

3.4 ÇELİK TEL DONATILI ZEMİN BETONLARININ TASARIM İLKELERİ

3.4.1 Genel

Çelik tel donatılar daha çok, istenen yük taşıma kapasitesini sağlamak ve rötreye bağlı olarak oluşan çatlamayı önlemek veya çatlakların gelişmesini azaltmak maksadıyla betonda kullanılmaktadırlar. Fakat betonun ilk çatlama durumuna ulaşmasına kadar geçen sürede herhangi bir önemli katkısının olmadığı belirlendiği için, bu aşamaya kadar betonun eğilmede çekme dayanımına etkisinin bulunmadığı söylenebilir. Betonun basınç dayanımına da katkısının olmadığı deneylerle ispatlanmıştır. Buna rağmen en büyük özelliğinin, sünekliği ve çatlama sonrası betonun çekmede enerji yutma kapasitesini artırması olduğu bilinmektedir.

Betonda kullanılan çelik tel lifler soğukta işlenmiş çelik tellerden, çelik levhalardan veya başka biçimdeki çeliklerden imal edilmektedirler. Zemin betonlarında en çok kullanılan tip, çelik tellerden oluşanlardır. Bunların uzunlukları 75 mm' ye kadar imal edilmekte olup, uzunluklarının çaplarına oranları 20 ile 100 arasında değişmektedir [16]. Uygulamada yaygın biçimde kullanılan kancalı uçlu çelik tellerin kodlandırılmalarına ait bir örnek aşağıda verilmektedir (Şekil 3.33).

A	B		X	X	/	Y	Y		C	D
---	---	--	---	---	---	---	---	--	---	---

A: Çelik tel geometrisi

YY: Çelik telin uzunluğu

B: Çelik telin görünüşü

C: Tel kaplaması

XX: Narinlik (uzunluk/çap)

D: Çekme – kopma dayanımı

Örnek:

R C 80/60 B N

- normal çekme – kopma dayanımlı
- bright (kaplamasız)
- uzunluk (60 mm)
- narinlik (60/0,75=80)
- collated (tutkalla birbirine yapıştırılmış)
- regular (düzgün kancalı uçlu)

En yaygın kullanılan 3 tür kancalı uçlu çelik telin kodlanması aşağıdaki gibidir;

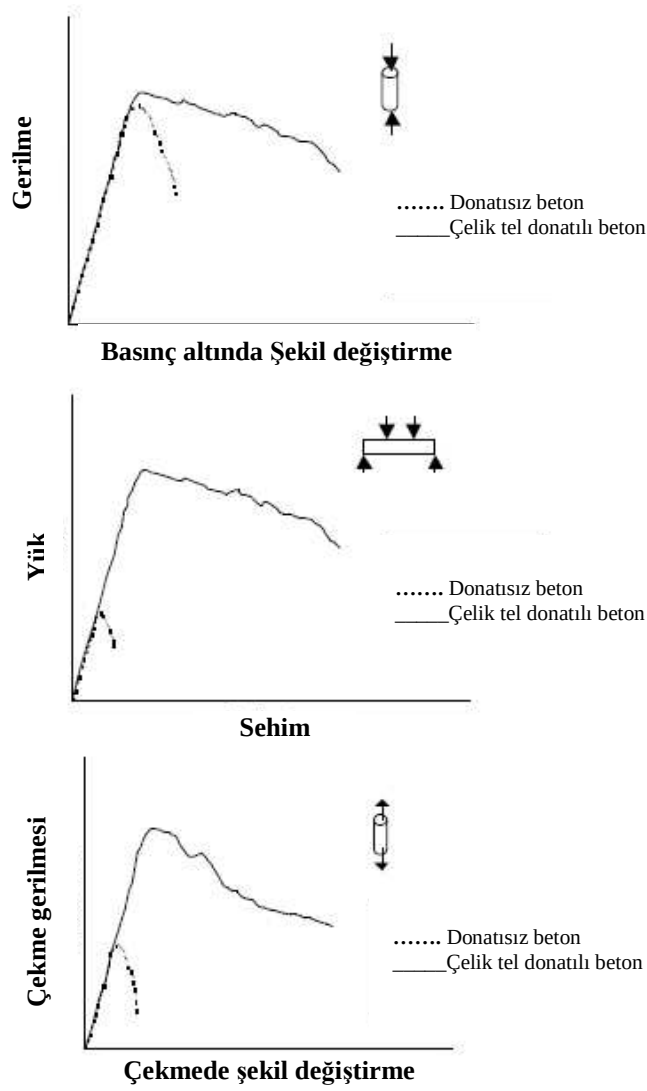
- RC 65/60 BN (çap= 0,92 mm, uzunluk 60 mm)
- RC 80/60 BN (çap= 0,75 mm, uzunluk 60 mm)
- ZP 305 (çap= 0,55 mm, uzunluk 30 mm)

Üçüncü telin kodlaması eski sisteme göredir.

Şekil 3.33 Kancalı uçlu çelik tellerin kodlanması

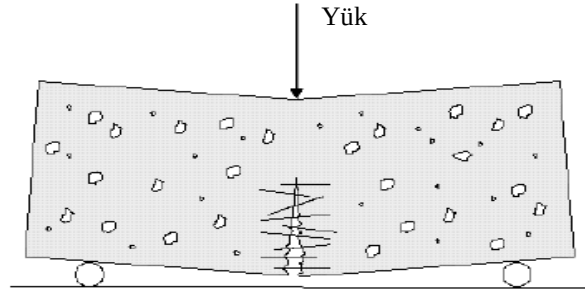
Beton içerisinden kolay sıyrılmasını önlemek maksadıyla kıvrımlı, kancalı uçlu, pürüzlü yüzeyli ve dalgalı biçimleri olan çelik tellerin çekme dayanımlarının minimum değerleri, tel biçimine bağlı olmak üzere; 800 - 2300 MPa değerleri arasındadır.

Aşağıda, Şekil 3.34’ te, çelik tel donatılı betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılmış bir dizi deney sonucu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.34 Çelik tel donatılı beton özellikleri

Şekil 3.34’ den görüldüğü üzere; basınç yükleme durumunda gerilme değerinde herhangi bir artış olmamasına rağmen, şekil değiştirme özelliklerindeki hatırı sayılır iyileşme dikkat çekicidir. Kiriş eğilme deneyinde artan yüke karşı, düşey yerdeğiştirmenin, göçme mekanizmasını etkilediği ve elemanın sünekliğinin arttığı görülmektedir. Çekme durumunda ise, eğilmedeki duruma benzer bir davranış oluşmaktadır. Bunun nedeni; tellerin beton ile aderansının çok iyi olması nedeniyle, çatlağın iki tarafında köprü vazifesi yaparak çatlağın gelişmesine olanak tanımamasıdır.



Şekil 3.35 Çelik tel donatının köprüleme davranışı

Çelik tel donatıların önemli birkaç özeliği aşağıda kısaca belirtilmiştir.

Köprüleme etkisi

Çelik tel donatıların beton içerisinde çekip çıkarma deneylerinden elde edilen sonuçlar, tellerin özellikle betonun çatlama sonrası etkilerinin öğrenilmesi bakımından önemli rol oynarlar. Beton içinden çekip çıkarma gerilmesinin yüksek olması, betonun çatlama sonrasındaki çekme gerilmesi taşıma kapasitesini artırır. Zemin betonu yükleme altında iken kısa süre sonra çatlamaya başlar. Çelik tel donatılar çatlağın iki yanını bir köprü gibi birleştirerek, betonun daha büyük bir taşıma gücü değerine ve bu anda yüksek enerji yutma kapasitesine ulaşmasını (betonun dağılmadan büyük şekil değiştirmeler yapabilmesini) sağlarlar (Şekil 3.35).

Bayasi ve Kaiser [17], betonun dağılmadan oluşacak çatlak genişliklerinin ve bu çatlak genişliğine karşı gelen eğilme dayanımının elde edilebilmesi için yaptıkları çalışmada; maksimum 2 mm lik çatlak genişliğine ulaşıldığında hesap edilen eğilme dayanımının taşıma gücü eğilme kapasitesine oranını elde etmişlerdir. Bu değer, göçmede müsaade edilen katsayı olarak düşünülmelidir. Hacimce % 2 lik çelik tel oranı durumunda bu değer, yukarıda bahsi geçen araştırmacılar tarafından % 93 olarak bulunmuştur. Bilindiği gibi donatısız betonlar için bu değer çok daha küçüktür.

İşlenebilirlik

Çelik tel donatılı betonlarda işlenebilirliği etkileyen en önemli iki özellik: donatıların narinliği (uzunluk/çap) ve beton içerisindeki hacimsel orandır. Hacim arttığında işlenebilirlik azalır. Birçok araştırmacı, hacimsel oranın (V_f) % 2 ve boyut oranının 100 olması durumunu bir sınır olarak görmektedir. Bu sınır durum bir katsayı ile ifade edilmekte ve bu sınır durumun üstüne çıkılması durumunda, işlenebilirliğin artması için betona katkı eklenmesi gerektiği tavsiyesinde önerilmektedir [16].

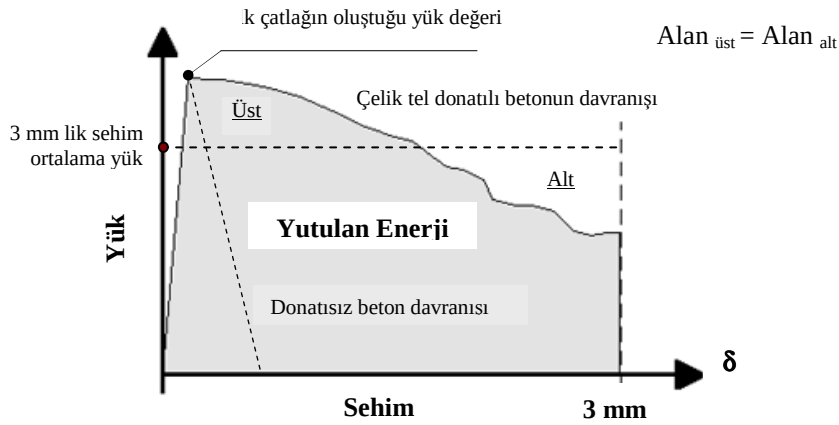
$$\xi_{tel} = V_f (l_{tel} / d_{tel}) \leq 1,5 \quad (3.59)$$

Aderans etkisi

Çubuk donatılı betonlarda çelik tel donatının da bulunması durumunda, aderansın arttığı bir dizi deney sonucunda bulunmuştur. Bu deneylerde 51 mm uzunluğunda ve boyut oranı 57 olan çelik teller, betona hacimsel olarak % 2 miktarında eklenmiştir. Bu durumda yapılan çekme deneyinde, yerel aderans dayanımı kazancının % 55 ve sürtünme dayanımının % 140 oranında arttığı bulunmuştur.

Tokluk

Çelik tel donatıların betona en büyük katkısı, yük altında betonun enerji yutma kapasitesi olarak ifade edilebilecek tokluk değerindeki artışta oluşmaktadır. Belli bir yük altında şekil değiştirme artarken, beton çatlamaya ve dağılmaya başlar. Çelik tel donatılı zemin betonunda söz konusu enerji yutma kapasitesi nedeniyle, tahribata meydan vermeyecek şekil değiştirmeler olabilmekte ve yük kapasitesi artmaktadır. Yutulan enerji, gerilme-şekil değiştirme diyagramı altında kalan alanın bir göstergesidir ve tokluk değeri bu enerji ile orantılı olarak elde edilir.



Şekil 3.36 Çelik tel donatılı betonda yük – sehim diyagramında yutulan enerji

Tokluk teriminin literatürde geniş anlamda kullanılmasına rağmen, okuyucuların konuyu daha iyi kavraması amacıyla, zemin betonu haricindeki hemen tüm yapı elemanları için kullanılan ve alışkın olunan **süneklik** kavramı burada tokluk kavramı yerine kullanılacaktır.

Süneklik özellikleri; çelik tel donatı biçimine, dozajına (kg cinsinden beton m³' ündeki ağırlık), çekme dayanımına ve çelik tellerin beton içerisindeki aderansını etkileyen bağlantı mekanizmasına bağlıdır. Söz konusu süneklik özeliği, zemin betonunun kalınlık hesabı ile ilgili tasarımda önemli rol oynamaktadır.

Betonda ilk çatlak sonrası kullanılabilir eğiilde çekme dayanımının değeri, tasarımda pozitif eğiilme moment kapasitesinin (m) elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bununla

beraber beton zeminde yükten meydana gelen çatlakların betonun üst yüzeyinde oluşmasına izin verilmediğinden, çelik tel donatıların negatif moment kapasitesine etkisi ihmal edilmektedir [2].

Çelik tel donatılar nedeniyle ortaya çıkan süneklik etkisinin hesaplanması için farklı ülke yönetmelikleri farklı yöntemler uygulamaktadırlar. Her yönetmeliğin test biçimi, test numunesi ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında bazı farklılıkları olmasına rağmen neticede elde edilen yük ile sehim ilişkisini ifade eden diyagramdır. Şekil 3.36, söz konusu yük ile sehim ilişkisini açık biçimde göstermektedir. Japon standart deney yönteminin kullandığı yük – sehim eğrisinin biçimine benzeyen diyagramdan bir bakıma sünekliğin ölçüsü olan ve ileride elde ediliş biçimi ayrıntılı olarak tariflenecek $R_{e,3}$ değeri; 3 mm lik sehim karşı gelen ortalama yükün ilk çatlağın olduğu andaki yüke oranı olarak bulunabilir. Burada ortalama yük değeri için çizilen eğri, Şekil – 3.36’ daki şeklin Üst ve Alt olarak tanımlanan alanların eşit olması ilkesine göre oluşturulmuştur. Elde edilen oran genellikle **eşdeğer eğilme dayanımı oranı** olarak bilinmektedir. $R_{e,3}$ ün çelik tel donatılar için belirtici bir özellik olduğu söylenebilir.

Betonun içine katılan çelik tel donatıların miktarına bağlı olarak değişen $R_{e,3}$ değeri ve buna bağlı olarak eşdeğer eğilme dayanımı, çelik tellerin miktarı arttıkça yüksek değerler almaktadır. Farklı çelik tel donatı üreticileri yaptıkları deneyler ile $R_{e,3}$ değerleri için farklı sonuçlar vermektedirler. İlerleyen sayfalarda bu bilgilere yer verilecektir. Bununla beraber derz bulunmayan zemin betonlarında 35 – 45 kg/m³ lük dozaj, çatlakların genişliğini ve konumunun düzenlenmesi açısından yeterli olmaktadır. Kesme derzli betonlarda ise bu dozaj, 20 – 30 kg/m³ değerindedir. Daha önceki bölümlerde bahsi geçen akma kriterlerinin oluşması ve gerekli sünekliğin sağlanması için önerilen dozaj, farklı tipteki çelik tel donatılar için bir dereceye kadar farklı olsa da, 30 kg/m³ kadardır [1].

TR34, eşdeğer eğilme dayanımı oranı $R_{e,3}$ kullanılarak elde edilen pozitif moment kapasitesi için aşağıdaki bağıntıyı vermektedir [2]. Daha önce belirtildiği gibi, negatif moment kapasitesinin bulunmasında $R_{e,3}$ değeri kullanılmamaktadır.

$$m = \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} (R_{e,3}) \left(\frac{h_f^2}{6} \right) \quad (3.60)$$

$$m' = \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \left(\frac{h_f^2}{6} \right) \quad (3.61)$$

Burada;

$f_{ctk,fl}$:Donatısız betonun karakteristik eğilme dayanımı,

h_f :Beton plak kalınlığı,

γ_c :Beton için malzeme katsayısı (yerinde dökme betonlar için 1,5)
olarak bilinmektedir.

$f_{ctk, fl}$ için farklı ülke yönetmelikleri farklı değerler ve bağıntılar vermektedir. Aşağıda bu farklı değerler ve bağıntılar verilecektir.

Eurocode 2

$$f_{ctk, fl} = \left[1 + \sqrt{\frac{200}{h_f}} \right] f_{ctk(0,05)} \leq 2 f_{ctk(0,05)} \quad (3.62)$$

Minimum kayma dayanımı;

$$v_{Rd,ct} = 0,035 k_1^{3/2} \sqrt{f_{ck}} \quad (3.63)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada;

$f_{ctk(0,05)}$:karakteristik eksenel çekme dayanımı

d :faydalı yükseklik

f_{ck} :karakteristik basınç dayanımı

$$k_1 = 1 + \sqrt{200/d}$$

olarak bilinmektedir. Farklı beton dayanımları için belli başlı beton özellikleri aşağıdaki tabloda (Tablo – 3.15) topluca verilmektedir [2].

Tablo 3.15 Eurocode 2' ye göre betonun dayanım özellikleri

Sembol	Özelik	Dayanım sınıfı				Birim	Açıklama
f_{cu}	Karakteristik basınç dayanımı (küp) (N/mm ²)	30	35	40	45	N/mm ²	Küp dayanımı
f_{ck}	Karakteristik basınç dayanımı (silindir) (N/mm ²)	25	28	32	35	N/mm ²	Silindir dayanımı
f_{cm}	Ortalama basınç dayanımı (silindir) (N/mm ²)	33	36	40	43	N/mm ²	$f_{ck} + 8$
f_{ctm}	Ortalama tek eksenli çekme dayanımı (N/mm ²)	2,6	2,8	3,0	3,2	N/mm ²	$0,3 f_{ck}^{2/3}$
$f_{ctk(0,05)}$	Karakteristik tek eksenli çekme dayanımı (N/mm ²)	1,8	2,0	2,1	2,2	N/mm ²	$0,7 f_{ctm}$
E_{cm}	Sekant elastisite modülü (kN/mm ²)	31	32	33	34	kN/mm ²	$22(f_{cm}/10)^{0,3}$

TS 500

TS 500-2000’ de betonun karakteristik aksenal çekme dayanımı bağıntısı verilmiştir.

$$f_{ctk, fl} = 0,35\sqrt{f_{ck}} \quad [\text{MPa}] \quad (3.64)$$

Çeşitli beton sınıfları için bu denklemden elde edilen aksenal çekme dayanımı değerleri TS500-2000’ de 3.3.1 ve 3.3.2 alt bölümünde Çizelge 3.2 de verilmiştir. Betonun çekme dayanımı, eğilme ve silindir yarma deneylerinden de elde edilebilir. Aksenal çekme dayanımı f_{ctk} , silindir yarma deneyinden elde edilen çekme dayanımını 1,50 ile; eğilme deneyinden elde edilen çekme dayanımını da 2,0 ile bölerek yaklaşık biçimde hesaplanabilir [18]. Bu durumda eğilmede çekme dayanımı aşağıdaki biçimde formüle edilebilir.

$$f_{ctk, fl} = 0,7\sqrt{f_{ck}} \quad [\text{MPa}] \quad (3.65)$$

Tablo 3.16 TS 500’ e göre betonun dayanım özellikleri

Beton sınıfı	Karakteristik basınç dayanımı f_{ck} MPa	Eşdeğer Küp basınç dayanımı f_{cu} MPa	f_{ctk} MPa	$f_{ctk, fl}$ MPa	28 günlük Elastisite modülü E_{cm} MPa
C16	16	20	1,4	2,8	27000
C18	18	22	1,5	3,0	27500
C20	20	25	1,6	3,2	28000
C25	25	30	1,8	3,6	30000
C30	30	37	1,9	3,8	32000
C35	35	45	2,1	4,2	33000
C40	40	50	2,2	4,4	34000
C45	45	55	2,3	4,6	36000
C50	50	60	2,5	5,0	37000

Amerikan standardı (ASTM)

Eğilmede çekme dayanımı (İngilizcede “**MOR** – Modulus of Rupture” olarak ifade edilmektedir), dört nokta yüklemeli kiriş deneyi ile belirlenmektedir. Donatısız betonlar için ASTM C 78 ve çelik tel donatılı betonlar için ASTM C 1018 standartları kullanılmaktadır. Zemine oturan beton döşemelerin kalınlığının belirlenmesinde en etkili özellik olarak kullanılan eğilmede çekme dayanımı, genellikle betonun silindir basınç dayanımının karekökünün bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilmektedir.

Amerikan Portland Çimentoları Birliği PCA, sözkonusu katsayının 9 olması gerektiğini önermektedir. Amerikan Beton Enstitüsü ACI, özellikle zemin betonları için değil ancak genel olarak 7,5 katsayısını vermektedir. Betonun silindir basınç dayanımına göre farklı katsayılar ile elde edilmiş eğilmede çekme dayanımları aşağıdaki tabloda verilmektedir [4]. Tablonun alındığı kaynaktaki birimler MPa birimine dönüştürülmüştür.

Tablo 3.17 Amerika’ da kullanılan eğilmede çekme dayanımı değerleri

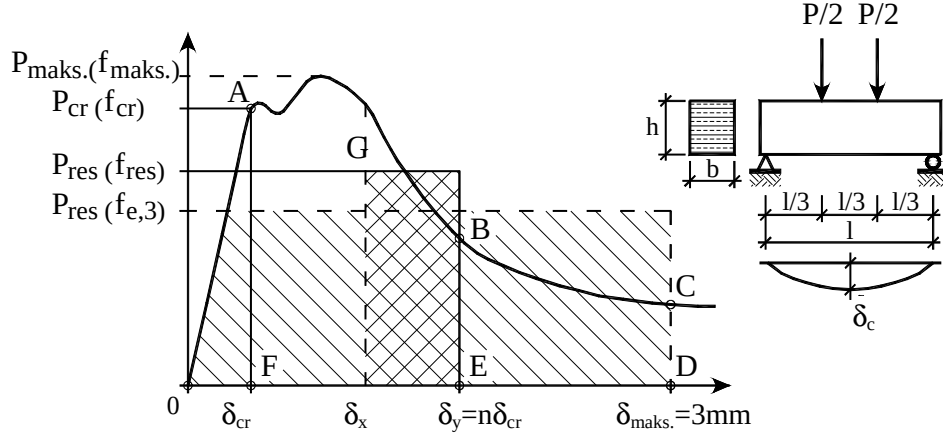
$k_{MOR} \sqrt{f'_c}$ MPa	Silindir basınç dayanımı f'_c ’ ye karşı gelen $f_{ctk, fl}$ değerleri [MPa]						
	(2000 psi) C14	(2500 psi) C18	(3000 psi) C21	(3500 psi) C25	(4000 psi) C28	(4500 psi) C32	(5000 psi) C35
$0,59 \sqrt{f'_c}$	2,21	2,50	2,70	2,95	3,12	3,34	3,49
$0,63 \sqrt{f'_c}$	2,36	2,67	2,89	3,15	3,33	3,56	3,73
$0,67 \sqrt{f'_c}$	2,51	2,84	3,07	3,35	3,55	3,79	3,96
$0,75 \sqrt{f'_c}$	2,81	3,18	3,44	3,75	3,97	4,24	4,44
$0,84 \sqrt{f'_c}$	3,14	3,56	3,85	4,20	4,44	4,75	4,97
$0,92 \sqrt{f'_c}$	3,44	3,90	4,22	4,60	4,87	5,20	5,44
$1,00 \sqrt{f'_c}$	3,74	4,24	4,58	5,00	5,29	5,66	5,92

3.4.2 Çelik Tel Donatılı Betonların Eğilme Dayanımları

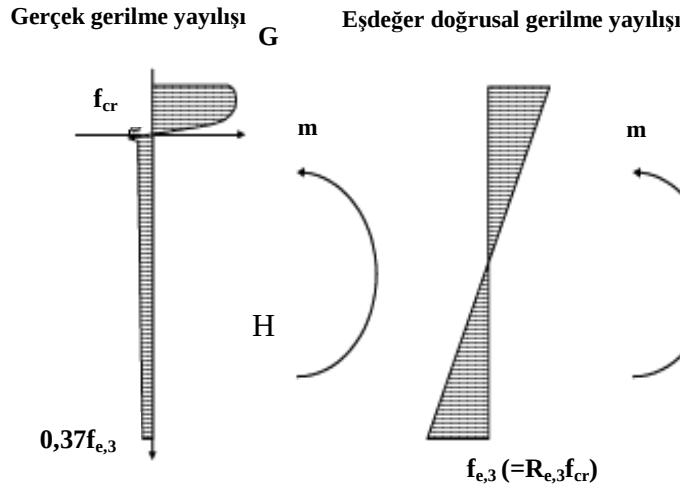
Çelik tel donatılı betonların eğilme dayanımlarının elde edilmesi için kullanılan farklı ülke yönetmeliklerinden ve farklı değerlerden bir önceki bölümde söz edilmişti. Burada deneysel yolla çelik tel donatılı betonların davranışları incelenecek ve kiriş eğilme deneylerinden yola çıkılarak, belirlenen kiriş sehim değerlerine karşı gelen betonun süneklik değerleri ve eşdeğer eğilme dayanımı elde edilecektir. Özellikle $R_{e,3}$ ve farklı sehim sınırlarına karşı gelen tokluk indislerinin elde edilmesine, tanımı yapılacak yöntemle ulaşılabacaktır [1]. Ardından TR34’ teki yöntem incelenecek ve belirtilen yöntem ile karşılaştırılacaktır. Bu alt bölüm sonunda ise, ASTM C 1018 test yöntemi (aynı zamanda TS 10515 – 1992) ve Alman Beton Birliğinin (DBV) önerileri açıklanacaktır. Tanımı yapılan yöntem içerisinde, uygun olduğu durumlarda ASTM C 1018 test yöntemine atıfta bulunulmuş ve tokluk indislerinde ortak bazı açıklamalar yapılmıştır. Okuyucunun her yönetmeliğin belirttiği test yöntemlerini benimsemesi ve tamamını kullanması beklenmemektedir. Bununla beraber, konunun bir bütün olarak anlaşılması ve farklı test yöntemlerinin birbirlerini tamamlayıcı nitelikte olması yanında, farklı okuyucuların farklı test yöntemlerine alışkın olmalarının ihtimal dahilinde bulunması bu şekilde bir düzenlemeyi gerektirmiştir. Bazı bağıntıların alt yapısının kavranması hedeflenmekte ve bu sayede hesaplamalarda esnek olunmasına imkan verilmeye çalışılmaktadır.

3.4.2.1 Yük ve sehim arasındaki ilişkiler

Tasarımda kullanılan eğilme dayanımı, çelik tel donatının yük – sehim özelliklerine ve öngörülen sınır duruma (kullanım sınır durumu veya taşıma gücü sınır durumu) bağlıdır. Şekil 3.37, standart kiriş eğilme testinden elde edilen yük – sehim eğrisini göstermektedir. Düşey ekseninde bulunan yük, aynı moment değerine karşı gelen eşdeğer gerçek eğilme gerilmesi ile yerdeğiştirebilir. Benzer biçimde aynı moment değerine karşı gelen, fakat doğrusal gerilme dağılımı ise gerçek gerilme yayılımı ile birlikte Şekil 3.38’ de verilmiştir.



Şekil 3.37 Çelik tel donatılı betonda eğilmede yük – sehim ilişkisi



Şekil 3.38 Eğilme momenti (m) için gerçek ve eşdeğer gerilme dağılımları

Bu yöntemde elde edilen gerilme ve dayanımlar, aşağıda verilen denklem ve Şekil 3.38 de gösterilen eşdeğer doğrusal gerilme yayılımı esas alınarak ifade edilmiştir.

$$\sigma = M / W = M / (bh_f^2 / 6) = PL / (bh_f^2) \quad (3.66)$$

Burada;

W :Kesit mukavemet momenti

b :Deney kirişi genişliği (deneyde 150 mm)

h_f :Deney kirişi yüksekliği (deneyde 150 mm)

σ :Bulunmak istenen gerilme (örneğin f_{e,3})

L :Deney kirişi uzunluğu (deneyde 450 mm)

olarak belirlenmiştir. Esasen elde edilmesi gereken f_{e,3} değerinin hesabı kısaca denklem 3.67’ deki gibi yapılabilir. Bu denklemde bilinmeyen olmadığı için iyi bir yaklaşımla eşdeğer eğilme dayanımı f_{e,3} istenen sehim değerine göre hesaplanabilmektedir. Eşdeğer dayanımın elde edilmesinin ardından R_{e,3} değerinin de kolayca hesaplanabileceği açıktır.

$$f_{e,3} = \frac{T_b L}{db h_f^2} \quad (3.67)$$

Burada T_b,yük – sehim eğrisinin 3 mm’ ye karşı gelen sehime kadar olan eğrinin altında kalan alandır ve esasen 3.66 denklemindeki P değerinin elde edilmesi ve Şekil 3.37’ de gösterilen eğrinin altında kalan eşdeğer alanın ifadesinde bu P değerinin yerine konmasıyla elde edilebilmektedir. Kısaca bu işlem aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{Şekil 3.37’ den} \quad \Rightarrow T_b = Pd$$

$$\text{Denklem 3.66’ dan} \quad \Rightarrow P = f_{e,3} b h_f^2 / L$$

$$\text{Birleştirilme sonrasında} \quad \Rightarrow T_b = db h_f^2 f_{e,3} / L$$

ve ardından 3.67 denklemi elde edilir.

Yukarıda ifade edilen ve ortaya çıkan sonuç pratik amaçlar için rahatlıkla kullanılabilir. Bununla beraber, istenilen sehim değerine ve enerji yutma kapasitesine ait olmak üzere elde edilmesi gereken eşdeğer eğilme dayanımı ve süneklik oranı hakkında net bilgi elde edilemeyeceği ve deney sonrasında detaylı bilgi sahibi olunamayacağı için daha kapsamlı bir hesap yöntemine gereksinim duyulmaktadır. Bu işlem, şu ana kadar elde edilmiş ön bilgiler ve Şekil 3.37 ve 3.38’ in ışığında aşağıda gerçekleştirilecektir.

δ_x ve δ_y sehimleri arasındaki ortalama eğilme gerilmesi (f_{res}), kalan dayanım olarak adlandırılır ve sünekliği (tokluğu) belirten indisler cinsinden ifade edilebilir (Denklem 3.68).

$$f_{res} = f_{cr} \frac{(I_y - I_x)}{(y - x)} = f_{cr} R_{x,y} \quad (3.68)$$

Burada;

f_{cr} :Çatlama yüküne karşı gelen gerilme

I_y :Seçilen büyük sehime karşı gelen süneklik indisi

I_x :Seçilen küçük sehime karşı gelen süneklik indisi

$R_{x,y}$:Kalan dayanım çarpanı

olarak adlandırılmaktadır.

δ_{cr} ilk çatlağın meydana geldiği andaki sehim olmak üzere, süneklik indisleri aşağıdaki basit yolla bulunabilir (Şekil 3.37).

$$I_y = \frac{Alan_{OABEFO}}{Alan_{OAF0}} \quad (3.69)$$

$$I_x = \frac{Alan_{OAGHFO}}{Alan_{OAF0}} \quad (3.70)$$

Yük – sehim eğrisi tam olarak elastoplastik olan malzeme durumu için, süneklik indisini ifade eden ve ilk çatlağın belli bir katı olan sehim miktarı δ_y , $I_y = y$ olacak biçimde tanımlanmaktadır. Bu durumda, OABEFO alanı OADO üçgeninin alanına eşittir ve bu alan y ile ifade edilebilir. Çelik tel donatı miktarının çok yüksek olması durumunda, I_y , y' den büyüktür. Fakat pratikte karşılaşılan durumlar için I_y , y' den küçük kalmaktadır.

Yukarıdaki paragrafta ifade edildiği üzere,

$$\delta_y = n\delta_{cr} \text{ ve}$$

$n = (y + 1) / 2$ olarak elde edilir.

Süneklik oranı veya kalan dayanım çarpanı olarak tarif edilen $R_{e,3}$, daha önce açıklandığı gibi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$R_{e,3} = \left(\frac{f_{e,3}}{f_{cr}} \right) \quad (3.71)$$

Burada, $f_{e,3}$ için Şekil 3.37 kullanılarak daha önce belirtilen ve T_b olarak ifade edilen veya doğrudan eğri altında kalan alan gözönüne alınır ise, $f_{e,3} = Alan_{OABCDEFO} / \delta_{maks.}$ elde edilir. $\delta_{maks.} = 3$ mm olduğu bilindiğine göre, $R_{e,3}$ için sonuçta Denklem 3.72 düzenlenir.

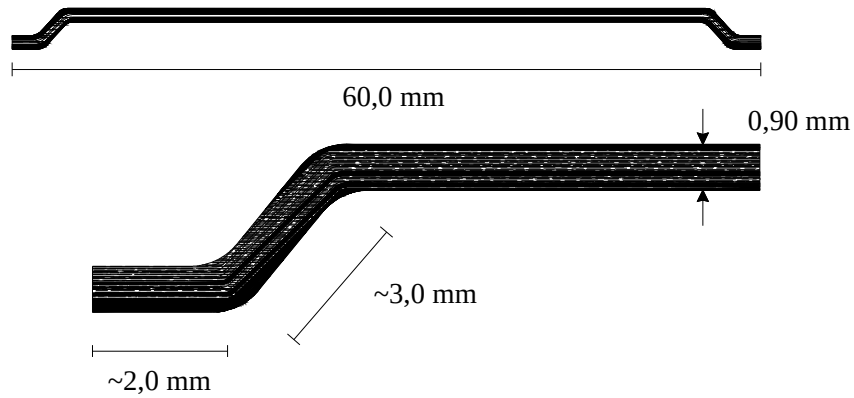
$$R_{e,3} = \left(\frac{Alan_{OABCDEFO}}{3f_{cr}} \right) \quad (3.72)$$

Burada önemli olan nokta; ilk çatlağın oluştuğu andaki dayanım ve eşdeğer eğilmede çekme dayanımının, belirli bir çelik tel donatı biçimi ve hacmine bağlı olarak deneylerden elde edilmesi gerektiğidir. Çelik tel lif üretici firmalar tarafından, üretilen her cins tel tipi için farklı dozaj (betonun 1 m³ ünde kg cinsinden çelik tel) ve hacimde (betonun 1 m³ ünde m³ cinsinden çelik tel) deneyler gerçekleştirilmekte ve sonuçta her bir farklı durum için f_{cr} ve $f_{e,3}$ değerleri elde edilmektedir.

Elde edilen bu değerler kullanılarak 3.71 denkleminde $R_{e,3}$ oranı kolaylıkla hesaplanmaktadır. Aşağıdaki tabloda, Bekaert firmasının Dramix® adlı çelik tel donatısının üç çeşidi için, yukarıda tarifi yapılan deneysel yolla bulunan $R_{e,3}$ değerleri verilmiştir. Farklı üreticilerin farklı çelik tel donatıları için değerler, üretici firmalardan temin edilmelidir.

Tablo 3.18 Dramix® çelik tel donatıların farklı dozajları için $R_{e,3}$ değerleri

$R_{e,3}$ değerleri			
Dozaj (kg/m ³)	RC-80/60-BN	RC-65/60-BN	RL-45/50-BN
15	42	38	-
20	52	47	38
25	60	56	45
30	68	63	52
35	75	69	58
40	80	75	63
45	86	80	68
50	90	85	72
55	95	89	77
60	99	93	80
65	102	97	84



Şekil 3.39 Dramix® RC-65/60-BN çelik tel için boyut özellikleri

Bu bölümün başında açıklanan akma çizgileri yöntemine göre betonun plastik hesabında, donatılı plak alt yüzeyinde meydana gelen çatlaklar sonucunda momentlerin yeniden dağılarak sünek bir davranış oluştuğu belirtilmişti. Plakta bu sünekliğin kaynağı olan çelik tel donatıların betonda hesaba katılması sonucunda, süneklikte ve eğilmedeki çekme dayanımında bir iyileşme oluşur ve bu iyileştirme $(1 + R_{e,3}/100)$ çarpanı ile ifade edilir ve hesaba katılır [1,2].

Bu durumda, eğilmedeki çekme dayanımının üst sınır durumundaki değeri;

$$f_u = f_{cr} \left(1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right) \quad (3.73a)$$

veya

$$f_u = f_{ctk, fl} \left(1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right) \quad (3.73b)$$

şeklinde ifade edilebilir. TR34' e göre tasarımda kullanılacak eğilme dayanımının değeri, 3.74 denklemi ile verilen biçimde küp numunenin basınç dayanımından hareketle hesaplanabilir (ayrıca malzeme katsayısı ile azaltmaya gerek yoktur).

$$f_{ctd, fl} = 0,393 (f_{cu})^{2/3} \quad (3.74)$$

Yukarıda f_{cr} olarak ifade edilen ve kiriş eğilme deneyinde ilk çatlamaya karşı gelen değer, esasen üst sayfalarda verilen $f_{ctk, fl}$ değeridir. $f_{ctk, fl}$ değerinin farklı ülke yönetmelikleri için değişik sayılar almasından dolayı, deney yönteminin açıklanması sırasında f_{cr} ' nin kullanılması uygun bulunmuştur. Bu aşamaya kadar olduğu gibi bundan sonra da, bağıntılarda $f_{ctk, fl}$ ve deneyler ile ilgili açıklamalarda f_{cr} kullanılacaktır.

TS500-2000 Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, yukarıda Tablo 3.16' da sayısal değerleri ve 3.65' teki denklemi kullanarak eğilmede çekme dayanımının ifadesini vermektedir. Bu ifade 3.73 denkleminde yerine konursa 3.75 elde edilir.

$$f_u = 0,7 \sqrt{f_{ck}} \left(1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right) \quad (3.75)$$

Farklı ülke yönetmeliklerine göre hesap yapılması istendiğinde, betonun 28 günlük karakteristik silindirik dayanımının ve süneklik (tokluk) oranının bilinmesi yanında, yönetmeliklerde verilen malzeme ve/veya yük çarpanlarının da bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıdaki ifadeler malzeme güvenlik çarpanlarını içermemektedir. Taşıma gücü limit durumu kullanılarak tasarım yapılması sırasında, gerekli olan malzeme güvenlik çarpanları kullanılmalıdır. Bu hususta bir alt bölüm ilerdeki sayfalarda malzeme güvenlik çarpanları hakkında gerekli bilgileri verecektir. Bunun yanında, deneylerden elde edilen bilgilerin kullanılmasında ve bunların tasarıma katılmasında da farklılıklar mevcuttur. Hesap yönteminin seçilmesini esas alan bu kriterler aşağıda açıklanacaktır.

3.4.2.2 Tasarım ve hesapta kullanılacak dayanımın seçilmesi

Tasarımda üç çeşit dayanım kullanılabilir.

- a – Çatlama gerilmesi
- b – Maksimum dayanım
- c – Kalan (Artık) dayanım

- Çatlamayı gözönünde bulunduran kullanım sınır durumu (başka deyişle; elastik hesap), çatlama gerilmesi f_{cr} ' yi esas alır.
- Elastik hesap yöntemi kullanılan üst sınır durumda (tekil yükün plağın köşesinde veya plak kenarında çizgisel yük bulunması durumu için), $f_{maks.}$ yani maksimum gerilme kullanılır (eğer f_{cr} ' den büyük kalıyorsa).
- Plastik hesap yöntemi kullanılan üst sınır durumda, çatlamadan sonra ortaya çıkan ve Şekil 3.37' de gösterilen kalan dayanım esas alınarak tasarım gerçekleştirilir. Burada öngörülen tasarım modeli, ya δ_x ve δ_y sehimleri arasında kalan ortalama gerilme f_{res} yada 3 mm lik sehime karşı gelen ortalama kalan dayanım $f_{e,3}$ ' e bağlıdır. Bunların her ikisi de sonuçta, akma çizgilerindeki çatlaklarda ortalama eğilme momenti kapasitelerini vermektedirler. $R_{e,3}$ ' ün hesabı için kullanılan x ve y değerlerinin seçim esasları aşağıda açıklanacaktır.

3.4.2.3 Plastik tasarım için artık dayanım

Yukarıda belirtilen farklı hesap yöntemleri, farklı sehim değerleri için kullanılmaktadır. Her sehim değerine karşı gelen süneklik indisi farklı olacaktır. Bu durumda 3 mm sehim için kullanılan $R_{e,3}$ değeri her sehim için genelleştirilmek suretiyle $R_{x,y}$ olarak ifade edilebilir. Genel bir yaklaşım, $R_{e,3}$ ' ün tanımlanmasında $x = 10$ ve $y = 20$ değerlerinin kullanılmasıdır. Eğer kısıtlanmış rötre ve sıcaklıktan meydana gelen büzülme nedeniyle oluşan çekme gerilmeleri varsa ve eğer, eksenel yük etkisi ayrıca hesaba katılmıyorsa o zaman y ' nin daha büyük değerleri kullanılmalıdır. Kiriş eğilme deneyinde ortaya çıkan sehim ve meydana gelen çatlak genişliği arasında basit bir ifade türetilerek y değeri bulunabilir.

Standart JSCE-SF4 (1984) eğilme deneyinde (Japon Beton Enstitüsü – Çelik Tel 34) normal durumlarda sadece bir adet çatlak görülür. Çatlamadan sonraki ilave sehim değeri $\Delta\delta$, esasen bahsi geçen çatlağın genişliği, w , ile orantılı olacaktır. Şekil 3.33 ve ara hesaplar sonucunda; deney kirişi yüksekliği, sehim ve çatlak genişliği arasında bir bağıntı oluşturulmuş ve 3.76 numaralı denklem ile aşağıda verilmiştir.

$$\Delta\delta = \frac{wL}{4h_f} \quad (3.76)$$

Uzunluğu yüksekliğinin 6 katı olan narin kirişler için ($L=450$ mm ve $h_f = 75$ mm), L/h_f ifadesi 3.76' da yerine konursa;

$$\Delta\delta = w \frac{6}{4} = 1,5w \quad (3.77a)$$

$$\Delta\delta = 0,15(10w) \quad (3.77b)$$

elde edilir. Çatlama anındaki sehim $\delta_{cr} = 0,15$ mm olarak tahmin edilirse, $\Delta\delta$; çatlama anındaki sehimin 10w katı olacaktır. $n = (y+1)/2$ hatırlanırsa, bu durum 20w ile ifade edilebilir. Başlangıçta y için verilen 20 değerine son bulunan 20w eklenirse, y ile w arasında bir bağıntı bulunmuş olur.

$$y = 20 + 20w_k \quad (3.78)$$

Burada w_k , kısıtlanmış veya oluşmasına imkan verilmemiş çatlak genişliğidir.

Sadece eğilme etkisi altında (kısılması engellenmemiş) y için 20 değeri kullanılmaktadır. w_k genişliği için 0,5 mm seçilmesi durumunda, y =30 olarak elde edilir. Bu sonuç şu şekilde ifade edilebilir: Uzunluğu L =450 mm ve yüksekliği $h_f = 75$ mm olan kiriş eğilme deneyi neticesinde elde edilen $R_{10,30}$ un tasarımda kullanımında; yaklaşık 0,5 mm lik çatlak genişliği vereceği kabullenilmektedir.

Tasarım için daha yüksek değerlerin, mesela 1 mm, kullanılması tercih edilebilir. Bu durumda $R_{10,40}$ kullanılmalıdır. Ayrıca, R değerleri ile çatlak genişlikleri arasındaki ilişkinin deney kiriş boyutlarına bağlı olarak da değiştiği bilinmektedir. Şekil 3.37' deki deney numunesi boyutları için $\delta_{cr} = 0,05$ mm olarak kabul edilirse,

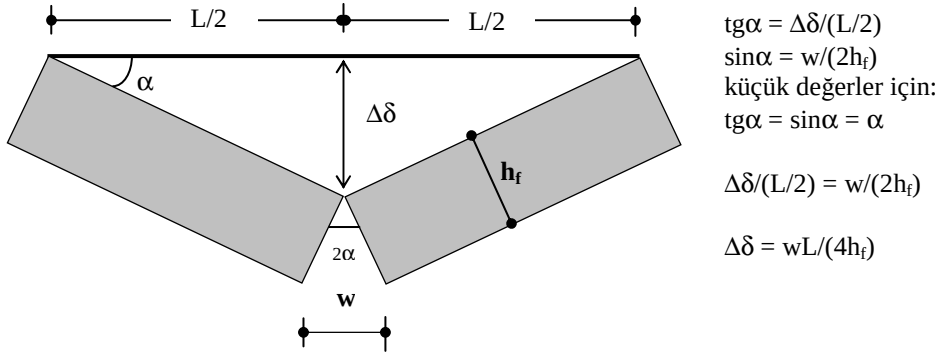
$$\Delta\delta = w \frac{3}{4} = 0,75w \quad (3.79a)$$

$$\Delta\delta = 0,05(15w) \quad (3.79b)$$

Bu durumda y ifadesi, $n = (y+1)/2$ katkısıyla, elde edilir.

$$y = 20 + 30w_k \quad (3.80)$$

$R_{10,30}$ kullanılarak yapılan tasarımda meydana gelecek çatlak genişliği 0,3 mm mertebesinde dir. Daha yüksek çatlak genişlikleri ile çalışılmak istendiğinde $R_{10,50}$ değeri kullanılabilir. Bu durumda y =50 olarak alındığında, nihai çatlak genişliği 1 mm olacaktır. Zemin betonlarında kullanılan çelik tel donatıların en büyük üstünlüğü, üst sınır çatlak genişliğinin sınırlandırılması veya öngörülmesi durumunda, bu sınıra ulaşılmasına imkan veren tedbirlerin alınabilmesidir. Eğilme etkilerine ek olarak kesme gerilmelerine karşı koyarken, aynı zamanda zımbalama ve sıcaklık etkilerine maruz kalan plağın toptan göçme mekanizması, doğru hesaplanan ve betona uygun şartlarda eklenen çelik tel içeriği (dozajı) ile ayarlanabilmektedir. Farklı ülke yönetmeliklerinde $R_{e,3}$ ve $R_{x,y}$ değerlerinin hesaplanması için bir takım farklı yöntemler kullanılıyor olsa da sonuçta tamamı birbirine benzer yaklaşımlar içermektedir ve iki terim de benzer karakterdedir.



Şekil 3.40 Kiriş eğilme deneyinde sehim ile çatlak genişliği arasındaki ilişki

3.4.2.4 Plastik tasarım için TR34 (Teknik Rapor 34) yaklaşımı

TR34' e göre plakta momentlerin yeniden dağılımı mümkün olduğunda, denklem 3.60 ve 3.61 de verilen pozitif ve negatif momentlerin değerleri birlikte değerlendirilmektedir. Bu durumda toplam moment kapasitesi aşağıda verilmiştir:

$$m + m' = f_0 h_f^2 / 6 \quad (3.81)$$

Burada;

$$f_0 = f_{ctd, fl} + f_{e,3} = (1 + R_{e,3} / 100) f_{ctd, fl}$$

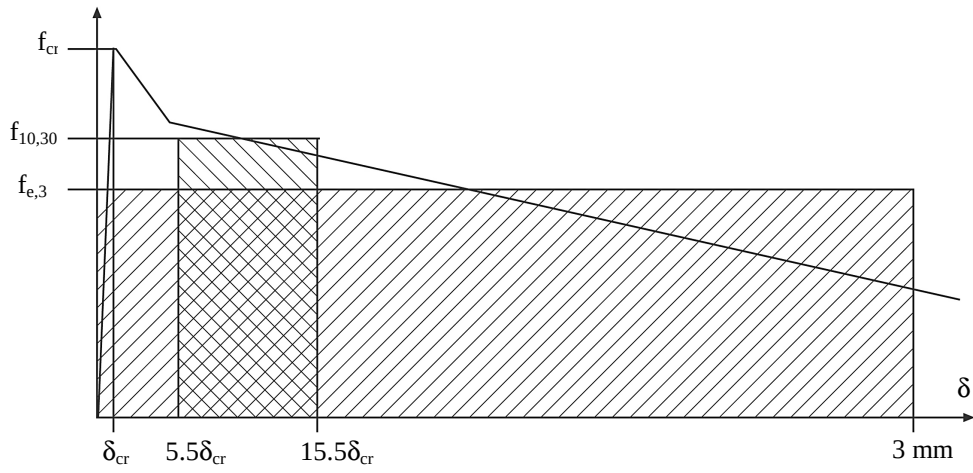
$f_{ctd, fl}$:3.74 denklemleri ile verilen ve küp dayanımından elde edilen (malzeme güvenlik çarpanı da içeren) eğilme dayanımı değeridir.

Plakta momentlerin yeniden dağılımı imkanı yok ise (tekil yüklerin köşede olması veya kenara paralel çizgisel yük bulunması durumu), plakta oluşan negatif ve pozitif momentlerin toplam kapasitesine çelik tel donatısının etkisinin olmadığı varsayılmaktadır.

$$m + m' = f_{ctd, fl} h_f^2 / 6 \quad (3.82)$$

Eşdeğer eğilme dayanımı $f_{e,3}$, ilk çatlama ile sonraki 3 mm lik sehimi sınırına kadar olan bir ortalama ile ilişkilidir. Bu, plastik tasarımda kullanılan $R_{10,30}$ değerine karşı gelen sehimlerle karşılaştırılabilir. Bu: $n = (10+1)/2 = 5,5$ ve $n = (30+1)/2 = 15,5$ sayıları, deney sırasında meydana gelen ve tasarımda öngörülen ilk çatlağın olduğu sehimin katları olarak ifade edilmektedir. Örneğin $\delta_{cr} \approx 0,05$ mm olduğunda, $\delta_{10} = 5,5\delta_{cr} \approx 0,3$ mm ve $\delta_{30} = 15,5\delta_{cr} \approx 0,8$ mm bulunacaktır.

Şekil 3.41, $R_{e,3}$ ile yukarıdaki paragrafta elde edilen sehimlerin açık biçimde bir karşılaştırmasını vermektedir [1]. Genellikle $f_{10,30}$, beton içerisinde özellikle çelik tel miktarı az olduğunda, $f_{e,3}$ ' ten daha yüksek değerler almaktadır. Bu durumda TR34' te tanımlanan $f_{e,3}$ eşdeğer dayanımı, $f_{10,30}$ ' dan daha güvenli (daha az ekonomik) bir süneklik kriteri üzerine kurulmuştur. Diğer taraftan, yeniden dağılım mümkün olduğunda TR34 pozitif momentler için tam çatlama dayanımını esas almaktadır. Bundan dolayı, $f_{10,30}$ ile karşılaştırmak için uygun değer $f_0/2 = (f_{ctk, fl} + f_{e,3})$ olmalıdır. Böylece iki tasarım arasındaki fark bir bakıma azalmaktadır. Bu fark deney kirişi boyutları ile de ilgilidir.



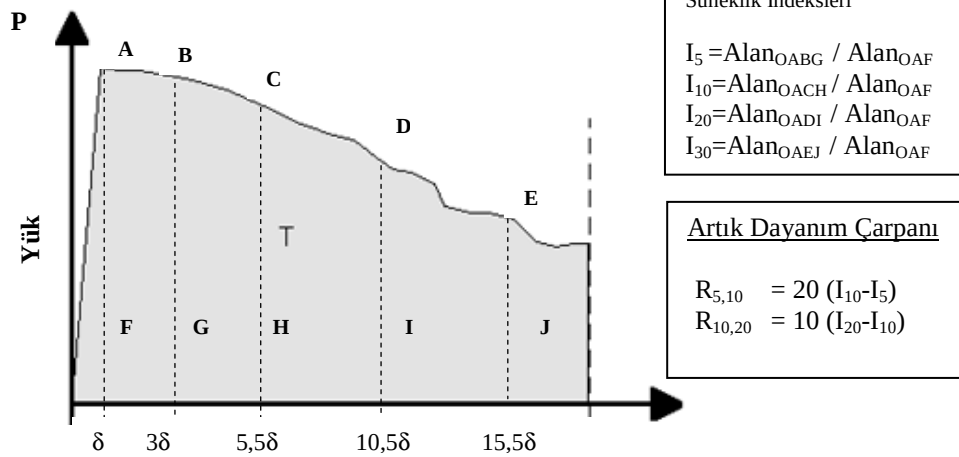
Şekil 3.41 TR34'ün 2.baskısında kullanılan deney için dayanım – sehim ilişkisi

3.4.2.5 ASTM C-1018 deney yöntemi

TS10515 – 1992, ASTM C-1018 deney yöntemine benzerdir.

Burada geniş açıklama yapılmayacak ve sadece deney sonucu, yük – sehim ilişkisi olarak verilmiştir. Süneklik indisleri ve karşı gelen kalan dayanım çarpanı ayrıca bağıntı biçiminde ifade edilmiştir [19] .

δ ; ilk çatlak oluştuğu andaki sehim değeridir.

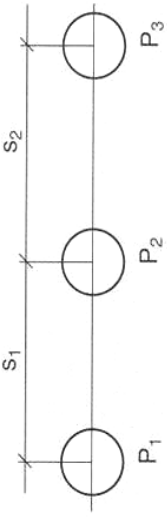


Şekil 3.42 ASTM C-1018 standardına göre yük – sehim ilişkisi

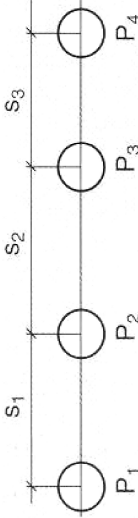
3.4.2.6 Farklı yük durumlarında $R_{e,3}$ değerleri

Burada, zemine oturan plak üzerine etki eden ve önceki bölümlerde ayrıntılı biçimde incelenmemiş çeşitli yük durumları için hazırlanmış olan $R_{e,3}$ değerleri tablo halinde verilmiştir [3]. Sıralı ve çoklu yük durumlarını içeren bu bağıntılarda kullanılan birimler daha önce kullanılan birimlerdir.

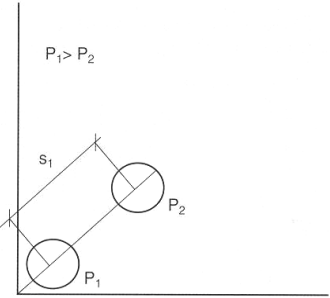
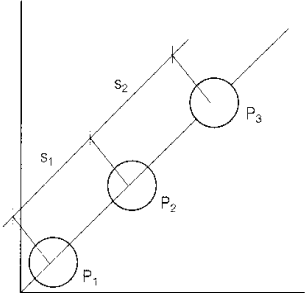
Tablo 3.19 Çeşitli yük durumları için hesaplanan $R_{e,3}$ değerleri

Yük tanımı	$R_{e,3}$ (%)
Plak ortasında sıralı yük durumları	
Plak ortasında 3 lü grup yük 	$R_{e,3} = \left[\frac{P_1 + P_2 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_3 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l} \right)}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{P_1 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_2 + P_3 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l} \right)}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{P_1 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l} \right) + P_2 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l} \right) + P_3}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ Burada: $f_{ctd, fl} = 0,393(f_{cu})^{2/3}$ Yukarıdaki bağıntılardan en büyük değeri veren $R_{e,3}$ dozaj seçimi için kullanılmalıdır.

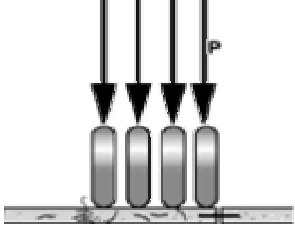
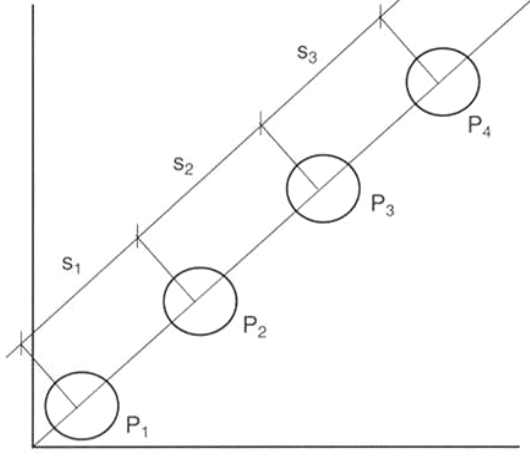
Tablo 3.19 (devam)

Yük tanımı	$R_{e,3}$ (%)
Plak ortasında sıralı yük durumları	
Plak ortasında 4 lü grup yük 	$R_{e,3} = \left[\frac{P_1 + P_2 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l}\right) + P_3 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l}\right) + P_4 \left(1 - \frac{s_1 + s_2 + s_3}{1,5l}\right)}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l}\right)\right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{P_1 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l}\right) + P_2 + P_3 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l}\right) + P_4 \left(1 - \frac{s_2 + s_3}{1,5l}\right)}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l}\right)\right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{P_1 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l}\right) + P_2 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l}\right) + P_3 + P_4 \left(1 - \frac{s_3}{1,5l}\right)}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l}\right)\right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{P_1 \left(1 - \frac{s_1 + s_2 + s_3}{1,5l}\right) + P_2 \left(1 - \frac{s_2 + s_3}{1,5l}\right) + P_3 \left(1 - \frac{s_3}{1,5l}\right) + P_4}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{2a_r}{l}\right)\right]} - 1 \right]$ Burada: $f_{ctd, fl} = 0,393(f_{cu})^{2/3}$ bağıntılardan en büyük değeri veren $R_{e,3}$ dozaj seçimi için kullanılmalıdır.

Tablo 3.19 (devam)

Yük tanımı	$R_{e,3}$ (%)
Plak köşesinde sıralı yük durumları	
Plak köşesinde 2 li grup yük 	$R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 + P_2 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_2 \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ Yukarıdaki bağıntılardan en büyük değeri veren $R_{e,3}$ dozaj seçimi için kullanılmalıdır.
Plak köşesinde 3 lü grup yük 	$R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 + P_2 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_3 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l} \right) \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_2 + P_3 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l} \right) \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l} \right) + P_2 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l} \right) + P_3 \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ Burada: $f_{ctd, fl} = 0,393(f_{cu})^{2/3}$ Yukarıdaki bağıntılardan en büyük değeri veren $R_{e,3}$ dozaj seçimi için kullanılmalıdır.

Tablo 3.19 (devam)

Yük tanımı	$R_{e,3}$ (%)
Plak köşesinde sıralı yük durumları	
Plak köşesinde 4 lü grup yük  Burada: $f_{ctd, fl} = 0,393(f_{cu})^{2/3}$	
$R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 + P_2 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_3 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l} \right) + P_4 \left(1 - \frac{s_1 + s_2 + s_3}{1,5l} \right) \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 \left(1 - \frac{s_1}{1,5l} \right) + P_2 + P_3 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l} \right) + P_4 \left(1 - \frac{s_2 + s_3}{1,5l} \right) \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ $R_{e,3} = \left[\frac{3 \left[P_1 \left(1 - \frac{s_1 + s_2}{1,5l} \right) + P_2 \left(1 - \frac{s_2}{1,5l} \right) + P_3 + P_4 \left(1 - \frac{s_3}{1,5l} \right) \right]}{f_{ctd, fl} h_f^2 \left[1 + \left(\frac{4a_r}{l} \right) \right]} - 1 \right]$ Yukarıdaki bağıntılardan en büyük değeri veren $R_{e,3}$ dozaj seçimi için kullanılmalıdır.	

3.4.3 Güvenlik Katsayıları ve Tasarım İlkeleri Arasındaki İlişkileri

Güvenlik katsayıları hem yük ve hem de malzemeye bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Bunun yanında seçilen tasarım ilkesine göre de söz konusu çarpanların kullanılması değişiklik göstermektedir.

3.4.3.1 Yük çarpanları

Kullanım sınır durumları için tasarımda, tasarım yükü P_d artırılmamış yükleri ifade ederken, taşıma gücü sınır durumunda P_d yük tipine göre belli bir çarpan ile artırılmış yükleri ifade etmektedir.

Plağa etkiyen yüklerin sabit ve hareketli olması durumuna göre farklı karakterde iki çeşit yük çarpanı kullanılmaktadır. Bu değerler tablo halinde aşağıda verilmektedir:

Tablo 3.20 Çeşitli yük durumlarına göre yük çarpanları [1,3]

Yük Biçimi	Rötre ve sürtünme		
	Hesaba katılmıyor		Hesaba katılıyor
	Derz mesafesi ≤ 12 m	Derz mesafesi ≥ 12 m	Derz önemli değil
Statik yük çarpanı γ_0	1,5	2,0	1,2
Dinamik yük çarpanı γ_D	1,4	1,4	1,4

Tablo 3.20 dikkatle incelenirse, dinamik yük çarpanının sabit ve 1,4 olduğu görülür. Esasen hemen tamamı trafiğe açık olan zemin betonları için kullanılacak dinamik çarpan, yükün tekrar sayısı ile ilgili olmalıdır. Bu etkiyi hesaba katan ve içerisinde yeteri miktarda çelik tel donatı bulunan zemin plaklarının dinamik yük çarpanı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilmektedir.

$$\gamma_D = 1 + 0,4 \log(N) / 7 \leq 1,4 \quad (3.83)$$

Burada N, yükün tekrarlanma sayısıdır ve aynı noktadan geçen araç sayısının, plağın ömrü boyunca 10 Bin ile 5 Milyon arasında değiştiği varsayılır. Betonun öngörülen ömrü boyunca yüklerden dolayı yorulma etkisini hesaba katmak için kullanılan dinamik çarpan ve yük geçiş sayısı N, beton kalınlığının hesabında büyük önem taşımaktadır. Örnek olarak: 5 Milyon araç geçişi için tasarlanan plak kalınlığı 210 mm iken, 10 Bin geçiş için kalınlık 160 mm' ye düşebilmektedir. Bu durumda geçiş sayısının dikkatlice hesaplanması ve hesaba katılması önemlidir. Geçiş sayısının doğru olarak hesaplanması mümkün olmayacaksa, güvenlik nedeniyle bu değer 1,4 alınması doğrudur, fakat ekonomik değildir. Geçiş sayısının elde edilmesi için tahminen aşağıdaki yöntem uygulanabilir [4]. Her 5 dakikada 1 geçiş, her biri 8 saatlik 2 vardiye, haftada 5 gün, yılda 50 hafta ve 20 yıllık bir plak ömrü. Bu hesap, sonuçta N için yaklaşık olarak 960 Bin sayısını vermektedir. Bu durumda dinamik çarpan; 1,34 olarak hesabedilebilir.

3.4.3.2 Malzeme arpanları

Zemin betonunda kullanılan malzeme arpanları aşağıda tablo halinde verilmektedir [18].

Tablo 3.21 Malzeme güvenlik arpanları

Malzeme Tanımı	arpan	
Donatısız ve elik tel donatılı beton	$1/\gamma_{mc}$	$\gamma_{mc} = 1,5$
Betonarme eliğı	$1/\gamma_{ms}$	$\gamma_{ms} = 1,15$

Tasarımda ayrıca karakteristik beton değerlerinin bir α çarpanıyla azaltılarak kullanılması tavsiye edilmektedir [2,18]. Bu durumda plak kalınlığının artması mümkün olsa da, plastik tasarım ve çatlak sonrası momentlerin yeniden dağılımı esas alındığından, elik tel donatılı beton davranışı, taşıma gücü sınır durumunda bu biçimde bir çarpanı kullanmak gerektiğini açık biçimde göstermektedir [2].

3.4.3.3 Tasarım eğilme dayanımları

ngrlen tasarım modeline göre, burada üç farklı eğilme dayanımı tarifi yapılmış ve tasarımda kullanılacak biçimde düzenlenmiştir. Tasarım durumunda yapılması gereken, kullanılan sınır duruma karşı gelen eğilme karakteristik değerlerinin malzeme güvenlik çarpanı ile çarpılmasından ibarettir.

Tablo 3.22 Tasarımda kullanılan sınır durumlar

Model no	Dayanım Kriteri	Tanım	Formül	Açıklama
1	atlama anı gerilmesi	$f_{ctd, fl}$	$f_{ctk, fl} / \gamma_{mc}$	Doğrusal hesap (KSD)
2	Maksimum gerilme	$f_{ctd, fl}$	$f_{maks.} / \gamma_{mc}$	Taşıma gücü sınırı – Doğrusal
3	Kalan dayanım	$f_{ctd, fl}$	f_{res} / γ_{mc}	Taşıma gücü sınırı - Plastik

Burada;

$f_{ctk, fl}$: Kiriş eğilme deneyinde çatlama yüküne karşı gelen gerilme,

$f_{maks.}$: Kiriş eğilme deneyinde maksimum yüke karşı gelen gerilme,

f_{res} :Kiriş eğilme deneyinde belirli bir sehim aralığına karşı gelen ortalama gerilmedir.

KSD : Kullanım sınır durumu

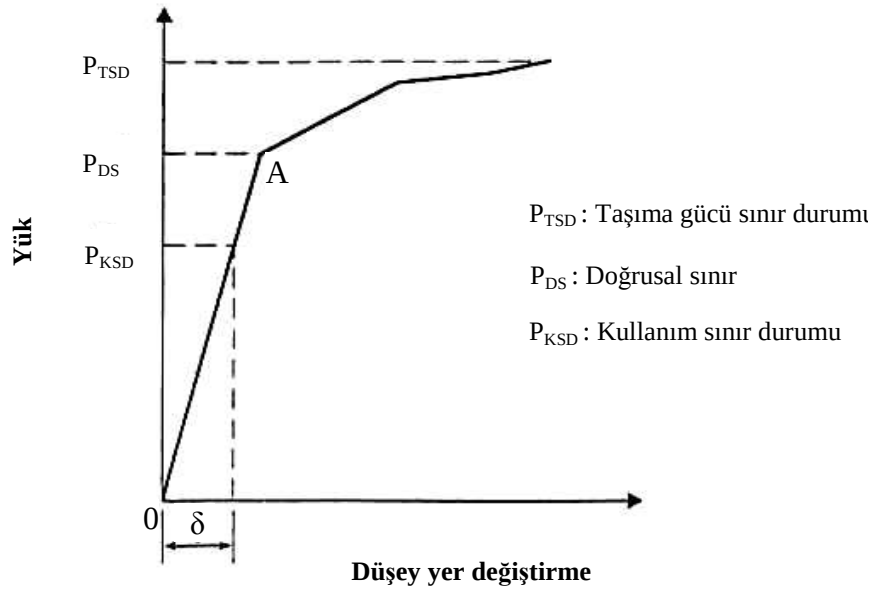
Aşağıdaki alt bölümde tasarım hakkında daha kapsamlı bir çalışma sunulmuştur.

3.4.3.4 Kullanım sınır durumu için kriterler

Plak kalınlığının eğilme ve ilerki bölümde anlatılan zımbalama kaymasına göre nihai yük durumlarının belirlenmesinin ardından, plak performansının kullanım sınır durumuna göre kontrol edilmesi gereklidir. Düşey yer değiştirme, çatlak kontrolü ve derz açıklığı ele alınan temel konulardır. Servis sınır durumu için malzeme güvenlik katsayıları ve yük arttırma katsayıları 1,0 alınır. Bazı durumlarda servis şartlarını sağlayabilmek için taşıma gücü yük durumlarına göre hesaplanmış plak kalınlığını arttırmak gerekebilir [2].

Düşey yer değiştirme kontrolü

Yeterli sünekliği sağlayan uygun donatı içeren zemin plağı için tipik bir yük – düşey yer değiştirme grafiği Şekil 3.43'te verilmektedir.



Şekil 3.43 Çelik tel donatılı plak için tipik yük – düşey yer değiştirme grafiği

Servis yükü $P_{KSD} (= \alpha P_{TSD} / (\gamma_{mc} \gamma_f))$, Şekil 3.43' te gösterilen yük – düşey yer değiştirme eğrisinin OA kısmında olmalıdır. Bu değer doğrusal sınır P_{DS} 'den küçüktür. Burada, P_{DS} ; doğrusal yük sınırı, P_{TSD} ise taşıma gücü yük sınırıdır. Oluşan düşey yer değiştirme δ , malzeme taşıma ve depolama sistemleri ile çalışan makinaların işleyişine etki etmemelidir.

$$\delta = c \left(\frac{P}{kl^2} \right) \quad (3.84)$$

Burada;

c :Yükün pozisyonuna bağlı olarak düşey yer değiştirme katsayısıdır.

k ve l daha önceden bilinen terimleri ifade etmekte olup sırasıyla yatak katsayısı ve bağlı rijitlik yarıçapı olarak bilinmektedir.

c değeri; kenar yüklemesi için 0,442 ve kenardan uzakta bir yükleme için 0,125 alınır. Köşe yüklemesi durumunda ise c değerleri (a_r/l)'nin bir fonksiyonudur ve 3.85 denklemi ile hesaplanabilir. Bu denklemle bulunan bazı değerler Tablo 3.23'te verilmiştir.

$$c = \left[1,1 - 1,24 \left(\frac{a_r}{l} \right) \right] \quad (3.85)$$

Tablo 3.23 Köşe yüklemesi durumunda düşey yer değiştirme katsayısı c değerleri

a_r/l	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200
c	1,04	1,01	0,98	0,95	0,92	0,89	0,86

60 kN'luk bir tekil yük altındaki plak ($a_r=56$ mm, $h=150$ mm, $E_{cm}=33 \times 10^3$ N/mm²) için k değerinin düşey yer değiştirmeler üzerindeki etkisi Tablo 3.24'te verilmiştir.

Tablo 3.24 60 kN yükleme altında k değerinin, plağın düşey yer değiştirmesine etkisi

k (N/mm ³)	l (mm)	P/ k l ² (mm)	Sehimler (mm)		
			Kenardan uzakta içte	Serbest kenarda	Serbest köşede
0,02	834	4,31	0,54	1,90	4,38
0,04	701	3,05	0,38	1,34	3,05
0,06	634	2,49	0,31	1,10	2,47
0,08	590	2,15	0,27	0,95	2,11
0,10	558	1,93	0,24	0,85	1,88

Uzun süreli yükleme durumunda sünmenin etkisi, l değerinin değiştirilmesiyle tahmin edilir. Uzun süreli yükleme durumunda sünme sonucu betonun elastisite modülü değişir, bu etki aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir: $E_{cm(t)} = E_{cm} / (1+\phi)$

$$E_{cm(t)} = \frac{E_{cm}}{(1+\phi)} \quad (3.86)$$

Burada ϕ ; sünme katsayısını ifade etmektedir.

Sünme katsayısı ϕ ; i) beton sınıfı, ii) çimento cinsi, iii) yükleme sırasındaki beton yaşı, ve iv) etkin kalınlık gibi değişkenlerden etkilenir. İlgili standartlarda bu konuda çeşitli grafikler mevcuttur [6,7].

Kullanım sınır durumunu etkileyen değişik tip yükleme durumları mevcuttur. Bunlar;

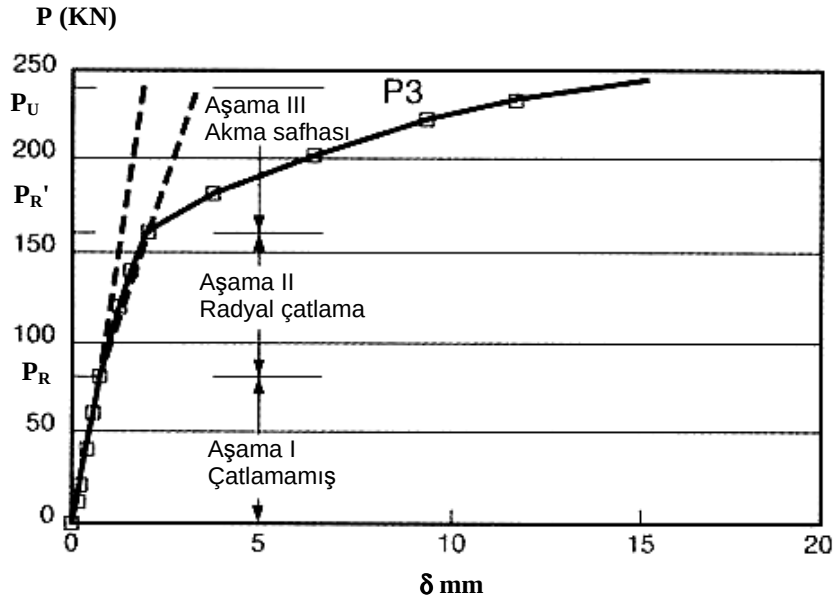
- a – Plastik rötre,
- b – Sıcaklık etkileri,
- c – Uzun süreli kuruma rtresi,
- d – Rtrenin engellenmesinden dolayı oluşan etkiler,
- e – Betonun kıvrılması,

şeklinde genel olarak sayılabilir. Yukarıda sayılan tüm etkiler ve bunların hesap yöntemleri Bölüm – 3.5’ te ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

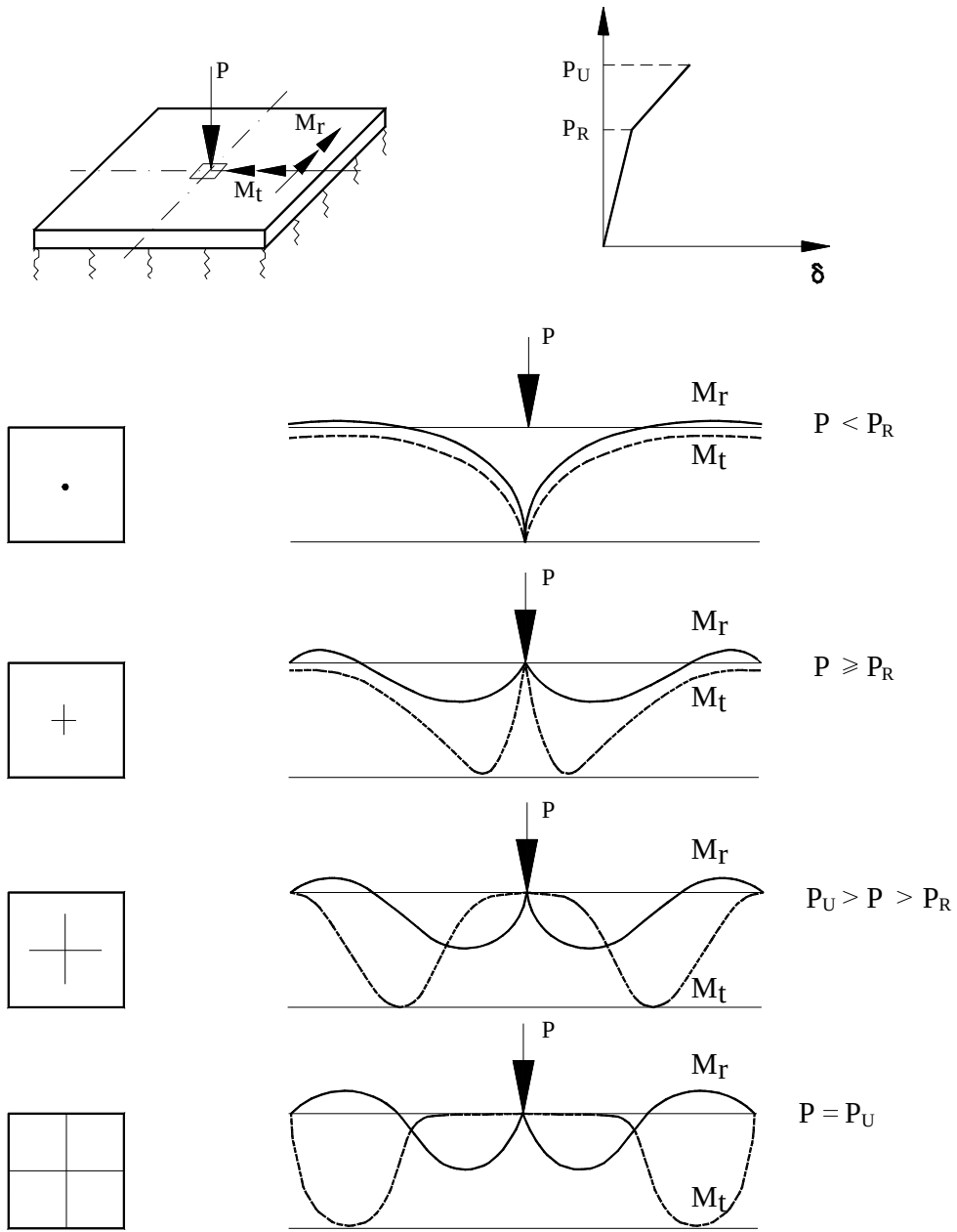
3.4.3.5 Tasarıma etki eden gerilmeler ve plak üzerine etkileri

şekil 3.45 ve 3.46 incelenirse donatısız bir plaktaki moment dağılımının (veya sadece çatlak kontrolü amacıyla hasır donatı içeren bir plağın) elik tel içeren plaktan akma kapasitesi olarak oldukça farklı olduğu görülür.

Plağın altında oluşan ilk kılcal atlağa kadar donatısız plak ile elik tel donatılı plağın davranışı benzerdir. İlk çatlaktan sonra iki plak arasındaki fark görülebilir. Çatlamış durumda donatısız (veya hasır donatılı) plak teğetsel momentleri taşıyamaz. Yükleme altında çatlak, plak kenarına doğru hızlıca yayılır. Çatlak plak kenarına ulaştığında kırılma yüküne ulaşılmış olur. Plastik safhadaki elik tel donatılı plakta yük altında bir plastik mafsal oluşur. elik tel donatılı betonun çatlak sonrası davranışına bağlı olarak zemin betonu halen eğilme momenti almaya devam eder. Süneklik (tokluk) oranı arttıkça plastik safhadaki kalıcı dayanım da artar.



şekil 3.44 Zemine oturan plakların teorik yük - sehim eğrileri [3, 20]



Şekil 3.45 Ortada tekil yük bulunan donatısız plakta moment dağılımı [3, 20]

$M_r = M_0$ ve $M_t = M_f$ olduğunda en büyük yüke ulaşılır.

Burada;

M_r : Radyal eğilme momenti

M_t : Teğetsel eğilme momenti

M_0 : Beton elastik durumdayken taşınabilecek eğilme momenti

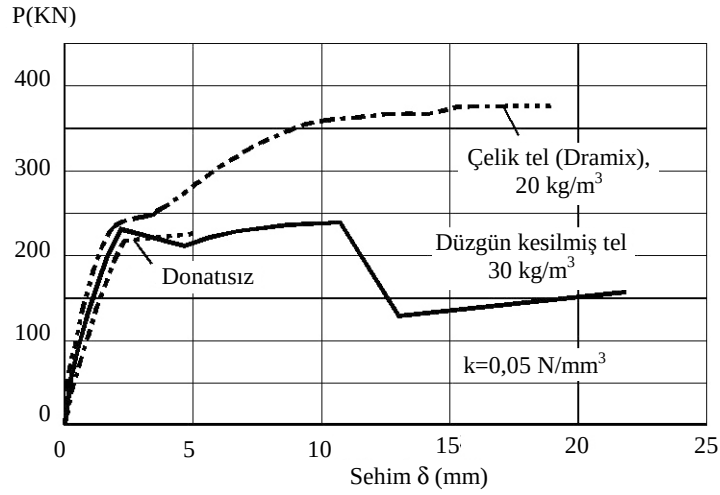
M_f : Plastik durumda çelik lifler tarafından alınabilecek eğilme momenti

Olarak ifade edilebilir.

Aşağıda verildiği üzere akma çizgileri teorisi (daha önce belirtildiği üzere), göçme yükünü en büyük iki eğilme momentinin toplamının fonksiyonu olarak öngörür.

$$\sum (M_0 + M_f) = (m' + m) \quad (3.87)$$

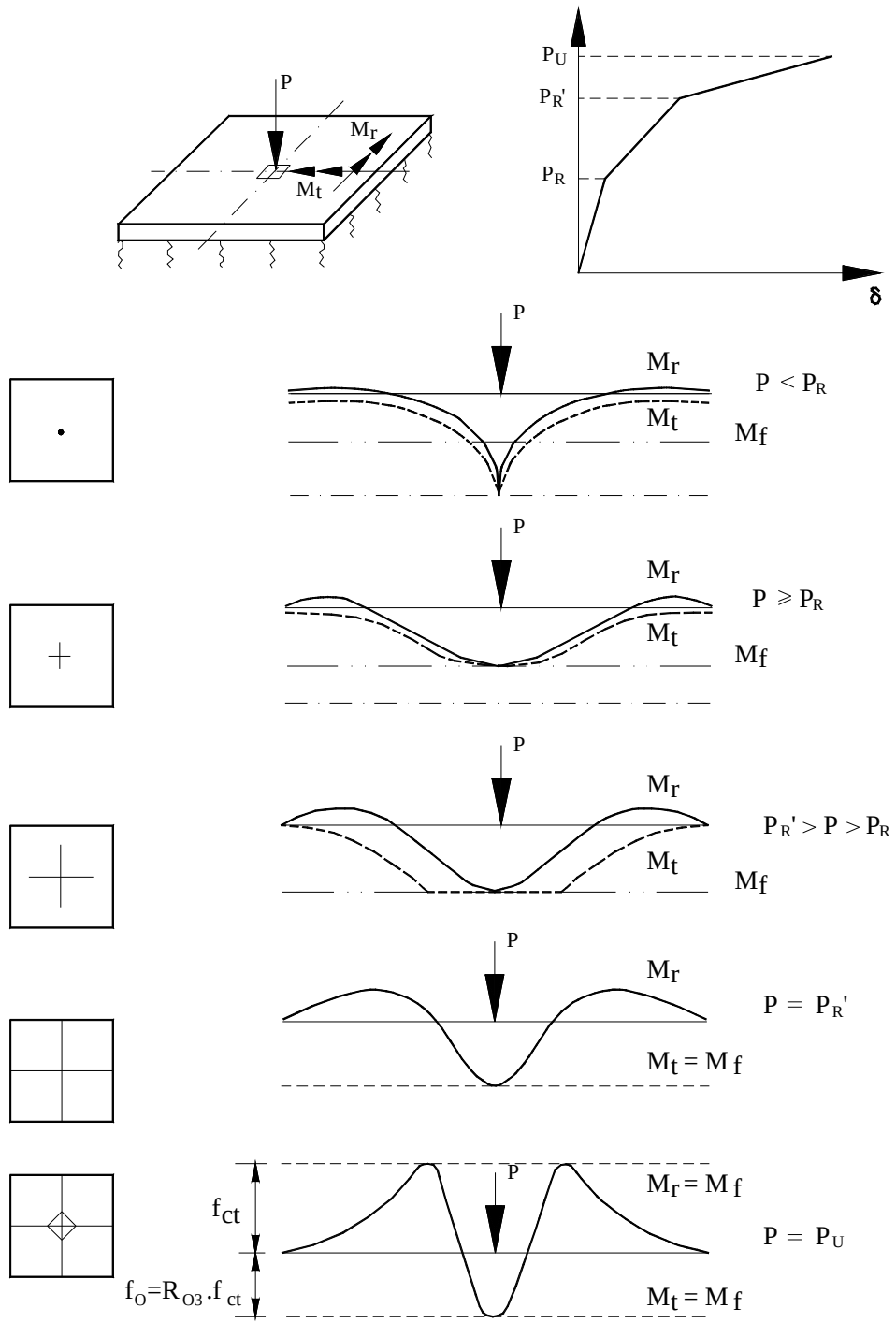
Çelik tel donatılı beton akma safhasında iken göçme yükü plak rijitliği ve alt temel tepkilerine bağlı olarak pozitif ve negatif momentlerin toplamıdır ve döşemenin son tasarımını belirler.



Şekil 3.47 Zemine oturan plakların donatılı/donatısız durumları için yük-sehim eğrileri

Buna göre, izin verilebilen en büyük eğilme gerilmesi ($f_{ctd,fl}$) ilk çatlak dayanımı (M_r için f_{cr}) ve artık eğilme gerilmesinin toplamı olduğu yukarıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır.

$$f_{e,3} = f_{cr} \cdot \frac{R_{e,3}}{100} \quad (3.88)$$



Şekil 3.46 Ortada tekil yük bulunan çelik tel donatılı plakta moment dağılımı [3, 20]

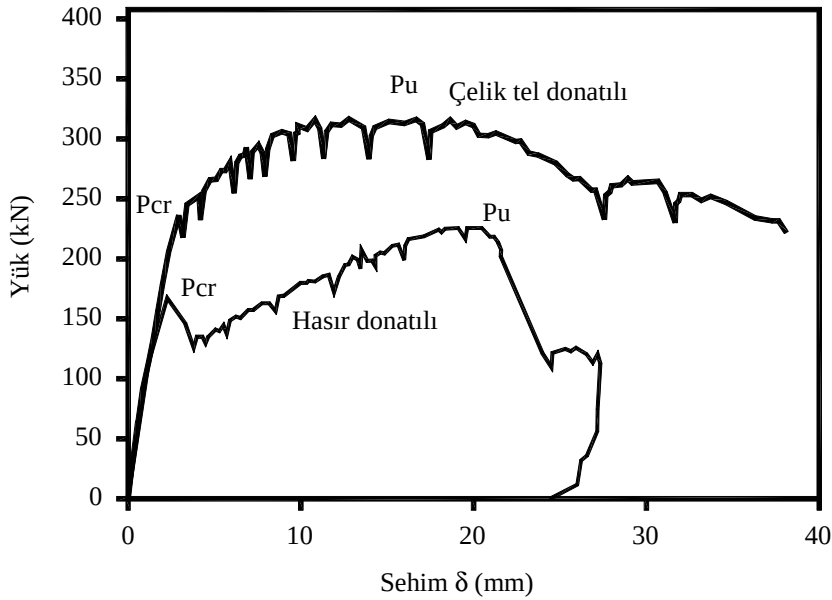
Tasarım modunda kullanılan tasarım eğilme gerilmeleri (güvenlik çarpanları olmadığı için taşıma gücü sınırı olarak, f_u) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır (Denklem 3.73b). Tasarım değerleri için Bölüm – 3.4.3’ e bakınız.

$$f_u = f_{ctk,fl} \left(1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right)$$

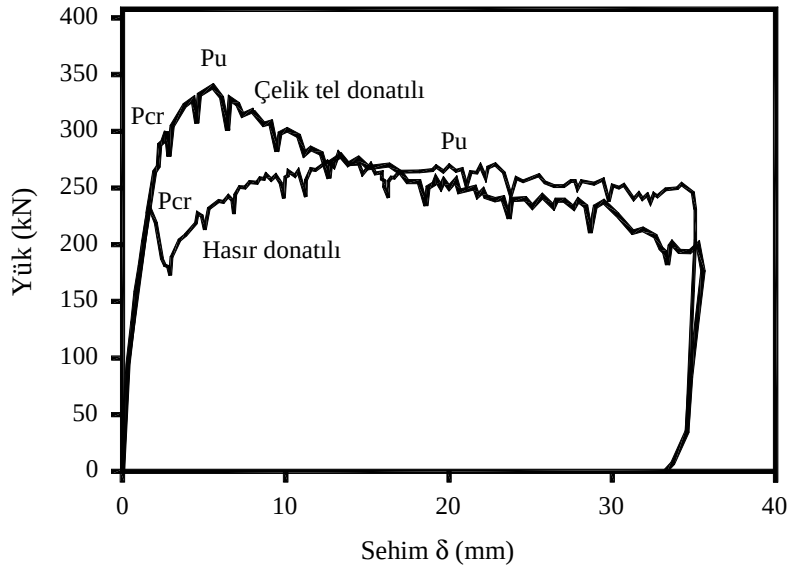
f_{cr} veya $f_{ctd,fl}$ donatısız betonun küp basınç dayanımı olup $0,393 \sqrt[3]{(f_{cu})^2}$ bağıntısı ile hesaplanabilir (Denklem 3.74).

Bu durum; Westergaard elastik metodunda kullanılan gerilmelerle karşılaştırıldığında gerilmelerin neden daha fazla görüldüğünü açıklar. Deneyel veriler; akma çizgisi teorisinin plak tasarımında kullanılması için $R_{e,3}$ değerinin 30’dan büyük olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu kritik değerin altında plak donatısız bir plak olarak davranır ve elastik formüllere göre tasarlanmalıdır.

Thames Politeknik’ de (İngiltere) yapılan araştırmalar çelik tel donatılı plakların ($R_{e,3} > 30$) çift hasır donatılı plaklarla karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir [21].



Şekil 3.48 Çelik tel ve hasır donatılı beton plakların gevşek alt zemin üzerinde iken plak merkezlerindeki yük – düşey yer değiştirme eğrileri [3, 21]



Şekil 3.49 Çelik tel donatılı ve kaynaklı hasır donatılı beton plakların sıkıştırılmış zemin üzerinde iken plak merkezlerindeki yük – düşey yer değiştirme eğrileri [3, 21]

3.4.4 Diğer Tasarım Yöntemleri

Bu bölümde ACI'nın 544 nolu Komitesinin ve Alman Beton Birliğinin (DBV) önerileriyle ilgili açıklamalar verilmekte, herbir önerinin detayları sunulmaktadır.

3.4.4.1 ACI 544 komitesinin tasarım önerileri

Bu bölümde çelik tel donatılı betonların tasarımı ile ilgili öneriler verilmektedir. Uygulamalarda daha çok bir temel üzerine uygulanan zemin betonları ve bazı kaplamalar gözönüne alınmaktadır. Çelik tellerin plak kalınlıklarını düşürmesi ve yapının performansını artırması esas gözönünde bulundurulmaktadır. Burada yapılan açıklamalar öneri ve yol gösterici nitelikte olup şartname değildir. Sadece tasarımda doğrudan kullanılabilen ve kirişlerde eğilme haline ait olan denklemler verilmektedir.

Çelik tel + çelik çubuk donatılı kirişlerde eğilme hali için tasarım denklemleri

ACI'nın nihai dayanım tasarım yöntemine benzeyen ve Henager ve Doherty tarafından geliştirilen bir yöntem özetlenmektedir. Nihai momenti elde etmek için, çelik tel donatılı betonun çekme dayanımı çelik çubuğun katkısına eklenmektedir. Yapılan temel varsayımlar Şekil – 3.50'de verilmektedir. Nominal moment (M_n) için aşağıdaki denklem yazılabilir [19, 20]:

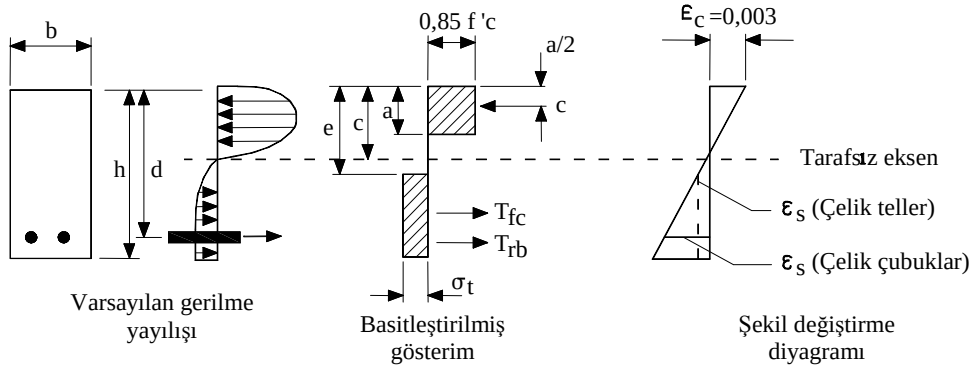
$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (h - e) \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (3.89)$$

Burada;

$$e = [\varepsilon_s (\text{çelik tel}) + 0,003] \frac{c}{0,003} \quad (3.90)$$

$$\sigma_t = 0,00772 \ell / d_f \rho_f E_{be} \quad (\text{MPa}) \quad (3.91)$$

- l : çelik tel boyu,
 d_f : çelik tel çapı,
 ρ_f : çelik telin hacim yüzdesi,
 F_{be} : çelik telin özeliğine bağlı olarak 1,0'den 1,2'ye kadar değişen lif aderans etkinliği,
 a : dikdörtgen gerilme bloğunun derinliği,
 b : kiriş genişliği,
 c : basınç lifinin çekme ve basınç kuvvetlerinin hesaplanmasıyla bulunan tarafsız eksene olan uzaklığı,
 d : basınç bölgesindeki uç lifin çekme bölgesindeki donatının merkezine olan uzaklığı,
 e : uç basınç lifinin çelik tel donatılı betonun çekme gerilmesi bloğuna olan uzaklığı,
 ε_s : kirişin teorik moment dayanımında çelikteki çekme şekil değiştirmesi, çelik teller için çekip çıkarma deneyine dayanarak çelik tel donatılı betondaki şekil değiştirme = σ_t / E_s (dinamik aderans dayanımı = 2,3 MPa),
 çelik donatıdaki şekil değiştirme = f_y / E_s ,
 ε_c : betondaki basınç şekil değiştirmesi,
 f'_c : betonun basınç dayanımı,
 f_y : çelik çubuğun akma dayanımı,
 A_s : çekme donatısının kesit alanı,
 C : basınç kuvveti, h = kirişin toplam derinliği,
 σ_t : betondaki çekme gerilmesi,
 E_s : çeliğin elastisite modülü,
 T_{fc} : çelik tel donatılı betonda çekme kuvveti = $\sigma_t b (h - e)$ ve
 T_{rb} : çelik çubuğun çekme kuvveti = $A_s f_y$.



Şekil 3.50 Çelik tel içeren betonarme kesitin tasarım varsayımları

Uç beton lifindeki sınır basınç şekil değiştirmesini 0,003 almak çok ihtiyatlı bir yaklaşımdır. ϵ_c için söz konusu bu değeri 0,0033, hatta büyük çelik tel dozajı durumunda 0,004 almak daha uygundur. Çelik teller için genellikle aderans dayanımı 2,3 MPa seçilmektedir.

3.4.4.2 Endüstriyel zeminlerin tasarımı için Alman Beton Birliğinin (DBV) önerileri

3.4.4.2a Malzeme parametrelerinin tanımı

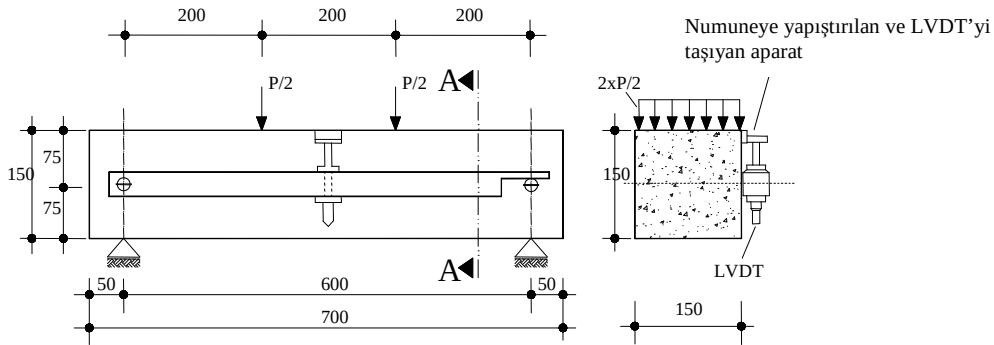
Eğilme deneyleri

İki farklı boyutta kiriş öngörülmektedir:

- 150x300x1100 mm'lik kirişler ve açıklık 900 mm (Tip I)
- 150x150x700 mm'lik kirişler ve açıklık 600 mm (Tip II)

Yük uygulanan noktalar arasındaki uzaklık daima 200 mm'dir.

Deney 30 mm'den 60 mm'ye kadar değişen boydaki lifler için geçerlidir. Açıklığın ortasındaki sehimin ölçülmesi bu amaç için geliştirilen bir elektronik düzenle gerçekleştirilmekte ve kirişin net sehim gözönünde bulundurulmaktadır. Deney sırasında elde edilen yük-sehim eğrisinin tümü kaydedilmelidir. Böyle bir deney, kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesini gerektirmektedir. Şekil 3.51, eğilme deney düzenini göstermektedir [21].

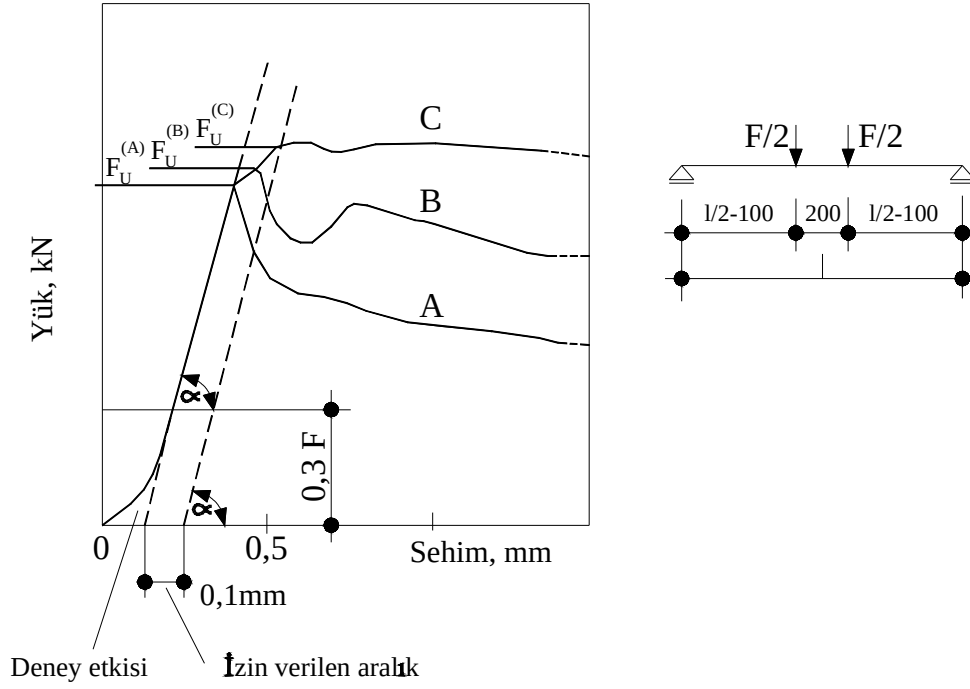


Şekil 3.51 Açıklığın ortasında sehimin kaydedilmesi için deney düzeni

Yük, beton döküm yönünde kirişin üst yüzeyine uygulanmalı ve yükleme sırasında deformasyon hızı sabit tutulmalıdır. Bu hız için en yüksek değer 0,5 mm/dakika olmalıdır. Açıklığın ortasındaki sehimin $l/150$ değerine erişinceye kadar deneyin sürdürülmesi gerekir, burada l açıklıktır. Kirişin 200 mm'lik orta bölgesi dışında (yük uygulanan noktaların dışında) çatlayan kirişler reddedilir.

Maksimum eğilme dayanımı

Maksimum eğilme yükü (F_u), eğilme özelliklerini tanımlamak için kullanılan kirişten elde edilmektedir. Bunun için, maksimum yük farklı tipteki yük-sehim davranışı için Şekil 3.52’de tanımlanmaktadır.



Şekil 3.52 Kiriş deneyinden nihai yükün (F_u) hesaplanması

Maksimum yükten, nihai eğilme dayanımı (β_{BZ}) aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$\beta_{BZ} = \frac{3(\ell - 200)}{2bd^2} F_u \quad (3.92)$$

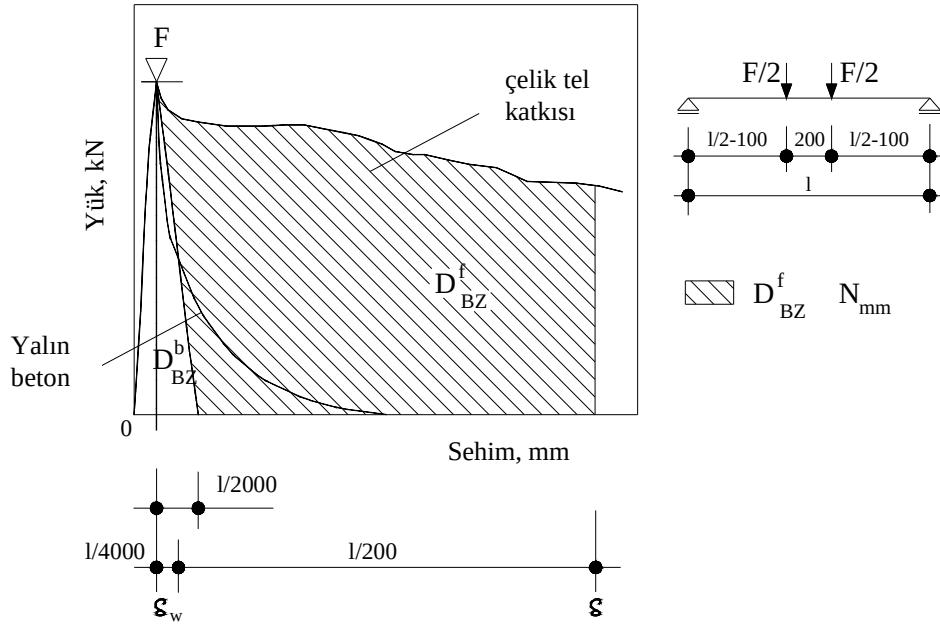
Burada;

$$D_{BZ} = D_{BZ}^b + D_{BZ}^f \quad (3.93)$$

D_{BZ} : çelik tel donatılı betonun enerji yutma kapasitesi (Şekil 3.53’deki yük-sehim eğrisi altında kalan alan)

D_{BZ}^b : donatısız (yalın) betonun payı

D_{BZ}^f : çelik tellerin payı



Şekil 3.53 Eşdeğer eğilme-çekme dayanımının hesaplanması (eşd β_{BZ})

3.4.4.2b Tasarımda kullanılan dayanım değerlerinin hesaplanması

Eğilme-çekme dayanımı ve eğilme-çekme dayanımının tasarım değeri (hes β_{BZ}):

$$hes\beta_{BZ} = \beta_{BZ,m} - s.t_5 / \sqrt{n} \quad (3.94)$$

Burada,

$\beta_{BZ,m}$:tip I numunesi üzerinde eğilmede elde edilen ortalama eğilme-çekme dayanımının

S :kullanılan numune sonuçlarının standard sapmasını

t_5 : numunelerin sayısına bağlı olarak %5'lik fraktildeki "student dağılımı" için değerlerini

n :numune sayısını göstermektedir.

Eğilme-çekme dayanımı tip II numunesinin sonuçlarını kullanarak hesaplandığında Denklem 3.95 uygulanmalıdır:

$$hes\beta_{BZ} = \alpha_{BZ} (\beta_{BZ,m} - s.t_5 / \sqrt{n}) \quad (3.95)$$

Burada

α_{BZ} :düzeltme katsayısını,

t_{20} : numunelerin sayısına bağlı olarak %20'lik fraktilde “student t dağılımı” için değeri ifade etmektedir. Tip 2 numunesi kullanıldığında Denklem 3.94 uygulanmalıdır.

3.4.4.2c Tasarım kavramları

Çelik tel donatılı betonun tasarımı için iki farklı kavram uygulanır.

- Gerilmeler çatlamamış beton kesiti tarafından taşınıyorsa elastik teori ve tahkik kullanarak hesaplama (mod I),
- Çatlamış beton kesitinde oluşan gerilmeler eşdeğer eğilme-çekme dayanımını (nom β_{BZ}) aşıyorsa, enerji yutma kapasitesi ve tahkiki gözönüne alarak hesaplama.

Sıcaklık değişimleri ve rötreinin etkileri, iç kuvvetler hesaplanırken gözönüne alınmalıdır. Betonun sünmesinden ileri gelen pozitif etkiler hesaba katılmalıdır.

Elastik teori kullanarak hesaplama (mod I)

İç kuvvetlerin hesaplanması elastik olarak desteklenen plak gözönüne alınarak yapılmaktadır. Elastisite Modülü DIN 1045'e göre ilgili beton sınıfına uygun seçilmelidir.

Hesaplama Tablo 3.25'e göre bir emniyet katsayısı ile çarpılarak yapılmaktadır. Oluşan gerilmeler Denklem 3.96 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu gerilmeler hesaplanan eğilme-çekme dayanımının (hes β_{BZ}) hesaplanan değerini aşmamalıdır.

$$K_N \frac{N_u}{A_o} + \frac{M_u}{W_o} \leq \text{hes} \beta_{BZ} \quad (3.96)$$

burada çekme kuvveti (N_u) için $K_N = 2,0$, basınç kuvveti (N_u) için $K_N = 1,0$, N_u = nihai durumda eksenel kuvveti, M_u = nihai durumda eğilme momenti, A_o = çelik tel donatılı plağın kesit alanı, W_o = çelik tel donatılı plağın mukavemet momenti ve β_{BZ} = eğilme-çekme dayanımı.

Enerji yutma kapasitesini gözönüne alarak hesaplama (mod II)

İç kuvvetlerin hesaplanması, çatlaklar boyunca kesit alanında azaltılmış rijitliğe sahip elastik olarak destekli bir plak varsayılarak hesaplanmaktadır. Çatlaklar arasında, çatlamamış plağın tüm rijitliği varsayılmaktadır. Tablo 3.25'e göre bir emniyet katsayısıyla artırılmış yükler için hesaplama yapılmaktadır. Bir yerdeğiştirme olarak, iç kuvvetler elastik teori varsayılarak türetilmektedir. Bu durumda, gözönüne alınan rijitlik çatlamamış plağın rijitliğinin en az 1/3'ü kadar olmalıdır.

Desteklenmiş bir plak varsayıldığında, çatlaklar boyunca gerilmeler Denklem (3.96)'nin koşullarını sağlamalıdır.

$$K_N \frac{N_u}{A_o} + \frac{M_u}{W_o} \leq nom\beta_{BZ} \quad (3.97)$$

Elastik teori kullanılarak basitleştirilmiş hesaplama yapıldığında, tüm plaktaki gerilmeler $nom\beta_{BZ}$ 'ye eşit veya küçük olmalıdır.

3.4.4.2d Emniyet katsayıları

Emniyet katsayısı aşağıdaki gibi türetilir:

$$\gamma = \frac{\gamma_o}{1 + K_D \frac{nom\beta_{BZ}}{hes\beta_{BZ}}} \quad (3.98)$$

Burada;

γ_o : Tablo 3.25'ye göre emniyet katsayısının temel değeri

K_D : Tablo 3.25'ye göre alınacak katsayıyı göstermektedir.

$nom\beta_{BZ} / hes\beta_{BZ}$ oranı 1'e eşit veya ondan küçük olmalıdır.

Tablo 3.25 Emniyet katsayısının (γ) hesabı için değerler

Tanım	Normal endüstriyel zeminler	Normal çatlak genişlik limitlerine sahip endüstriyel zeminler	Çatlak genişliğini sınırlayan daha yüksek gereksinimler
Temel değer (γ_o)	1,5	2,0	2,5
Katsayı (K_D)	0,1	0,25	0,40