

3.5 ZEMİNE OTURAN PLAKLARDAKİ RÖTRE, SICAKLIK VE BENZER ETKİLER

Önceki bölümlerde açıklanan ve hesap yöntemleri sunulan farklı yük durumlarından oluşan gerilmeler yanında, zemine oturan plaklarda başka gerilmeler de ortaya çıkmaktadır.

Zemine oturan plaklarda üç tür şekil değiştirme ve bundan dolayı meydana gelen gerilmeler söz konusudur. Bunlar:

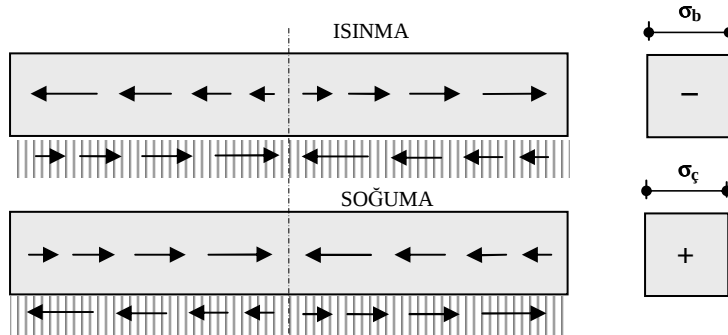
1. Plastik rötre ve oturma,
2. Sıcaklık değişimlerinin etkisiyle hareket, kıvrılma
3. Uzun süreli kuruma rötresi.

Bu şekil değiştirmelerin oluştuğu dönemler Tablo 3.26’da verilmiştir.

Tablo 3.26 Plak hareketlerinin oluştuğu tipik dönemler

Hareket türü	Dönem
Plastik	Dökümden ilk birkaç saat sonra
Sıcaklığa bağlı erken kısalma	Dökümden birkaç gün sonra
Mevsimsel sıcaklık değişimi	İlk yıldaki çevrimlerin en kritik olmasına karşın yıllık / günlük
Kuruma rötresi	Dökümden birkaç ay veya yıl sonra

Sıcaklık ve rötre nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerin hesabı için bilinen basit yöntemler kullanılabilir ve esasen sözkonusu iki etki için hesaplamalar birbirine benzer biçimde yapılabilir. Plakların hemen tamamı sınırlarından veya oturdukları zeminlerden dolayı az veya çok miktarda söz konusu etkilerin neden olduğu gerilmelerle karşı karşıya kalmaktadırlar. Sıcaklıktaki artış plakta basınç gerilmelerine, sıcaklığın düşmesi ve rötreinin oluşması ise plakta çekme gerilmelerine neden olur (Şekil 3.54) [6].



Şekil 3.54 Beton plakta ısınma ve soğuma sonucu oluşan gerilme durumları

Çekmede oluşan şekil değiştirmeler, betonun çekme şekil değiştirme kapasitesini geçtiğinde çatlaklar oluşur. Tasarım yöntemi plak üst yüzeyinde çatlakları önlemeyi amaçlar.

Plastik rötre

Plastik rötre beton yerleştirildikten bir kaç saat sonra oluşur. Betonu oluşturan malzemelerin doğru seçimi ve karışım oranlarının değiştirilmesi ile taze betonun aşırı kurumasına karşı önlem alınmasıyla bu çatlaklar azaltılabilir. (Ayrıntılar paragraf 6.1.1'de verilmektedir.)

Sıcaklık etkileri

Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan sıcaklık ile çevre sıcaklığının farkı sonucu büzülme oluşur. Sıcaklık kaybı 10°C den fazla olabilir ve bu durum 100×10^{-6} kadar bir şekil değişimine neden olabilir. (Ayrıntılar paragraf 6.3'de verilmektedir.)

Uzun süreli kuruma rötresi

Uzun dönemde, sertleşmiş betondan su kaybı kuruma rötresine neden olur. Bu durum beton özellikleri ile çevre koşullarına bağlıdır ve yıllarca devam edebilir. İyi tasarlanmış bir beton için kuruma rötresinden kaynaklanan şekil değiştirmesi 400 ila 600×10^{-6} arasındadır. 6 metrelik bir plak için bu şekil değiştirme 2,4 ila 3,6 mm kısaltmaya denk gelir. Uzun süreli kuruma rötresi beton bileşenlerinin uygun seçilmesiyle azaltılabilir [1,12].

3.5.1 Zemine Oturan Derzli Beton Plaklarda Gerilmeler

Sıcaklık ve rötre etkisini sınırlandırmak veya en aza indirmek için, beton plak çevresi boyunca komşu plaklardan bir derz ile ayrılabilir. Derz aralıkları; sözkonusu plağın ve komşu plakların hareketlerinin hesaplanması sonucu belirlenir. Böylece, gerilmelerin hesaplanması sırasında derzlerle ayrılmış her plak, kendi ağırlığı ve zemin sürtünme katsayısı ile diğer komşu plaklardan bağımsız olarak hesaba katılabilir.

Hesaplamalarda en basit yol; sıcaklık ve rötre etkilerini iki bölüme ayırmaktır:

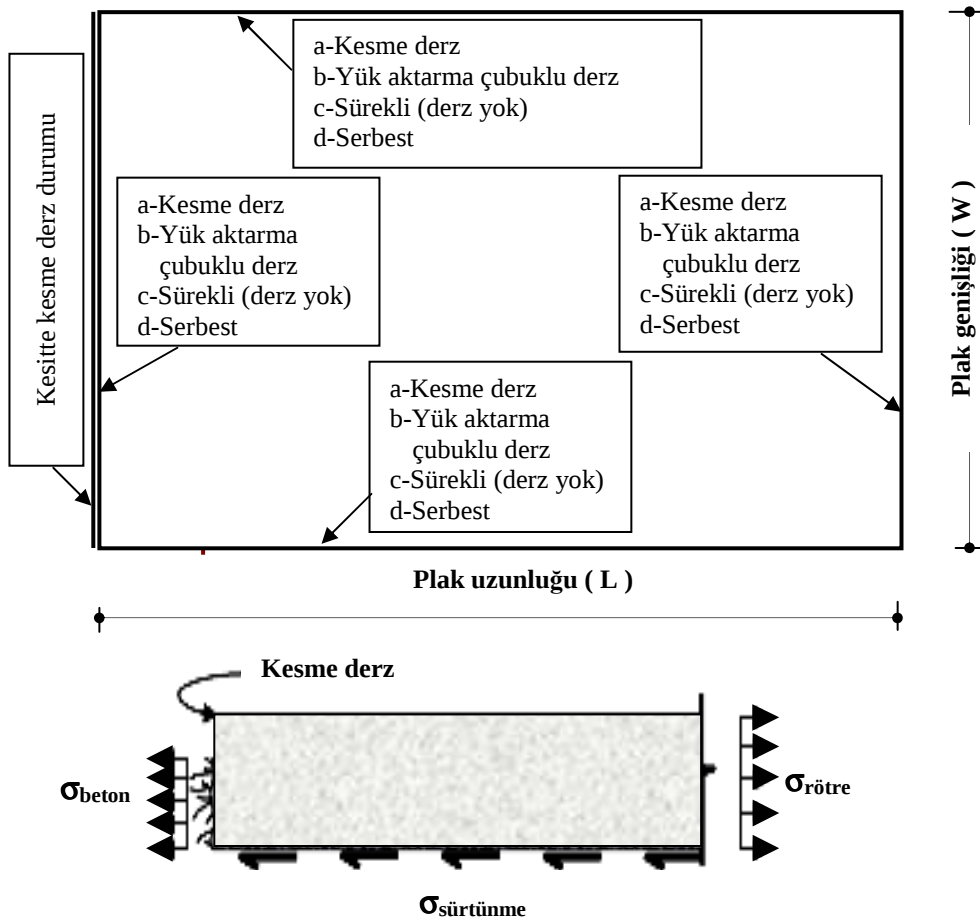
3.5.1.1 Düzgün sıcaklık değişimi (rötre etkisi)

Zemin, beton plağın hareketini aralarındaki sürtünme etkisinden dolayı bir miktar engeller. Plak ile zemin arasındaki bu engelleme, araya değişik malzemeler yerleştirilmek suretiyle azaltılabilir (Şekil 3.55). Bununla beraber sözkonusu engelleme tam olarak sağlanamaz. Betonun kısalmasına ve bu nedenle beton içerisinde çekme gerilmeleri oluşturan rötre kısaltmaları, betonun çekme dayanımı basınç dayanımına nazaran az olduğundan (basınç dayanımının yaklaşık 1/10 mertebesinde), beton için tehlike oluşturmaktadır.

Donatısız beton plak sadece kendi ağırlığını kullanmak suretiyle kısaltmaları engelleyerek gerilme oluşmasına neden olurken, çelik tel içeren betonların kısaltmaya karşı ek direnç gösterdikleri ve ek gerilmenin oluşmasına neden oldukları bilinmektedir. Şekil 3.55, farklı iki gerilmenin oluşma biçimi hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 3.27 Temas yüzeyi türüne göre sürtünme katsayıları [2]

Sürtünme katsayısı (μ)	
Yıkanmış kum ve çakıl karışımı	1,6
Emülsiyon halde asfalt	2,0
İri taneli alttemel	1,3
Plastik zemin	1,7
Polietilen örtü – çift kat	0,5
Polietilen örtü – tek kat	0,7
Kum tabakası	0,9
Asfalt tabakası	3,2



Şekil 3.55 Tipik bir beton plakta rötre gerilmelerinin oluşumunun şematik gösterimi

Çelik tel donatılı betonda eğilmedeki çekme gerilmesi

Bir önceki bölümde, Şekil 3.38’ de çelik tel donatılı betonun gerçek gerilme yayılımı gösterilmişti. Şekilde gösterilen çekme bölgesinde gerilme değeri $0,37f_{e,3}$ olarak ifade edilmiştir. Bu durumda kesme derzinin plak üst yüzeyinden aşağıya doğru plak kalınlığının $1/3$ ’ ünde olduğu varsayılırsa, geriye kalan $2/3$ ’ lük kısımda çelik tel donatılı betonda meydana gelen gerilme kolayca elde edilir [1].

$$\sigma_{beton} = 0,37 f_{e,3} \left(\frac{2}{3} \right) \cong 0,27 R_{e,3} f_{ctk, fl} \quad (3.99)$$

Burada;

$R_{e,3}$:Çelik tel donatılı betonda 3 mm’lik sehime göre eşdeğer eğilme dayanımı oranı,

$f_{ctk, fl}$:Donatısız betonun eğilmede çekme dayanımıdır.

Meydana gelen gerilme değerinde bulunan betonun eğilme dayanımı ifadesinin karakteristik dayanım olduğu ve gerilme elde edilmesi durumunda doğrudan kullanılması gerektiği hatırlanmalıdır. Bu ifadenin malzeme katsayısı ile küçültülmesine, güvensiz tarafta kalınacağı için olanak verilmemelidir. Araç trafiğine açık olan plaklar için, dinamik güvenlik katsayısının uygulanması ve gerilmenin artırılması önerilmektedir.

Plakın kendi ağırlığından dolayı oluşan gerilme

Sürtünmeden meydana gelen çekme gerilmesi, plak kenarında veya derzinde sıfırdan başlamak suretiyle plak merkezine doğru artacaktır. Merkezdeki gerilme aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir.

$$\sigma_{sürtünme} = \frac{N_{\zeta}}{1000h_f} = \frac{\gamma_b (L/2) h_f \mu}{1000h_f} \quad (3.100)$$

Burada;

γ_b :Betonun birim hacim ağırlığı (24 kN/m³),

L :Plak uzunluğu (m),

h_f :Plak kalınlığı (gerilme plak kalınlığından bağımsız),

μ :Plak ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı (Bkz. Tablo 3.27).

Sadeleştirme yapılır ve bilinen değerler denklem 3.99’ da yerine konulursa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\sigma_{sürtünme} = 0,012 \mu L \text{ [MPa]} \quad (3.101)$$

elde edilir. Bilindiği gibi plaklar uzunluğu ve genişliği olan iki boyutlu yapı elemanlarıdır ve dört kenarında farklı mesnetlenme biçimleri ile farklı derz şekilleri olabilir. Bundan dolayı plaka üzerindeki farklı bölgelerde, her aks boyunca serbest veya dübelli kenarlarda ve derz oluşması olasılığı bulunan kısımlarda bu gerilmelerin teorik olarak hesab edilmesi gerekmektedir.

Daha önceki bölümlerde akma çizgileri yöntemi kullanılarak yapılan plastik hesapta, çatlamanın plak üst yüzeyinde ve dairesel (veya oval) biçimde meydana geldiği belirtilmiş ve bağıntılar bu varsayım ile pozitif ve negatif momentlerin toplamı kullanılarak türetilmişti. Buna benzer bir yaklaşım rötrelere gerilmelerinin yeter yaklaşıklık ile

bulunmasında da kullanılabilir. Bu nedenle: Çevresinde sadece kesme derz olan bir plağın bu derzlerden birinin hemen yakınında ortaya çıkan rötre gerilmesi ifadeleri aşağıdaki gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
\text{Plak boyunca oluşan} & \rightarrow \sigma = 0,27R_{e,3} f_{ctk, fl} + 0,012\mu L \\
\text{Plağın diğer doğrultusunda oluşan} & \rightarrow \sigma = 0,27R_{e,3} f_{ctk, fl} \\
\text{Plak merkezindeki ortalama gerilme} & \rightarrow \sigma = 0,27R_{e,3} f_{ctk, fl} + 0,012\mu L / 2
\end{aligned} \tag{3.102}$$

Her ne kadar yük aktarma çubuklarının çekmeye karşı dayanımlarının bulunmamasına karşın, bu çeşit derzlerde rötre gerilmesi hesabı için bir yaklaşım olarak; bunların zemine tam olarak paralel ve plak kenarına tam dik biçimde yerleştirilemiyor olması nedeniyle, kesme derzlerinde olduğu gibi hesaplanabileceği kabul edilebilir. Bu seçim, hesaplarda çok sayıda değişik durum ile çalışılmasını engelleyecek ve hesap kolaylığı sağlayacağı gibi tasarımcıya da zaman kazandıracaktır. Aşağıdaki tabloda (Tablo 3.28), plağın çeşitli bölgelerinde meydana gelen ortalama rötre gerilmeleri verilmektedir.

Her ne kadar rötre gerilmesi zamana bağlı olarak azalmıyorsa da, aslında betonda oluşan gerilmeler sünme nedeniyle azalma eğilimindedirler. Esasen, betonun dayanımındaki artışın bir sonucu olarak ortaya çıkan rötre gerilmesindeki azalma, çatlama için en kritik zamanın betonun yeni döküldüğünü fakat çekme dayanımının ise düşük değerde olduğu anda gerçekleştiğini ifade etmektedir. Tablo 3.28’ inde verilen ifadelerin, özellikle beton kürrü tamamlanincaya kadar geçen süre için hesaplamada düzenlenmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle, gün içerisinde farklı sıcaklıklar ile plak boyunun sürekli değişme eğiliminde olduğu ve rötre gerilmelerinin sünme etkilerine benzer biçimde zamana bağlı olarak değişiklik gösterebileceğinin akıldan çıkartılmaması gerektiği ve tasarım sırasında bu nedenle plağın tam olarak tutulduğu duruma karşı gelen gerilmelerin kullanılmasının doğru olacağı ifade edilmelidir.

Tablo 3.28 Plakta ortaya çıkan ve bölgelere göre düzenlenmiş rötre gerilmesi ifadeleri [1]

Bölge	Kısıtlanmış ortalama rötre gerilmesi $\sigma_{rötre} [N/mm^2]$
Serbest köşe	0
Serbest kenar	$(0,27R_{e,3} f_{ctk, fl} + 0,012\mu L) / 2$
Dübelli veya kesme derz	$0,27R_{e,3} f_{ctk, fl} + 0,012\mu L / 2$ (Bakınız: Şekil 3.49)
Dübelli köşe	$0,27R_{e,3} f_{ctk, fl}$
Orta bölge	$0,27R_{e,3} f_{ctk, fl} + 0,012\mu(W + L) / 2$

Rötre gerilmelerinin oluşmasında sürtünme etkileri betonun katkısının yanında şüphesiz düşük mertebededir. Bununla beraber, plağın plandaki boyutları arttıkça bu etki de giderek artma eğilimi göstermektedir. Plakta sürtünmeden dolayı meydana gelen etkileri azaltmak ve çatlakları kontrol altına almak için plak boyutlarını belirli sınırlar içerisinde tutmak gerekir. Çelik tel donatılı plaklarda maksimum derz mesafesini bulmak için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir [1].

$$L_{d,maks.} = 0,103R_{e,3}(K_1K_2K_3f_{cd})^{2/3} / \mu \quad (3.103)$$

Burada;

f_{cd} : Betonun 28 günlük tasarım silindir basınç dayanımı [MPa],

$R_{e,3}$:3 mm'lik sehime göre eşdeğer eğilme dayanımı oranı,

μ :Sürtünme katsayısı,

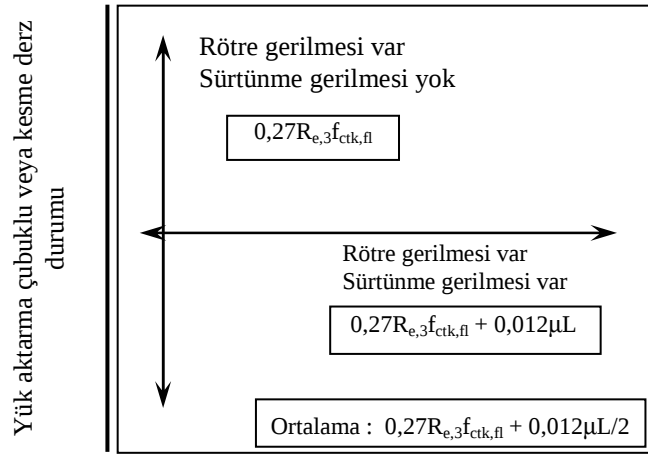
K_1 : $(h_f / 140)^2$ ve ≤ 1 (h_f [mm]),

K_2 :Küre bağlı bir çarpan (Tablo 3.29),

K_3 :Dış mekandaki plaklar için 1,0 ve içteki plaklar için 1,25 olarak ifade verilmektedir.

Tablo 3.29 Beton plağın kür biçimine göre elde edilen K_2 değeri

Kür biçimi	K_2
7 Gün boyunca üst yüzey su altında	0,5
Uygun biçimde kür uygulanmış	0,3
Kür uygulanmamış veya zayıf kür	0,2



Şekil 3.56 Dübelli veya kesme derz durumunda rötre gerilmesini veren ifadelerin açıklanması

Yukarıda hesap yöntemi ile rötre gerilmelerinin oluşmasını azaltmak ve kontrol altına almak mümkündür. İstenilen kalite ve işlenebilirlikte betonun siparişi, beton üreten tesisin özellikle agrega ve çimento kalitesi ile iş ciddiyeti, mikserlere yerleştirilen betonun şantiye ortamına ve kalıptaki yerine ulaşıncaya dek geçen süredeki durumu, mikser operatörünün eğitimi ve kültürü, betonun katkılı olup olmaması, hava şartları ve beton kalitesi ile betonun döküm anındaki sıcaklığı rötreyi doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen değişkenlerdir. Çok sık karşılaşılan durumların başında, betonun şantiyeye intikali ve dökümü sırasında yetkili bir personel bulunmasındaki zorluktur. Esasen üzerinde durulması gereken husus, betona verilmesi gereken özenin yeterince anlaşılamamış olmasındadır. Betonun dökümü, yerleşmesi ve korunması şantiyedeki en önemli işlerdendir. Yukarıda bahsedilen noktaların çoğunun rötreye etkisi Tablo 3.30'de yer almaktadır.

Tablo 3.30 Rötrenin artmasına neden olan olayların yığılımlı etkisi [4,22]

Sıra	Rötrenin artmasına sebep olan yanlış imalatlar		Rötredeki eşdeğer artış (%)	Yığılımı etki
1	Şantiye etkisi	Betonun dökümü sırasında 27 8C olması (en uygun beton döküm sıcaklığı 15 8C dir)	8	1,00 x 1,08 = 1,08
2		Beton Slump değerinin 150 ~ 180 mm olması (doğru değer 75 ~ 100 mm olmalı)	10	1,08 x 1,10 = 1,19
3		Mikserin aşırı dolu olması, şantiyede uzun süre bekleme veya mikser tanburunun çok dönmesi	10	1,19 x 1,10 = 1,31
4	Malzeme etkisi	40 mm maksimum agreg a çapı kullanılması (doğru değer 20 mm olması durumudur)	25	1,31 x 1,25 = 1,64
5		Göreceli olarak yüksek rötre kapasiteli çimento kullanmak	25	1,64 x 1,25 = 2,05
6		Yeterince yıkanmamış kirli agreg a kullanımı	25	2,05 x 1,25 = 2,56
7		Rötreye karşı koyma gücü az agreg a kullanımı	50	2,56 x 1,50 = 3,84
8		Yüksek derecede rötre oluşturan katkı kullanımı	30	3,84 x 1,30 = 5,00
Toplam Artış : Toplam = % 183			Biriken = % 400	

3.5.1.1a Sünme etkisi ve beton özeliğine bağı olarak plak merkezinde rötre gerilmesi

Plak hareketi tamamen kısıtlanmış ise merkezdeki rötre gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{r\ddot{u}tre,merkez} = \frac{\psi \cdot E_{cm} \cdot \varepsilon_r}{1 + \phi} \quad (3.104)$$

Burada;

ψ :Kısıtlanmış rötre çarpanı ($0 < \psi < 1$)

(Bu katsayı kalınlık ve derz aralığının fonksiyonudur; aşağıdaki tabloya bakınız.)

μ :Plak ile alt temel arasındaki sürtünme katsayısı (Tablo 3.27)

L_d : İki derz arasındaki plak açıklığı

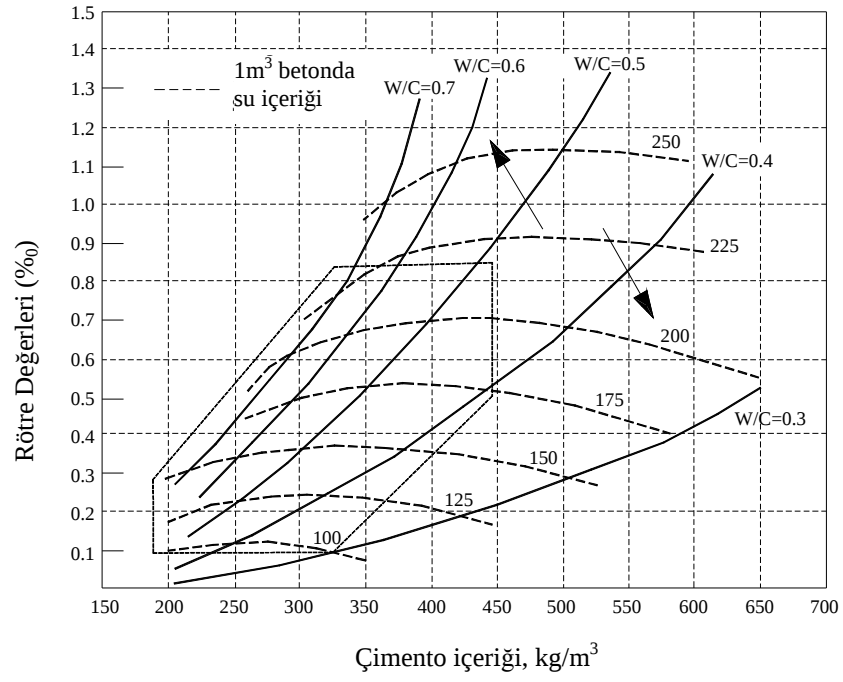
h_f : Plak kalınlığı

ϕ : Sünme katsayısı: $\phi \approx 5$ (erken yaştaki beton için)

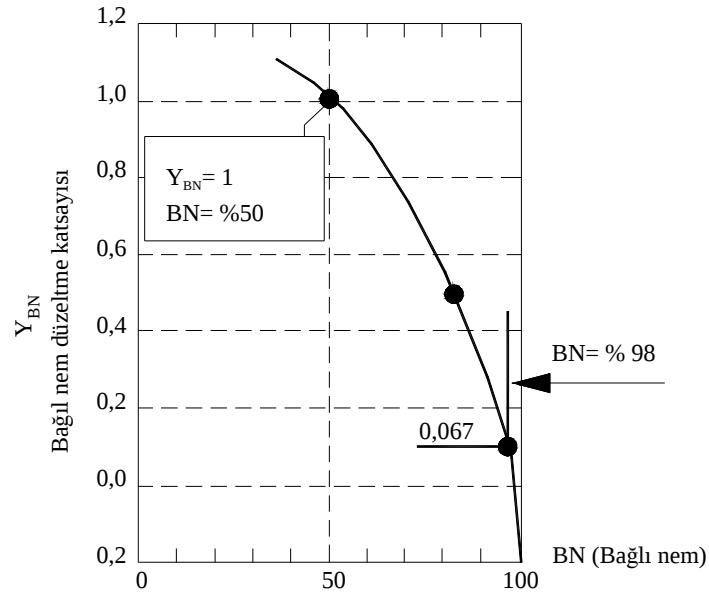
ε_r :Beton türü, su/çimento oranı, kür koşulları gibi özelliklere bağı olarak betonun rötresi.

Tablo 3.31 Sürtünme, derz aralığı ve plak kalınlığına bağı olarak kısıtlanmış rötre çarpanı(ψ) [3]

ψ					
μ	L_d/h_f				
	10	20	30	50	> 100
< 0,5	0,05	0,15	0,25	0,5	1
1	0,1	0,3	0,5	1	1
2	0,2	0,6	1	1	1



Şekil 3.57 Çimento miktarı ve su/çimento oranına bağlı olarak rötre



Şekil 3.58 Havadaki neme bağlı olarak düzeltme katsayısı [3]

Şekil 3.57'deki grafikte rötre (düşey eksen); çimento miktarı (yatay eksen), su içeriği (kesikli eğriler) ve su/çimento oranı (sürekli eğriler) ile bulunabilir. Gerekli veriler yoksa aşağıdaki tablo basitleştirilmiş bir değerlendirme verebilir.

Havadaki nemin etkisini dikkate almak için de farklı bir grafik kullanılabilir (Şekil 3.58).

Örnek:

Çimento dozajı : 350 kg/m³

Su/çimento oranı : 0,4

→ Şekil – 3.57 kullanılarak rötre 300×10^{-6} olarak elde edilir.

Bağıl nem (BN) = %60 olarak kabul edilsin.

→ Şekil – 3.58'den $Y_{BN} = 0,9$ olarak bulunur.

→ Nihai rötre : $300 \times 10^{-6} \times 0,9 = 270 \times 10^{-6}$ hesaplanır.

Tablo 3.32 Rötre değeri için basitleştirilmiş katsayılar (BN = Bağıl nem)

$\epsilon_r (\text{‰})$	
İç mekanlar	
% 50 < BN < % 60	0,4
% 40 < BN < % 50	0,5
% 30 < BN < % 40	0,6
% 20 < BN < % 30	0,7
BN < % 20	0,8
Dış mekanlar	
% 60 < BN < % 70	0,3
% 70 < BN < % 80	0,2
BN > % 80	0,1

Batı Avrupa ülkeleri başlangıç değerleri olarak şunları kullanır [2]:

İç mekanlar : $\epsilon_r = 400 \times 10^{-6}$

Dış mekanlar : $\epsilon_r = 200 \times 10^{-6}$

Uygulamada daima yerel rutubet özellikleri göz önüne alınmalıdır. Plak kenarında rötre gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma_{\text{rötre, kenar}} = \frac{\sigma_{\text{rötre, merkez}}}{2} \quad (3.105)$$

Plak köşesinde ise rötre gerilmesinin oluşmadığı varsayılmaktadır.

3.5.1.2 Sıcaklık değişimi

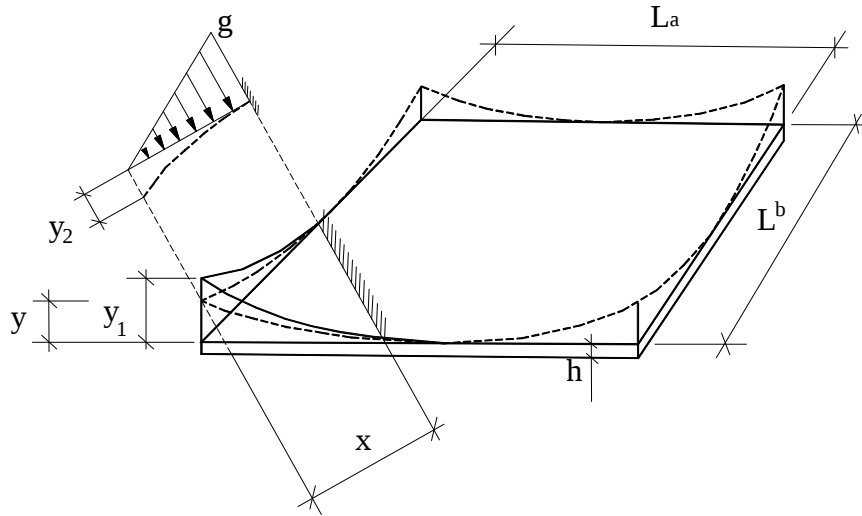
Özellikle dış mekanda ve hava şartlarına açık olan zemine oturan plaklarda sıcaklık değişimleri günlük olarak meydana gelmektedir. Plaktaki bu çeşit sıcaklık değişimleri plak boyunda uzamalara neden olur ve bunun sonucunda plakta, ısınma veya soğumaya bağlı olarak Şekil 3.59’ da görülen bükülmeler meydana gelir.

Belirtilen tür bükülmeden kaynaklanan şekil değiştirmeye bağlı olarak plakta gerilmeler oluşur. Söz konusu gerilmeler yükleme ve rötreden dolayı oluşan gerilmelere eklenir. Normal koşullarda bile hava sıcaklığında ve betonun alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklıklarda önemli farklılıklar bulunur. Fakat betonun ısınması ve soğuması hava sıcaklığından çok daha yavaş olur.

Plaktaki söz konusu uzunluk değişimleri, sadece sıcaklık değişimi etkisi düşünüldüğünde, plakta aksenal basınç veya çekme kuvvetleri oluşturur. Bu kuvvetlerden ortaya çıkan gerilmeler, kısıtlanmış rötre nedeniyle oluşan gerilmeler ile karşılıklı etkileşim sonucu oluşurlar.

Sıcaklık yükselmesi veya düşmesi doğrusal olarak oluşuyorsa, plakta meydana gelen bükülme herhangi bir gerilmenin ortaya çıkmasına neden olmaz. Bununla beraber, plağın kendi ağırlığı bu durumda harekete engel olarak üst ve alt yüzeylerinde sırasıyla, plağın soğuması ve ısınması sırasında çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur.

Plak için önemli olan, soğuma evresidir. Bu durumda plak kenarları zeminden yukarıya doğru bir hareket yapma eğilimindedir ve plağın kendi ağırlığı ise bu harekete engel olur. Belirtilen hareket nedeniyle plak üst yüzeyinde çatlak oluşması olasılığına karşı tedbirler alınmalı ve gerilmenin en fazla etkilenen kesitin plak orta noktası olduğunun hesaplarda gözardı edilmemesi gerektiği hatırlanmalıdır. Tablo 3.33, sıcaklık nedeniyle oluşan gerilmelerin iki doğrultu için ortalama değerlerini vermektedir [1].



Şekil 3.59 Sıcaklık değişimine bağlı olarak plaktaki kıvrılmalar

Tablo 3.33 Plakta ortaya çıkan ve bölgelere göre düzenlenmiş sıcaklığa bağlı gerilme ifadeleri

Bölge	Sıcaklığa bağlı ortalama gerilme $\sigma_{\text{sıcaklık}}$ [N/mm ²]
Serbest köşe	0
Serbest kenar	$E_{cm} \alpha \Delta t / 4$
Yük aktarma çubuğu veya kesme derz	$E_{cm} \alpha \Delta t / 4$
Yük aktarma çubuklu köşe	0
Orta bölge	$E_{cm} \alpha \Delta t / 2$

Burada;

E_{cm} : Betonun elastisite modülü (Bakınız Tablo 3.15 ve 3.16)

α :Isıl genişleme katsayısı ($1 \times 10^{-5} / 8C$)

Δt :Sıcaklık değişimi → Dış mekanda : 10 8C

→ İç mekanda : 3 8C (Avrupa ülkeleri ve TR34' te 5 8C)

olarak verilmektedir.

Şekil 3.60, hava sıcaklığının plak sıcaklığı üzerindeki etkisi hakkında bir fikir verir (Bu grafik hava sıcaklığının +20 °C ile +50 °C arasında değiştiği varsayımı ile yapılmıştır).

Örnek:

$\Delta T_{\text{hava}} = 30$ °C varsayılın.

Plak kalınlığının 15 cm (150 mm) olması durumunda Şekil 3.60' taki grafikten Yaz durumu ve öğleden sonraki bir zaman için; $\Delta T_{\text{beton}} = 48 - 35 = 13$ °C elde edilir.

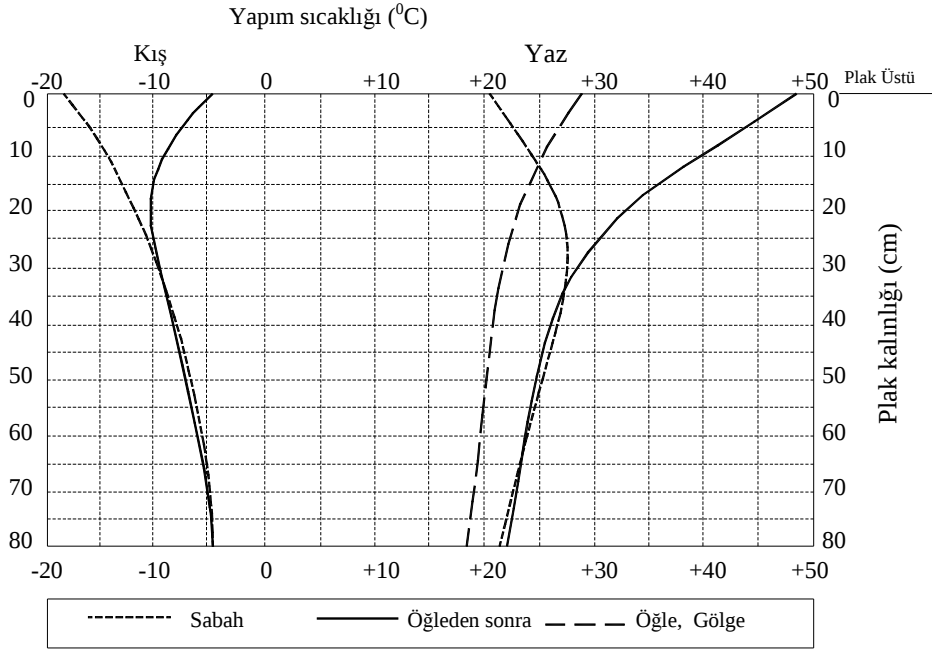
Sünme etkisine bağlı olarak sıcaklık gerilmesi

Plak kenarında ve köşesinde sıcaklık nedeniyle ortaya çıkan gerilme, sünme katsayısına bağlı olarak aşağıda sırasıyla 3.106 ve 3.107 denklemleriyle verilmektedir [3].

$$\sigma_{\text{kenar , sıcaklık}} = \frac{E \alpha \Delta T}{1 + \phi} \quad (3.106)$$

$$\sigma_{\text{köşe , sıcaklık}} = \frac{E \alpha \Delta T}{1,5} \quad (3.107)$$

Burada sünme katsayısı ϕ , eski bir beton için 2 olarak kullanılabilir. Yukarıda verilen gerilmelerin, Tablo 3.33' te verilen değerlerden özellikle köşe gerilmeleri için farklı olduğu ilgi çekicidir.



Şekil 3.60 Beton plakta sıcaklık değişimi

3.5.1.3 Kıvrılma

Kıvrılma plak alt ve üst yüzeylerinin farklı rötre yapması sonucu oluşur. Plakta tek yönlü olarak, üst yüzeye doğru rutubet kaybıyla oluşan fark kıvrılmaya neden olur. Kıvrılma sonucu oluşan eğilme gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilir [12]:

$$f_{kv} = \left(\frac{1}{2} \right) E_{cm(t)} \left(\frac{\Delta \epsilon}{1 - \nu} \right) \quad (3.108)$$

Burada

$E_{cm(t)}$: Sünmeye bağlı olarak değiştirilmiş beton elastisite modülü,

ν : Poisson oranı (0,2)

$\Delta \epsilon$: Plak alt ve üst yüzeyi arasındaki farklı şekil değiştirmedir ve genellikle plak kalınlığının

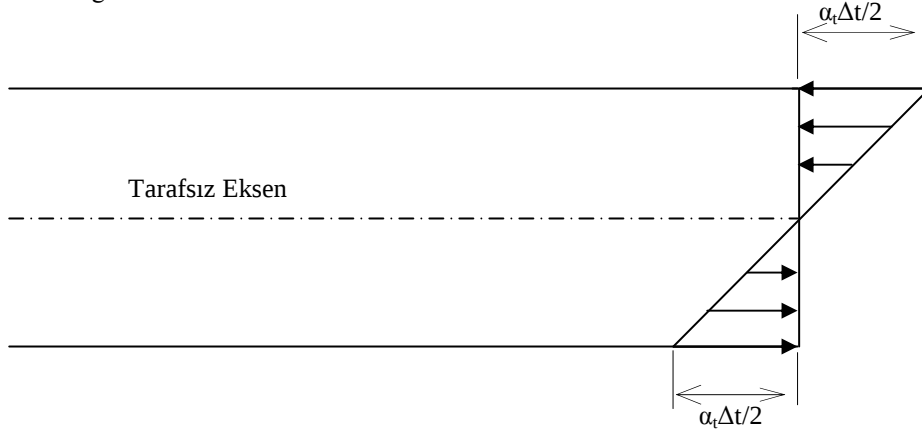
1 mm'si başına $(1,5 \sim 2,0) \times 10^{-6}$ alınır.

$E_{cm} = 33 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ değeri $[1/(1+\phi)]$ çarpanıyla $E_{cm(t)}$ değerine dönüştürülmek istensin. Bu durumda sünme katsayısı eski bir beton için $\phi=2$ tahmin edilirse, $E_{cm(t)} = 11 \times 10^3$ elde edilir. Düşük bir $\Delta \epsilon$ kabulü ile (örneğin $\Delta \epsilon = 1,5 \times 10^{-6} \times 175$) kıvrılma sonucu oluşan gerilme ($h_f = 175 \text{ mm}$):

$$f_{kv} = (1/2)(11 \times 10^3)(1,5 \times 10^{-6} \times 175) / (1 - 0,2) = 1,8 \text{ N/mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Gün boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri de kıvrılmaya neden olmaktadır. Güneş ışığı gün içinde plağın üst kısmını ısıttığında alta göre daha sıcak olan üst kısım uzamaya çalışarak aşağıya doğru kıvrılır. Bu durumda plak oturmaya çalışacağından üst kısımda basınç oluşacaktır. Gece boyunca ise üst kısım alta göre daha çabuk soğuyacağından, daha sıcak olan alt kısım uzamaya çalışacak ve sonuçta plak üste doğru kıvrılacaktır. Bu durumda ise üst kısımda çekme gerilmeleri ve alt kısımda da basınç gerilmeleri oluşmaktadır.

Kıvrılmaya neden olan sıcaklık değişimlerinin plak boyunca doğrusal olduğu varsayılarak şekil değiştirmeler hesaplanmaktadır. Esasen söz konusu değişimlerin plak kalınlığı boyunca doğrusal olmamasına rağmen, pratik amaçlar için doğrusal kabul edilmesi uygun görülmektedir. Bu durumda kıvrılma sonucu oluşan gerilmelerin hesabedilmesinde Hooke yasası kullanılabilir. Söz konusu duruma ait şekil değiştirme diyagramı aşağıdaki, ara işlemler gösterilmeden sonucu doğrudan verilen ve iki yönlü kıvrılmayı ifade eden gerilme bağıntısı ise Denklem 3.109' da verilmektedir.



Şekil 3.61 Kıvrılmaya neden olan ve plakta kalınlığı boyunca oluşan şekil değiştirme

$$\sigma_x = \frac{E_{cm} \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu)} \quad (3.109)$$

Burada σ_x ; plağın iki doğrultudaki (x ve y) şekil değiştirmesinin kısıtlanmasından kaynaklanan x doğrultusundaki gerilmedir.

Çevresi serbestçe zemine oturan plağın ortasında kıvrılma dolayısıyla oluşan maksimum düşey yerdeğiştirme, bilinen matematiksel ifadelerin kullanılmasıyla elde edilebilir. Şekil 3.62'de verilen kıvrılmış plak üzerinde yazılan denklemlerde taraflı eksenin plak orta düzleminde bulunduğu, sıcaklık değişiminin doğrusal ve plak boyunun birim olduğu varsayılmıştır.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{k,alt} &= \varepsilon_{k,üst} = \alpha_t \Delta t / 2 \\ \Delta \varepsilon_k &= \varepsilon_{k,alt} + \varepsilon_{k,üst} = \alpha_t \Delta t \end{aligned}$$

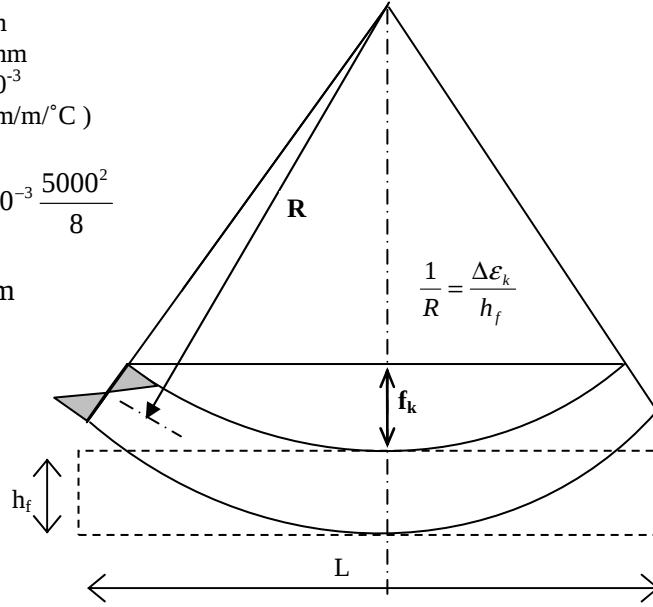
kullanılarak hesaplanan düşey yerdeğiştirmenin ifadesi 3.110 denkleminde verilmektedir.

Örnek:

$$\begin{aligned} h_f &= 200 \text{ mm} \\ L &= 5000 \text{ mm} \\ \Delta \varepsilon_k &= 0,16 \times 10^{-3} \\ (\alpha_t &= 9 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

$$f_k = \frac{0,16}{200} \times 10^{-3} \frac{5000^2}{8}$$

$$f_k = 2,5 \text{ mm}$$



Şekil 3.62 Kıvrılma sonucu oluşan şekil değiştirme durumu ve maksimum kıvrılma f_k

$$f_k = \frac{\Delta \varepsilon_k}{h_f} \frac{L^2}{8} = \frac{L^2}{8R} \quad (3.110)$$

Esasen kıvrılma gerilmeleri, plağın alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklık farklarına göre değişiklik gösterir. Yerinde ölçümün yapılmadığı durumlarda sıcaklık değişiminin maksimum gün içi değeri, plağın birim mm kalınlığa düşen miktarı olarak, 0,055 ila 0,077 $^\circ\text{C}$ değeriyle alınabilir. Gece değerleri verilenlerin yarısı kadardır.

Kıvrılmadan meydana gelen gerilmelerin araç yükleriyle beraber değerlendirilmesi sırasında, bu gerilmeler çatlaklara neden olacak kadar büyük olsa da, (özellikle çubuk donatılı plaklarda) plak kalınlığı hesaplarında gözönüne alınmazlar. Bu durumun sebebi aşağıda ifade edilmektedir:

1 – Derzler ve yük aktarma çubukları kıvrılmayı azalttıkları gibi kıvrılmanın neden olduğu gerilmelerin de ortadan kaldırılmasına yardımcı olurlar. Çatlama oluştuğunda kıvrılma gerilmesi ortadan kalkarak sona erer. Kıvrılmadan dolayı oluşan bu çatlakların ömrü kısa olduğundan, çoğunlukla plağın yük taşıma kapasitesine de olumsuz etki yapmamaktadır.

2 – Tasarımda yorulma ilkesi kullanıldığında, araç yüklerinden oluşan gerilmeler ile kıvrılma gerilmelerini birleştirmek tasarım açısından kullanışlı olmaz. Zemine oturan beton plak tasarımında milyonlarca defa tekrarlanan yüklerle çalışılırken, kıvrılmadan kaynaklanan gerilme tekrarlamaları ise sınırlı sayıdadır.

3 – Kıvrılma gerilmeleri hesaba katıldıklarında, araç yüklerinden meydana gelen gerilmelere eklenerek ve çıkartılarak hesaba katılırlar. Plak kenarında hesap yapıldığında, gün içerisinde elde edilen kıvrılma gerilmeleri araç yüklerinden meydana gelen gerilmelere eklenirken, geceleyin veya endüstriyel tesisin ısıtılmadığı sürelerde bu gerilmelerden çıkartılır. Gece çalışması gündüze göre nispeten daha az sıcak bir ortamda gerçekleştirilen endüstriyel tesislerde ve özellikle dış mekanlarda, sözkonusu sıcaklık ile çalışıldığında kıvrılma gerilmelerinin hesaba katılması elverişsiz durum oluşturmamaktadır.

Yukarıda ifade edilenler yanında kıvrılma gerilmelerini etkileyen ve bunların hesaba katılmalarını gerektirecek başka etkiler de vardır. Özellikle uzun plaklarda ve sürekli çalışıldığı için sabit ısıda tutulan tesislerdeki plaklarda kıvrılma etkilerinin ayrı bir yükleme olarak hesaba katılmaları gerekebilir. Çubuk donatı bulunmayan ve/veya derzlerde yük aktarma çubukları kullanılmayan plaklarda da kıvrılmadan oluşan gerilmeler büyük değerlere ulaşabilir ve bunun neticesi olarak çatlaklarla beraber plak yüzeyinde trafiği engelleyebilen mm mertebesinde yükseltiler oluşabilmektedir.

Tasarım öncesinde tüm ihtimallerin hesaba katılması ve en elverişsiz durumların tasarımda kullanımına ilişkin kararın alınması gerekmektedir. Zemine oturan beton plaklarda genellikle önceden tahmin edilemeyen veya hesaba katılmasına gerek olmadığı düşünülen etkilerden dolayı birçok problemle karşılaşmakta ve söz konusu problemlerin giderilmesi maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır.

3.6 ZİMBALAMA KAYMASININ ETKİSİ

Yükün uygulandığı alanın yakınlarında meydana gelen zımbalama kayması riski, genel olarak aşağıdaki değişkenlere bağlıdır:

- a - Yükün temas çapının bağlı rijitlik yarıçapına oranı, $2a_r/l$
- b- Bağlı rijitlik yarıçapının plak kalınlığına oranı, l/h_f
- c - Zımbalama dayanımının eğilme dayanımına oranı. $f_{zd}/f_{ctd,fl}$

Zımbalamanın kritik olduğu durumlar; $f_{zd}/f_{ctd,fl}$ ve $2a_r/l$ nin küçük ve l/h_f nin büyük değerleri için sözkonusudur. Bahsi geçen oranlar için aşağıda tanımlanan koşulların yerine getirilmesi durumunda, ayrıca bir hesaba gerek duyulmamaktadır.

$$\begin{aligned} 2(a_r / l) &\geq 0,7 \\ l / h_f &\leq 2,0 \\ f_{zd} / f_{ctd, fl} &\geq 0,6 \end{aligned} \quad (3.111)$$

Yukarıdaki denklemin üçüncü şartının sağlanması her zaman mümkün gözüktüğü de, taşıma gücü sınır durumuna göre hesap yapıldığında çelik tel donatı miktarının aşırı dozajda olması halinde bu şart gerçekleşmemektedir. Güvenli tarafta kalınarak zımbalama kontrolünün üçüncü şartının gerçekleşmesi istendiğinde, $f_{ctd,fl}$ değeri olarak Tablo 3.22' den 3. modele ait eğilme dayanımı kullanılmalıdır. Buradaki f_{res} değeri için, eğer 3 mm sehim şartı kullanılıyorsa (bakınız. Bölüm 3.4.2.1), $R_{e,3} f_{ctk,fl}$ çarpımının alınması uygundur. Zımbalama dayanımı f_{zd} , çelik tel donatılı betonun çatlama dayanımının bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Bununla beraber, ilk çatlak oluşması sürecinde, betonun çelik tel dozajının etkisi hemen hemen hiç yoktur. Bu durumda f_{zd} aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_{zd} = 0,4 f_{ctk, fl} / \gamma_{mc} \quad (3.112)$$

Burada;

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

$1/\gamma_{mc}$:Betonun malzeme güvenlik çarpanıdır.

Yükün uygulandığı bölgeden uzaktaki kritik çevre boyunca oluşan zımbalama kayması, zeminin de katkısıyla karşılanır (Şekil 3.63). Belli bir zemin gerilmesi oluşturan yükün temas alanının kenarından $h_f/2$ uzaklıktaki bir çevre boyunca betonun karşıladığı zımbalama dayanımı aşağıda 3.113 denklemiyle verilmektedir:

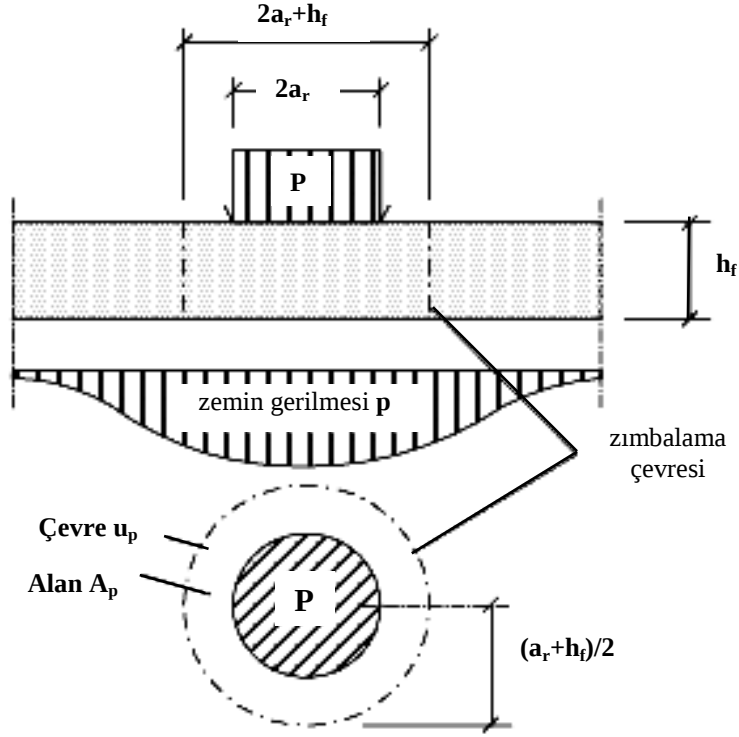
$$P_{zd} = f_{zd} u_p h_f + A_p p = \pi h_f (2a_r + h_f) f_{zd} + 0,25\pi (2a_r + h_f)^2 p \quad (3.113)$$

Burada;

A_p : Zımbalama çevresi içerisinde kalan dairesel (veya dikdörtgensel) alan,

u_p : Zımbalama çevresi,

p :Zemin gerilmesinin ortalama değeridir.



Şekil 3.63 Zımbalama kayması etkilerine zemin gerilmesinin katkısı

Bu durumda betonun zımbalama dayanım değeri f_{zd} aşağıdaki denklemden hesaplanır [1]:

$$f_{zd} = 0,45k f_{ctk} / \gamma_{mc} \quad (3.114)$$

Burada;

k :Boyut etkisini içeren bir çarpan,

f_{ctk} :Betonun karakteristik çekme dayanımıdır.

Boyut etkisini ifade eden k , plak kalınlığı metre cinsinden kullanılmak üzere 0,2 m. ve daha az kalınlıktaki plaklar için;

$$k = 1,6 - h_f \leq 1,4 \quad (3.115)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Çelik tel donatılı betonun karakteristik çekme dayanımını ifade eden f_{ctk} değeri, ya doğrudan çekme deneyi ile veya kabaca eğilme deneyindeki çatlama dayanımından elde edilebilir.

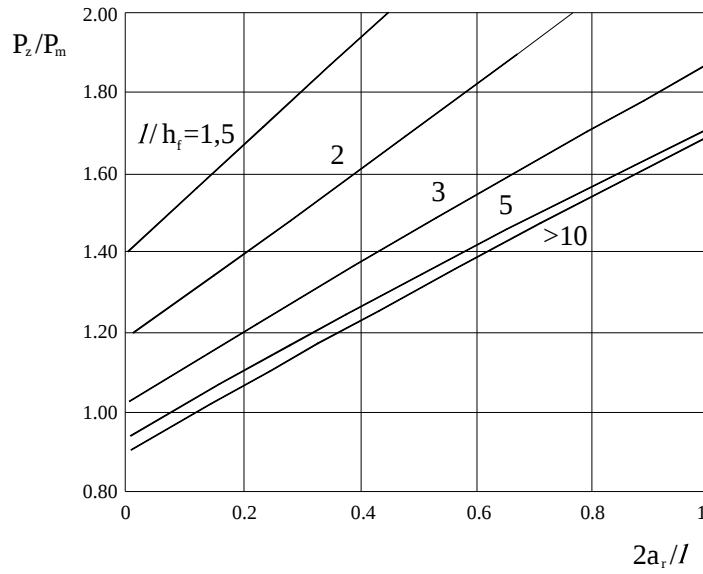
$$f_{ctk} = 0,6 f_{ctk, fl} \quad (3.116)$$

Çelik tel donatılı birçok endüstriyel zemin betonu 200 mm' den daha az kalınlıktadır ve k değeri 1,4 olarak kullanılabilir. Bu durumda f_{zd} için 3.112 denkleminin kullanılması mümkündür.

Yukarıda sözü edilen 3.111 denkleminin üçüncü koşulunun gerçekte pratik bir amacı vardır. Beton içerisindeki çelik tel donatıların artması durumunda betonun sünekliğinin arttığı ve dayanımının iyileştiği bilindiğine göre bu şart, tel miktarının artışının sınırlandırılması gerektiğini ve dozajın aşırı artması durumunda beton sünekliğinin kaybedilebileceğini ifade etmektedir. Bu sınırın mertebesi birçok değişkene bağlıdır ve pratik olarak elde edilmesi güçtür. Bununla beraber zemin betonlarında kullanılan dozajın pratik sınırı 60 kg/m^3 mertebesinde dir. Sünekliğin pratik olarak düşmesine neden olabilecek dozaj sınırının ise 60 kg/m^3 değerinin çok üzerinde olduğu söylenebilir.

Zımbalama dayanımı ile eğilme dayanımı oranının, çelik tel içeren zemin betonlarında çoğu kez 0,6 değerinden büyük olduğunu gösteren bir grafik Şekil 3.64’ te verilmektedir. Burada bu oran 0,6 olarak düzenlenmiş ve bu duruma göre, zımbalama dayanımının eğilme dayanımına oranı temel alınmıştır.

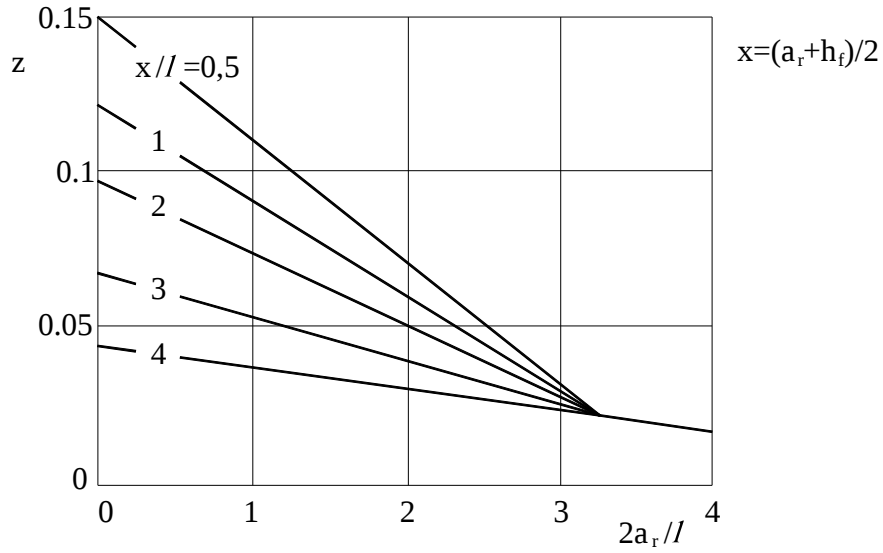
Kenar yükleme halinde zımbalama etkisi genelde ihmal edilmektedir. Plak ortasındaki bir yüklemenin bile nadiren zımbalama ile ilgili bir problem oluşturduğu bilindiği için, kenar yükleme durumundaki hesap şekli üzerinde bu kısımda durulmayacaktır.



Şekil 3.64 $f_{zd}/f_{ctd,fl}$ değerinin 0,6 olması durumunda, zımbalama kapasitesinin eğilme kapasitesine oranı

Ortalama zemin gerilmesinin elde edilebilmesi için Şekil 3.65’ teki diyagram kullanılabilir. Aşağıda verilen denklemde z değeri, $2a_t/l$ ve x/l ’ ye bağlı olarak okunur ($x = (a_t + h_t)/2$).

$$p = \frac{z}{l^2} P \quad (3.117)$$

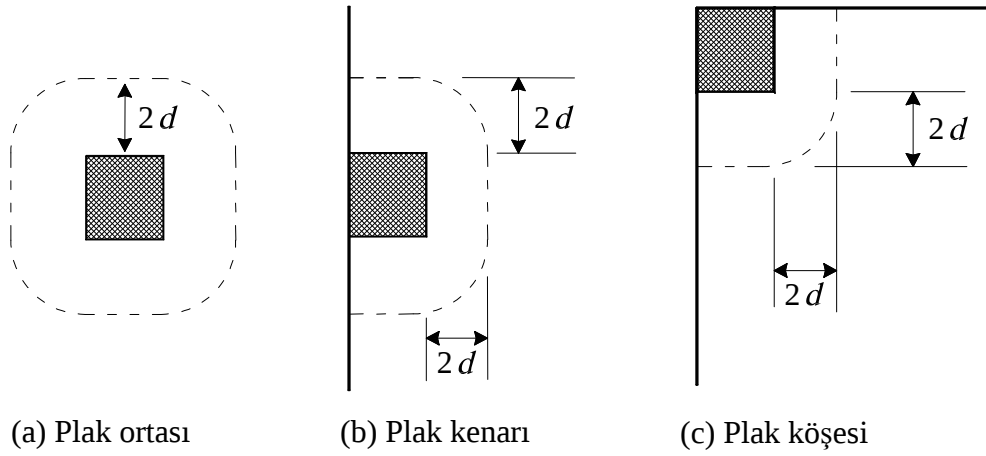


Şekil 3.65 Ortalama zemin gerilmesinin elde edilmesi için gerekli z değeri

Aşağıda, alternatif olarak TR34'e göre zımbalama hesabı hakkında kısaca bilgi verilecektir.

3.6.1 Zımbalama Kayması Kontrolü İçin TR34 Yaklaşımı

Zımbalama kayma kapasitesini belirlemek için temas alanı yüzündeki ve temas yüzeyinden $(2d)$ uzaklıktaki kritik bölgede kayma kontrol edilir (Şekil 3.66). Faydalı yükseklik bu durumda $0,75h_f$ alınmaktadır.



Şekil 3.66 Zımbalama kayması için kritik bölgeler: (a) iç bölge, (b) kenar, (c) köşe

Tasarım standartları klasik çelik çubuk donatılar esas alınarak hazırlanmıştır ve çelik tel donatı içeren plaklar için faydalı yükseklik (d) tanımı yapmazlar (*faydalı yükseklik; basınç bölgesinden çekme bölgesindeki donatının merkezine olan mesafedir*).

3.6.1a Yüünün temas yüzeyi kenarındaki kayma

Plaktaki donatı miktarından bağımsız olarak, temas alanı yüzeyindeki kayma dayanımı şu miktarı aşmamalıdır [2];

$$\tau_{maks.} = 0,5k_2 f_{cd} \quad (3.118)$$

Burada;

f_{cd} :Betonun tasarım silindir basınç dayanımı (sınıf dayanımı) = f_{ck} / γ_{mc}

k_2 :0,6 (1 - $f_{ck}/250$) (Eurocode 2’de farklı sembol kullanılmaktadır.)

f_{ck} :Betonun karakteristik silindir basınç dayanımıdır.

Zımbalama durumunda maksimum yük kapasitesi ise aşağıdaki gibi belirlenir:

$$P_{z,maks.} = \tau_{maks.} u_0 d \quad (3.119)$$

Burada;

u_0 : Yüüklü alan yüzeyindeki çevrenin uzunluğudur.

3.6.1b Kritik çevre üzerinde kayma

Temas yüzeyinden 2d mesafede kritik kayma çevresi üzerinde kayma gerilmesi kontrol edilir.

Hasır veya çubuk donatılar

Kayma çevresi üzerinde beton tarafından taşınabilen ortalama kayma gerilmesi $\tau_{Rd,c}$ aşağıdaki şekilde verilir [2]:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} k_1 (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} \geq 0,035 k_1^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (3.120)$$

Burada;

$$\rho_1 = \sqrt{(\rho_x \rho_y)}$$

$$k_1 = 1 + (200 / d)^{0,5} \leq 2$$

ρ_x, ρ_y :Sırasıyla x ve y doğrultularındaki donatı oranlarını ifade etmektedir.

Böylece plak yük kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{zd} = \tau_{Rd,c} u_p d \quad (3.121)$$

Burada u_p ; yük uygulanan alandan 2d mesafedeki çevre uzunluğudur.

Çelik tel donatılar

Çelik tel halinde tasarım kayma kapasitesi, donatısız betona göre τ_f kadar artırılır. Söz konusu gerilme τ_f aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır [2, 13]:

$$\tau_f = 0,12R_{e,3} f_{ctk,fl} \quad (3.122)$$

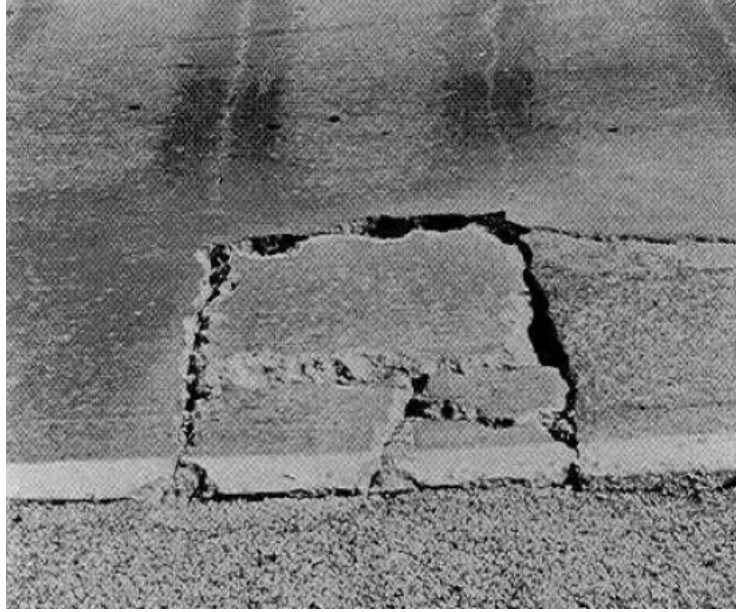
Burada;

$R_{e,3}$:Çelik tel donatılı betonda 3 mm'lik sehim için eşdeğer eğilme dayanımı oranı,

$f_{ctk,fl}$:Donatısız betonun karakteristik eğilme dayanımını vermektedir.

En küçük kayma kapasitesi için $0,035k_1^{3/2} f_{ck}^{1/2}$ bağıntısı verilmektedir. Buna göre çelik tel donatılı beton için plak yük kapasitesi P_{zd} aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P_{zd} = (0,035k_1^{3/2} f_{ck}^{1/2} + 0,12R_{e,3} f_{ctk,fl}) u_p d \quad (3.123)$$



Şekil 3.67 Zımbalama nedeniyle yerel olarak taşıma gücünü kaybetmiş bir beton plak

Örnek:

Bir fabrikada, zemin betonuna oturan bir arakat kolonu taban plakasının boyutları 300x300 mm dir. Plak kalınlığı 150 mm, çelik tel donatı dozajı 40 kg/m³ ve kullanılan beton cinsi C25 olduğuna göre plağın zımbalama dayanımını bulalım. (Tel donatı - Dramix® **RL-45/50-BN**)

Yükün temas yüzeyi kenarındaki kayma ve maksimum yük kapasitesi 3.118 ve 3.119 den

$$\tau_{maks.} = 0,5k_2 f_{cd} \quad * k_2 = 0,6(1 - 25/250) = 0,54$$
$$* f_{cd} = f_{ck} / \gamma_{mc} = 25/1,5 = 16,6 \text{ MPa}$$

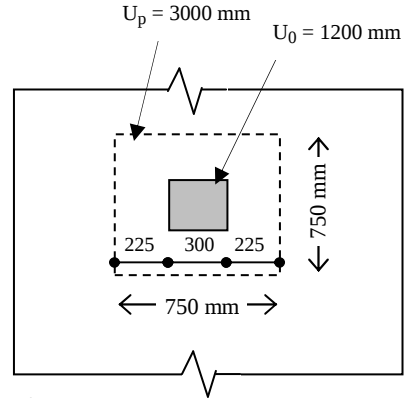
$$\blacktriangleright \tau_{maks.} = 0,5 \times 0,54 \times 16,6 = 4,48 \text{ MPa}$$

Taban plakası yükü aşağıdaki değerden az olmalı

$$\blacktriangleright P_{z,maks.} = 4,48 \times 1200 \times (0,75 \times 150) = 605 \text{ KN}$$

Kritik çevre üzerinde kayma 3.123 den

$$P_{zd} = (0,035k_1^{3/2} f_{ck}^{1/2} + 0,12R_{e,3} f_{ctk,fl}) u_p d$$



Tablo – 3.18’ den $R_{e,3} = 0,63$ ve $k_1 = 1 + (200/112,5)^{0,5} = 2,33 > 2 \rightarrow k_1 = 2$

$$P_{zd} = (0,035 \times 2^{3/2} \times 25^{1/2} + 0,12 \times 0,63 \times 3,6) 3000 \times 112,5$$

$$\blacktriangleright P_{zd} = 337500(0,5 + 0,27) = 260 \text{ KN}$$