun ağırlığının az olması nedeni ile çökme değerleri, aynı bir kıvam için normal betona göre bir miktar daha az çıkmaktadır. Hafif beton bileşiminin ancak uygun deneysel araştırmalar sonucu uygulama amaçlarına göre tayin edilebileceği belirtilmektedir (Akman ve Taşdemir, 1977).

Hafif betonla yapılmış olan deneysel çalışmalarda C16 betonu su/çimento oranı 0.40 olan 0/8, 8/16 ve 0/16 kaba agrega dane boyutlu serilerde 0.46-0.51 kaba agrega hacim oranı değerlerinde sağlanmaktadır (Topçu, 1988).

### **2.3.4. Taşıyıcı hafif betonun üstünlük ve mahsurları**

Ekonomik olmaları nedeniyle kullanılan hafif ve taşıyıcı hafif betonun üstünlük ve mahsurlarını şöyle sıralayabiliriz:

#### **a. Üstünlük**

- a.1. Birim hacim ağırlığındaki azalma nedeniyle beton kalıbında daha düşük basınç oluşur.
- a.2. Hafif betonla üretilen elemanların birim ağırlıklarının düşük olması nedeniyle yapıdaki ölü yükler azalır. Böylece temelleri ve diğer yapı elemanlarını daha küçük boyutlarda tasarlamak ve inşa etmek mümkün olur.
- a.3. Isı ve ses yalıtkanlığı normal betona nazaran daha yüksektir.
- a.4. Donmaya ve yangına karşı daha dayanıklıdır.
- a.5. Hafif betonun kullanıldığı yapılar için depremlerde, düşey yükün azalmasına bağlı olarak atalet (kütle) kuvvetleride önemli oranlarda azalacaktır.
- a.6. Kolay işlenebilmesi sayesinde en ince kalıp detaylarını bile aksettirebilir, güzel görünümlü yüzeyler ortaya konulabilir.

#### **b. Mahsurları**

- b.1. Hafif betonun mekanik dayanımı, boşluklu olmaları yani porozitenin büyük olması nedeniyle normal betona nazaran düşüktür.
- b.2. Aşınmaya karşı dayanıksızdır.
- b.3. Dış etkilere maruz donatılarda daha kalın bir beton örtü tabakasına ihtiyaç gösterir.
- b.4. Elastisite modülünün düşük olmasından dolayı hafif ve taşıyıcı hafif betonlu kirişlerde, sehimler ve dönmeler daha yüksek olur.
- b.5. Normal betona göre daha düşük bir kesme-kayma dayanıma sahiptirler.

### 2.3.5. Taşıyıcı hafif betonun uygulama alanları

Hafif betonarme ve hafif öngerilmeli beton Avrupa'da son yıllarda bir çok ilginç yapıda ve gittikçe artan bir biçimde uygulanmıştır. Bu uygulamaları en çok bünyesinde bulunduran ülkelerin başında Almanya gelmektedir. Uygulanan yapılar arasında en önemli örnekler olarak; 1966 'da Wiesbaden 'de inşa edilen Djckerhoff köprüsü, 1967 'de Stade 'de yapılmış olan atom santrali işletme binası, 1968 'de Langerich 'de yapılmış olan Herrmanwesck köprüsü, 1969 'da Darmstad 'da yapılmış olan Teknik Üniversite yeni binaları, 1970 'de Frankfurt 'da yapılmış olan 5. Hava alanı terminali ve nihayet 1971 'de Münih 'de yapılmış olan BMW idare binası sayılabilir (Argunhan, 1984; Heufers, 1972/73).

### 2.3.6. Taşıyıcı hafif betonarme dikdörtgen kesitlerin basit eğilme etkisi altında taşıma gücüne göre tasarlanması

Avrupa Uluslararası Beton Komitesi (CEB) 'in öngördüğü üzere betonarme sistemlerin taşıma gücüne göre tasarımında, basınç bölgesindeki gerilme yayılımı parabolik+dikdörtgen varsayılmaktadır (Gündüz, 1980; Berktaş, 1989; TS 500, 1984; Ersoy, 1987).

Betonarme sistemlerin taşıma gücünün ACI esaslarına göre hesaplanmasında ise, basınç bölgesindeki gerilme yayılımı için kullanılan katsayılar  $30 \text{ N/mm}^2$  basınç dayanımlı betonlara kadar sabit alınmakta, bu dayanım değerinden sonra katsayılar küçültülmektedir (Gündüz, 1980; Berktaş, 1989).

Eğilme etkisi altındaki betonarme sistemlerin taşıma gücüne göre tasarımındaki temel felsefe; betonarme taşıyıcı elemanın kırılmasına betonun dayanımını kaybetmesinden ziyade donatının akmasının sebep olması ve sünek bir kırılma türü elde edilmesidir. Taşıyıcı hafif betonarme kirişlerde de taşıma gücüne göre tasarım, normal betonarme kirişlerdekine benzer bir şekilde yapılır. Burada, yalnızca malzeme karakteristikleri yönünden bazı değişiklikler vardır. Bunlardan en önemlisi; kesitin en uç lifindeki maksimum kısalmanın hafif betonda 0.002 alınmasıdır (Güral, 1983).

Betonarme kesitlerin taşıma gücüne göre tasarımı, denge ve uygunluk denklemleriyle kuvvet-birim deformasyon ilişkilerinden yararlanmak suretiyle yapılır. Bu denge, uygunluk ve kuvvet-birim deformasyon ilişkilerini belirleyen bağıntıların yazılabilmesini sağlamak için bazı temel varsayımların yapılması gerekmektedir (Gündüz, 1980; Çetmeli, 1981; TS3234, 1978; TS 500, 1984). Bu temel varsayımlar şunlardır;

- a. Bernouilli - Navier hipotezi betonarme kesitler için de geçerlidir. Yani, şekil değiştirmeden önce düzlem olan kesitler şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalır.
- b. Aderans tamdır, yani donatı çubuğunun birim boy değişimi, komşu beton lifin birim boy değişimi ile özdeştir.
- c. Donatı çeliğinin gerilme-birim boy değişimi ilişkisi elasto-plastik varsayılır. Yani donatı çeliğindeki gerilme aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmalıdır:

$$\sigma_s = \varepsilon_s \times E_s \leq f_{yd} \quad (2.1)$$

- d. Basit ve birleşik eğilme hesaplarında betonun çekme dayanımı ihmal edilebilir.
- e. Betonarme kesit taşıma gücüne ulaştığında, gerilmeler birim şekil değiştirme ile orantılı değildir. Beton basınç bölgesindeki gerilme dağılımı için, geçerliliği deneysel verilerle kanıtlanmış herhangi bir dağılım kullanılabilir. Hesaplarda kolaylık sağlamak amacı ile bu dağılım, dikdörtgen varsayılabilir.
- f. Donatı çeliğindeki uzama %10 ile sınırlanmıştır.

#### 2.4. Betonarme Elemanlarda Sehımlerin ve Çatlakların Hesabı

Betonarme yapı elemanlarında göçmeye karşı sağlanan güvenliğin yanı sıra, öngörülen işletme yükleri altında elemanların ve yapının tümünün aşırı şekil değiştirme veya çatlama göstermeyecek bir biçimde boyutlandırılıp donatılması gerekir (TS 500, 1984).

Yapıda işletilebilme yönünden güvenlik, işletme yükleri altında oluşabilecek sehımlerin ve çatlakların, izin verilebilen maksimum değerlerden küçük olduğu gösterilerek sağlanabilir. İşletme yükleri etkisinde kalan yapılardaki sehımler, elemanların belirli bir rijitlikte olması sağlanarak denetlenebilir ve sınırlandırılabilir.



Sehimlerin denetlenmesinde uygulamada iki yol izlenir: Birincisi, boyutlandırma olup, yönetmeliklerde verilen ve sehim hesabı yapılmasını gerektirmeyen minimum boyutlar temel alınarak yapılabilir. İkinci olarak, bu minimum boyutların altına inilmesi durumunda ise, sehim hesabı yapılır ve belirlenen sehimin yönetmeliklerdeki sınır değerleri geçip geçmediği araştırılır (Gündüz, 1980; TS500, 1984).

Sehim hesabında kullanılan yöntemde, eğilme momentinin eleman boyunca değişken olması nedeni ile sünme ve büzülme etkilerinin göz önüne alınmış olması gerekir. Ani sehim hesabının yalnızca sabit ve hareketli yükler toplamına göre yapılması yeterlidir. Zamana bağlı sehimin hesaplanmasında ise, büzülme ve sünme etkisi hesaba katılmalıdır. Bir kirişte maksimum sehim, kirişin doğrusal elastik davrandığı varsayılarak,

$$\Delta_{\max.} = k \times L^2 \left( \frac{M}{E \times I} \right) \quad (2.2)$$

genel bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıdaki büyüklükler :

- M : Eğilme momenti,
- L : Kiriş açıklığı,
- E : Kiriş malzemesinin elastisite modülü,
- I : Kesit atalet momenti,
- k : Sınır koşullarına ve yükün açıklık boyunca dağılımına bağlı katsayıdır.

Bağıntı, betonarme kirişlerdeki sehimlerin hesaplanmasında da kullanılabilir. Elemana etkiyen maksimum eğilme momenti ( $M_{\max}$ ), elemanın çatlama momentinden ( $M_{cr}$ ) küçükse, sehim, çatlamamış beton kesit atalet momenti ( $I_c$ ) temel alınarak hesaplanır.  $I_c$ 'nin belirlenmesinde donatı hesaba katılmaz.

$$M_{cr} = 1.3 \times f_{ctk} \times \frac{I_c}{y} \quad (2.3)$$



Maksimum eğilme momenti çatlama momentinden büyük ise, sehim hesabı, kesitin etkili atalet momenti “ $I_{ef}$ ” temel alınarak yapılır. Etkili atalet momenti, çatlamayı içeren şu bağıntıyla bulunabilir (TS500, 1984):

$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3 \times I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3\right] \times I_{cr} \quad (2.4)$$

Burada  $I_{cr}$  çatlamış kesitin atalet momentini gösterir. Betonarme kesit, eşdeğer beton kesite dönüştürülerek belirlenir. Etkin atalet momenti, çatlamamış beton kesit atalet momentinden büyük alınmamalıdır.

Betonarme elemanlarda; dayanım bakımından sakıncalı olmasa bile, yapının estetiğini bozacak, konuya yabancı kişilerde kuşku yaratacak ve donatının korozyonuna yol açabilecek ölçüde çatlaklar oluşmamalıdır. Hesaplanan çatlak genişlikleri daima “izin verilen karakteristik değer” in altında kalmalıdır. Çatlak hesaplarında yük ve malzeme katsayıları “bir” alınmalıdır. Elemanın bulunduğu ortama bağlı olarak izin verilen karakteristik çatlak genişlikleri Çizelge 2.1 'de verilmiştir (Gündüz, 1980).

Çizelge 2.1. Betonarme elemanlarda izin verilen karakteristik çatlak genişlikleri

Normal atmosferik koşullarda, iç yapı elemanlarında	0.4 mm
Nemli veya agresif atmosferlerde yapı içindeki elemanlarda ve normal atmosferik koşullarda dışarıdaki yapı elemanlarında	0.2 mm
Özellikle agresif bir ortamdaki içeride ve dışarıdaki yapı elemanlarında ve geçirimsizlik istenen yerlerde	0.1 mm

Nervürlü çeliklerin kullanılması durumunda, çatlak genişlikleri ve aralıkları düz yüzeyli çeliklere oranla küçük olmaktadır. Belirli bir değere kadar çatlak genişlikleri, çatlak aralıklarının fonksiyonudur. Aynı zamanda çatlak genişliği, donatıdaki uzamanın ve dolayısıyla gerilmesinde fonksiyonudur.

İşletme yükleri etkisindeki eğilme elemanlarında, donatı ağırlık merkezindeki çatlak ortalama genişliği ( $W_m$ ) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir (Gündüz, 1980; TS 500, 1984). Düz yüzeyli çubuklar için,

$$W_m = 1.2 \times \left( 2 \times c_{\text{örtü}} + \frac{k_s \times \phi}{\rho_r} \right) \left( \frac{\sigma_s}{E_s} \right)^2 \quad (2.5)$$

$c_{\text{örtü}}$  : Dış yüzeye en yakın çekme çubuğu için örtü beton kalınlığı,

$\phi$  : Donatı çapı,

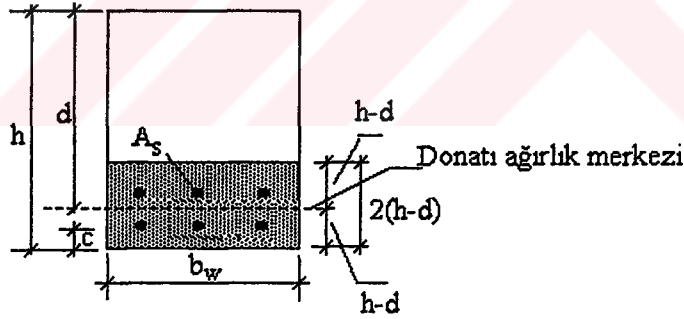
$\sigma_s$  : Donatıda normal gerilme,

$E_s$  : Çelik elastisite modülü,

$k_s$  : Kesitteki birim deformasyon dağılımı ile donatının yüzey biçimine bağlı katsayı,

$\rho_r$  : Çatlak genişliği için donatı yüzdesi olup (2.6) da verilmiştir.

$$\rho_r = \left[ \frac{A_s}{b_w \times 2 \times (h - d)} \right] \quad (2.6)$$



Şekil 2.6 : Kiriş kesitlerde çatlama genişliklerinin hesabı için dikkate alınan alan

Karakteristik çatlak genişliği  $W_k$  ise, (2.5) de hesaplanmış olan  $W_m$  ortalama genişlik, 1.7 ile çarpılarak belirlenir.

$$W_k = 1.7 * W_m \quad (2.7)$$

Böylece belirlenen " $W_k$ " genişliğinin izin verilen karakteristik çatlak genişliğinden büyük olmaması gerekir.

## **2.5. Kirişlerin Göçme Modu Tanımı ve Kompozit Betonarme Hafif Kirişlere Uyarlanması**

Göçme modu, eğilme etkisi altında bulunan elemanın dayanımı kaybettiği, yani taşıma gücüne ulaştığı anda oluşan göçmenin tipi veya sınıfıdır. Taşıyıcı hafif betonarme elemanlar taşıma güçlerini, donatının akmasını basınç bölgesindeki betonun ezilmesi takip edecek şekilde tasarlanmalıdır.

Bu prensiple boyutlandırılan taşıyıcı hafif betonarme elemanda; aşırı sehimler ve dönmeler, esas donatının kopmasından önce meydana gelecektir. Bunun ardından da az bir miktar yük artışı ile taşıma güçlerini kaybedecekler ve göçme oluşacaktır. Bu şekilde tasarlanan taşıyıcı hafif betonarme kompozit kirişlerde kırılma çekme kırılması olacaktır. Kompozit betonarme elemanların davranışlarını genel olarak inceleyebilmek amacıyla, denge ve basınç kırılması ile taşıma gücünü kaybedecek şekilde boyutlandırma yapıp deneyler yineleneyecektir.

### 3. EĞİLME TEORİSİNİN KOMPOZİT KİRİŞLERE UYGULANMASI

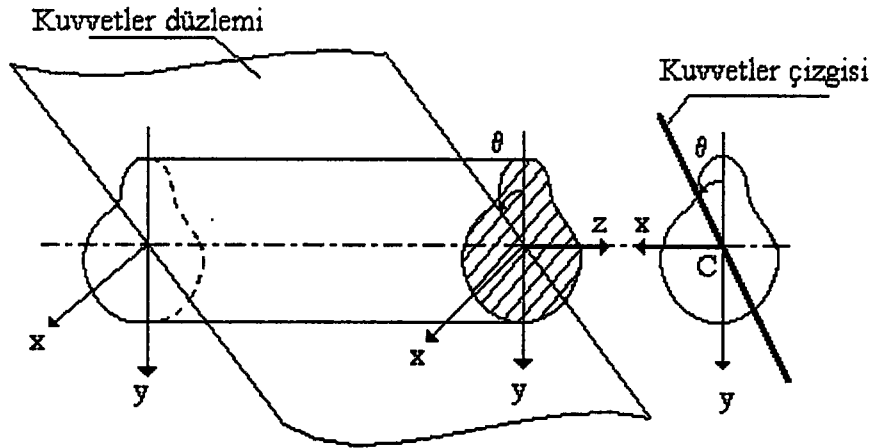
Bu bölümde, betonarme yapı elemanlarına gelen basit eğilme kuvvetinin klasik hesap yöntemleri özetlenecektir.

#### 3.1. Eğilme Hali

Bir prizmatik çubukta sıfırdan farklı tek kesit zorunun eğilme momenti olması haline “Eğilme Momenti Hali” veya “Basit Eğilme” adı verilir. Bu halde çubuğa etkiyen dış kuvvetlerin tümü çubuk ekseninden geçen bir düzlemin içinde bulunurlar ve bu kuvvetler çubuğun her kesitinde yalnız eğilme momenti doğururlar. Çubuk ekseninden geçen düzlem içerisinde bulunan kuvvetlerin tümü çubuk eksenine dik iseler bu kuvvetler çubukta genellikle kesme kuvveti ve eğilme momentini beraber meydana getirirler. Eğer ilaveten kesme kuvveti de sıfır ise çubuk bu durumda basit eğilmeye maruz kalır (Kayan, 1987).

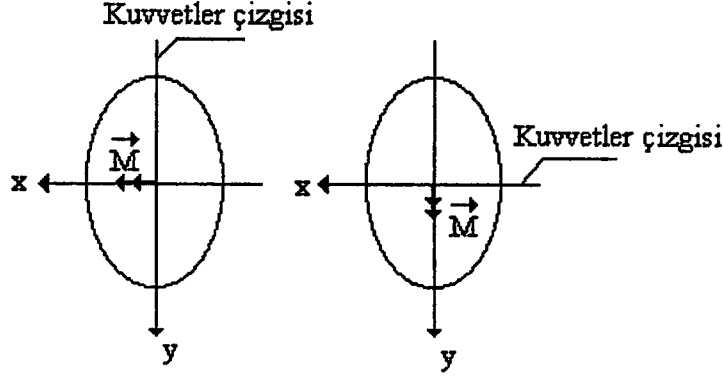
Basit eğilme halinde gerilme dağılımının belirlenmesi için yapılacak olan kabul ve tanımlamalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Basit eğilmede momenti doğuran kuvvet çiftinin içinde bulunduğu düzleme “Kuvvetler Düzlemi” adı verilir. Bu düzlem çubuk ekseninden geçer. Bu düzlemin çubuk en kesiti ile olan ara kesitine kuvvetler çizgisi adı verilir. Eğilme momentini tanımlayan moment vektörü bu çizgiye diktir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kuvvetler düzlemi ve kuvvetler çizgisi

Kuvvetler çizgisinin kesit asal eksenleri ile çakışmaması basit eğilmenin genel hali olup eğik eğilme adını alır.



Şekil 3.2. Kuvvetler çizgisinin asal eksenlerle çakışması: Basit düz eğilme

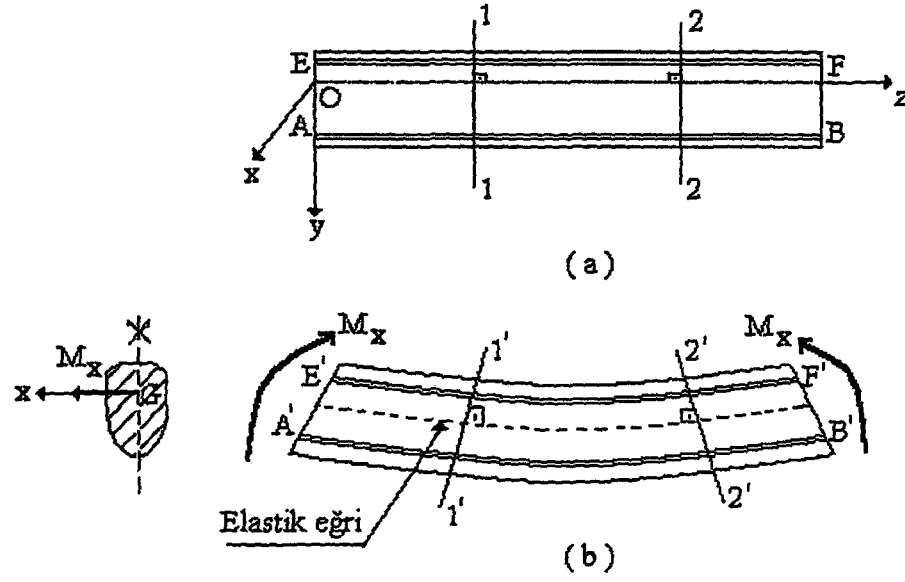
Kuvvetler çizgisi asal eksenlerden herhangi birisi ile çakışıyor ise (Şekil 3.1'deki  $\theta=0$  durumu) bu özel hale düz eğilme adı verilir. Kuvvetler çizgisi ile moment vektörlerinin durumları Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.

### 3.1.1. Basit eğilmede yapılan varsayımlar

Basit eğilmede gerilme ve şekil değiştirme hesabı için kabul edilen iki temel varsayım vardır:

- Eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalırlar. Böylece kesitlerin eğilme şekil değiştirmesi süresince yaptıkları hareket, şekil düzlemine dik bir eksen etrafındaki katı cisim dönme hareketidir (Bernoulli-Navier Hipotezi).
- Malzeme doğrusal elástiktir (Hooke cismi).

Şekil 3.3.a da 1-1 ve 2-2 ile gösterilen iki dik kesitin ilk durumu ve Şekil 3.3.b de ise aynı kesitlerin eğildikten sonraki durumları çizilmiştir.



Şekil 3.3. Basit Eğilmeye maruz bir eleman: (a) eğilme öncesi, (b) eğilme sonrası

Eğilme elemanının birim uzama değeri elde edilerek (3.1) 'deki gerilme bağıntısında yerine konulmuştur. Bu durumda elde edilen normal gerilme ise, Hooke bağıntısı yardımı ile,

$$\sigma_z = E \varepsilon_z = E \frac{1}{\rho_x} y \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. Bağıntı (3.1) de verilmiş olan  $(1/\rho_x)$  eğrilik olup, değeri (3.2) de tanımlanmıştır :

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{M_x}{EJ_x} \quad (3.2)$$

Bu ise şekil değiştirme formülüdür. Bu formülün önemli bir sonucu, eğriliğin eğilme momentiyle orantılı olduğunu ifade etmesidir. (3.1) denkleminde verilmiş olan  $EJ_x$  değerine çubuğun eğilme rijitliği denilir.

Basit eğilme halinde  $M_x$  değeri sabit ise  $\rho_x$  değeri de sabit olur. Hesaplanan gerilme yayılışı ile ilgili ifade (3.3) de verilmiştir:

$$\sigma_z = \frac{M_x}{J_x} y \quad (3.3)$$

Burada:  $M_x$  : Kesite etkiyen x-x eksenine eğilme momenti,  
 $J_x$  : x-x eksenine kesit atalet momenti,  
 $y$  : Kesitte bir noktanın tarafsız eksene olan uzaklığı  
 $\sigma_z$  : z-z eksenine dik düzlemde normal gerilme değeridir.

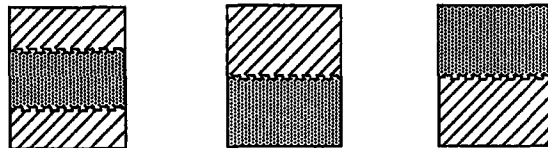
### 3.2. Kompozit Kirişlerde Basit Eğilme Hali ve Yapılan Varsayımlar

Kompozit kirişler, normal beton kesitli kirişlerden farklı mekanik özelliklere haiz kısımları bulunması nedeni ile farklı bir yapıdadır. Yukarıdaki bölümde normal bir kiriş için verilmiş olan gerilme bağıntıları bu bölümde kompozit bir kesit için hesaplanacaktır.

Kompozit kesit olması halinde de Hook Kanunu ve Bernouilli Navier Hipotezi geçerlidir. Ancak, E elastiklik modülleri, kompozit kesiti oluşturan normal beton ile hafif beton için farklıdır. “nb” normal betonu, “hb” hafif betonu gösteren indisler olmak üzere, beton gerilmeleri,

$$\begin{aligned} \sigma_{nb} &= \epsilon_{nb} E_n \\ \sigma_{hb} &= \epsilon_{hb} E_h \end{aligned} \quad (3.4)$$

olacaktır. Kompozit beton kesite eğilme teorisinin uygulanabilmesi için normal-hafif beton tabakalarının temas yüzeylerinde tam bir kenetlenmenin sağlanması gerektiği açıktır (Şekil3.4). Bunun için alt tabaka yüzeyi en az 6 mm pürüzlendirildikten sonra üst tabaka betonu dökülmüştür (TS 3233).

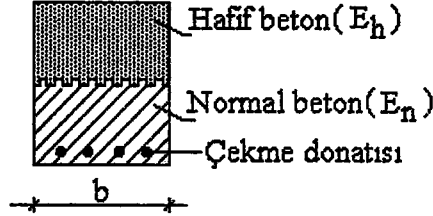


Şekil 3.4. Farklı beton tabakalarının kenetlenmesi

Bu bilgilerin ışığında aşağıdaki bölümlerde Şekil 2.3 de verilen kompozit kesit için gerilme bağıntıları verilmiştir.

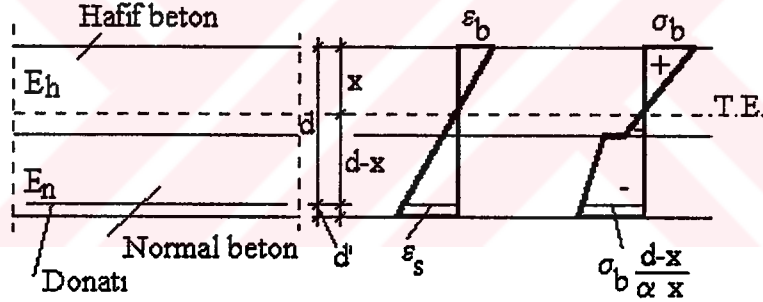
### 3.2.1. Basınç bölgesi hafif beton olan iki tabakalı kompozit kesit hâli

Şekil 3.5 'deki basınç bölgesi hafif beton kompozit kesit, yerinde döküm kısımlarla tamamlanan prekast betonarme döşeme elemanlarından esinlenerek tasarlanmıştır.



Şekil 3.5. Basınç bölgesi hafif ve çekme bölgesi normal beton olan kompozit kiriş kesiti

Bernouilli-Navier Hipotezine ve Hooke Kanununa uyan kompozit kesitli elemanın normal deformasyon ve gerilme dağılımı ise Şekil 3.6 'daki gibi olacaktır.



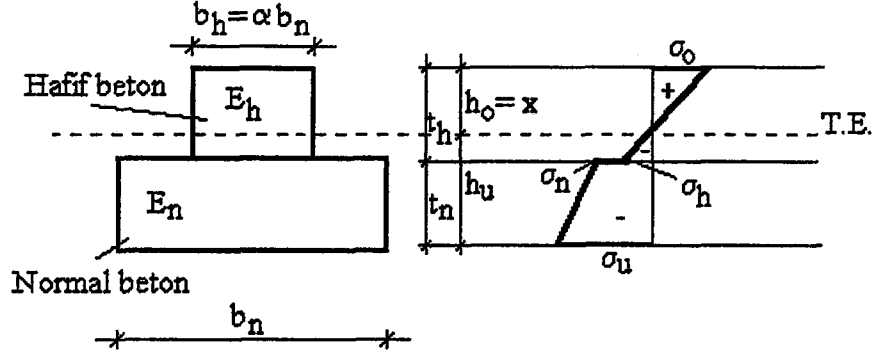
Şekil 3.6. Basınç bölgesi hafif ve çekme bölgesi normal beton olan kompozit kiriş kesitinde birim boy değişimi ve gerilme yayılımı

Kompozit kesitler için gerilme hesapları, dönüştürülmüş kesit üzerinde yapılır. Hafif ve normal beton elastisite modülleri oranı,

$$\alpha = \frac{E_h}{E_n} \quad (3.5)$$

ile, normal beton kesitine dönüştürülmüş kompozit kesitin temsili kesiti Şekil 3.7 'de çizilmiştir.





Şekil 3.7. Normal betona dönüştürülmüş eşdeğer kompozit kesit

Şekillerde verilen simgeler aşağıdaki anlamda kullanılmıştır:

- $b_n$  : Normal beton plak numune genişliği,
- $b_h$  : Hafif beton plak numune genişliği,
- $t_n$  : Normal beton kalınlığı,
- $t_h$  : Hafif beton kalınlığı,
- $h_o$  : Kompozit kesitte tarafsız eksenin basınç yüzüne uzaklığı,
- $h_u$  : Kompozit kesitte tarafsız eksenin çekme yüzüne uzaklığı,
- $\sigma_o$  : Kompozit kesitte üst lif beton gerilmesi,
- $\sigma_n$  : Birleşim yüzeyi seviyesinde normal beton gerilmesi,
- $\sigma_h$  : Birleşim yüzeyi seviyesinde hafif beton gerilmesi,
- $\sigma_u$  : Kompozit kesitte alt lif beton gerilmesi,
- $E_h$  : Hafif beton elastisite modülü,
- $E_n$  : Normal beton elastisite modülü

Gerilme hesaplarında kesitin çatlama öncesi ve sonrası safhalarının dikkate alınması gerekir.

#### (a) Çatlama öncesi

Tarafsız eksenin yerindeki değişmelerde, gerek kesit geometrisi gerekse çekme donatısı miktarına göre üç durum söz konusu olabilir:

- Tarafsız eksenin (TE) hafif beton tabakasında kalması ( $h_o \leq x < t_h$ ) hâli,
- TE nin tam arakesitte olması hâli, ( $h_o = x = t_h$ )
- TE nin normal beton tabakası için kalması ( $h_o = x > t_h$ ) hâli.

Bu üç haldeki gerilme değerleri ise sırasıyla şu şekilde hesaplanabilir.

**(a.1)  $h_o = x < t_h$  hali (Şekil 3.7)**

Çatlamamış kesitte donatının katkısı ihmal edilirse, TE mesafeleri ve kesit atalet momenti, normal betona dönüştürülmüş kesit ile,

$$h_o = \frac{t_h b_h \frac{t_h}{2} + t_n b_n (t_h + \frac{t_n}{2})}{b_h t_h + b_n t_n}$$

$$h_u = t_n + t_h - h_o$$

$$I_t = b_h \frac{h_o^3}{3} + \frac{b_h (t_h - h_o)^3}{3} + b_n \frac{t_n^3}{12} + b_n t_n (t_h - h_o + \frac{t_n}{2})^2 \quad (3.6)$$

bulunur. Gerilmeler ise,

$$\sigma_o = \frac{M}{I_t} h_o \alpha$$

$$\sigma_h = -\frac{M}{I_t} (t_h - h_o) \alpha$$

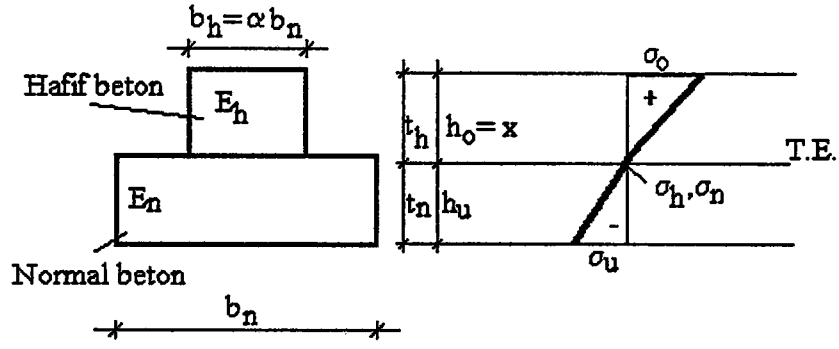
$$\sigma_n = -\frac{M}{I_t} (t_h - h_o)$$

$$\sigma_u = -\frac{M}{I_t} h_u \quad (3.7)$$

olur. Sonuç olarak, gerilmelerin, kesite etkiyen eğilme momentinin ve kompozit kesit özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir:  $[\sigma(y) = f(M, b_n, \alpha, t_n, t_h)]$ .

**(a.2)  $h_o = t_h$  hali (Şekil 3.8)**

$h_o = x = t_h$ ,  $h_u = t_n$  ile dönüştürülmüş kesit Şekil 3.8 de verilmiştir.



Şekil 3.8. Tarafsız eksenin hafif-normal beton arakesitinde bulunması hâli

Atalet momenti,

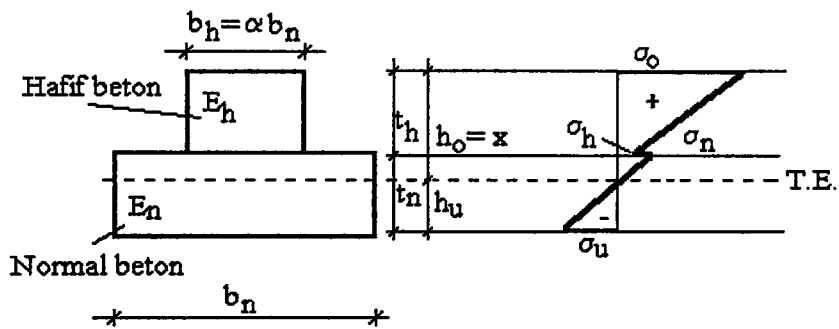
$$I_t = b_h \frac{t_h^3}{3} + \frac{b_n t_n^3}{3} \quad (3.8)$$

Gerilmeler ise,

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \frac{M}{I_t} h_o \alpha \\ \sigma_n &= 0 \\ \sigma_h &= 0 \\ \sigma_u &= -\frac{M}{I_t} h_u \end{aligned} \quad (3.9)$$

bulunur.

(a.3)  $h_o = x > t_h$  hâli (Şekil 3.9)



Şekil 3.9. Tarafsız eksenin normal beton içerisinde bulunması hâli

$h_o = x > t_h$  ve  $h_u = t_h + t_n - h_o$  ile, normal betona dönüştürülmüş kesit atalet momenti,

$$I_t = b_h \frac{t_h^3}{12} + b_h t_h \left( \frac{t_h}{2} + t_n - h_u \right)^2 + b_n \frac{(t_n - h_u)^3}{3} + b_n \frac{h_u^3}{3} \quad (3.10)$$

Gerilmeler ise,

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \frac{M}{I_t} h_o \alpha \\ \sigma_h &= \frac{M}{I_t} (h_o - t_h) \alpha \\ \sigma_n &= \frac{M}{I_t} (h_o - t_h) \\ \sigma_u &= -\frac{M}{I_t} h_u \end{aligned} \quad (3.11)$$

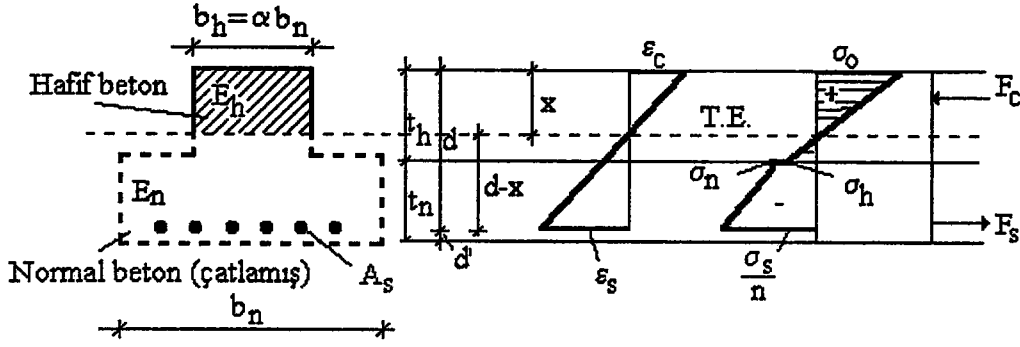
bulunur.

### (b) Çatlamış kompozit kesitte gerilmeler

Çatlamış kompozit kesit gerilme hesabında iki durumu birbirinden ayırmak gerekir. Bunlar, gerilme yayılışında orantılılık sınırı olarak  $(0.4f_{ck})$  'yı kabul etmek kaydıyla çatlamış kesit gerilmelerinin  $(0.4f_{ck})$  'nın altında ve  $(0.4f_{ck})$  'nın üzerinde olması halleridir. Burada,  $f_{ck}$ , her bir beton için kendi karakteristik dayanımıdır.

#### (b.1) Gerilmelerin $(0.4 f_{ck})$ 'nin altında olması hali

Kompozit kirişlerde, artan basınç gerilmeleri  $(0.4f_{ck})$  ve  $(0.4f_{ckh})$  'den küçük kaldığı sürece lineer elastik hesap kuralları geçerli varsayılabilir. Kompozit kesitte kullanılan donatı miktarına bağlı olarak, tarafsız eksen yeri için iki durum söz konusu olacaktır. Bu durumlar, tarafsız eksenin hafif beton ve normal beton içerisinde kalması halleridir.

(b.1.1) Tarafsız eksenin hafif beton içerisinde kalması ( $h_o=x \leq t_h$ ) hali (Şekil 3.10)

Şekil 3.10. Çatlamış kesitte tarafsız eksenin hafif beton içerisinde bulunması hali

Basit eğilme halinde, çatlamış kompozit betonarme kesitte tarafsız eksenin derinliğini,  $n=E_s/E_n$  modüller oranı olmak üzere,

$$b_h \frac{x^2}{2} = A_s n (d - x)$$

$$b_h x^2 + 2A_s n x - 2A_s n d = 0 \quad (3.12)$$

denklemini ile hesaplamak mümkündür. Kuadratik köklerden  $x < t_h$  olan geçerlidir. Bu durumda kesit atalet momenti ise, normal betona dönüştürülmüş çatlamış kesit için,

$$I_{cr} = b_h \frac{x^3}{3} + A_s n (d - x)^2 \quad (3.13)$$

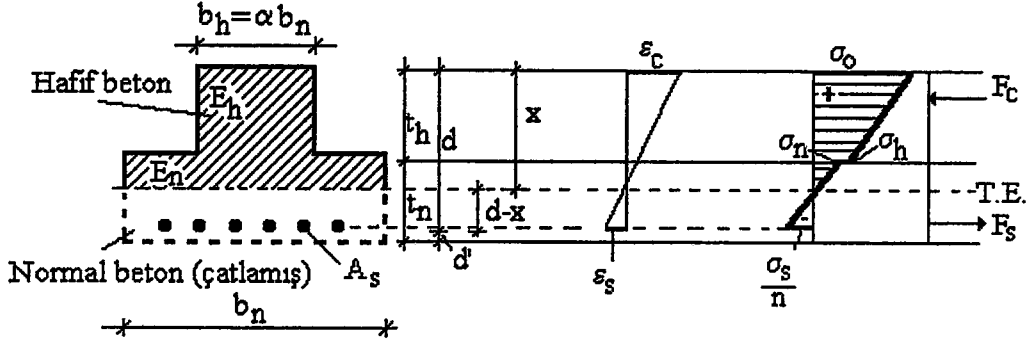
Gerilmeler,

$$\sigma_o = \frac{M}{I_{cr}} x \alpha$$

$$\sigma_s = -n \frac{M}{I_{cr}} (d - x) \quad (\text{çekme}) \quad (3.14)$$

olacaktır.

(b.1.2) Tarafsız eksenin normal beton içinde bulunması ( $h_o=x > t_h$ ) hali (Şekil 3.11)



Şekil 3.11. Çatlamış kesitte tarafsız eksenin normal beton içerisinde bulunması hali

Bu durumda, TE 'nin yerini veren denklem,

$$b_h t_h \left(x - \frac{t_h}{2}\right) + \frac{b_n (x - t_h)^2}{2} = n A_s (d - x) \quad (3.15)$$

Bu defa kuadratik köklerden ( $d > x > t_h$ ) olanı geçerli olacaktır. Bu durumda çatlamış kesit atalet momenti, normal betona dönüştürülmüş kesit için,

$$I_{cr} = b_h \frac{t_h^3}{12} + b_h t_h \left(x - \frac{t_h}{2}\right)^2 + b_n \frac{(x - t_h)^3}{3} + A_s n_s (d - x)^2 \quad (3.16)$$

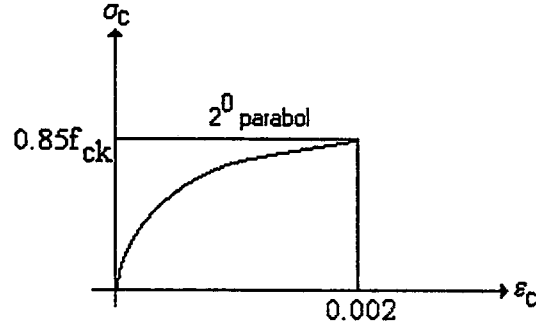
ve gerilmeler ise,

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \frac{M}{I_{cr}} x \alpha \\ \sigma_s &= -n \frac{M}{I_{cr}} (d - x) \end{aligned} \quad (3.17)$$

olarak hesaplanabilir.

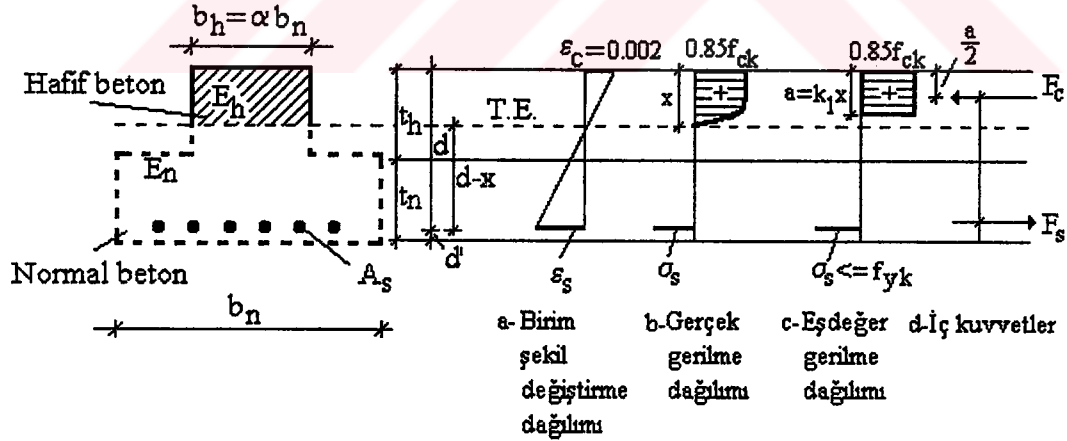
(b.2) Basınç gerilmelerinin  $0.4 f_{ck}$ 'nin üzerinde olması hali (Şekil 3.12 ve Şekil 3.13)

Bu durumda  $x > t_h$  hallerini incelemenin pratik bir sonucu olamayacağı düşünülmektedir; bu nedenle, yalnız  $x \leq t_h$  hali incelenmekle yetinilmiştir.



Şekil 3.12. Hafif beton için kabul edilen gerilme-şekil değiştirme modeli (basınç)

Şekil 3.12 'de,  $\sigma_c > 0.4 f_{ck}$  halinde kullanılmak üzere kabul edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı çizilmiştir; eğri ikinci derece parabol kabul edilmiştir. Bununla beraber, eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu için,  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  'ün, normal beton için verilen değerlerden çok olmadığı bilinir.



Şekil 3.13. Basit eğilme altındaki kompozit kesitte gerilme ve iç kuvvetler

İç kuvvetler,

$$\begin{aligned}
 F_s &= A_s \sigma_s = A_s f_y \\
 F_c &= 0.85 f_{ck} k_1 x b_n
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

şeklinde yazılarak,  $F_c = F_s$  iç kuvvet dengesinden tarafsız eksen derinliği,  $x$ , hesaplanabilir. Bilinen  $x$  için kesitin eğilme momenti taşıma gücü,

$$\begin{aligned}
 M_u &= F_s z = F_c z \\
 M_u &= A_s f_y (d - a/2) = 0.85 f_{ck} k_1 x b_n (d - a/2)
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

olur.





## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Deneysel Araçları

Beton silindir basınç dayanımı deneyleri için 3000 kN kapasiteli hidrolik beton presi kullanılmıştır. Deneyleri yapılan beton numuneler düşey eksenli 250 dm<sup>3</sup> 'lük betoniye ile karılmıştır. Üretilmiş olan hafif ve normal betonlar 15x30 cm 'lik silindir kalıplara dökülmüştür. Numuneler, uygun kür şartlarında bekletilerek 7 ve 28 günlük basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

Kompozit elemanların eğilme deneylerinde 300 kN kapasiteli yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Numunelerde oluşan deplasmanların ölçülebilmesi için 0.01 mm hassasiyetli mekanik komparatörler kullanılmıştır. Okumalar numunelerin orta noktaları ile mesnet bölgelerinde yapılmıştır.

### 4.2. Malzeme

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde TS500(1984) 'de tanımlanan ve konut inşaatlarında kullanılan C16 betonu kalitesinde hafif ve normal beton üretilmeye çalışılmıştır. Üretilen hafif ve normal beton ile betonarme kompozit yapı elemanları imal edilmiştir. Bu amaçla yöresel hafif agrega ile C16 kalitesinde dayanıma sahip hafif betonun elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan malzeme ve özellikleri aşağıdaki paragraflarda açıklanmıştır.

#### 4.2.1. Agrega özellikleri

Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan agrega malzemeleri için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kum, kırmataş ve ponza taşı agregaları için yapılan özgül ağırlık deneyleri sonuçları paragraf 5.1 'de verilmiştir.

#### 4.2.2. Beton karma suyu ve çimento özellikleri

Üretilen beton numunelerde karma suyu olarak Kayseri bölgesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Yapılan bütün deneylerde çimento olarak PÇ32.5 kullanılmış olup Kayseri 'de özel bir çimento fabrikasının 1998 üretimidir. Kullanılan çimentolar üzerinde TS 24'e uygun çimento deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından TS19 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.2.3. Donatının özellikleri

Taşıyıcı hafif kompozit betonarme plaklarda donatı olarak TS708 standardına uygun S420 nervürlü betonarme çeliği kullanılmıştır. Aderans bakımından hafif betonda nervürlü donatı kullanılması tavsiye edilmektedir (Açikel H., 1995). Beton çeliğinin mekanik özellikleri Çizelge 4.1 'de verilmiştir (TS 500,1984).

Çizelge 4.1. Kullanılan betonarme çeliğinin mekanik özellikleri

Donatı Sınıfı	Akma Mukavemeti $f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Hesap Mukavemeti $f_{yd}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Mukavemeti $f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Uzaması $\epsilon_{su}$
S420	420	365	500	0.10

#### 4.3. Yöntemler

Kompozit plak üretiminde ve üretim sonrası beton bakımında sırasıyla şu yöntemler uygulanmıştır.

##### 4.3.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Değişik çaplardaki hafif agregalarda özgül ağırlık deneyleri yapılarak agregalara ait elde edilen deney sonuçları Paragraf 5.1 'de verilmiştir.

### 4.3.2. Beton numunelerin hazırlanmasında uygulanan yöntemler

Karışım oranlarına ait hesaplar C16 kalitesinde normal ve hafif beton elde edebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla 350, 400 ve 450 çimento dozajına sahip hafif ve normal beton numuneler üretilmiştir.

#### 4.3.2.1. Agregaların oranları

Kompozit elemanlar, hafif ve normal ağırlıklı betonun aynı kalite sınıfında olacak şekilde üretilerek aynı kalıba dökülmesi neticesinde elde edilmiştir. İstenilen C16 sınıfına sahip hafif ve normal beton farklı granülometri değerleri dikkate alınarak üretilmiştir. Hafif agregalara ait elde edilen granülometri değerleri ve eğrisi paragraf 5.1’de verilmiştir.

#### 4.3.2.2. Çimento dozajı ve su miktarı

Betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliğini etkileyen en önemli birleşim parametresi çimento/su oranıdır. Su miktarını ise betonun işlenebilirlik özelliği etkilemektedir. Bu bilgiler ışığında üretilmiş olan betonda gerekli su miktarı, hafif ve normal beton için şu şekilde olmuştur:

Agrega taneleri su içeriği bakımından üç konumda olabilirler; tam kuru, yüzeyi kuru içi suya doygun ve yüzeyi ıslak. Bunlar içinde en ideali orta konum olan yüzey kuru suya doygun konumudur. Bu durumda agrega çimento hamurunu emmez, ıslatma suyu ise sadece yüzeyde ince su tabakası oluşturmaya yeterlidir. Beton suyu miktarı tayininde amaç; agrega daneleri üzerinde yeterli kalınlıkta bir su tabakası olmasını sağlamaktır. Bu amaçla çeşitli teorik formüller geliştirilmiştir (Akman, 1990).

Yapılan deneysel çalışmalarda beton ıslatma suyu hesaplamasında “İncelik Modülü” formülünden yararlanılmıştır. Bu değer, karışıma ait her elekten geçen %’de malzeme miktarı toplamının 100’e oranıdır. Buradan betonda kullanılan agrega yığınının ıslatmak için gerekli olan su miktarı  $E_{su}$ ,

$$E_{su} = \alpha_{su} (10 - k_{ag}) \quad (4.1)$$

şeklinde verilmiştir. Bağıntıda  $\alpha_{su}$  katsayısı/ Çizelge 4.2 de verilmiş olan değerlerden seçilmiştir. Hesaplarda çimento/su oranı 0.40 mertebesinde olacak şekilde çimento dozajına göre su miktarı tayin edilmiştir.

Çizelge 4.2. Beton karma suyu tayininde kullanılan  $\alpha_{su}$  katsayısı değerleri

Beton Kıvamı	Dere Kumu ve Çakıl	Dere Kumu ve Mıcır	Deniz Kumu ve Mıcır
Kuru	28-30	33	37
Plastik	31-33	37	40
Akıcı	36-40	43	47

Hesap edilmiş olan beton karma suyu miktarı normal betonda betonun toplam su gereksinimini verir. Hafif betonda agregalar daha fazla su emdiği için farklı olmaktadır. Bu nedenle hafif betonda istenen kıvamı sağlayacak net su miktarı yeterlik deneyi ile saptanmalıdır. Çeşitli agregalarda 5 cm çökme verecek kıvamda  $1m^3$  beton için gerekli su miktarı 180kg - 270kg arasında değişir (TS2511, 1977).

Çimento miktarı tayininde ise üretilmesi istenen beton dayanımı esas alınmıştır. Betonun dayanımı  $E_{su}/C$  oranı hakkında fikir vermektedir. Bu oranı tespit ederken çimento cinsinin etkisini esas alan Graf formülünden yararlanılmıştır.

$$f_c = \frac{f_{cc}}{K_G} \left(\frac{c}{s}\right)^2 \quad (4.2)$$

Bağıntıda verilmiş olan parametrelerin tanımlanması şu şekilde yapılmıştır:

- $f_{cc}$  :Çimentonun standart dayanımı ( $N/mm^2$ ); PÇ32.5 için  $f_{cc} = 32.5 N/mm^2$ ,
- $K_G$  :4-10 arasında beton dayanımına göre seçilen katsayı,
- $c$  :Dozaj,
- $s$  :Beton karma suyu miktarı,
- $f_c$  :Karışımdan beklenen basınç dayanımı.

Beton sınıfına göre yukarıda verilen bağıntı yardımı ile su/çimento oranı tayin edilmiştir. Su miktarı belirlenmiş iken oran ile çimento dozajı hesaplanabilir. Bununla beraber, çimento dozajının minimum değeri (4.3) 'den hesaplanan değerden az olamaz.

$$c_{\min} = \frac{500}{\sqrt[3]{D}} \quad (4.3)$$

D : mm cinsiden agreganın en büyük dane çapı,

$c_{\min}$  : minimum çimento dozajı.

Hafif agregaların özellikleri arasında büyük değişiklikler görüldüğünden belirli bir dayanım elde edilebilmesi için gereken çimento miktarı da geniş sınırlar arasında değişmektedir (TS2511,1977). Bu nedenle C16 sınıfı betonu için 350, 400 ve 450 kg/m<sup>3</sup> dozajlı üç grupta beton numuneler üretilmiştir.

#### 4.3.2.3. Hafif ve normal beton karışım hesapları

Hafif betona ait karışım hesapları agregaların bağıl olarak yüksek su emme özelliği nedeniyle biraz daha karmaşıktır. Hafif betonda normal betondaki gibi hava hacminin bulunması güçtür. Bu sebeble, hafif agregalı betonlarda dane boyutuna göre belirli yüzde ile hava katılması tavsiye edilmektedir (TS 2511, 1977). Çalışmada birleşim hesaplarında hafif ve normal beton için "Mutlak Hacim Yöntemi" esas alınmıştır:

$$V_a = 1000 - \left( \frac{c}{\delta_c} + W + \partial \right) \quad (4.4)$$

Bağıntıda verilmiş olan parametrelerin tanımı şu şekilde yapılmıştır:

c : Dozaj ( kg ),

W : 1 m<sup>3</sup> betondaki su miktarı ( lt ),

$\delta_c$  : Çimentonun özgül ağırlığı ( kg/dm<sup>3</sup> ),

$\partial$  : 1 m<sup>3</sup> taze betondaki hava hacmi ( dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> )

$V_a$  : Agregata toplam hacmi ( dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> )

Buna göre "2" numaralı agreganın "G<sub>i</sub>" ve W su miktarları:

$$\begin{aligned} G_i &= V_a P_i \delta_{ai} \\ W &= w C \end{aligned} \quad (4.5)$$

ile hesaplanabilir. Burada:

- P<sub>i</sub> : i nolu agreganın agrega toplam hacmi içerisindeki yüzdesi,
- δ<sub>ai</sub> : i nolu agreganın birim hacim ağırlığı ( kg/dm<sup>3</sup> ),
- w : Ağırlıkça W/C (etkin su/çimento) oranı,
- W : Su miktarı (lt) dır.

Beton karışım hesaplarında iki aşama vardır. Birinci aşama yukarıda verildiği üzere beton karışımının teorik yolla hesabıdır. İkinci aşama ise; betonu üretmek ve betonun taze halde iken işlenebilirliğini, sertleşmiş halde iken dayanımı sağlayıp sağlamadığını kontrol etmektir. Özellikle hafif betonlarda dayanım ile çimento dozajı arasındaki bağıntıyı saptamak için deney karışımları kullanılmalıdır (TS 2511,1977).

Çimento dozajı ve su miktarı belirlendikten sonra, 1m<sup>3</sup> betona girecek toplam agrega miktarı,

$$1m^3 = 1000dm^3 = \frac{c}{\delta_c} + E_{su} + V_a + h_{hava} \quad (4.6)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada:

- c/δ<sub>c</sub> : Çimentonun mutlak hacmi (dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),
- E<sub>su</sub>/1.0 : Suyun mutlak hacmi (dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),
- V<sub>a</sub> : Agrega toplam hacmi (dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),
- h<sub>hava</sub> : Havanın hacmidir; betonda 0-30 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> arasında değerler alır.

V<sub>a</sub> toplam agrega miktarı hesaplandıktan sonra, agrega gruplarının miktarları daha önce seçilmiş olan agrega oranlarına göre bulunur. Hacim olarak hesap edilmiş olan agregaların

ağırlıkları, birim ağırlıkları ile çarpılmak suretiyle bulunabilir. 350, 400 ve 450 doz betonlar için hesaplanmış malzeme miktarı paragraf 5.1 'de verilmiştir.

#### **4.3.2.4. Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve bakımı (kür)**

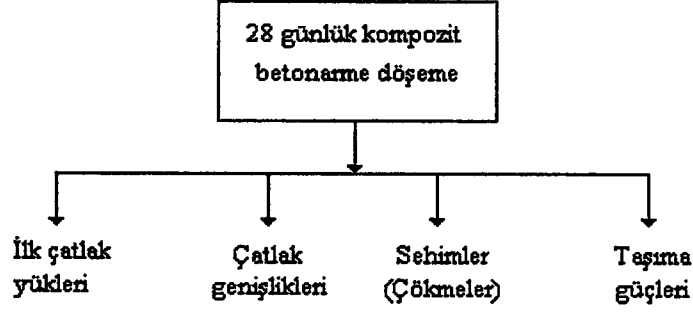
Betonarme kompozit plaklar 120x220x30cm boyutlarındaki standart çelik kalıp yardımı ile üretilmiştir. Burada verilen plak numune boyutları yüklenme çerçevesinin sınırları dikkate alınarak seçilmiştir. Normal ve hafif beton arka arkaya üretilip tabaka halinde kalıba dökülmüştür. Betonarme kompozit plak numunelerin üretimi yapılırken aynı zamanda üretilen betondan standart silindir numunelerde alınmıştır. Slump değerleri 5 ila 7 cm arasında kalmıştır.

Silindir numuneler 7 ve 28 gün kür tankında bekletildikten sonra kırılarak basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Betonarme kompozit plak numuneleri ise 28 gün bekletildikten sonra kırılmak suretiyle eğilme dayanımı değerleri ölçülmüştür.

#### **4.3.2.5. Deney programları, numune boyutları ve sayıları**

Değişik karışım oranlarına sahip on adet normal beton ve on adet hafif beton olmak üzere toplam yirmi adet beton numune üretimi yapılmıştır. Karışımlardan altı adet silindir numune alınmıştır. Silindir numuneler üzerinde taze beton deneyleri yapılarak işlenebilme özellikleri ile birim ağırlıkları tespit edilmiştir. Alınan beton silindir numunelerinin üçünün 7, diğer üçünün ise 28 günlük mekanik özellikleri deneyle belirlenmiştir.

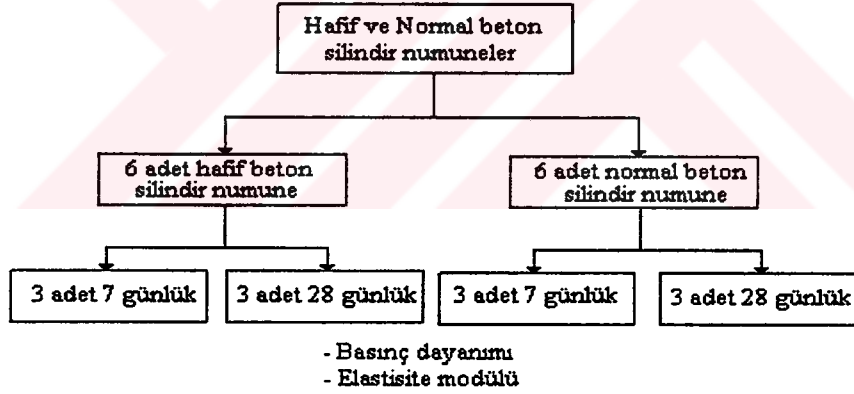
Yapılan deneysel çalışmalarda farklı yüksekliğe sahip; 24 adet betonarme kompozit kesitli ve 3 adet betonarme normal beton kesitli olmak üzere toplam 27 adet betonarme plak üretilmiştir. Betonarme elemanlar 28 gün yaşta deneye tabi tutulmuş; ilk çatlak yükleri, sehimler ve taşıma güçleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Kompozit betonarme döşemelere ait deney şeması Şekil 4.1 de verilmiştir.



Şekil 4.1. Betonarme döşemelere ait deney programı şeması

#### 4.3.3. Beton silindir numuneler üzerinde yapılan deneyler

Silindir numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük mekanik özellikleri belirleyen basınç dayanımı ve elastisite modülü tayini deneyleri yapılmıştır. Silindir numunelere ait deney şeması Şekil 4.2. de verilmiştir.



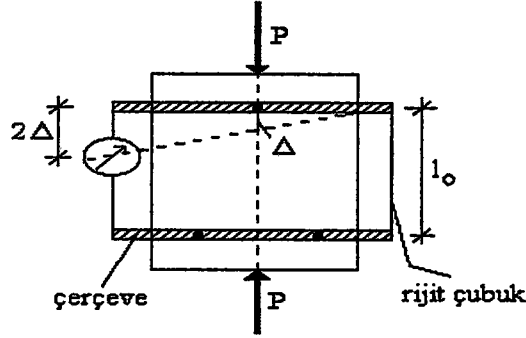
Şekil 4.2. Silindir numunelere ait deney programı şeması

##### 4.3.3.1. Basınç deneyleri

Üretilmiş olan hafif beton silindir numuneler basınç deneyine tabi tutulmadan önce beton birim hacim ağırlıkları tayin edilmiştir. Elde edilen beton birim hacim ağırlık sonuçları paragraf 5.1 'de verilmiştir. Silindir numune üzerine yükleme yapılmadan önce, numunede



oluşan deplasmanları ölçmek ve numuneye ait elastisite modülünü tayin etmek amacı ile kompressometre takılmıştır. Kompressometre şematik olarak Şekil 4.3 de verilmiştir.



Şekil 4.3 Beton numuneye basınç yükü uygulamadan önce takılan kompressometre

#### 4.3.3.2. Elastisite modülünün normal ve hafif beton için tayini

Elastisite modülünün tayini için beton silindir numunelere yükleme yapılırken her iki ton yük artımında deplasmanlar okunmuştur.  $\Delta$  deplasman okumaları paragraf 5.2 'de verilmiştir. Kompressometreye ait  $l_0$  boyu 150.5 mm olarak okunmuştur. Buna göre birim boy değişimleri,

$$\varepsilon = \frac{\frac{2\Delta}{2}}{l_0} = \frac{\Delta}{l_0} \quad (4.7)$$

ile hesaplanmıştır. Gerilme değerleri ( $\sigma$ ) hesaplanarak gerilme ve birim boy değişimi diyagramları çizilmiştir.

Elastisite modülü, betonun  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisine çizilen teğetin eğimi olacaktır. Bu teğetin eğimi her bir gerilme için değişken olması nedeni ile tek bir elastisite modülü vermek güçtür. Bu güçlük “başlangıç modülü”, “teğet modülü”, “sekant modülü” gibi değişik elastisite modülleri kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır (Berktaş, 1989; Hobbs, 1971). Elastisite modülünü veren eğri Şekil 3.20 de verilmiştir.

Bu çalışmada betona ait  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi her bir numune için çizilmiştir. Elde edilen eğriler üzerinde sekant modülü dikkate alınarak elastisite modülleri normal ve hafif beton silindir numuneler için tayin edilmiştir. Bulunan eğriler Ek 4 de verilmiştir.

Yapılan deneylerde normal ağırlıklı betonlar için elastisite modülleri ortalama olarak 26000-30000 N/mm<sup>2</sup> arasında bulunurken, hafif beton için 8000-10000 N/mm<sup>2</sup> arasında kalmıştır.

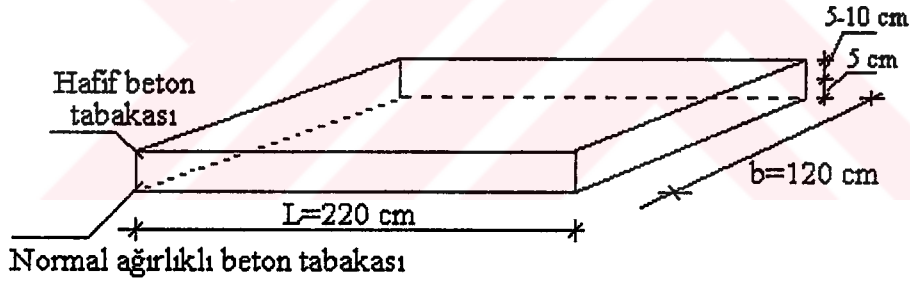


#### 4.3.4. Kompozit betonarme plakların hesabı

Normal betondan imal edilmiş olan betonarme plak ile kompozit olarak üretilmiş olan betonarme plak elemanların hesabında betonarmede bilinen taşıma gücü kabulleri dikkate alınmıştır. Donatı hesaplarında da betonarme kesitlerin davranışına bağlı ve taşıma gücü yönteminde kabul edilen kırılma şekilleri esas alınmıştır.

##### 4.3.4.1. Betonarme kompozit plakların boyutları ve bazı özellikleri

Betonarme kompozit plaklar; normal beton kesit çekme bölgesinde ve 5cm kalınlığında olacak şekilde üretilmiştir. Kullanılan normal betonun birim hacim ağırlığı  $25 \text{ kN/m}^3$  olarak bulunmuştur. Çekme donatısı normal beton içerisine yerleştirilmiştir. Normal beton tabakası üzerine 5cm 'den 10cm 'ye kadar değişik kalınlıkta hafif beton tabakası dökülmüştür. Kullanılan hafif betonun birim hacim ağırlığı  $15 \text{ kN/m}^3$  olarak bulunmuştur. Kompozit beton yapı elemanlarına ait boyutlar Şekil 4.4 'de verilmiştir.



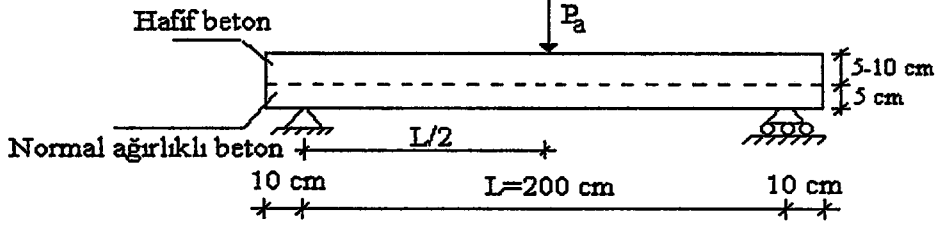
Şekil 4.4. Kompozit beton numunelerin geometrik boyutları

##### 4.3.4.2. Üretilen kompozit plakların beton özellikleri

Normal ağırlıklı betonda C16 beton sınıfına uygun dayanım elde edilecek şekilde granülometri çalışmaları yapılmıştır. Uygun granülometri oranlarına göre  $1 \text{ m}^3$  beton için beton malzemesi karışım oranları hesaplanmıştır. Silindir numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılarak, üretilmiş olan betonun istenilen beton sınıfına uygun olup olmadığı tespit edilmiştir.

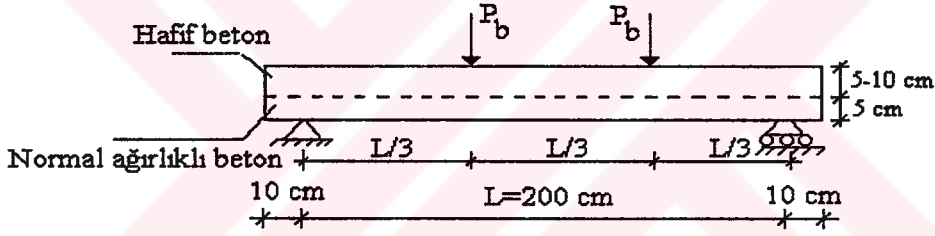
#### 4.3.4.3. Normal ağırlıklı betonarme plak numunelerin teorik taşıma gücü hesabı

Eğilme deneylerinde genelde kullanılan ve Şekil 4.5 ile Şekil 4.6 da verilen yükleme biçimlerinden Şekil 4.6 uygulanmıştır.



Şekil 4.5. Üç noktalı eğilme deneyi

Seçilen statik sistem için numunelere ait kesit tesirleri kiriş teorisine göre hesaplanmıştır. Eleman boyutları ve yükleme şartları buna imkan vermektedir.



Şekil 4.6. Deneylerde uygulanan yükleme biçimi

Kesit tesirlerinin hesabında plakların çözümünde sıkça kullanılan Kırılma Çizgileri Teorisi (KÇT) ile de çözüm yapılmıştır. Teorik kırılma yükleri numuneye ait seçilmiş olan bir kırılma figürü için statik denge yöntemi ile hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama ve KÇT ile ilgili bilgiler çalışmanın ekler kısmında Ek 3 de verilmiştir. KÇT ile elde edilen kesit tesirleri kiriş teorisi kabulü sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Seçilmiş olan numunelerin statik sistemi kiriş çalışmasına benzer bir kırılma biçimi gösterdiği için teorik kırılma yükleri aynı bulunmuştur.

Üç noktalı eğilme deneyinde,  $M_u$  eğilme-taşıma gücü momenti olmak üzere, yükün mukabil değeri,

$$P_{au} = \frac{4M_u}{L} \quad (4.11)$$

ile hesaplanabilir. Bu hesapta plak kendi ağırlığından etkilenme ihmal edilmiştir. Şekil4.6'daki yükleme biçimi ile,

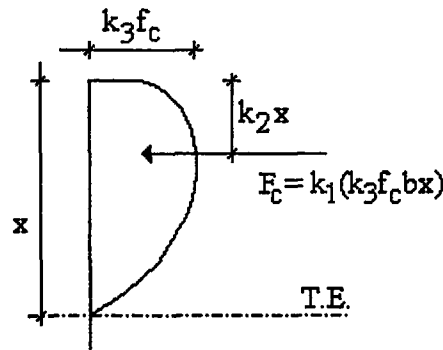
$$P_{bu} = P_u = \frac{3M_u}{L} \quad (4.12)$$

bulunur. Çekme, dengel ve basınç kırılması halleri için  $P_u$  değerleri hesaplanmıştır.

#### (a) Çekme kırılması

Kırılma durumunda basınç gerilmeleri bloğunun durumunu belirleyen parametreler Rüşch ve Hognestad'ın deneysel çalışmaları ile belirlenmiştir (Berktaş İ., 1989). Basınç gerilme bloğunun üç parametresi  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  aşağıdaki anlamda tanımlanmıştır.

- $k_1$  : Ortalama basınç gerilmesinin maksimum gerilmeye oranı,
- $k_2$  : Basınç bileşkesinin basınç lifine uzaklığının tarafsız eksen derinliğine oranı,
- $k_3$  : Maksimum basınç gerilmesinin beton silindir dayanıma oranı.



Şekil 4.7. Betonarme bir kesitte basınç gerilme bloğu parametreleri

Verilen parametreler yardımı ile, Şekil 4.7 'den yararlanılarak  $\sigma_m$  ortalama gerilme değeri,  $f_c$  ise silindir basınç dayanımı olmak üzere,

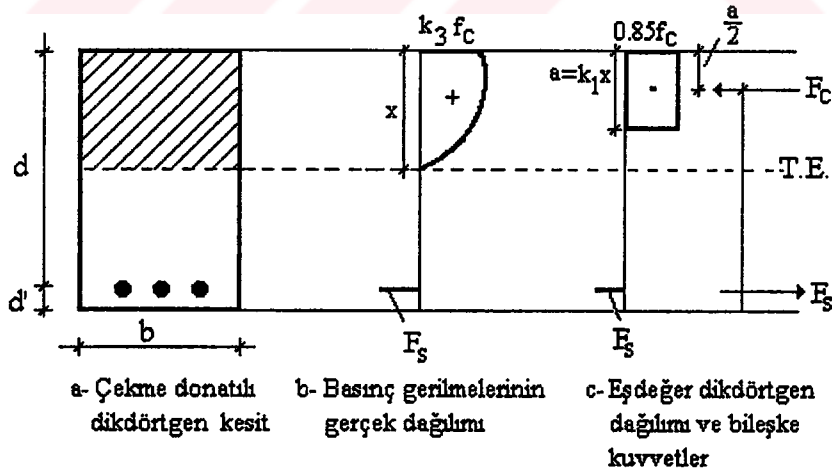
$$k_1 k_2 = \frac{\sigma_m}{f_c} \Rightarrow \sigma_m = k_1 k_2 f_c \quad (4.13)$$

olacaktır. Beton basınç kuvveti ise,

$$F_c = k_1 k_3 f_c b x \quad (4.14)$$

bulunur. Hognestad ve Rüşch tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda,  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  değerlerinin beton dayanımı ile orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir. TS500/84 'de normal betonlar için  $f_{ck} \leq 25 \text{MPa}$  halinde bu değerler sabit tutulmuştur.

Diğer taraftan gerçek dağılımla aynı değeri verecek ve hesaplarda kolaylık sağlayacak herhangi bir eşdeğer dağılım betonarme kesit için kullanılabilir. Buna göre Şekil 4.7 'de verilen gerilme bloğu yerine eşdeğeri olan ve Şekil 4.8 'de verilen gerilme bloğu kullanılabilir (TS500, 1984).



Şekil 4.8. Betonarme bir kesitte eşdeğer gerilme bloğu

Görüldüğü gibi dikdörtgen gerilme bloğunun genişliği  $0.85 f_{cd}$  alınmıştır. Bu değer  $k_3$  'ün 0.85 varsayılması demektir.

$k_3=0.85$  genel kabul görmüş bir değerdir. Diğer parametreler ise TS 500/84 'de, normal betonlar için,  $f_{ck} \leq 25$  MPa halinde  $k_1k_3=0.72$  olarak öngörülmektedir.  $k_3=0.85$  alındığına göre  $k_1$  değeri normal betonlarda 0.85 olmaktadır. Normal betonda dayanımın 25 MPa 'ı geçen her 1 MPa artışı için  $k_1$  değeri 0.006 azalmaktadır.  $k_2$  değeri ise b genişliği sabitse, Şekil 4.8'den  $k_2 = a/(2x)$  olacaktır. Genişlik farklı olursa eşdeğer gerilme kamasının ağırlık merkezinin basınç kenarına uzaklığı  $a=k_2x$  dir. Şekil 4.8 'den (b) ve (c) durumlarının eşdeğer olması için  $F_c$  değerinin ve yerinin aynı olması gerekir. Buradan Şekil 4.8 'den (4.15)

$$0.85 f_c k_1 b x = 0.85 f_c b a$$

$$a = k_1 x \quad (4.15)$$

yazılabilir. Betonarme kesit için b genişliği sabitse  $a/2=k_2x$  ve  $k_2=k_1/2$ , yani  $k_2= 0.425$  bulunur. Betonarme bir kesitin en uçtaki basınç lifinde betonun birim kısalmasının ezilme birim kısalmasına ulaşmasıyla ( $\epsilon_{cu} =0.003\approx 0.0035$ ) kesit taşıma gücünü kaybeder. Betonarme elemandaki çekme donatısının miktarı kirişin davranışını etkiler ve belirler (Berktaş, 1989). Basit eğilme halinde,

$$F_s = F_c \quad (4.16)$$

olmalıdır. Çekme gerilmesinin bileşkesi olan çekme kuvveti,  $F_s$ ,

$$F_s = A_s \sigma_s \leq A_s f_y \quad (4.17)$$

Basınç gerilmesinin bileşkesi olan beton basınç kuvveti,  $F_c$

$$F_c = 0.85 f_c a b \quad (4.18)$$

olacaktır. Yapılan deneysel çalışmaların betonarme hesaplarında  $f_{ck}$  değeri dikkate alınmıştır. Deneylerde ise,  $f_{ck}$  olarak doğrudan ölçülen değerler kullanılmıştır.

İç kuvvetler manivela kolu,

$$z = k_z d = d - 0.5a \Rightarrow k_z = 1 - 0.5 \frac{a}{d} \quad (4.19)$$

olur. Buradan, kesite etkiyen eğilme momenti iç kuvvetlerin oluşturduğu eğilme momentine eşit olacağından, taşıma gücü momenti  $M_u$ ,

$$M_u = F_s z = F_c z \quad (4.20)$$

ile hesaplanabilir. Çekme kırılması, betonun ezilme mukavemetine erişmeden donatının akma sınırına ulaşması olarak tanımlanmıştır. Böylece kesit taşıma gücüne ulaşmadan çelikte akma sonucu büyük uzama ve çekme bölgesindeki betonda çatlaklar görülür. Kesit sünek davranış gösterir. Tanım gereği,

$$(\varepsilon_s > \varepsilon_{yk}) \text{ ve } (\sigma_s = f_{yk}) \quad (4.21)$$

yazılabilir. (4.16) ve (4.17) den, böylece,

$$a = \frac{A_s f_{yk}}{0.85 f_{ck} b} \quad (4.22)$$

bulunur.  $\rho = A_s / bd$  donatı oranını göstermek üzere, (4.18, 4.19 ve 4.20) bağıntılarından,

$$M_u = \rho b d^2 f_{yk} \left(1 - 0.59 \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right) \quad (4.23)$$

bulunur. Dengeli kırılma için  $\rho_b$  donatı oranı,

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{bd} = 0.85 k_1 \frac{f_{ck}}{f_{yk}} \frac{600}{600 + f_{yk}} \quad (4.24)$$

olacaktır.  $k_1=0.85$ ,  $f_{ck}=16$  MPa,  $f_{yk}=420$  MPa ile,  $\rho_b = 0.0162$  olur. TS 500, 1984 'e göre sünek davranış, bir başka deyimle çekme kırılması sağlanabilmesi için,



$\rho \leq \rho_m = 0.85\rho_b = 0.014$  olmalıdır. Çekme kırılması öngörülen normal beton (referans) elemanlarında  $\rho = 0.010 < \rho_m$  alınarak numuneler üretilmiştir. Buna göre, normal beton numuneler için,  $\rho = 0.01$  ile, hesaplanan  $M_u$  taşıma gücü eğilme momenti, ve bunun mukabili  $P_{au}$  ve  $P_{bu}$  tekil kuvvetleri Çizelge 4.3 'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Normal beton numuneler için eğilme taşıma gücü momenti ve mukabil yükleri

Kalınlık (cm)	$M_u$ (kNm)	$P_{au}$ (kN)	$P_{bu}$ (kN)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	d(cm)
10	24.86	49.72	37.29	9.42	7.5
13	46.84	93.68	70.26	12.56	10.5
15	66.26	132.52	99.39	14.92	12.5

(b) Denge kırılması

Normal beton elemanlar için,  $\rho_b = 0.0162$  dengeli donatı oranı,  $f_{ck} = 16$  MPa,  $f_{yk} = 420$  MPa ile hesaplanan  $M_{ub}$  taşıma gücü momenti,

$$M_{ub} = \rho_b b d^2 f_{yk} \left(1 - 0.59 \rho_b \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right) \quad (4.25)$$

$P_{au}$  ve  $P_{bu}$  mukabil yükleri, (4.11) ve (4.12) ile hesaplanarak Çizelge 4.4 'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Normal beton deney numunelerinin dengeli kırılma durumunda eğilme taşıma gücü momenti ve mukabil yükleri

Kalınlık (cm)	$M_{ub}$ (kNm)	$P_{aub}$ (kN)	$P_{bub}$ (kN)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	d(cm)
10	34.93	69.86	52.40	14.92	7.5
13	67.43	134.86	101.15	20.41	10.5
15	95.67	191.34	143.51	24.34	12.5

## (c) Basınç kırılması

Basınç kırılması, çelik donatıdaki gerilmenin akma sınırına ulaşmadan betonun ezilmesi ile meydana gelen kırılma şeklidir. Kırılma şekli ani olur. Çeliğin "gerilme-birim deformasyon" eğrisinde doğrusallık sınırı henüz aşılmamıştır. Şekil değiştirmelerin lineer yayıldığı hipotezi ve  $E_s=200\ 000$  MPa ile,

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_s} = \frac{x}{d-x} = \frac{0.003}{\frac{\sigma_s}{E_s}} = \frac{600}{\sigma_s} \quad (4.26)$$

yazılabilir. Buradan,

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \varepsilon_s E_s \leq f_{yd} \\ \sigma_s &= 600 \frac{d-x}{x} \quad (\text{N/mm}^2) \\ \sigma_s &= 600 \frac{k_1 d - a}{a} \leq f_{yd} \quad (\text{N/mm}^2) \end{aligned} \quad (4.27)$$

bulunur. İç kuvvetlerin eşitliği bağıntısından,

$$\begin{aligned} 0.85 f_{ck} b a &= A_s \sigma_s \\ 0.85 f_{ck} b a - A_s 600 \frac{k_1 d - a}{a} &= 0 \end{aligned}$$

yazılabilir; bu son ifade düzenlenirse, a için ikinci derece bir denkleme ulaşılır:

$$0.85 f_{ck} b a^2 + 600 A_s a - 600 A_s k_1 d = 0 \quad (4.28)$$

$k_1=0.85$  alınarak a için bulunacak iki kökten  $a < d$  olanı anlamlıdır. Buradan, dikdörtgen kesit için taşıma gücü momenti,

$$M_u = 0.85 f_{ck} b a (d - a/2) \quad (4.29)$$

ile hesaplanabilir. Basınç kırılmasının gerçekleşmesi için betonarme hesaplamalarda  $\rho_b$  dengeli donatı yüzdesine göre  $\rho > \rho_b$  hali için bir  $\rho$  değeri seçilmelidir.  $\rho_b=0.0162$  olarak bulunmuş olup  $\rho=0.020$  seçilmiştir. Seçilen donatı için normal beton deney elemanlarının hesaplanan  $M_u$  eğilme-taşıma gücü momentleri,  $P_{au}$  ve  $P_{bu}$  mukabil yükleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Normal beton deney numunelerinin basınç kırılması durumunda eğilme taşıma gücü momentleri ve mukabil yükleri

Kalınlık (cm)	$M_{uba}$ (kNm)	$P_{auba}$ (kN)	$P_{buba}$ (kN)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	d(cm)
10	35.81	71.62	53.72	18.06	7.5
13	70.11	140.22	105.17	25.12	10.5
15	99.33	198.66	149.00	29.83	12.5

Denge kırılması, çekme kırılması ve basınç kırılması için seçilen donatılar Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8 'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Normal betonarme deney elemanlarında dengeli kırılma durumunda seçilen donatılar (S420)

Kalınlık (cm)	Boyuna donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Enine donatı Alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Boyuna donatı adedi ( $\phi 10$ )	Enine donatı adedi ( $\phi 8$ )
10	14.58	2.92	19	6
13	20.41	4.08	26	9
15	24.30	4.86	31	10

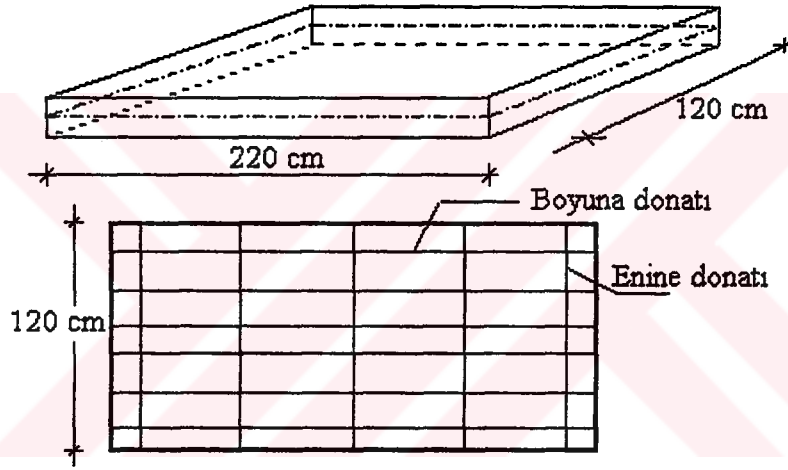
Çizelge 4.7. Normal betonarme deney elemanlarında çekme kırılması durumunda seçilen donatılar (S420)

Kalınlık (cm)	Boyuna donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Enine donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Boyuna donatı adedi ( $\phi 10$ )	Enine donatı adedi ( $\phi 8$ )
10	9.00	1.80	12	4
13	12.60	2.52	16	6
15	15.00	3.00	19	6

Çizelge 4.8. Normal betonarme deney elemanlarında basınç kırılması durumunda seçilen donatılar (S420)

Kalınlık (cm)	Boyuna donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Enine donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Boyuna donatı adedi ( $\phi 10$ )	Enine donatı adedi ( $\phi 8$ )
10	18.00	3.60	23	8
13	25.20	5.04	32	11
15	30.00	6.00	38	12

Seçilmiş olan donatılar döşemeye Şekil 4.9 'da verilen düzende yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Donatı düzeni

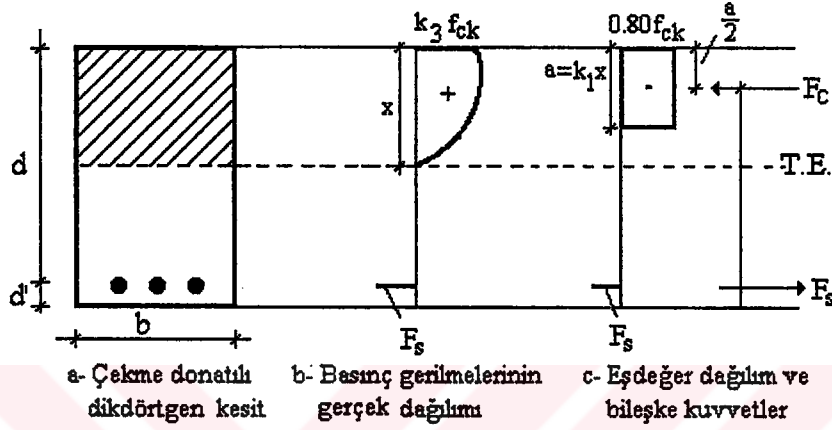
#### 4.3.4.4. Kompozit betonarme plak deney numunelerinde teorik taşıma gücü hesabı

Hafif ve normal beton tabakalar halinde üretilen kompozit kesitler için de Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 'da verilmiş olan statik sistem geçerlidir. Betonarme hesaplar, kompozit kesitler için, göçme anındaki davranışları dikkate alınarak, aşağıda özetlendiği üzere yapılmıştır.

##### (a) Çekme kırılması

Hafif betonarme elemanlarda taşıma gücüne göre tasarım normal betonarme elemanlara benzer şekilde yapılır. Ancak malzeme karakteristikleri yönünden bazı değişiklikler vardır.

Hafif betonla ilgili yapılan çalışmalarda kırılmadan hemen önce basınç lifindeki birim kısalmalar  $\epsilon_{cu}$ , 0.002 olarak teklif edilmiş ve uygulama alanı bulmuştur. Bu durumda basınç bölgesindeki gerilme bloğu alanı normal betona göre daha küçük tutulmaktadır (Bate SCC., 1980; Güral M., 1983; Kong F. K., 1987). Basınç bölgesi hafif beton tabakada yer alan kesitler için eşdeğer gerilme dağılımı modeli Şekil 4.10'da verildiği gibidir.



Şekil 4.10. Hafif betonarme kesitte eşdeğer gerilme dağılımı ve eşdeğer gerilme bloğu

Hafif betonarme kesitlerin eğilme hesabı için  $k_3=0.80$  önerilmiş ve genel kabul görmüştür; diğer parametreler,  $k_1$  ve  $k_2$ , normal betonlarda olduğu gibi alınabilir (ACI318-83; BS8110; Ferguson M., 1988; Kong F.K., Evans R.H., 1987). Bu kabuller altında beton basınç gerilmeleri bileşkesi  $F_c$  ve donatı çekme kuvveti  $F_s$ ,

$$\begin{aligned} F_c &= k_3 f_{ck} a b = 0.80 f_{ck} a b \\ F_s &= \sigma_s A_s \end{aligned} \quad (4.30)$$

olacaktır. Çekme kırılmasının tanımı gereği,

$$\epsilon_s > \epsilon_{yk} \quad \text{ve} \quad \sigma_s = f_{yk} \quad (4.31)$$

olmalıdır. İç kuvvetlerin eşitliğinden, eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu derinliği,  $a$ ,

$$a = \frac{A_s f_{yk}}{0.80 f_{ck} b} \quad (4.32)$$

ve çekme kırılması durumunda taşıma gücü momenti,

$$M_u = \rho b d^2 f_{yk} \left(1 - 0.625 \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right) \quad (4.33)$$

olarak bulunur. Hafif beton hâlinde,  $\epsilon_{cu} = 0.002$ ,  $E_s = 200\ 000$  MPa,  $k_3 = 0.80$  ile, dengeli donatı oranı,

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{bd} = 0.80 k_1 \frac{f_{ck}}{f_{yk}} \frac{400}{400 + f_{yk}} \quad (4.34)$$

olacaktır.  $k_1 = 0.85$ ,  $f_{ck} = 16$  MPa,  $f_{yk} = 420$  MPa ile dengeli donatı oranı, basınç bölgesi hafif beton ile imal edilen deney plakları için,  $\rho_b = 0.01264$  bulunur. TS 500, 1984 'ün sünek davranış sınırı  $\rho_m = 0.85 \rho_b = 0.01074$  olur. Çekme kırılması öngörülen deney numuneleri için  $\rho = 0.010 < \rho_m$  donatı oranı ile hesaplanan taşıma gücü momenti ile  $P_{au}$  ve  $P_{bu}$  göçme yükleri Çizelge 4.9 'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Basınç bölgesi hafif beton tabakada kalan kompozit beton deney elemanlarının eğilme taşıma gücü momenti ve mukabil kuvvetleri

Kalınlık (cm)	$M_u$ (kNm)	$P_{au}$ (kN)	$P_{bu}$ (kN)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )
10	24.64	49.28	36.96	9.42
13	47.19	94.38	70.79	12.56
15	65.83	131.66	98.75	14.92

(b) Denge kırılması

$\rho_b = 0.01264$  ile dengeli kırılma durumunda taşıma gücü momenti,

$$M_{ub} = \rho_b b d^2 f_{yk} \left(1 - 0.625 \rho_b \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right) \quad (4.35)$$

bulunur. Bu suretle, basınç bölgesi hafif beton tabakasında yer alan deney numuneleri için hesaplanan dengeli kırılma momenti ve ilgili göçme yükleri Çizelge 4.10 'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Basınç bölgesi hafif beton kompozit deney elemanlarında dengeli kırılma durumunda eğilme taşıma gücü momenti ve göçme yükleri

Kalınlık $t_n+t_h$ (cm)	$M_u$ (kNm)	$P_{au}$ (kN)	$P_{bu}$ (kN)	$A_s$ (kullanılan) (cm <sup>2</sup> )
10	34.24	68.48	51.36	14.92
13	66.09	132.18	99.14	20.41
15	93.67	187.34	140.51	24.34

### (c) Basınç Kırılması

Basınç kırılmasını tanımlayan  $\rho > \rho_b = 0.01264$  halinde,  $\epsilon_{cu} = 0.002$ ,  $E_s = 200\ 000$  MPa,  $k_3 = 0.80$ ,  $k_1 = 0.85$  ile, eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu derinliği "a" yı veren 4.28 bağıntısı,

$$0.80 f_{ck} b a^2 + 400 A_s a - 400 A_s k_1 d = 0 \quad (4.36)$$

şeklinde yazılabilir. Bulunacak a köklerinden pozitif olanı dikkate alınmalıdır. Bununla, eğilme taşıma gücü momenti,

$$M_u = 0.80 f_{ck} b a (d - 0.5a) \quad (4.37)$$

bulunur. Deney plaklarında  $\rho = 0.020 > \rho_b = 0.01264$  alınarak, basınç kırılması beklenen numuneler donatılmıştır. Bu çerçevede hesaplanan taşıma gücü momentleri ve ilgili göçme yükleri Çizelge 4.11 'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Basınç bölgesi hafif beton olan kompozit elemanlarda basınç kırılması halinde eğilme taşıma gücü momenti göçme yükleri

Kalınlık $t_n+t_h$ (cm)	$M_u$ (kNm)	$P_{au}$ (kN)	$P_{bu}$ (kN)	$A_s$ (kullanılan) (cm <sup>2</sup> )
10	31.54	63.08	47.31	18.06
13	61.83	123.66	92.75	25.12
15	87.62	175.24	131.43	29.83

Enine donatı boyuna donatı alanı  $A_s$  'nin %20 'si olarak alınmıştır. Ayrıca enine donatı aralığı 40cm'den küçük olacak şekilde donatı adedi seçilmiştir. Donatı seçimi, kompozit elemanlar için, kırılma şekli dikkate alınarak yapılmış ve Çizelge4.12, Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Dengeli kırılma hali için kompozit betonarme elemanlarda donatı alanı ve seçilen donatı (S420)

Kalınlık (cm)	Boyuna donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Enine donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Boyuna donatı Adedi ( $\phi 10$ )	Enine donatı adedi ( $\phi 8$ )
10	14.40	2.88	19	6
13	20.16	4.03	26	8
15	24.00	4.80	31	10

Çizelge 4.13. Çekme kırılması hali için kompozit betonarme elemanlarda donatı alanı ve seçilen donatı (S420)

Kalınlık (cm)	Boyuna donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Enine donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Boyuna donatı Adedi ( $\phi 10$ )	Enine donatı adedi ( $\phi 8$ )
10	9.00	1.80	12	4
13	12.60	2.52	16	6
15	15.00	3.00	19	6

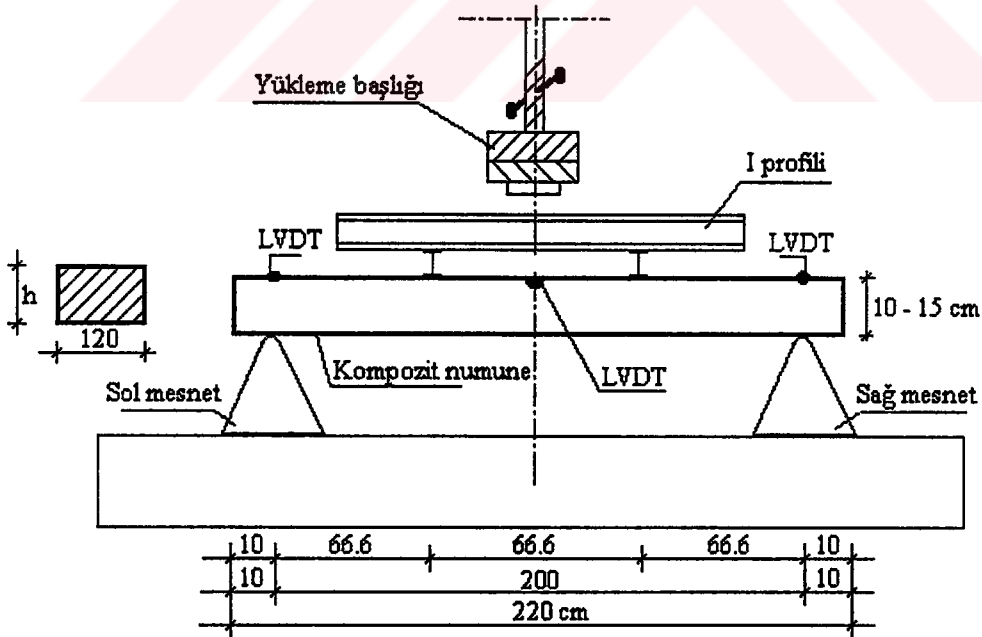


Çizelge 4.14. Basınç kırılması hali için kompozit betonarme elemanlarda donatı alanı ve seçilen donatı (S420)

Kalınlık (cm)	Boyuna donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Enine donatı alanı $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Boyuna donatı adedi ( $\phi 10$ )	Enine donatı adedi ( $\phi 8$ )
10	18.00	3.60	23	8
13	25.20	5.04	32	14
15	30.00	6.00	38	12

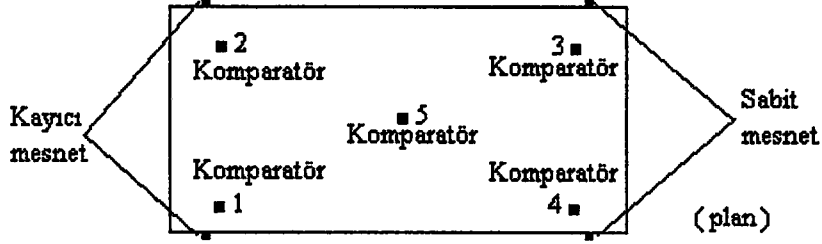
#### 4.3.4.5. Deney düzeni

Şekil 4.9 'da verilmiş olan yapı elemanlarına basit eğilme olacak şekilde statik yükleme yapılmıştır. Yükleme Şekil 4.6 'da verilen statik sisteme uygun olarak yapılmıştır. Numuneye iki adet eşit şiddetli tekil kuvvet uygulayabilmek amacıyla Şekil 4.11 'de verilen yükleme ve ölçme düzeni teşkil edilmiştir. Deney düzeneğinde verilmiş olan P/2 tekil kuvvetleri, I profilleri yardımı ile yayılı şerit yüklemesi olarak yapılmıştır.



Şekil 4.11. Eğilme deneylerinde kullanılan yükleme düzeni

Kritik noktalardeki deplasman değerlerini ölçmek amacıyla 0.01 mm hassasiyetli mekanik komparatörler kullanılmıştır. Deplasman ölçüm noktaları Şekil 4.12 'de işaret edilmiştir.



Şekil 4.12. Kompozit betonarme elemanda deplasman ölçümü yapılan noktalar

Deplasmanların dışında, deney esnasında ayrıca, ilk çatlak yükleri ve taşıma gücü yükleri okunmuştur.

## 5. DENEY SONUÇLARI

### 5.1. Agregada Deneyleri

Hafif agregada özgül ağırlık deneylerinde şu sonuçlar elde edilmiştir.

**Kum** : Üretilen tüm betonlarda 8mm'nin altında Develi- Kocahacılı köyü kumları kullanılmıştır (Ekler: Resim 4 ve 7). Kumun kuru halde özgül ağırlığı (KHÖA) yapılan deneyler sonucunda  $0.01287 \text{ kN/dm}^3$ , kuru yüzey doymun halde özgül ağırlığı (KYDHÖA)  $0.01687 \text{ kN/dm}^3$  ve absorpsiyon değeri %30 olarak bulunmuştur.

**Ponza Taşı Hafif Agregaları** : Deney numunelerinde hafif agregada olarak Kayseri-Develi yöresinden getirilen ponza taşı hafif agregaları kullanılmıştır (Ekler:Resim 3 ve 6). Karışımlarda kullanılan agregalar Ür-Pa çakılı olup 8 mm'nin üzerindedir.

Ponza taşının özgül ağırlığı toz haldeki ponza taşı numuneleri üzerinde beş deney yapılarak elde edilmiştir. Ortalama kuru halde özgül ağırlık (OKHÖA)= $0.0114 \text{ kN/dm}^3$  ve ortalama kuru yüzey doymun halde özgül ağırlık (OKYDHÖA)= $0.0161 \text{ kN/dm}^3$  olarak bulunmuştur. Absorpsiyon değeri %28 olmuştur. Deneylerde 10 dakika suda kalmış olan Kocahacılı köyü ince kumu için, piknometre ile ölçüm neticelerine göre özgül ağırlık değerleri aşağıda verilmiştir.

Boş piknometre ağırlığı(gr)	: 157.7
Piknometre + KYD numune ağırlığı (gr)	: 358.0
Piknometre + KYD numune + işarete kadar saf su ağırlığı (gr)	: 738.6
Boş tava ağırlığı (gr)	: 370.5
Tava + fırında kurumuş numune ağırlığı (gr)	: 519.9
KHÖA	: 1.258
KYDHÖA	: 1.687
Apsorpsiyon	: %35

Hafif agregalara ait granülometri değerleri ise sırasıyla Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kullanılan Kocahacılı kumu granülometri deneyi sonuçları

Elek No	Elek Üstü Kalan	% Geçenler	% Ortalama
32	-----	100	100
16	-----	100	100
8	11.8	99.6	100
4	42.5	98.2	99
2	317.2	87.6	88
1	1104.5	50.8	51
0.50	826.8	23.2	23
0.25	375.9	10.7	11
TAVA	321.5		
Numune miktarı (gr)	3000.1		

Çizelge 5.2. Kullanılan Ür-Pa ince çakılına ait granülometri deneyi sonuçları

Elek No	Elek Üstü Kalan	% Geçenler	% Ortalama
32	-----	100	100
16	73.4	97.6	98
8	533.6	79.8	80
4	928.6	48.8	49
2	802.7	22.1	22
1	383.6	9.3	9
0.50	123.2	5.2	5
0.25	48.9	3.5	4
TAVA	105.9		
Numune miktarı (gr)	3000.1		

Çizelge 5.3. Kullanılan Ür-Pa iri çakılına ait granülometri deneyi sonuçları

Elek No	Elek Üstü Kalan	% Geçenler	% Ortalama
32	-----	100	100
16	409.4	86.4	87
8	1117.2	49.1	49
4	650.7	27.4	28
2	372.9	15.0	15
1	179.4	9.0	9
0.50	73.1	6.6	6
0.25	52.0	4.8	5
TAVA	145.3		
Numune miktarı (gr)	3000.1		

Deneylerde her üç malzemenin karışımında kullanılan; bims kumu, bims ince çakılı ve bims iri çakılı için elekten geçen yüzde (%) değerleri Çizelge 5.4 de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Karışımında kullanılan agregaların granülometri değerleri

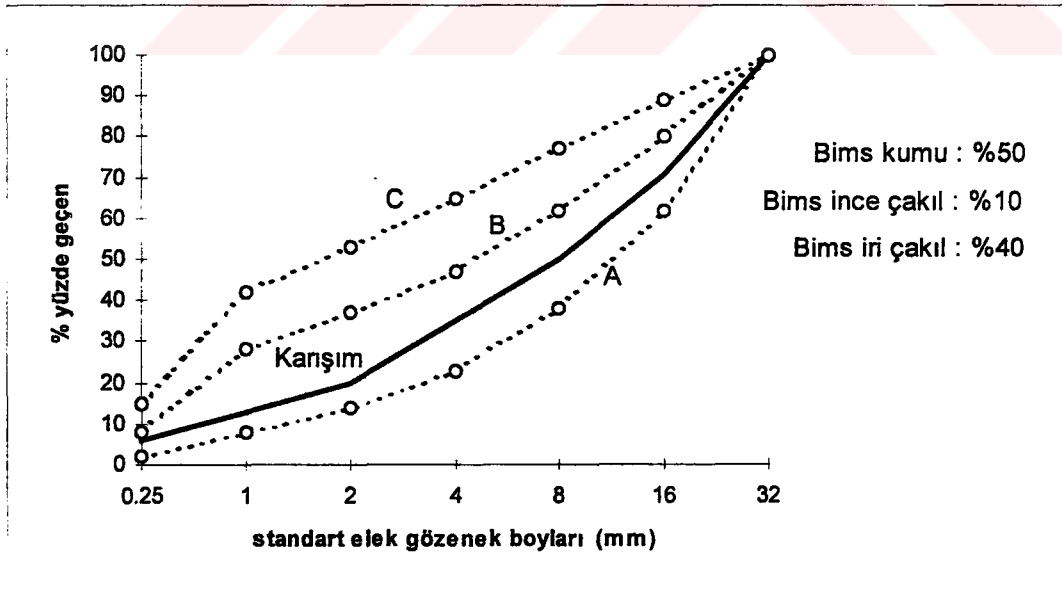
Elek No	Geçenler yüzdesi (%)		
	Bims kumu	Bims ince çakılı	Bims iri çakılı
32	100	100	100
16	100	94	30
8	98	7	1
4	69	2	1
2	40	1	1
1	25	1	1
0.25	12	0	1

Bims kumundan %50, bims ince çakıldan %10 ve bims iri çakıldan %40 alınarak elde edilen hafif agrega karışımının granülometrisi Çizelge 5.5 'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Standart granülometri sınır değerleri ile karışım sonuçları

Elek No	Geçenler yüzdesi (%)			
	Alt sınır	Karışım	Üst sınırlar	
32	100	100	100	100
16	62	71	80	89
8	38	50	62	77
4	23	35	47	65
2	14	20	37	53
1	8	13	28	42
0.25	2	6	8	15

Standart sınır değerlerine ve karışım sonuçlarına göre Şekil 5.1 de granülometri eğrisi çizilmiştir.



Şekil 5.1. Standart granülometri sınır değerleri ve hafif agrega karışımının granülometri eğrisi

TS706 'ya göre, A-B-C standart eğrileri arasında kalan agregâ karışımları uygun kabul edilebilir.

Beton karışım değerleri değişik agregâ grupları ve çimento dozajlarına göre hesaplanmıştır. Böylece 1m<sup>3</sup> betonda kullanılmış olan çimento, su, kum ve çakıl gibi malzemelerin değerleri elde edilmiş olmaktadır. Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8 de 35 dm<sup>3</sup> betona ait karışım miktarları verilmiştir.

Çizelge 5.6. 350 dozlu deney betonu birleşenleri

Malzeme	Miktar (kg)
Su	9
TÇ-32.5	12.25
Kocahacılı kumu	14.8
Ûr-Pa dağ çakılı	25.2

350 dozlu beton harcının slump 'ı 3 cm olarak bulunmuştur. Beton karma suyuna 0.95 kg su ilave edilmiştir. Ûr-Pa dağ çakılı için nem oranı %10 ve Kocahacılı kumu için %24 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.7. 400 dozlu deney betonu birleşenleri

Malzeme	Miktar (kg)
Su	9
TÇ-32.5	14
Kocahacılı kumu	14.4
Ûr-Pa dağ çakılı	24.5

400 dozlu beton harcında slump 7 cm olarak bulunmuştur. Beton karma suyuna 0.75 kg su ilave edilmiştir.

Çizelge 5.8. 450 dozlu deney betonu birleşenleri

Malzeme	Miktar (kg)
Su	9
TÇ-32.5	15.75
Kocahacılı kumu	13.8
Ür-Pa dağ çakılı	23.9

450 dozlu beton harcında slump 8 cm olarak bulunmuştur. Beton karma suyuna 0.75 kg su ilave edilmiştir.

## 5.2. Hafif ve Normal Beton Deney Sonuçları

Normal ve Hafif beton için değişik dozajlarda ve karışım oranlarında beton numuneler hazırlanmıştır (Ekler: Resim 12 ve 13). Numuneler üzerinde aşağıda verilen deneyler yapılmıştır.

### 5.2.1. Birim hacim ağırlığı deneyleri

Silindir numunelerin birim hacim ağırlıklarını tayin edebilmek amacıyla herbir numune evvela tartılmış; elde edilen ortalama ağırlık değerleri silindir numune hacmi  $0.0053 \text{ m}^3$  'e bölünmek suretiyle, hafif ve normal beton için birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Normal betondan imal edilen silindir numuneler için birim hacim ağırlık değerleri 350 dozlu betonda yaklaşık  $25 \text{ kN/m}^3$  bulunmuştur.

Hafif beton numuneleri için ortalama birim hacim ağırlığı 350, 400 ve 450 doz için hesaplanarak Çizelge 5.9 'da verilmiştir.



Çizelge 5.9. Değişik dozajlardaki hafif beton numunelerin birim hacim ağırlıkları

Beton numune		Ağırlık ( gr )	Ortalama ( gr )	Birim hacim ağırlığı ( kN/m <sup>3</sup> )
350 doz	No.1	7607		14.45
	No.2	7645		
	No.3	7780		
	No.4	7660	7658	
	No.5	7598		
	No.6	7655		
400 doz	No.1	7993		15.05
	No.2	7926		
	No.3	7990		
	No.4	7975	7975	
	No.5	7973		
	No.6	7990		
450 doz	No.1	7955		14.97
	No.2	7954		
	No.3	7991		
	No.4	7906	7933	
	No.5	7866		
	No.6	7923		

Ölçülen birim hacim ağırlıkları, TS 2511'de hafif beton için verilen 19 kN/m<sup>3</sup> sınırından küçük olup üretilen betonların "hafif beton" kabul edilebileceği anlaşılmıştır.

#### 5.2.2. 28 Günlük normal ve hafif beton silindir numune basınç dayanımı deneyi sonuçları

350 dozlu hafif beton silindir numunelerin kompresometre okumaları 20 kN'da bir yapılarak Çizelge 5.10 'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. 350 dozlu deney betonunun kompressometre okumaları

Yükleme (kN)	Kompresometre okumaları (0.001 mm hassasiyetle)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
20	10	20	10	10	10	11
40	28	35	30	26	30	29
60	50	50	47	45	48	50
80	65	80	76	67	68	72
100	90	110	104	90	90	94
120	110	130	136	110	110	133
140	140	160	183	138	135	155
160	165	190	193	165	160	185
180	190	210	215	195	184	215
200	220	240	237	226	214	248
220	260	270	267	266	252	294
240	295	320	318	310		350
260	340	360	355			
280	390	450				
<b>Göçme yükü (kN)</b>	<b>285</b>	<b>281</b>	<b>260</b>	<b>245</b>	<b>228</b>	<b>241</b>

Bu numuneler için dayanım değerleri Çizelge 5.11 'de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11. 28 günlük 350 dozlu hafif beton silindir numunelerin basınç deneyi sonuçları

Numune no	Göçme yükü $P_u$ (kN)	Silindir numune dayanımı $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	20 cm'lik küp eşdeğeri (N/mm <sup>2</sup> ) $f_c^{küp} = f_c / 0.85$
No.1	285	16.10	19.00
No.2	281	15.90	18.70
No.3	260	14.70	17.20
No.4	245	13.90	16.30
No.5	228	12.90	15.20
No.6	241	13.70	16.10
Ortalama	257	$f_{cm} = 14.50$	17.10
Standart sapma $\sigma$		1.249	1.470
Karakteristik Dayanım $f_{ck}$		12.93	15.21

400 dozlu hafif beton silindir numunelerin kompressometre okumaları Çizelge 5.12 'de, dayanım değerleri ise Çizelge 5.13 'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. 400 dozlu hafif beton deney numunelerde kompressometre okumaları

Yükleme (kN)	Kompressometre okumaları (0.001 mm hassasiyetle)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
20	11	10	10	12	13	11
40	29	28	28	31	30	28
60	50	46	44	54	48	50
80	69	70	62	75	65	68
100	86	91	83	95	85	85
120	105	108	100	115	105	105
140	124	130	119	135	125	125
160	146	151	138	154	145	142
180	164	172	160	175	165	162
200	185	191	185	192	188	184
220	205	210	205	210	210	205
240	222	229	225	232	230	222
260	244	248	248	250	250	245
280	268	266	270	270	275	265
300	294	296	290	292	295	290
320	316	320	316	312	324	310
340	341		340	334	350	335
360	366		370	358	375	365
380	398		405		412	400
400					455	
<b>Göçme Yüğü</b> (kN)	<b>394</b>	<b>335</b>	<b>383</b>	<b>365</b>	<b>404</b>	<b>398</b>

Çizelge 5.13. 28 günlük 400 dozlu hafif beton silindir numunelerde basınç deneyi sonuçları

Numune no	Göçme yükü $P_u$ (kN)	Silindir numune dayanımı $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	20 cm'lik küp eşdeğeri (N/mm <sup>2</sup> ) $f_c^{küp} = f_c / 0.85$
No.1	394	22.3	25.6
No.2	335	19.0	21.9
No.3	383	21.7	25.0
No.4	365	20.7	23.8
No.5	404	22.7	26.1
No.6	398	22.5	25.9
Ortalama	380	$f_{cm} = 21.5$	24.7
Standart sapma $\sigma$		1.415	1.66
Karakteristik dayanım $f_{ck}$		19.69	23.16

450 doz hafif beton silindir numuneler için kompressometre okumaları Çizelge 5.14 'de, dayanım değerleri ise Çizelge 5.15 'de verilmiştir.

Çizelge 5.14. 450 dozlu hafif beton numunelerde kompressometre okumaları

Yükleme ( kN )	Kompressometre okumaları (0.001 mm hassasiyetle)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
20	10	10	15	10	10	9
40	27	32	35	28	23	24
60	48	50	60	45	39	40
80	68	75	80	60	55	60
100	90	95	92	78	72	80
120	107	115	105	95	90	98
140	125	140	120	110	105	115
160	145	162	140	128	120	135
180	167	185	158	145	140	155
200	188	210	178	165	156	174
220	210	250	200	185	174	193
240	232	285	215	205	190	215
260	255		238	220	210	235
280	275		258	240	228	256
300	300		280	263	248	282
320	325		305	286	268	300
340	350		325	308	290	322
360	375		350	332	310	350
380	408		378	368	330	377
400	440		410		355	410
420			445		380	455
<b>Göçme yükü ( kN )</b>	<b>415</b>	<b>258</b>	<b>429</b>	<b>390</b>	<b>425</b>	<b>425</b>

Çizelge 5.15. 28 günlük 450 dozlu hafif beton silindir numunelerde basınç deneyi sonuçları

Numune no	Göçme yükü $P_u$ ( kN )	Silindir dayanımı $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	20 cm'lik küp eşdeğeri (N/mm <sup>2</sup> ) $f_c^{küp} = f_c / 0.85$
No.1	415	23.5	27.0
No.2	258	14.6(ihmal edildi)	16.8 (ihmal edildi)
No.3	429	24.3	27.9
No.4	390	22.1	25.4
No.5	425	24.1	27.7
No.6	425	24.1	27.7
Ortalama	390	$f_{cm} = 23.62$	27.1
Standart sapma $\sigma$		0.90	1.06
Karakteristik dayanım $f_{ck}$		22.47	26.44

### 5.3. Normal ve Kompozit Betonarme Elemanlarla İlgili Deneyler

Bölüm 4 'de 120\*220 cm plan boyutlarında ve farklı yüksekliklerdeki numuneler için teorik göçme yükü  $P_u$  hesaplanmıştı. Öngörülen beton kaliteleri, normal ve hafif beton için C16 olduğundan, elde edilen deney sonuçlarına göre normal beton için 300≈350 dozaj dikkate alınırken, hafif betonda 400 dozajlı beton karışımı esas alınmıştır. Yukarıda özetlenen deney sonuçları da açıkça göstermektedir ki hafif beton için dozajın artışı ile birlikte basınç dayanımı da artmaktadır (Bkz: Çizelge 5.11, 5.13 ve 5.15).

Hafif betonla ilgili olarak yapılan deneyler sonucunda, Erciyes Dağı volkanik agregası kullanılarak 450 dozajla 14.97 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığında ve ortalama dayanımı 23.6 N/mm<sup>2</sup> olan beton, 400 dozajla 15.05 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığında ve dayanımı

21.5 N/mm<sup>2</sup> olan beton, 350 dozajla 14.45 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığında ve dayanımı 14.5 N/mm<sup>2</sup> olan beton elde edilebilmiştir.

Kompozit betonarme kesitin sadece normal betondan imal edilmiş olan kesite göre eğilme deneyleri yapılarak, davranışı ve taşıma gücünün değişimi incelenmiştir. Bu amaçla öncelikli olarak, muhtelif boyutlarda ve değişik donatı yüzdelerine sahip kompozit betonarme elemanlar imal edilmiştir. Üretilmiş olan betonarme elemanlar 120\*220 cm plan boyutlarında, normal+hafif beton kalınlıkları sırası ile 5+5 cm, 5+8 cm ve 5+10 cm olmak üzere toplam 3\*8=24 adettir. Karşılaştırma amacıyla, yalnız normal betondan üretilmiş 10, 13 ve 15 cm kalınlıklı ve aynı planlı üç numune ayrıca kırılmıştır.

### **5.3.1. Kompozit betonarme plakların basit eğilme deneyleri**

Üretilmiş olan 24 adet betonarme kompozit numune Şekil 4.11 'de verilmiş olan yükleme düzenine uygun olarak basit eğilme altında kırılmıştır. Kompozit numuneler kırılırken Şekil 4.12 de verilen noktalarda deplasman değerleri okunmuştur. Ayrıca kompozit numunelerin ilk çatlak yükleri ve kırılma anındaki yükleri de tespit edilmiştir.

24 adet kompozit betonarme numunenin 8 'inde çekme kırılması, 8 'inde denge kırılması, 8 'inde ise basınç kırılması olması planlanarak ve hesaplanarak donatılmıştır.

#### **5.3.1.1. Çekme kırılması ile göçmesi beklenen kompozit betonarme plak deneyleri**

Çekme kırılması ile göçmesi planlanan numuneler, üçü 5+5 cm, ikisi 5+8 cm, üçü 5+10cm olmak üzere toplam 8 adettir. Numune üretimine ait resimler Ek 4 Resim 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17 ve 18 de verilmiştir. Numunelere ait deplasman okumaları, numuneye ait teorik kırılma yükünün 1/10 'nundan başlayıp aynı değerde artan yük kademelerinde yapılmıştır.



Deneye tabi tutulan 8 adet numunenin; yalnız normal beton ve kompozit kesit olması haldeki ağırlığı, teorik göçme yükleri ve deneysel göçme yükleri Çizelge 5.16 'da verilmiştir.

Çizelge 5.16. Çekme kırılması yapması planlanan kompozit numunelerin eğilme deneyi teorik ve deneysel göçme yükleri

Numune Adı No (cm+cm)	Normal B. Numune Ağırlığı kN	Kompozit B. Numune Ağırlığı kN	$W_{kom}/W_{nor}$	Teorik Göçme Yüğü $P_{ut}$ (kN)	Deneysel Göçme Yüğü $P_{ue}$ (kN)	$P_{ue}/P_{ut}$
1 No (5+5)	6.60	5.28	0.80	73.92	106.50	1.44
2 No (5+5)	6.60	5.28	0.80	73.92	119.50	1.62
3 No (5+5)	6.60	5.28	0.80	73.92	108.00	1.46
4 No (5+8)	8.58	6.47	0.75	141.58	178.25	1.26
5 No (5+8)	8.58	6.47	0.75	141.58	173.60	1.23
6 No (5+10)	9.90	7.26	0.73	197.50	239.20	1.17
7 No (5+10)	9.90	7.26	0.73	197.50	233.25	1.14
8 No (5+10)	9.90	7.26	0.73	197.50	236.20	1.16

### 5.3.1.2. Denge kırılması ile göçmesi beklenen kompozit betonarme plak deneyleri

Denge kırılması ile göçmesi beklenen 3 adet 5+5 cm, 2 adet 5+8 cm ve 3 adet 5+10 cm kalınlıkta toplam 8 adet 120\*220 cm plan boyutlarında numuneler üretilmiştir. Deney esnasında numunelerde okunan deplasman değerleri, Şekil 4.12 'de belirtilen noktalar için okunmuştur (Ekler: Ek 1.9-1.16). Deplasman okumaları numune teorik kırılma yükünün 1/10 'nundan başlanıp aynı kademede artan değerlerde olmuştur.

Deneye tabi tutulan 8 adet numunenin; yalnız normal beton ve kompozit kesit olması haldeki ağırlığı, teorik ve deneysel göçme yükleri Çizelge 5.17 'de verilmiştir.

Çizelge 5.17. Denge kırılması yapması planlanan kompozit numunelerin eğilme deneyi teorik ve deneysel göçme yükleri

Numune Adı No (cm+cm)	Teorik Göçme Yüğü $P_{ut}$ (kN)	Deneysel Göçme Yüğü $P_{ue}$ (kN)	$P_{ue}/P_{ut}$
9 No (5+5)	102.72	157.90	1.54
10 No (5+5)	102.72	150.45	1.46
11 No (5+5)	102.72	153.50	1.49
12 No (5+8)	198.28	236.50	1.19
13 No (5+8)	198.28	242.00	1.22
14 No (5+10)	281.02	270.65	0.96
15 No (5+10)	281.02	291.85	1.04
16 No (5+10)	281.02	288.60	1.03

### 5.3.1.3. Basınç kırılması yapması beklenen kompozit beton plakların eğilme deneyleri

Basınç kırılması ile göçmesi beklenen 3 adet 5+5 cm, 2 adet 5+8 cm ve 3 adet 5+10 cm olmak üzere toplam 8 adet 120\*220 cm plan boyutlarında numuneler üretilmiştir. Deneylerde deplasmanlar Şekil 4.12 'de belirtilen noktalar için okunmuştur (Ekler: Ek 1.17-1.24). Deplasman okumaları çekme kırılması numunelerine benzer şekilde yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5.18 'de verilmiştir.

Çizelge 5.18. Basınç kırılması yapması planlanan kompozit numunelerin eğilme deneyleri teorik ve deneysel göçme yükleri

Numune Adı No (cm+cm)	Teorik Göçme Yüğü $P_{ut}$ (kN)	Deneysel Göçme Yüğü $P_{ue}$ (kN)	$P_{ue}/P_{ut}$
17 No (5+5)	94.62	220.35	2.33
18 No (5+5)	94.62	168.50	1.78
19 No (5+5)	94.62	183.00	1.93
20 No (5+8)	185.50	241.60	1.30
21 No (5+8)	185.50	250.50	1.35
22 No (5+10)	262.86	295.15	1.12
23 No (5+10)	262.86	275.25	1.05
24 No (5+10)	262.86	288.60	1.10

### 5.3.2. Normal betondan imal edilen betonarme plakların eğilme deneyleri

Çekme kırılması ile göçmesi planlanan üç adet normal betondan imal edilmiş betonarme plağın teorik ve deneysel göçme yükleri Çizelge 5.19 'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.19. Normal beton numunelerin eğilme deneyleri teorik ve deneysel göçme yükleri

Numune Adı No (cm+cm)	Teorik Göçme Yüğü $P_{ut}$ (kN)	Deneysel Göçme Yüğü $P_{ue}$ (kN)	$P_{ue}/P_{ut}$
25 Nolu 5+5	71.88	136.95	1.91
26 Nolu 5+8	140.88	229.00	1.63
27 Nolu 5+10	199.66	294.75	1.48

## 6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 6.1. Agregada Deney Sonuçları

Agregalarla ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalarda Erciyes Dağı volkanik agregasından birim ağırlık  $11.40 \text{ kN/m}^3$  olarak elde edilmiştir. TS1114 de verilen  $<12.00 \text{ kN/m}^3$  değerinden küçük olduğu için hafif agregada sınıfına girmektedir. Hafif agregada su emme değeri kum için %30 ve Ür-Pa çakılı için %28 olarak elde edilmiştir.

### 6.2. Hafif ve Normal Beton için Elde Edilen Deney Sonuçları

Normal betonda C16 olarak planlanan ve üretilen beton için birim hacim ağırlık  $25.00 \text{ kN/m}^3$  bulunmuştur. Elastisite modülleri ise  $26000-30000 \text{ kN/cm}^2$  arasında değişen değerlerde bulunmuştur.

Hafif beton için yapılan deneysel çalışmalarda 350 dozlu beton ile C16 sınıfında beton dayanımı elde edilememiştir (Bkz. Çizelge 5.11). Buna karşın 450 dozlu hafif betonda ise, dayanımın 400 dozlu betona nazaran fazla artmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeble deneysel çalışmalarda C16 sınıfında hafif beton 400 dozlu olarak üretilmiştir.

### 6.3. Normal ve Kompozit Betonarme Plaklarla İlgili Deney Sonuçları

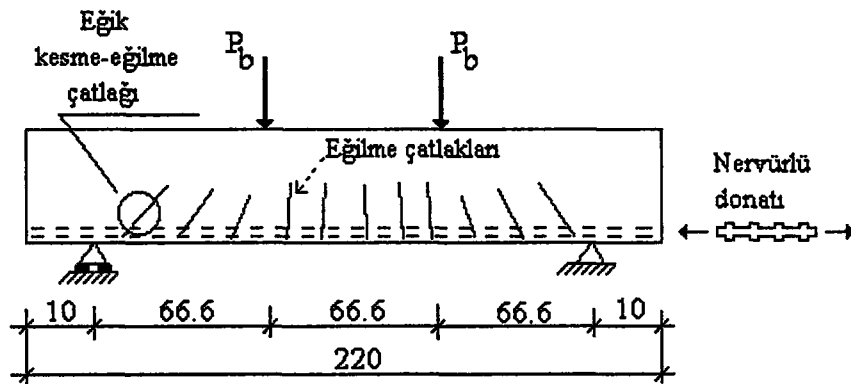
Üretilen 27 adet betonarme plak numune üzerinde basit eğilme deneyleri yapılmıştır (Ekler: Resim 20, 21, 23 ve 24). Numunelerin 24 adedi farklı donatı yüzdelerinde kompozit olarak, diğer 3 tanesi ise sadece normal betondan imal edilmiştir (Ekler: Resim 14, 15, 16, 17 ve 18). Üretilen kompozit betonarme elemanların hafif ve normal beton ara kesitlerinde süreklilik sağlamak amacıyla Resim 16 ve 17 'de verilmiş olan dişler TS3233 de istenilen derinlikte yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda betonarme numunelere ait taşıma güçleri, sehimleri, kırılma biçimleri ve oluşan çatlakları incelenmiştir (Ekler: Resim 22, 24, 25, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37 ve 38).

### 6.3.1. Taşıma gücü

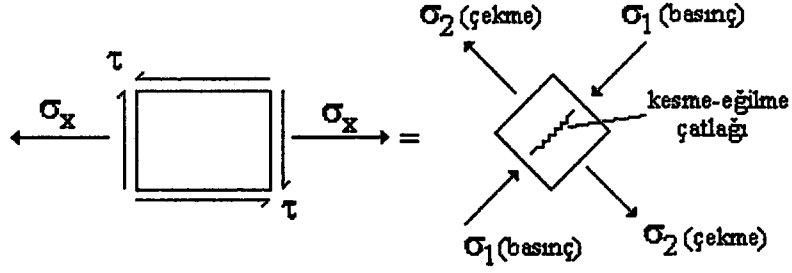
Kompozit betonarme elemanlarda kesit yüksekliği arttıkça deneysel göçme yükü teorik göçme yüküne yaklaşmaktadır. Aynı kalınlık ve donatı oranı için  $P_{ue}/P_{ut}$ , taşıma gücünün deneysel ve teorik değerleri oranı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Beklenildiği gibi, tamamı normal betondan imal edilmiş olan betonarme plaklarda deneysel göçme yükü daha yüksek olmaktadır. Kompozit kesitlerde artan kesme kuvveti karşısında hafif betonun normal betona göre daha dayanıklı olmadığı gözlenmektedir. Deneylerde özellikle 15 cm 'lik numunelerde kesme kırılması kendini hissettirmektedir (Ekler: Resim 37 ve 38). Deney numuneleri için yük-deplasman eğrileri de çizilmiştir; deplasman olarak ölçülen orta nokta sehimleri alınmıştır (Ekler: Ek2). Yük-deplasman eğrileri yapı elemanlarının davranışını yorumlamak için değer arz etmektedir.

### 6.3.2. Plaklarda çatlama ve çatlak düzeni

Eğilme çekme çatlaklarının ilk maksimum eğilme momenti bölgesinde meydana gelmesi beklenir. Yükleme başlangıcından itibaren çatlaklar kılcal düzeyde olup görülmeleri son derece zordur. Yükün şiddeti artırdıkça oluşan çatlakların boyu ve genişliği artmaya başlar. Ayrıca yeni çatlaklarda görülebilir. Çatlakları ve gelişimini kolayca izleyebilmek için çatlaklar kırmızı keçe kalem ile deney sırasında işaretlenmiştir. Basit eğilme bölgesinde gözlenen çatlaklar eleman eksenine dik yönde meydana gelmektedir (Ekler: Resim 33 ve 34). Kesmeli eğilme bölgelerinde çatlaklar, çekme asal gerilmelerine dik olarak eğikleşir (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2).



Şekil 6.1. Deney plaklarında tipik çatlak düzeni



Şekil 6.2. Kesmeli eğilme bölgesinde asal gerilmeler

Yapılan deneylerde çatlakların beklenildiği gibi meydana geldiği gözlenmiştir; basit eğilme etkisindeki orta bölgede eğilme eksenine dik çekme çatlakları, yükler ile mesnetler arasındaki kesme-eğilme bölgelerinde ise eğik çatlaklar oluşmuştur. Bazı numunelerde, özellikle kalınlığın artması ile kesme deformasyonlarının etkinlik kazandığı ve bazı numunelerde aderans sıyrılmasını çağrıştıran kesme-eğilme çatlakları gözlenmiştir (Ekler:Resim 37-38).

Normal betonda basınç dayanımının, genellikle, kaba agreganın dayanımından daha düşük olması nedeni ile, nihai dayanım harç dayanımına bağlıdır. Hafif betonda, agreganın dayanımının ya harç dayanımına eşit yada onun altında olması sebebi ile beton dayanımı agreganın dayanımına kontrol edilir. Kesme dayanımı nispeten düşük hafif agregalı beton elemanlarda kesme-eğilme çatlaklarının, bağıl olarak daha çok açılması beklenir; gözlenen çatlak durumu bunu doğrulamaktadır.

## 7. SONUÇLARIN YORUMU VE ÖNERİLER

1. Bu çalışmada kullanılan Erciyes Dağı volkanik tüfü TS1114 'de tanımlanan hafif agrega sınıfına girmektedir. Bu agrega C16 kalitesinde yapısal beton üretmenin mümkün olduğu görülmüştür.

2. Bununla beraber normal beton ile elde edilebilen C16 ile Young modülü  $E \approx 26000 \sim 30000 \text{ N/mm}^2$  mertebesinde ölçülmüşken, aynı kalitedeki hafif betonda bunun ancak yaklaşık 1/3 'ü mertebesinde,  $E \approx 8000 \sim 10000 \text{ N/mm}^2$  değerleri bulunmuştur; elastisite modülü normal betona nispetle ancak üçtebiri kadardır. Buna karşın basınç bölgesi hafif beton tabakada bulunan plak eğilme deneyleri yük-sehim diyagramları incelenir ise (Ek 2.1), kompozit plak eğilme rijitliğinin 5+5 cm kalınlıklı plaklarda normal beton plağınkine nispetle yaklaşık yarıya düştüğü görülmektedir. Yani, eğilme rijitliğindeki azalma elastisite modülündeki düşmeden daha küçük oranlarda gerçekleşmektedir.

3. Kompozit plaklarda normal-hafif beton tabakaları derzinin davranışı, kenetlenme yönünden tatminkâr bulunmuştur. Normal-hafif beton derzinin, bu çalışmada denendiği gibi, ortalama 4-6 mm pürüzlendirilmesi yeterli olacaktır. Bununla beraber, tekrarlı, özellikle tersinir yükler hâlinde elemanın mesnetlerine yakın bölgelerinde tabakaları birbirlerine özel etriyelerle bağlamak düşünülebilir.

4. Özellikle çekme kırılması elemanlarının davranışı (Çizelge 5.16 ve 5.19, Ek 2.1) anlamlıdır; tamamı normal beton olan plak elemana nispetle;

- a. Az kalınlıklı (5+5 cm) elemanlarda akma dayanımları pratik olarak aynı kalmaktadır;
- b. Orta kalınlıktaki (5+8 cm) elemanlarda yaklaşık %20-25 daha düşüktür;
- c. Nispeten kalın elemanlarda (5+10 cm), keza %20 kadar daha düşüktür.

5. Buna mukabil, teorik taşıma gücü, özellikle kalınlığı bağıl olarak düşük kompozit plaklarda %45-60 daha düşük tahmin edilmektedir; denenen az donatılı plakların hemen hepsinde, bu yönden artı bir kapasite gözükmemektedir. Önceki şıktaki değerlendirme bu

tespitle birlikte yorumlanınca, kompozit plakların bu noktalarda önemli bir eksikliğin bulunmadığı anlamı çıkar.

Bu son iki husus, pratikte çekme kırılması davranışında plakların kullanılmakta oluşu dikkate alınca ayrıca önemlidir.

6. Kompozit plak kullanmakla yapı kendi ağırlığında %20-30 azalma söz konusu olmaktadır. Normal betona nispetle yapımının güçlüğü aşıldığı nispette, bu tür inşaatla ekonomi sağlanacağı açıktır.

7. Hesaplarda öngörüldüğü gibi, çekme kırılması planlanan elemanlar, büyük deplasmanlar yaparak; dengeli ve basınç kırılması planlanan elemanlar, tipik davranış biçimleri sergileyerek kırılmışlardır.

8. Hafif beton ve kompozit beton plak ve duvar panellerinin sağlayacağı ısı yalıtım kapasitesi artı bir özelliği olarak gözönünde tutulmaya değer bulunmaktadır.

9. Kompozit plak taşıma gücü hesabı için kullanılan parametrelerin ( $\epsilon_{cu}=0.002$ ,  $k_1=0.85$ ,  $k_3=0.80$ ) yeterince gerçekçi olduğunu, bu çalışmada denenilen 24 kompozit numunenin hemen tamamı doğrulamaktadır.

10. Bu çalışmada incelenen kesit kompozisyonunda, basınç bölgesi hafif beton kompozit betonarme plakların, betonarme donatısını saran normal beton tabakası ile prekast olarak imal edildikten sonra, yapılarda kalıp gerektirmeden kullanılabileceği ve yerinde döküm hafif beton ile tamamlanabileceği düşünülmektedir.

11. Kompozit plakların tam kesit normal beton plaklara nispetle kesme mukavemeti açık bir şekilde düşüktür (Resim 25, 27, 28, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 38). Bu nedenle kesme mukavemeti önemli olabilecek hallerde dikkatle kullanılması, örneğin donatı ile tedbir alınması gerekir.



12. Doğrudan doğruya tam kesit hafif beton elemanların da kullanılması mümkündür. Ancak, bu tür elemanların gerekli plak rijitliğini sağlamakta, kompozit plaklara nispetle daha büyük zaaf göstereceği kompozit plaklar için ek I de verilen deplasman okumalarının sınır değerlere çok yakın olmasından tespit edilmiştir. Ayrıca donatının oksidasyonuna karşı normal beton ölçüsünde koruma sağlayamayabileceği, dolayısıyla dayanıklılık yönünün incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

13. Basınç bölgesi normal beton olan iki ve üç tabakalı kompozit eğilme panellerinin ve plakların incelenmesi, önemli bir taşıma gücü ve rijitlik kaybının meydana gelip gelmeyeceğini tespit bakımından anlamlı bir çalışma olabilir.



**KAYNAKLAR**

Abdullayey, A. G., Yılmaz, C., (6-8 April 1996) Thermal Expansion Behaviour of Three-Layer Composite Plates, Bahrain Conference Center, ICCE-96, pp. 1-7, Universty of Bahrain, BAHRAIN.

ACI Committee 224, (1972), "Control of Cracking in Concrete Structures", pp. 717-750, ACI Journal.

ACI 318-83, Building Code Reguierements for Reinforced Concrete, Reported by ACI Committee.

Açıkel, H., (1995), "Karapınar Volkanik Agregasından (TS 4047' ye uygun) Hazır Döşeme ve Çatı Plakları İmali", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KONYA.

Akman, M. S., Taşdemir, M. A., (20-22 Aralık 1977), Taşıyıcı Malzeme Olarak Perlit Betonu, S. 40-48, I. Ulusal Perlit Kongresi, ANKARA.

Akman, M. S., (1987), "Yapı Malzemeleri", İTÜ İnşaat Fakültesi Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İSTANBUL.

Akman, M.S., (1990), "Yapı Malzemeleri ", İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.

Akyüz, S., (1976), "Kompozit Malzeme Olarak Betondaki Elastik Bölgede Fazlar Arası Etkileşmenin Sayısal Bir Yöntemle İncelenmesi" Doktora Tezi, İTÜ.

Arda, T.S., ve Yardımcı, N., (1991), Çelik Yapıda Karma Elemanların Plastik Hesabı, Kurtiş Matbaası, İSTANBUL.

Argunhan, E., (1984 Ocak), "Ponza Taşı ile Üretilen Taşıyıcı Hafif Betonarme Elemanların Özelliklerine Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Etkisinin Araştırılması", İTÜ, Master Tezi, İSTANBUL.

Associates, R.B., (1988 April), "Recommended Practice For Precast Prestressed Concrete Composite Bridge Deck Panels", P.P. 67-89., PCI Journal.

Atan, Y., (1980), "Kompozit Malzeme Olarak Normal ve Hafif Betonların Zamana Bağlı Davranışı", İTÜ, Doktora Tezi, İSTANBUL.

Aydemir, M., (1980), "Kesikli Granülometrili Hafif Betonların Şekil Değişirme ve Kırılma Özellikleri" İTÜ İnşaat Fakültesi, Bitirme Ödevi.

Baradan, B., (1985), "Uçucu Kül ve Kula Cürüflü Malzemenin Özellikleri", Türkiye İnşaat Mühendisliği 8. Teknik Kongresi, S.251-262, ANKARA.

Bate SCC., (1980), "The International Journal of Lightweight Concrete", Volume 2, Number 4.

Berktaş, İ., (Ekim 1989), Betonarme I Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları, TMMOB İnşaat Mühendisler Odası İstanbul Şubesi, İSTANBUL.

Berktaş, İ., (1992), Plak Teorisi ve Uygulamaları (Küçük Şehirli İnce Plaklar), Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İSTANBUL.

Berktaş, İ., (1988), Betonarme Plaklarda Kırılma Çizgileri teorisi ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İSTANBUL.

Brodda, R., Weber, J. W., (1977), "Leicht und Normal Betone mit Ausfallkörnung und Stetiger Sieblinie", No: 9, s.: 340-342. Beton

BS 8110, (1985), "British Standard Structural Use of Concrete", Part 1, Part 2 and Part3.

Celep, Z., Kumbasar, N., (1996), "Betonarme Yapılar", Sema Matbaacılık, İSTANBUL.

Çetmeli, E., (1981), Yeni Alman Betonarme Şartnamesi (DIN 1045-1978), Betonarme Hesap Esasları, Kesitlerin Boyutlandırılması ve Donatının Yerleştirilmesi, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İSTANBUL.

Dipl. Ing. Heufers, H., (1972/73) "Stahlleichtbeton, Spannleichtbeton Zement Tashenbuch", Bauverlag GmbH, pp. 347-372, Wiesbaden, BERLIN.

Durmuş, A., (1985), "Betonarme İnşaat Hafif Betonlar", Türkiye İnşaat Mühendisliği 8. Teknik Kongresi, S.263-274, ANKARA.

Elliott, K.S., (1996), "Multi-Storey Precast Concrete Framed Structures, Composite Construction", Chapter 6, Published, ENGLAND

Erciyas, Y., (1963), "Bims ve Bims Betonu Üzerine Araştırmalar", İmar ve İskan Bakanlığı Yayınları, No. 5-17., ANKARA

Ersoy, U., (1987), "Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı", 2. Basım, İSTANBUL.

Eurocode No. 2, (1990), "Design of Concrete Structures".

Ferguson, Phil. M., Been, John E., Jirsa, James O., (1988), Reinforced Concrete Fundamentals (Fifth Edition), Çağlayan Kitabevi, İSTANBUL.

Floyd, O. Slate, Arthur, H. Nilson and Salvador, Martinez, (August 1986), Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete, ACI Journal.

Gündüz, A., (1980), Betonarme Taşıma Gücü İlkesine Göre Hesap, Birinci Baskı, Kazmaz Matbaası, Çağaloğlu, İSTANBUL.

Güral, M., (1983), "A Comparative Study on Reinforced Concrete Lightweight Roof Decks", Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İSTANBUL.

Hobbs, D.W., (1971), The Dependence of the Bulk Modulus, Young's Modulus, Creep, Shrinkage and Thermal Expansion of Concrete Upon Aggregate Volume Concentration, *Materials and Structures*, Vol. 4, No. 20, pp. 107-114.

Hüsem, M., (1997), "Doğal Hafif Agregalarla Üretilen Hafif Betonların Bazı Özelliklerinin Geleneksel Bir Betonunkilerle Karşılaştırılması Olarak İncelenmesi", Makale, Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi, İZMİR.

İnan, M., (1984) " Cisimlerin Mukavemeti ", İTÜ İnşaat Fakültesi, 5. Baskı, İSTANBUL.

Johnson, R.P., and Anderson, D., (1993), *Designer' Handbook to Eurocode 4, Great Britain* By Redwood Books, Trowbridge, LONDON.

Kayan, İ., (1987), " Cisimlerin Mukavemeti ", İTÜ Matbaası, Sayı. 1334, Gümüşsuyu, İSTANBUL

Kong, F.K., Evans, R.H., (1987), *Reinforced and Prestressed Concrete, Low Priced Edition*, LONDON.

Neville, A. M., (1975), "Properties of Concrete", Pitmann Publishing, LONDON.

Özay, R., (Ekim 1988), "Hafif Taşıyıcı Betonarme Elemanların Depreme Dayanıklılığı" Yüksek Lisans Tezi, İnş Uz486, İTÜ.

PCI Bridge Producers Committee, (April 1988), *Recommended Practice for Precast Prestressed Concrete Composite Bridge Deck Panels*, PCI Journal.

Soon, Ho Cho and Richard, G. Redwood, (September 1992), *Slab Behavior in Composite Beams At Openings. I: Analysis*, ASCE.

Soon Ho Cho and Richard G. Redwood, September 1992, "Slab Behavior in Composite Beams At Openings. II: Tests and Verification", ASCE.

Taşdemir, M.A., (1981), "Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları", İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, Doktora Tezi, İSTANBUL.

Taylor, R., (1979), *Composite Reinforced Concrete*, Thomas Telford Limited, LONDON.

Topçu, İ. B., (Mart 1988), "Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi", İTÜ Doktora Tezi, İSTANBUL.

Topçu, İ.B., Dönmez, H., (1996), *Volkanik Cüruflarla Üretilen Yarı Hafif Betonların Özellikleri*, IX. Mühendislik Sempozyumu, Süleyman Demirel Üniversitesi, S.95-99, İSPARTA,

Türkiye Pomza Taşı Semineri, (1988), İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, İSTANBUL.

TS 1248, (1973), "Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları", (Anormal Hava Kaşullarında), T.S.E.

TS 1114, (1976), "Hafif Agregalar", (Beton İçin), T.S.E.

TS 2511,(1977), "Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesapları", T.S.E.

TS 2823, (1977), "Bims Betondan Mamul Yapı Elemanları", T.S.E.

TS 2871, (1977), "Taze Beton Kıvam Deneyi", T.S.E.

TS 2940, (1978), "Taze Beton'dan Numune Alma Metodları", T.S.E.

TS 3068, (1978), "Laboratuvarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı", T.S.E.

TS 3233, (1979), "Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", T.S.E.

TS 3234, (1978), "Bimsbeton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları", T.S.E.

TS 3351, (1979), "Şantiyede Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı", T.S.E.

TS 3624, (1981), "Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu ", T.S.E.

TS 3114, (1990), "Beton Basınç Mukavemetinin Tayini", T.S.E.

TS 10465, (1992), "Beton Deney Metodları, Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini", T.S.E.

TS 500, (Şubat 1985), "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA.

Yorgun, C., Yardımcı, N., Arda, T.S., (1995), "Çelik Beton Kompozit Döşeme Plaklarının Taşıma Yüğü", IX. Ulusal Mekanik Kongresi, ÜRGÜP.

Wesche, K., (1974), Baustoffe Für Tragende Bauteile, Band 2, Bauverlag Gmbh, Wiesbaden, STUTTGART.

**EKLER****Ek 1. Numunelere ait okunan deplasman değerleri****Ek 1.1. 5+5 cm 1 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
5.00	35	26	15	23	14
10.00	59	47	25	40	50
15.00	79	70	35	52	95
20.00	87	79	39	57	120
25.00	119	117	53	82	275
30.00	141	145	64	100	415
35.00	159	174	71	112	550
40.00	174	202	82	128	697
45.00	182	225	91	140	810
50.00	204	255	101	155	945
55.00	218	275	112	168	1077
60.00	239	280	126	186	1247
65.00	248	282	134	196	1350
70.00	265	293	152	218	1553
75.00	274	313	174	243	1705
80.00	289	334	188	260	1867
85.00	303	351	200	274	2012
90.00	311	357	210	286	2135
95.00	327	381	225	304	2314
100.00	351	415	242	323	2410
105.00	404	471	280	350	2620
106.50	515	640	355	440	3960

**Göçme yükü : 106.50 kN****İlk çatlak yükü : 98.50 kN**

Ek 1.2. 5+5 cm 2 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
5.00	29	21	22	35	37
10.00	48	38	36	52	66
15.00	64	51	49	67	98
20.00	80	70	62	82	134
25.00	99	88	75	94	193
30.00	128	120	88	110	310
35.00	169	169	105	134	475
40.00	184	186	115	141	534
45.00	200	204	124	149	604
50.00	224	229	137	163	700
55.00	246	255	149	175	793
60.00	267	284	160	188	902
65.00	286	304	172	199	994
70.00	312	334	187	213	1102
75.00	338	363	202	226	1230
80.00	359	385	216	239	1341
85.00	381	396	231	250	1446
90.00	403	425	245	264	1557
95.00	426	450	263	288	1674
100.00	447	466	277	306	1790
105.00	476	489	298	330	1890
110.00	496	512	310	340	2005
115.00	527	530	334	355	2340
119.50	666	730	417	415	3600

Göçme yükü : 119.50 kN

İlk çatlak yükü : 97.50 kN

**Ek 1.3. 5+5 cm 3 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
5.00	26	18	19	27	22
10.00	45	35	23	40	57
15.00	66	48	37	50	93
20.00	82	67	40	63	118
25.00	105	85	50	75	219
30.00	133	123	60	97	340
35.00	158	165	75	108	505
40.00	175	182	88	127	563
45.00	197	205	103	142	640
50.00	209	233	110	156	725
55.00	230	260	119	170	840
60.00	247	282	137	185	970
65.00	260	290	148	193	1110
70.00	283	306	168	214	1200
75.00	298	327	176	232	1360
80.00	322	349	197	243	1515
85.00	348	367	210	262	1720
90.00	387	380	225	275	1925
95.00	405	409	233	290	2200
100.00	430	445	256	317	2310
105.00	457	475	287	335	2420
108.00	520	545	320	380	3940

Göçme yükü : 108.00 kN

İlk çatlak yükü : 97.00 kN



**Ek 1.4. 5+8 cm 4 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	30	28	26	29	48
20.00	58	63	43	45	82
30.00	82	85	60	61	117
40.00	117	116	80	83	160
50.00	149	155	100	110	180
60.00	187	192	140	143	225
70.00	225	228	173	178	276
80.00	240	260	195	211	315
90.00	267	295	229	233	400
100.00	300	317	275	270	477
110.00	330	348	290	292	560
120.00	363	380	305	312	600
130.00	392	415	318	333	660
140.00	420	462	355	365	750
150.00	473	519	392	380	940
160.00	540	573	405	412	1015
170.00	590	610	417	420	1280
178.25	618	633	425	432	1470

Göçme yükü

: 178.25 kN

İlk çatlak yükü

: 147.60 kN

## Ek 1.5. 5+8 cm 5 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	33	20	32	28	48
20.00	55	43	43	40	100
30.00	80	68	60	55	167
40.00	115	105	90	80	180
50.00	160	143	98	100	217
60.00	195	190	117	120	245
70.00	210	208	143	150	280
80.00	260	250	175	170	300
90.00	293	300	200	198	360
100.00	317	320	230	217	418
110.00	348	360	270	263	470
120.00	397	410	320	287	530
130.00	418	440	405	340	618
140.00	460	495	463	415	710
150.00	510	550	520	487	820
160.00	595	607	598	563	935
170.00	630	655	620	610	1180
173.60	677	690	675	647	1315

Göçme yükü

: 173.60 kN

İlk çatlak yükü

: 132.85 kN

## Ek 1.6. 5+10 cm 6 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	8	15	35	48	43
20.00	27	23	72	90	81
30.00	43	32	104	136	114
40.00	69	40	186	220	173
50.00	94	41	203	248	226
60.00	116	64	222	268	280
70.00	142	95	245	300	350
80.00	142	125	264	327	423
90.00	160	157	296	362	501
100.00	187	190	322	393	580
110.00	227	233	365	424	673
120.00	261	253	406	455	765
130.00	269	290	440	510	855
140.00	269	315	468	521	933
150.00	294	341	495	553	1005
160.00	319	365	510	578	1085
170.00	354	395	552	618	1159
180.00	378	416	582	648	1262
190.00	403	441	606	672	1350
200.00	434	471	640	706	1460
210.00	467	508	680	745	1590
220.00	502	549	725	791	1753
230.00	523	575	759	815	1880
239.20	577	645	824	855	2260

Göçme yükü : 239.20 kN

İlk çatlak yükü : 167.50 kN

**Ek 1.7. 5+10 cm 7 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	39	20	27	50	46
20.00	66	35	40	72	72
30.00	86	53	56	90	96
40.00	111	70	72	107	124
50.00	136	95	86	123	157
60.00	162	112	100	140	203
70.00	189	133	115	155	254
80.00	219	145	129	174	307
90.00	234	165	148	192	367
100.00	236	190	165	210	424
110.00	261	203	182	227	483
120.00	276	227	199	243	544
130.00	297	242	215	260	592
140.00	323	245	232	280	651
150.00	345	260	250	297	710
160.00	364	278	272	316	768
170.00	393	295	304	343	824
180.00	424	330	330	362	901
190.00	449	355	349	383	965
200.00	468	370	372	402	1020
210.00	499	387	399	425	1096
220.00	521	410	427	448	1180
230.00	521	428	461	482	1700
233.25	537	435	480	490	1950

Göçme yükü : 233.25 kN

İlk çatlak yükü : 216.00 kN

Ek 1.8. 5+10 cm 8 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	15	14	36	33	40
20.00	33	21	73	69	75
30.00	57	30	100	96	110
40.00	87	42	119	117	142
50.00	108	53	167	148	193
60.00	135	72	190	188	218
70.00	163	106	220	223	269
80.00	190	130	245	253	312
90.00	210	162	267	277	410
100.00	223	187	282	293	480
110.00	247	220	317	326	540
120.00	268	243	329	347	592
130.00	282	262	365	378	640
140.00	285	282	400	411	720
150.00	317	322	420	437	790
160.00	342	317	466	473	840
170.00	369	343	487	490	930
180.00	402	387	506	500	1020
190.00	419	402	542	533	1112
200.00	447	423	567	570	1200
210.00	482	463	589	590	1320
220.00	519	497	604	609	1440
230.00	522	517	618	612	1820
236.20	543	529	622	618	2100

Göçme yükü : 236.20 kN

İlk çatlak yükü : 197.60 kN

**Ek 1.9. 5+5 cm 9 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	57	38	32	60	57
20.00	96	66	50	76	117
30.00	148	109	75	99	230
40.00	190	150	100	123	354
50.00	232	200	130	151	501
60.00	272	250	161	180	643
70.00	321	291	190	207	777
80.00	359	341	241	245	961
90.00	413	363	295	285	1142
100.00	473	415	348	328	1347
110.00	532	451	399	368	1553
120.00	568	500	450	398	1754
130.00	633	541	505	435	1987
140.00	690	596	553	465	2233
150.00	766	645	610	500	2571
157.90	867	741	680	548	3050

Göçme yükü : 157.90 kN

İlk çatlak yükü : 85.00 kN

Ek 1.10. 5+5 cm 10 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	29	28	22	42	66
20.00	59	57	39	65	110
30.00	112	109	69	88	258
40.00	163	159	98	116	412
50.00	206	215	130	149	576
60.00	251	269	160	190	756
70.00	301	309	199	227	931
80.00	344	351	232	258	1093
90.00	399	405	275	320	1303
100.00	451	442	320	365	1513
110.00	505	494	361	405	1744
120.00	569	544	393	440	1993
130.00	634	590	520	490	2251
140.00	707	665	572	565	2463
150.00	818	742	655	647	2890
150.45	868	778	670	660	3560

Göçme yükü : 150.45 kN

İlk çatlak yükü : 96.50 kN

## Ek 1.11. 5+5 cm 11 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	33	22	25	48	50
20.00	67	49	42	73	105
30.00	105	88	73	92	208
40.00	172	135	95	119	340
50.00	217	197	135	153	480
60.00	263	240	162	179	620
70.00	315	285	218	218	793
80.00	348	340	240	240	980
90.00	405	377	287	300	1220
100.00	462	427	328	347	1420
110.00	517	473	382	388	1615
120.00	555	518	417	435	1840
130.00	622	565	510	480	2140
140.00	700	603	567	540	2345
150.00	779	720	640	610	2840
153.50	818	782	670	640	3110

Göçme yükü

: 153.50 kN

İlk çatlak yükü

: 88.60 kN



## Ek 1.12. 5+8 cm 12 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	60	58	22	18	43
20.00	105	100	40	38	86
30.00	130	125	65	60	120
40.00	173	171	90	87	163
50.00	210	200	120	115	197
60.00	248	233	143	140	220
70.00	283	271	175	169	248
80.00	310	300	220	200	290
90.00	360	340	245	217	327
100.00	405	382	297	263	405
110.00	463	425	325	297	465
120.00	500	480	357	315	520
130.00	533	503	389	368	595
140.00	568	547	417	405	705
150.00	593	581	443	430	890
160.00	620	610	477	465	1010
170.00	643	627	500	497	1160
180.00	660	643	523	515	1297
190.00	682	671	548	533	1340
200.00	700	690	577	568	1365
210.00	715	705	595	590	1390
220.00	728	718	607	600	1420
230.00	740	735	640	630	1430
236.50	762	745	663	650	1438

Göçme yükü : 236.50 kN

İlk çatlak yükü : 163.90 kN

**Ek 1.13. 5+8 cm 13 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.292	No.3	No.4	No.5
10.00	53	48	20	23	45
20.00	97	92	35	38	70
30.00	105	103	60	67	113
40.00	130	117	83	89	142
50.00	195	178	105	110	180
60.00	227	223	133	140	210
70.00	275	267	162	170	233
80.00	305	300	200	210	282
90.00	340	332	240	250	305
100.00	390	378	270	273	392
110.00	415	405	300	310	420
120.00	490	473	340	348	500
130.00	510	505	375	383	570
140.00	547	533	400	407	690
150.00	572	562	435	440	860
160.00	605	600	460	465	980
170.00	630	617	493	500	1100
180.00	647	640	508	513	1250
190.00	670	655	533	538	1300
200.00	693	673	560	565	1370
210.00	703	692	583	589	1400
220.00	717	705	600	607	1430
230.00	729	718	623	630	1467
240.00	750	743	650	660	1489
242.00	770	760	687	693	1503

**Göçme yükü : 242.00 kN****İlk çatlak yükü : 178.60 kN**

## Ek 1.14. 5+10 cm 14 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	62	25	7	55	37
30.00	92	50	23	90	78
45.00	125	70	37	120	105
60.00	154	92	49	145	140
75.00	182	111	55	170	181
90.00	219	141	80	202	242
105.00	249	165	98	230	299
120.00	279	180	124	255	356
135.00	321	202	157	290	435
150.00	339	203	160	305	472
165.00	372	210	185	330	537
180.00	407	227	211	360	607
195.00	415	244	258	400	684
210.00	444	269	279	435	763
225.00	469	295	310	465	846
240.00	487	301	325	480	881
255.00	547	333	357	525	992
270.00	592	371	389	555	1102
270.65	614	395	460	580	1460

Göçme yükü : 270.65 kN

İlk çatlak yükü

: Ani göçme gözlemlendi

Ek 1.15. 5+10 cm 15 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	80	41	23	37	41
30.00	150	83	48	70	83
45.00	175	149	67	110	143
60.00	190	152	78	112	152
75.00	215	175	90	125	189
90.00	259	185	114	155	250
105.00	275	195	132	185	319
120.00	308	210	151	202	374
135.00	343	222	170	225	432
150.00	374	250	197	255	513
165.00	407	269	226	286	590
180.00	432	286	256	320	660
195.00	456	311	282	347	735
210.00	424	328	306	371	898
225.00	499	353	326	404	994
240.00	525	377	356	424	1071
255.00	574	404	383	450	1177
270.00	615	433	416	479	1289
285.00	665	461	448	506	1412
290.00	681	472	457	516	1463
291.85	698	477	468	527	1512

Göçme yükü : 291.85 kN

İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi

**Ek 1.16. 5+10 cm 16 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	75	33	15	43	33
30.00	110	67	22	82	75
45.00	140	85	53	100	130
60.00	173	117	62	122	147
75.00	210	143	87	148	175
90.00	235	167	105	167	220
105.00	265	182	117	200	300
120.00	285	197	142	225	360
135.00	330	217	167	260	415
150.00	355	242	189	300	500
165.00	392	260	215	327	560
180.00	419	283	247	355	640
195.00	440	305	273	382	710
210.00	460	320	297	415	860
225.00	487	347	315	443	970
240.00	512	370	345	470	1100
255.00	565	392	370	500	1190
270.00	610	415	400	550	1280
285.00	640	440	430	570	1400
288.60	653	483	445	583	1490

**Göçme yükü : 288.60 kN İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi**

## Ek 1.17. 5+5 cm 17 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	48	25	14	50	67
20.00	82	51	14	76	120
30.00	106	74	30	98	172
40.00	135	110	55	125	252
50.00	165	145	73	151	352
60.00	201	191	106	180	462
70.00	226	223	132	208	563
80.00	254	258	162	235	677
90.00	274	276	196	278	795
100.00	302	318	235	315	918
110.00	325	356	262	350	1031
120.00	350	395	300	382	1140
130.00	379	442	340	415	1283
140.00	401	484	370	446	1414
150.00	430	521	405	471	1541
160.00	460	558	435	500	1710
170.00	490	600	470	530	1830
180.00	520	642	505	560	1981
190.00	550	685	550	594	2053
200.00	605	784	620	625	2360
210.00	670	891	722	682	2607
220.00	715	1002	753	740	2930
220.35	728	1020	775	763	3960

Göçme yükü

: 220.35 kN

İlk çatlak yükü

: Ani göçme gözlendi

**Ek 1.18. 5+5 cm 18 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	40	25	42	38	64
20.00	76	52	65	63	134
30.00	100	81	89	87	214
40.00	121	109	123	112	312
50.00	145	144	170	140	458
60.00	172	181	206	170	596
70.00	194	215	240	196	712
80.00	225	250	271	222	842
90.00	250	282	300	244	998
100.00	290	324	338	275	1125
110.00	321	361	377	320	1270
120.00	342	394	412	350	1420
130.00	366	437	464	390	1604
140.00	390	476	514	429	1760
150.00	425	531	574	476	1990
160.00	460	597	615	522	2340
168.50	530	738	733	620	3190

Göçme yükü : 168.50 kN İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlendi

**Ek 1.19. 5+5 cm 19 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	43	30	30	25	58
20.00	75	53	47	40	127
30.00	100	83	73	70	170
40.00	138	118	110	112	240
50.00	170	147	147	149	347
60.00	187	182	189	185	430
70.00	218	210	220	218	540
80.00	247	240	260	265	637
90.00	263	265	288	295	768
100.00	298	300	320	315	900
110.00	317	342	368	360	1000
120.00	342	380	400	390	1120
130.00	368	427	444	430	1250
140.00	400	462	500	490	1597
150.00	418	510	560	518	1710
160.00	447	543	595	582	1950
170.00	480	587	610	612	2520
180.00	510	605	627	635	2980
183.00	548	618	640	648	3410

**Göçme yükü : 183.00 kN İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi**



## Ek 1.20. 5+8 cm 20 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	62	65	15	18	40
30.00	93	90	20	22	60
45.00	117	120	33	35	82
60.00	150	155	47	46	105
75.00	175	182	58	55	140
90.00	190	193	77	82	195
105.00	205	208	105	110	343
120.00	220	226	120	130	470
135.00	235	238	142	147	625
150.00	275	287	168	172	887
165.00	300	305	190	200	1000
180.00	340	347	237	242	1205
195.00	370	385	260	268	1368
210.00	405	410	283	292	1709
225.00	440	453	305	310	2160
240.00	472	482	347	360	2630
241.60	490	498	360	369	2710

Göçme yükü : 241.60 kN

İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi

**Ek 1.21. 5+8 cm 21 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	55	52	20	17	45
30.00	90	87	28	26	70
45.00	120	118	35	32	90
60.00	150	162	59	55	117
75.00	190	205	62	59	162
90.00	210	219	90	87	218
105.00	240	267	110	103	367
120.00	267	302	132	122	502
135.00	293	325	147	140	640
150.00	317	367	175	169	870
165.00	342	389	200	205	1110
180.00	377	410	242	250	1260
195.00	400	427	270	275	1427
210.00	418	443	292	300	1810
225.00	460	475	310	315	2270
240.00	493	510	350	362	2810
250.50	502	527	372	385	2927

Göçme yükü : 250.50 kN

İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi

## Ek 1.22. 5+10 cm 22 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	55	25	18	32	31
30.00	83	46	38	38	60
45.00	110	65	58	56	92
60.00	138	85	77	74	123
75.00	158	100	96	92	147
90.00	179	115	116	112	179
105.00	201	136	139	131	221
120.00	210	152	160	150	256
135.00	220	169	183	175	299
150.00	230	190	212	203	347
165.00	250	209	237	223	398
180.00	270	225	259	240	442
195.00	290	245	285	260	493
210.00	312	265	318	289	544
225.00	328	268	345	311	603
240.00	345	305	363	325	641
255.00	370	323	392	350	706
270.00	395	340	423	385	763
275.00	417	347	445	410	816
295.15	424	358	459	414	843

Göçme yükü : 295.15 kN İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi

Ek 1.23. 5+10 cm 23 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	60	8	8	34	33
30.00	90	16	11	49	55
45.00	120	30	24	60	69
60.00	146	46	37	76	97
75.00	170	59	52	100	121
90.00	200	78	69	125	170
105.00	210	99	90	141	214
120.00	230	120	110	157	255
135.00	248	140	129	175	303
150.00	270	160	153	203	362
165.00	294	180	177	222	417
180.00	320	204	218	250	477
195.00	343	217	243	274	526
210.00	355	227	267	308	583
225.00	373	250	286	330	642
240.00	395	254	313	357	709
255.00	407	270	328	381	764
270.00	427	310	367	430	852
275.25	443	333	385	448	873

Göçme yükü : 275.25 kN İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi

Ek 1.24. 5+10 cm 24 Nolu plak deneyi okumaları

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	50	18	15	33	30
30.00	80	33	23	47	62
45.00	108	42	42	55	75
60.00	135	70	53	70	110
75.00	153	93	80	98	133
90.00	168	105	110	103	170
105.00	193	130	130	125	210
120.00	205	145	148	140	247
135.00	218	160	175	167	300
150.00	243	183	205	195	340
165.00	250	195	220	215	405
180.00	269	220	248	230	468
195.00	285	233	267	250	512
210.00	300	250	300	273	567
225.00	320	265	330	300	627
240.00	345	300	345	318	683
255.00	365	318	390	340	742
270.00	385	330	408	377	817
285.00	400	340	435	400	843
288.60	410	353	447	410	862

Göçme yükü : 288.60 kN

İlk çatlak yükü : Ani göçme gözlemlendi

**Ek 1.25. 5+5 cm 25 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
10.00	45	30	20	10	9
20.00	65	50	40	17	63
30.00	95	71	63	24	175
40.00	115	95	90	43	280
50.00	135	105	110	59	359
60.00	153	139	130	78	461
70.00	170	160	163	97	572
80.00	195	190	205	135	704
90.00	225	220	248	165	882
100.00	253	246	290	191	1071
110.00	320	298	370	231	1631
120.00	450	388	550	264	2580
125.00	690	533	750	460	3120
130.00	810	630	840	557	3680
135.00	955	800	980	692	3950
136.95	1035	855	1095	720	4210

**Göçme yükü : 136.95 kN****İlk çatlak yükü : 119.50 kN**

**Ek 1.26. 5+8 cm 26 Nolu plak deneyi okumaları**

Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	32	25	40	35	50
30.00	55	45	60	57	77
45.00	70	60	83	77	90
60.00	95	83	100	93	117
75.00	115	100	125	117	153
90.00	133	123	150	143	198
105.00	155	140	165	158	247
120.00	173	160	190	180	320
135.00	180	175	212	205	375
150.00	198	191	243	240	400
165.00	217	205	263	260	485
180.00	238	218	283	277	575
195.00	258	245	300	290	648
210.00	293	267	325	310	760
225.00	317	295	347	350	880
229.00	335	322	362	380	970

**Göçme yükü : 229.00 kN****İlk çatlak yükü : 173.50 kN**

Ek 1.27. 5+10 cm 27 Nolu plak deneyi okumaları

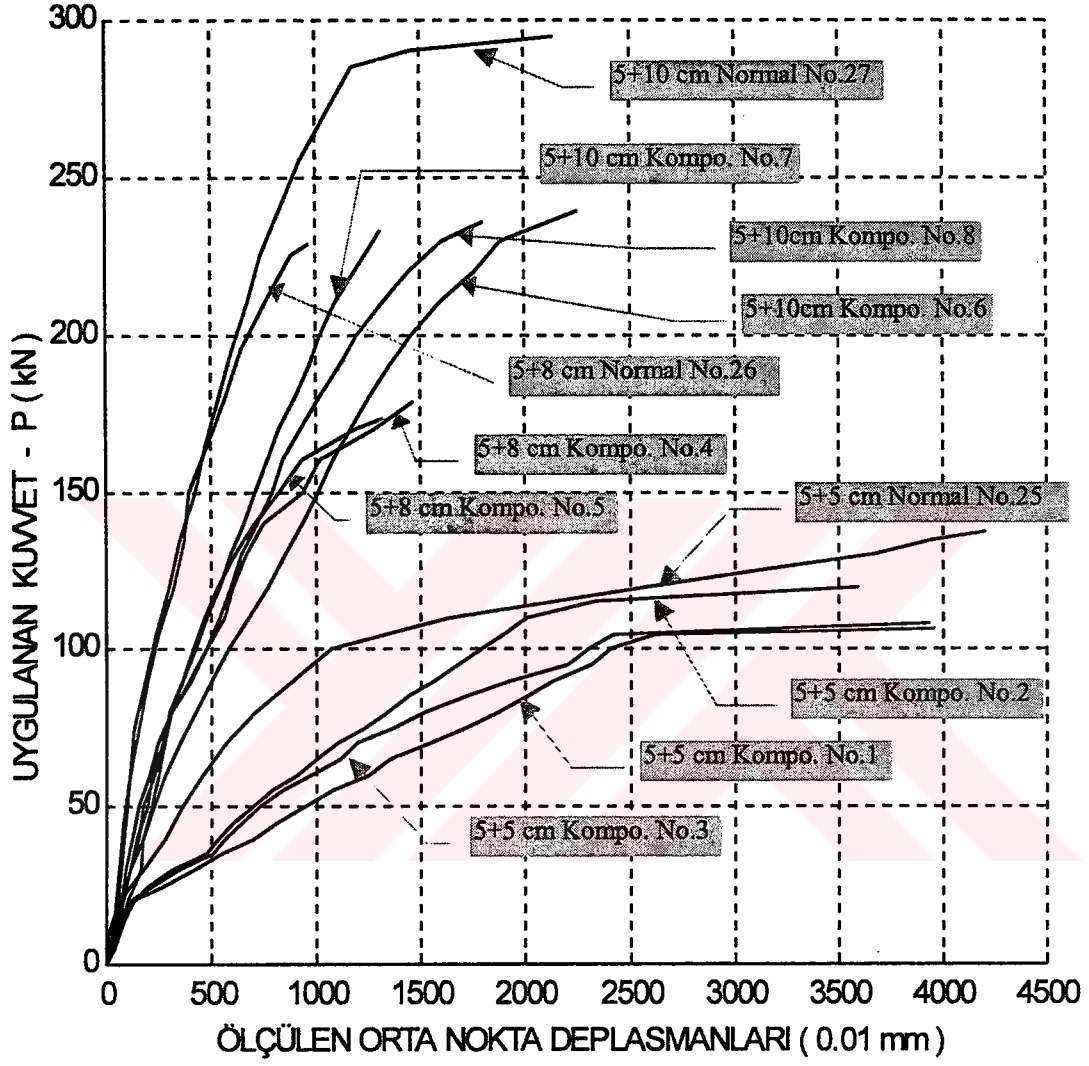
Yükleme (kN)	Deplasman Okumaları (0.01mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
15.00	44	30	32	30	43
30.00	56	50	52	60	67
45.00	72	65	69	80	82
60.00	87	79	86	100	111
75.00	104	91	105	120	137
90.00	124	103	126	140	183
105.00	141	117	145	160	234
120.00	156	135	169	190	302
135.00	169	152	192	210	358
150.00	189	167	218	235	421
165.00	208	182	235	260	476
180.00	222	199	249	280	538
195.00	245	200	257	305	600
210.00	271	202	280	325	673
225.00	289	219	297	345	734
240.00	308	242	327	375	827
255.00	331	264	349	400	921
270.00	378	282	377	430	1045
285.00	415	298	396	455	1171
290.00	442	331	427	490	1455
294.75	504	402	519	511	2143

Göçme yükü : 294.75 kN

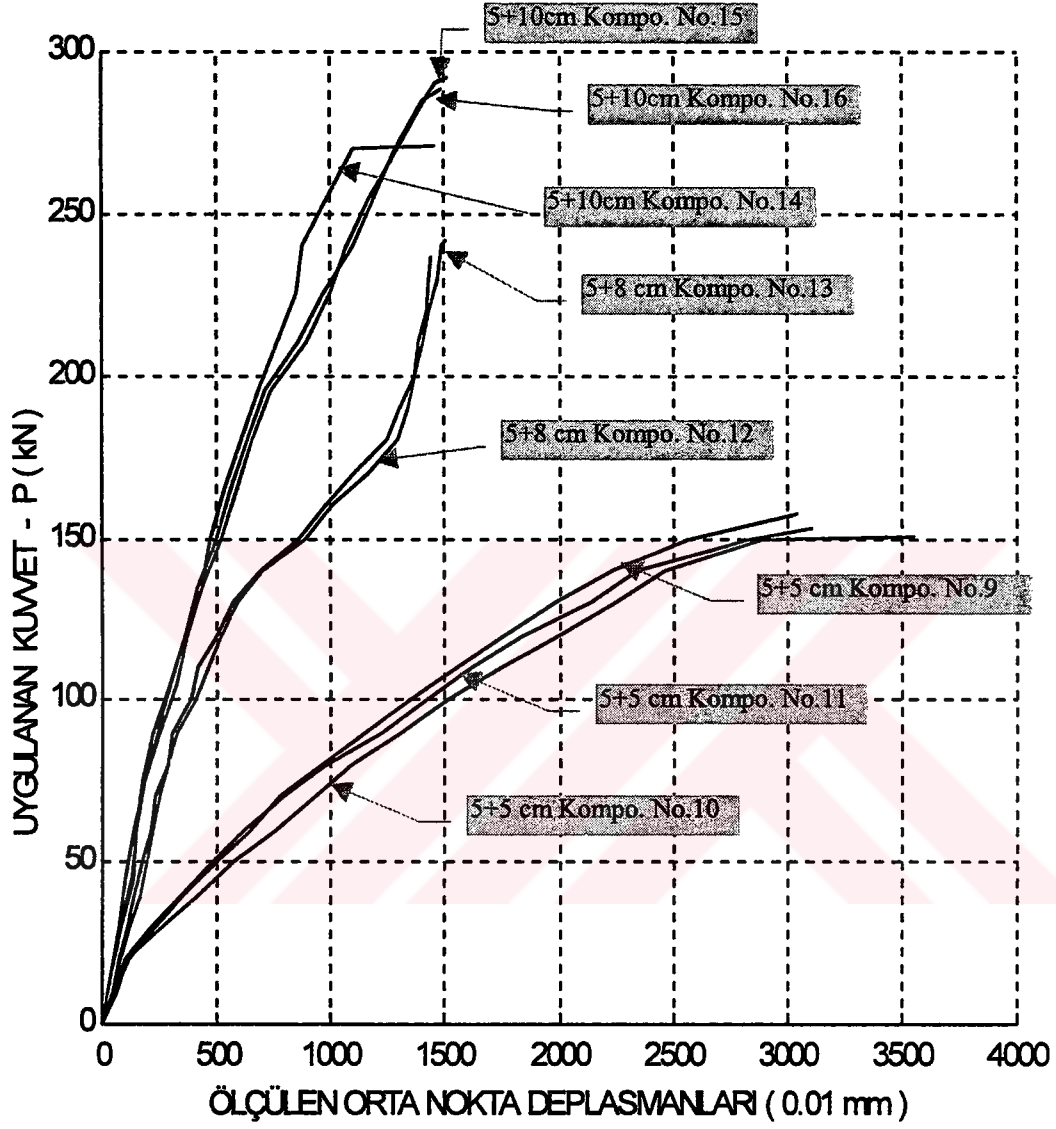
İlk çatlak yükü : 265.75 kN



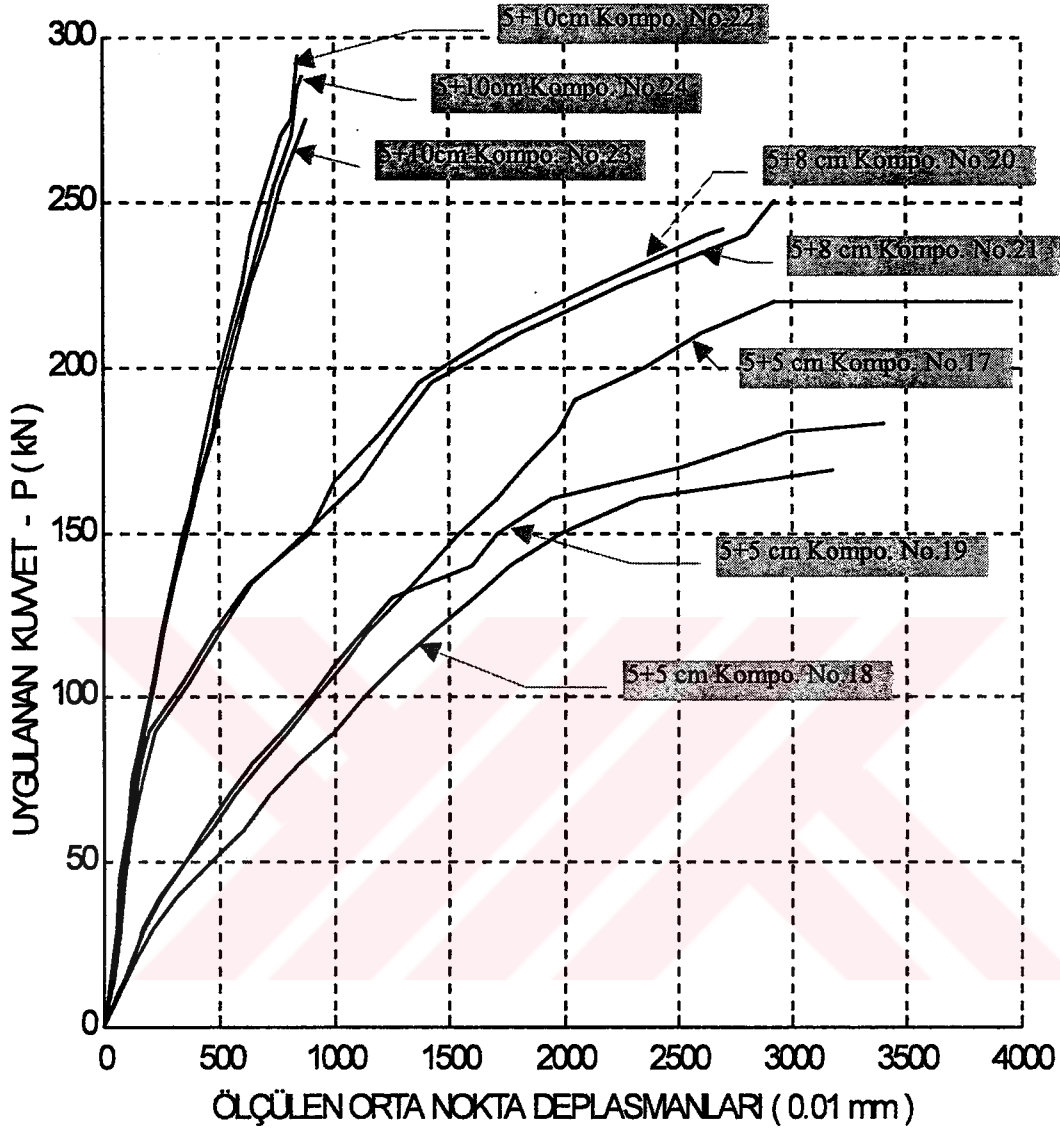
## Ek 2. Kuvvet-Deplasman grafikleri



Ek 2.1. Çekme kırılması planlanan plakların P- $\delta$  diyagramı



Ek 2.2. Denge kırılması hesaplanan plaklarda P- $\delta$  diyagramı



Ek 2.3. Basınç kırılması hesaplanan plakların P- $\delta$  diyagramı

## Ek 3

## KIRILMA ÇİZGİLERİ TEORİSİ (KÇT) İLE DENEY PLAKLARI KIRILMA YÜKLERİNİN HESAPLANMASI

Kırılma Çizgisi, kırılma durumuna gelmiş döşemede kendisine rastlayan bütün donatının aktığı, döşeme sınırlarına kadar devam eden ve döşemeyi parçalara bölen çatlaklar olarak tanımlanır.

Bu tanımlamayı ilk olarak 1922 de Danimarkalı bir mühendis A. Ingerslev “serbestçe oturan ve ankastre dikdörtgen plaklarda kırılma modu için doğru çözüm” adlı bildirisi ile ortaya atmıştır (Berktaş İ., 1988).

Bir diğer Danimarkalı bir bilim adamı Johansen, Kırılma Çizgileri Teorisi ile bazı plak formüllerini içeren doktora tezi çalışmasını 1943 de tamamladı. Çalışması Danimarka dilinde yayınlandığından, 1962 yılında İngilizceye çevrilmesine kadar geçen sürede çok büyük bir ilgi uyandırmadı. Bu çalışmada KÇT ile elde edilen teorik sonuçların deneysel çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Danimarka dışında 1960 ve 1970 ‘li yıllarda Almanya, Fransa ve özellikle ABD İllinois Üniversitesinde Siess yönetimindeki çalışma grubu tarafından gerçekleştirilen çok geniş bir deneysel araştırmalar ile teorinin deneylerle uyumu bir kez daha kanıtlanmış oldu.

KÇT ile hesapta yapılan başlıca varsayımlar şunlardır:

- Döşeme, eğilme dayanımının aşılması ile mekanizma durumuna gelir;
- Kırılma Çizgisine rastlayan bütün donatılar akma durumuna ulaşır;
- Kırılma anında, plastik şekil değiştirmeler yanında elastik şekil değiştirmeler çok küçüktür ve ihmal edilir.

Döşeme kırılma momentinin hesaplanması için döşeme kırılma biçiminin öncelikle belirlenmesi gerekmektedir. Kırılma biçiminin belirlenmesi ve kırılma momentlerinin hesabı için, genelde iki ayrı metot önerilmiştir; bunlar,

- \* **Virtüel İşler Yöntemi, ve**
- \* **Statik Denge Yöntemi**

dir.

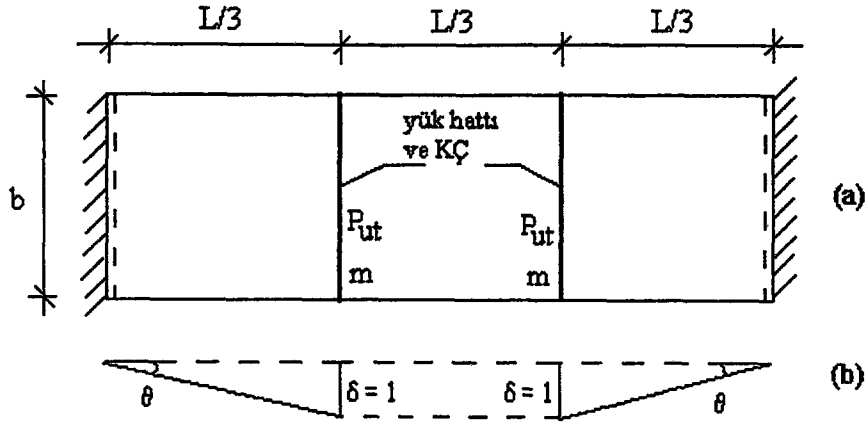
**1. Virtüel İşler Yöntemi:** Kırılma Çizgisi (KÇ) figürü tam olarak şekillendiği anda, döşemeye kırılma mekanizmasına uygun küçük bir deplasman verilecek olursa, bu deplasmandan ötürü dış kuvvetlerin yapacağı iş, iç kuvvetlerin yapacağı işe eşit olacaktır. Çoğu hallerde iç kuvvetlerden KÇ boyunca etkiyen sadece  $M_p$  eğilme momentlerinin virtüel işinin dikkate alınması yeterlidir. Virtüel deplasmanda yapılan dış işin iç işe eşit olması şartından  $M_p$  momentleri veya kırılma yükleri hesaplanır.

**2. Statik Denge Yöntemi:** Kırılma Çizgileri 'nin birbirinden ayırdığı döşeme parçaları soyutlanırsa aşağıdaki etkiler altında dengede buldukları görülür:

- a. Dış Yükler,
- b. Kırılma Çizgilerinde etkiyen eğilme momentleri,
- c. Kırılma Çizgileri boyunca etkiyen kesme kuvvetleri ve burulma momentleri.

Sonuç olarak bu yöntemde parçaların denge konumu incelenerek  $M_p$  momentleri ve/veya kırılma yükleri hesaplanır.

Deneysel çalışmada kullanılmış olan kompozit betonarme numuneler, karşılıklı iki kenarında basit oturtulma suretiyle mesnetlendirildiklerinden kırılma figürleri belirlidir (Şekil Ek 3.1); kırılma çizgilerinin çizgisel dış yük hatları boyunca meydana geleceği âşikârdır.



Şekil Ek 3.1: Deneysel çalışmada incelenmiş olan betonarme kompozit numune için: (a) Kırılma çizgisi figürü ve yük çizgisi, (b) Virtüel deplasman durumu

Burada, bu numunelerin teorik kırılma yükleri Statik Denge Yöntemi ile hesaplanmıştır. Numunelerin statik sistemi kiriş çalışmasına benzer bir kırılma biçimi göstermektedirler (Berktaş İ., 1988).

Yükün etkidiği noktaya birim deplasman uygulanırsa Kırılma Çizgileri ile ayrılmış her bir eleman için statik denge aşağıda verildiği şekilde yazılabilir:

$$P \cdot \delta = \theta \cdot m \cdot b$$

$$(P \cdot b + P \cdot b) \delta = \frac{3}{L} m b + \frac{3}{L} m b \quad \theta = \frac{1}{L} = \frac{3}{L}$$

$$P = 3 \frac{m}{L}$$

Bu ifadelerde P ve m birim genişlik için yük ve eğilme momentidir. Tez metninde, Dördüncü Bölümdeki Çizelge 4.9 daki ölçülerle, bu durumda aynı sonuçlar elde edilir.

**Bir başka deyimle; bu çalışmada deney numuneleri kırılma yükü ve momenti için kiriş teorisinin ve formüllerinin kullanılmasında bir sakınca yoktur.**



#### Ek 4. Deney çalışması resimleri



Resim 1: Ponza Ocakları



Resim 2: Ponza Ocakları



Resim 3: Ponza agregası



Resim 4: Ponza kumu



Resim 5: Normal beton malzemeleri



Resim 6: Ponza agregası

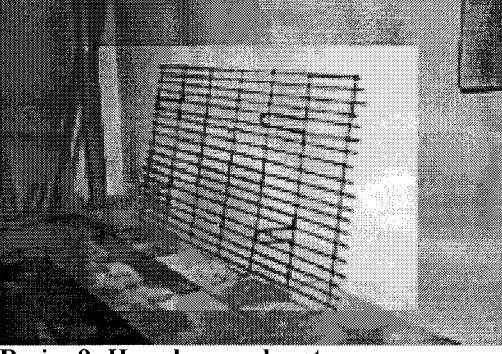


Resim 7: Ponza kumu



Resim 8: Plak donatısı montajı





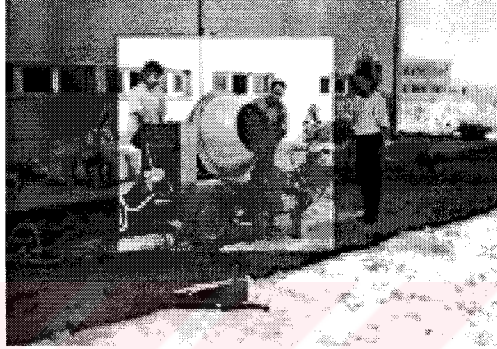
Resim 9: Hazırlanmış donatı



Resim 10: Donatının kalıba yerleştirilmesi



Resim 11: Kalıp montajı



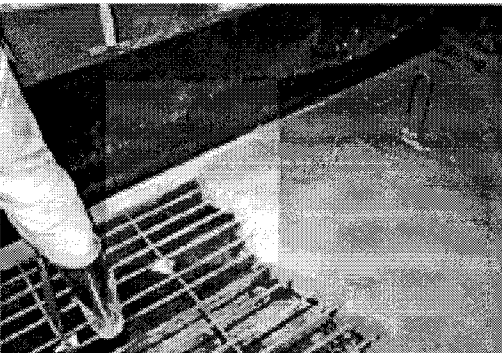
Resim 12: Beton karılması



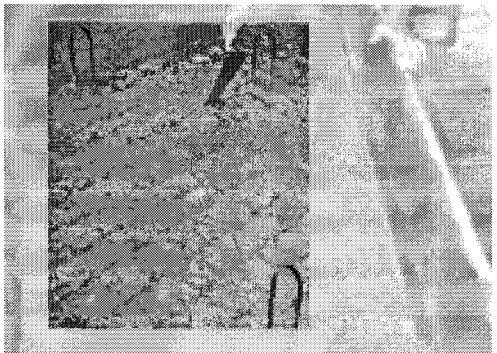
Resim 13: Numune alımı



Resim 14: Kalıba beton dökümü



Resim 15: Beton yerleştirme

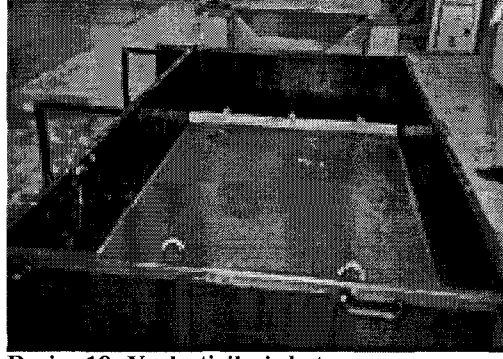


Resim 16: Normal beton yüzeyinin pürüzlenmesi

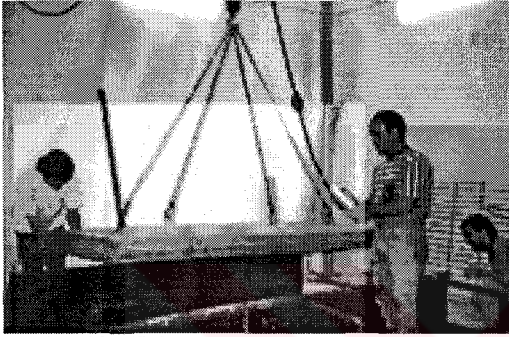




Resim 17: Hafif beton dökümü



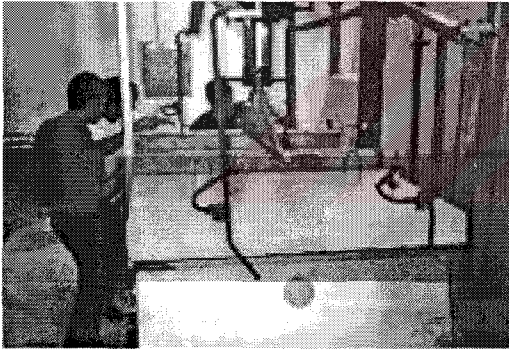
Resim 18: Yerleştirilmiş beton



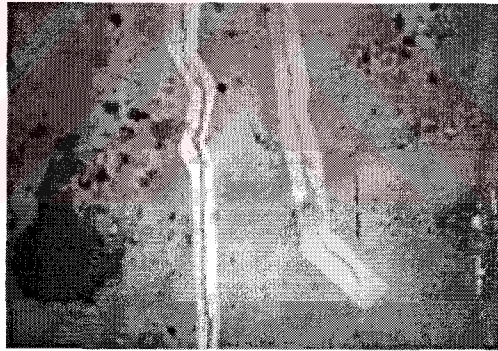
Resim 19: Kalıptan alımı



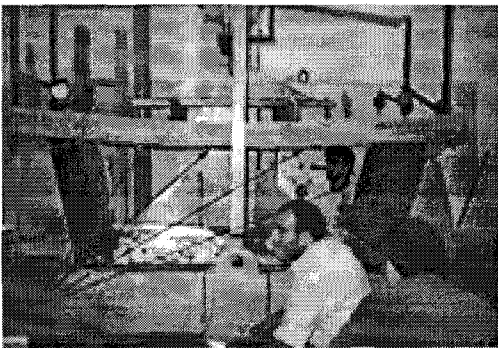
Resim 20: Numunenin makineye yerleştirilmesi



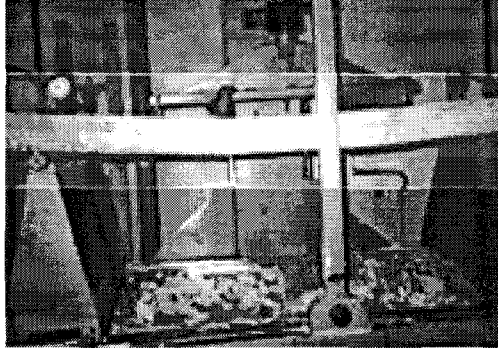
Resim 21: Komparatörlerin montajı



Resim 22: 5+5 cm. için ilk çatlaklar (alttan görüntü)

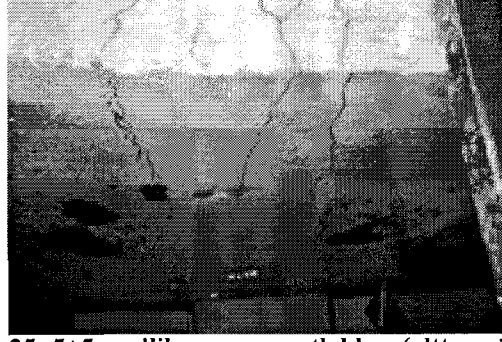


Resim 23: 5+5 cm 'lik numune deneyi



Resim 24: 5+5 cm 'lik numune deneyi





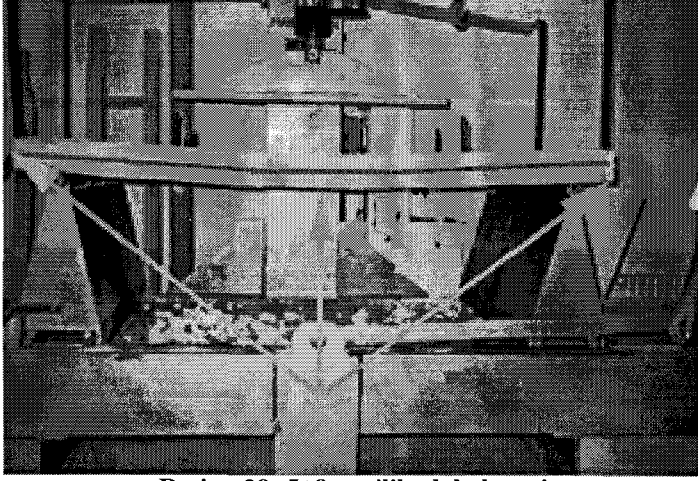
**Resim 25: 5+5 cm 'lik numune çatlakları (alttan görünüş)**



**Resim 26: 5+8 cm 'lik numunenin göçmüş hali**



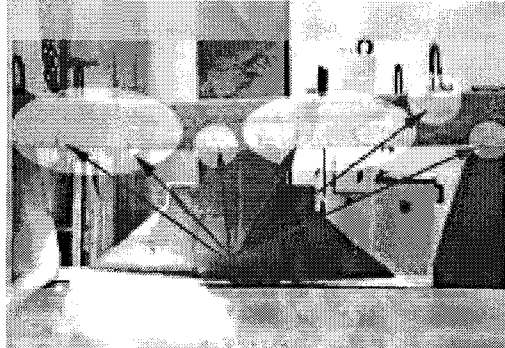
**Resim 27: 5+8 cm 'lik numunede kalıcı sehim**



**Resim 28: 5+8 cm 'lik plak deneyi**

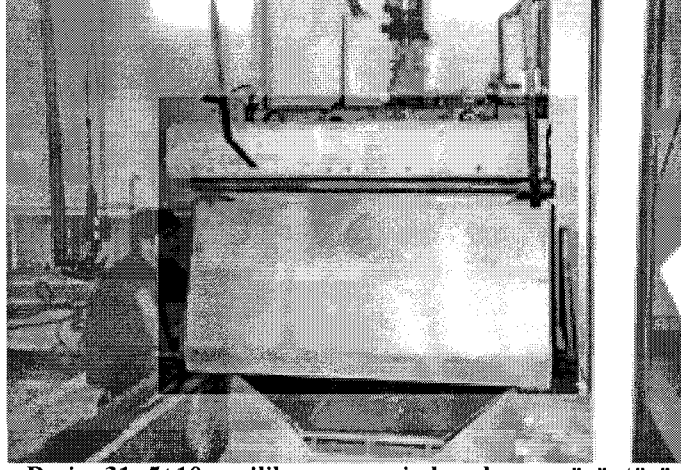


**Resim 29: 5+10 cm 'lik numunenin deney montajı**



**Resim 30: 5+10 cm 'lik numunenin göçmüş hâli**

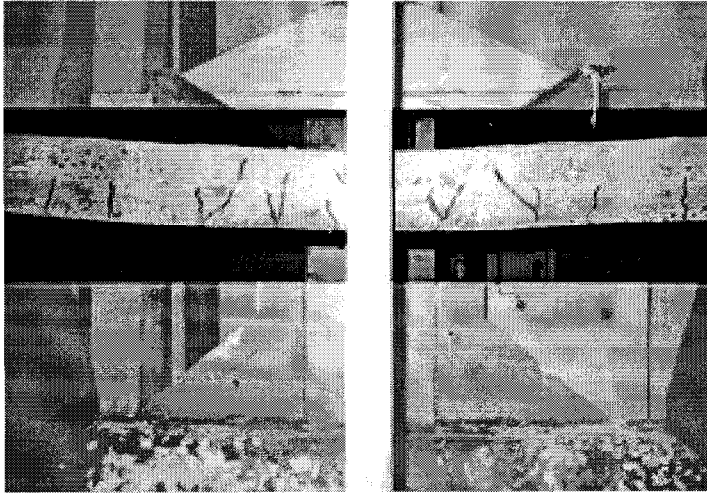




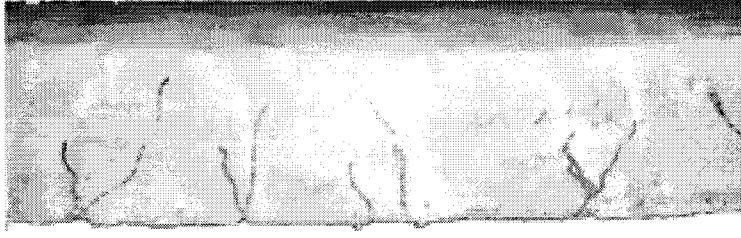
**Resim 31: 5+10 cm 'lik numunenin kısa kenar görüntüsü**



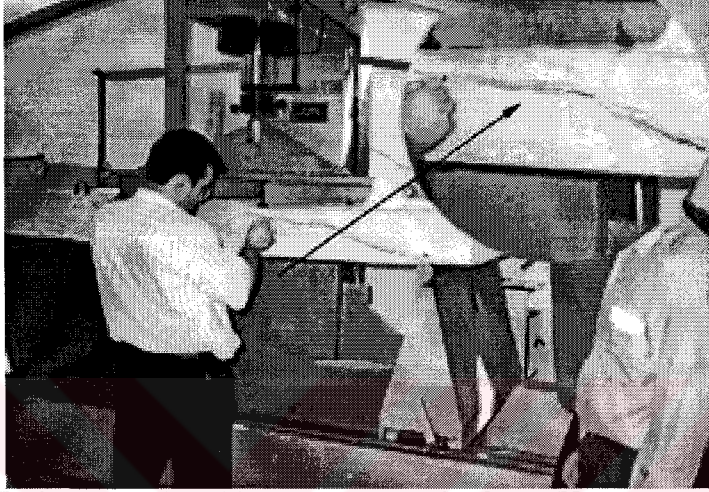
**Resim 32: 5+10 cm 'lik numunenin kısa kenar görüntüsü**



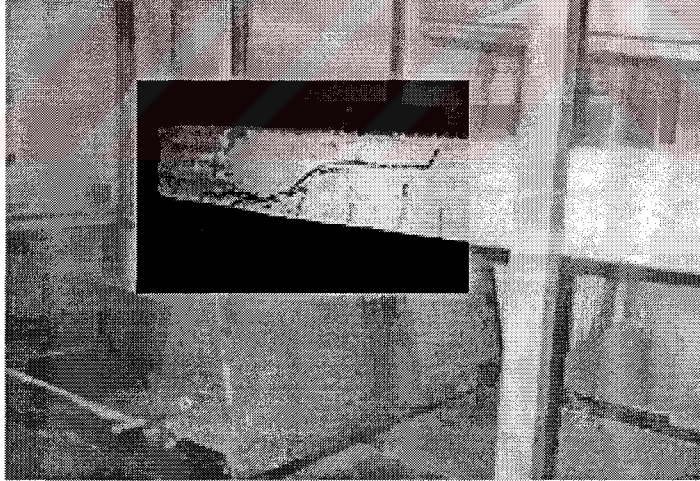
**Resim 33: 5+10 cm'lik numunenin göçmüş hali.**



**Resim 34:5+10 cm'lik numunede yakın plan görüntüsü**



**Resim 35: 5+10 cm 'lik numune kesme kırılması (Numune no: 6)**

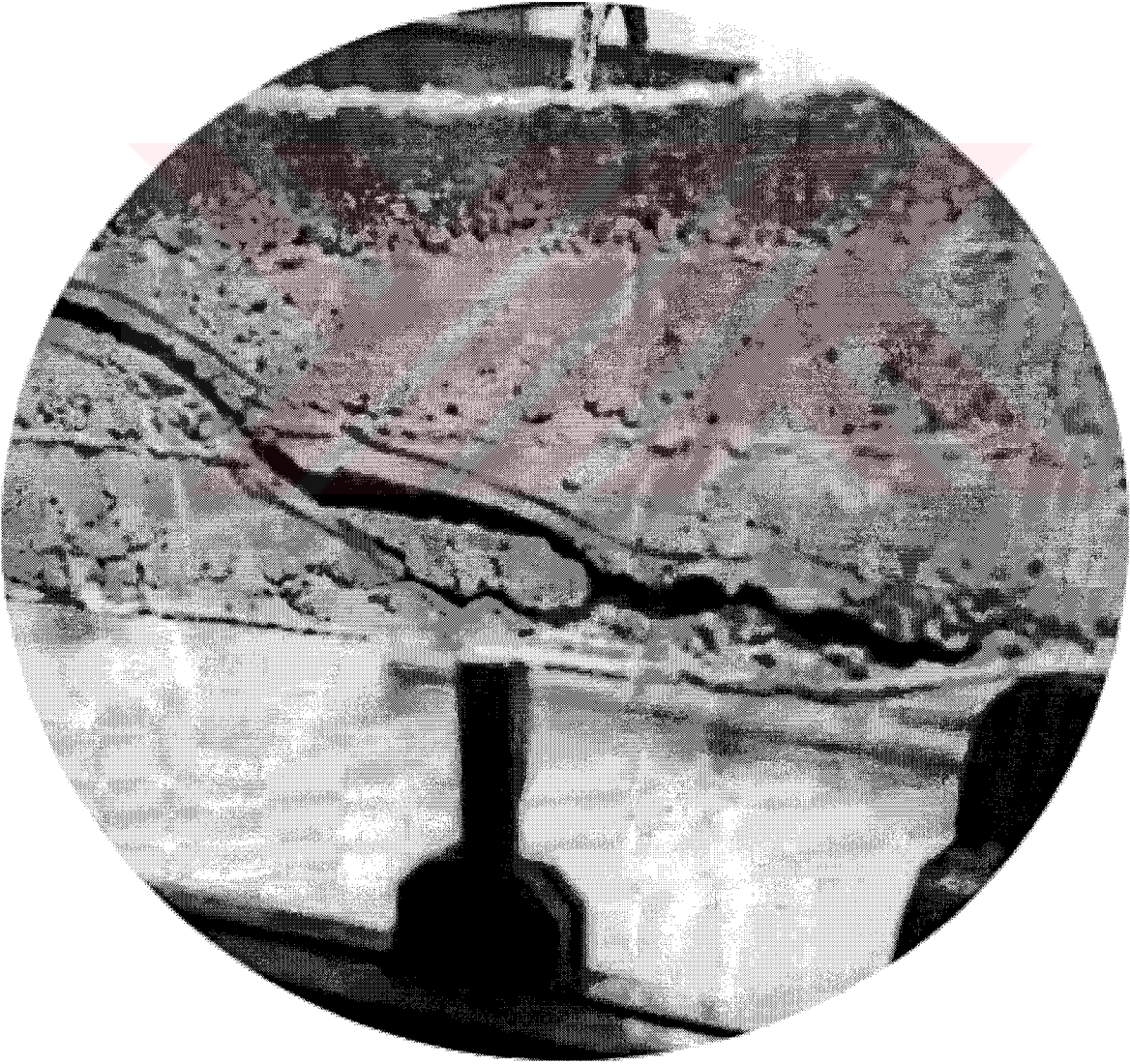


**Resim 36: 5+10 cm 'lik numune kesme kırılması (Numune no: 7)**





**Resim 37: 5+10 cm 'lik numunede kesme kırılması (Numune no: 8)**



**Resim 38: 5+10 cm 'lik numunede yakın plan görüntü**

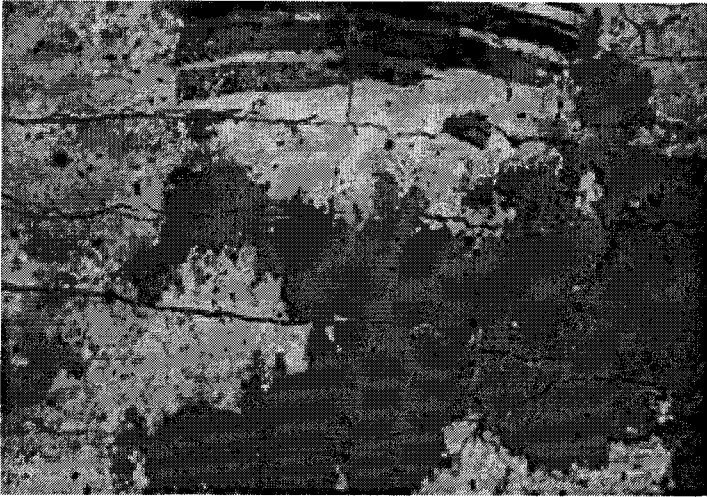




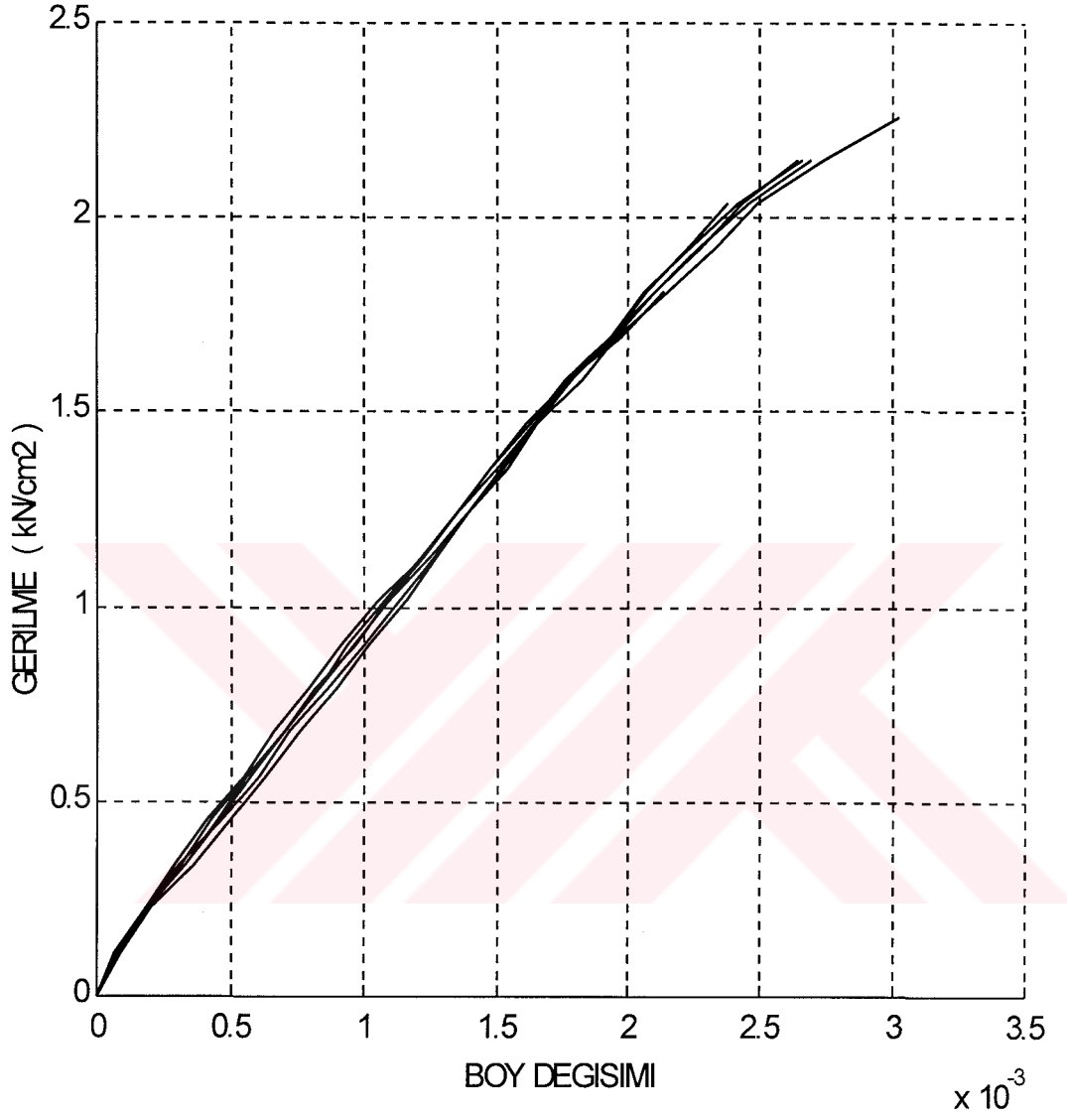
**Resim 39: 5+10 cm 'lik numunede çatlaklar**



**Resim 40: 5+10 cm 'lik numune göçmüş hâli (üst görünüş)**



**Resim 41: 5+8 cm 'lik numunenin alttan kırılmış haldeki görünüşü.**

**Ek 5. Elastisite modülü için gerilme-şekil değiştirme diyagramı****Ek 5.1. 400 Dozlu hafif beton silindir numuneleri gerilme - şekil değiştirme diyagramı**



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	06.08.1969	
Doğum yeri	Kayseri-Mimarsinan Kasabası	
Orta öğretim	Hauptschule-Almanya	
Lise	1985-1988	Kayseri Lisesi
Lisans	1988-1992	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü <b>1992 Dönemi Bölüm Birincisi</b>
Yüksek Lisans	1992-1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	1994-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Çalıştığı kurum	1993-Devam ediyor	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Programı Araştırma Görevlisi