



BETONARME YAPILARDA SÜNMENİN
KESİT TESİRLERİNE ETKİSİ

(EFFECT OF CREEP ON MEMBER END ACTIONS
AT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES)

Hasan ELÇİ* , Mehmet TERZİ*

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmanın amacı, betonarme yapıların yükleme yaşına ve zamana bağlı olarak kesit tesirlerinin ve düğüm noktası deplasmanlarının değişiminin araştırılmasıdır. Bunun için, betonda sünme etkilerini göz önüne alan bir bilgisayar programı yardımıyla çeşitli sayısal uygulamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Uzun süreli yüklere maruz yapılarda, özellikle aksel yükün fazla olduğu kolonlarda, aksel yüke bağlı boyutlandırma yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yapının yükleme yaşının da önemli olduğunu söylemek gerekmektedir.

The aim of this study is to search the change of the member end actions and joint displacements at the reinforced concrete structures according to loading age and time. For this, various numerical examples had done by the help of a computer program, which took care about creep effects of the concrete, and the obtained results were compared.

At the structures that were exposed by long time loads especially at the columns that have axial forces rather it seems necessary to designed related to axial forces. It is needed to say that the loading age was very important.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Beton, Sünme, Deplasman, Kesit tesiri
Concrete, Creep, Displacement, Cross action

* Balıkesir Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., İnş. Müh. Bölümü, Çağış Kampüsü, Balıkesir

1. GİRİŞ

Beton, uygulanan yüke ve zamana bağlı deformasyon yapan bir malzemedir. Ancak deformasyon artış hızı zamanla azalır. Betonda oluşan sünme deformasyonları, yapı elemanlarında kullanılabilirliği etkileyebileceği gibi hasara ve çökmelere de neden olabilir. Bu nedenle gereken durumlarda, zamana bağlı deformasyon hesapları da dikkate alınmalıdır.

Yapı, malzemenin hesap dayanım mukavemetinden küçük olmak üzere, oldukça büyük bir gerilme etkisi altında uzun süreli tutulacak olursa, sünmenin büyük değerler almasının bir sonucu olarak mukavemetini kaybedebilir. Buradan yapılarda, sünme mukavemeti olarak isimlendirilecek yeni bir karakteristiğin varlığı ortaya çıkmaktadır. Yapıyı devamlı olarak etkileyen gerilme bu karakteristiktan küçük ise bir kırılma tehlikesi yoktur. Buna karşılık gerilmenin bu karakteristiktan büyük olması halinde yapının sünme etkisiyle mukavemetini kaybetmesi beklenmelidir. Bu gibi olayların meydana gelmesiyle yapılar kısmen veya tamamen yıkılmakta, bu da önemli can ve mal kaybına sebep olmaktadır (Postacıoğlu, 1981).

İşte bu nedenle yapıların boyutlandırmasında uzun süreli yüklerin neden olacağı etkiler de göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada uzun süreli yükler etkisindeki yapıların deformasyonlarında ve kesit tesirlerindeki değişikliklerin ne şekilde olduğu ve bunların nasıl önlenebileceği araştırılmış, bu araştırmalar sonucunda da bazı sonuçlar elde edilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmada üç boyutlu analiz yapan, fortran dilinde kodlanmış bir program kullanılmıştır. Sadece yapı yüklendiği andaki deplasmanları ve kesit tesirlerini veren bu programa bazı eklemeler yapılarak sünme etkileri de göz önüne alınmıştır.

Çözümü yapılan örneklerde yapının kolon elemanlarının kesit boyutu ve betonun yükleme yaşı değiştirilmiş ve bu değişikliklerin sonuçları nasıl etkilediği araştırılmıştır.

2. TEMEL TANIMLAR

2.1. Sünme

Sünme, malzemenin elastik sınırı altında gerilme meydana getiren yüklerden dolayı zamana bağlı deformasyonu olarak tanımlanabilir.

Sünme metal malzemede yüksek sıcaklıklarda, beton, ahşap ve plastik malzemede ise normal sıcaklıklarda meydana gelen fiziksel bir olaydır. Sünmenin nedeni olarak, metallerde yüksek sıcaklıklarda dislokasyonların aktivasyon enerjisinin artması ve bunun kolay kaymalara yol açması, betonda yük altında jel suyunun yavaş yavaş kapiler boşluklara aktarılması, oradan da havaya buharlaşması, ahşap ve plastiklerde ise yük veya sıcaklık etkisi altında zincir şeklindeki moleküllerin yanal bağlarının zayıflaması gibi etkiler ileri sürülmektedir. Sünme sonucunda malzeme, statik yüklemeye bağlı mukavemetine kıyasla daha düşük bir gerilme altında kırılmakta ve statik yüklemeye bağlı şekil değiştirmesine kıyasla daha büyük şekil değiştirmeler yapmaktadır.

Kalıcı yükler altında betonda oluşan gerilmelerin basınç dayanımının %40'ından az olduğu durumlarda, sünmenin gerilme ile orantılı olarak arttığı, gerilmenin daha fazla olduğu durumlarda ise bu orantının kaybolduğu ve sünmenin daha hızlı arttığı bilinmektedir. Sünme, ancak betonda basınç gerilmeleri oluşturan, kalıcı yükler altında meydana gelir. Eğer iki özdeş numuneden birisi yüklenmeden, diğeri kalıcı bir yük altında saklanır ve bu numunelerde belli bir süre içinde oluşan birim kısaltmalar ölçülürse, sünme deformasyonu, yüklenmiş numune deformasyonundan yüklenmemiş numunenin deformasyonu çıkarılarak hesaplanabilir (Ersoy, 1987).

Betonun sünmesi betonarmeye de yansır ve bu malzemenin de ani şekil değiştirmeler yanında, zamanla artan şekil değiştirmeler yapmasına yol açar. Sünme olayı önceden göz önüne alınmazsa, yapıda gözle görülür kusurlar oluşturabilir. Bu husus özellikle büyük açıklıklı konsollar gibi deformasyonu büyük olan yerlerde önem kazanır. Ayrıca çok yüklü kolonlarda ihmal edilemeyecek kısalmalar görülebilir (Aka vd., 2001).

2.2. Betonda Sünmeye Etki Eden Faktörler

Beton gerilmenin etkisi altında kaldığı sürece, ani deformasyondan sonra meydana gelen deformasyon zamanla devamlı bir artış göstermektedir. Gerilmenin etki süresi arttıkça betonda meydana gelen sünme de artacaktır. Böylece sünmenin gerilmenin etkisi altında olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Burada önemli olan gerilmenin ve zamanın değişmesi ile sünmenin nasıl bir değişiklik göstereceğini belirlemektir. Betonun sünmesi malzemenin mekanik karakteristikleri arasında yer almaktadır.

Sünme; betonun içinde bulunan çimento dozajına, su miktarına, su çimento oranına, agrega miktarına bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Ayrıca betonun üretiminde kullanılan malzemenin karakteristik özellikleri betonun kalıba yerleştirilmesi, boşluk durumu ve boşluk miktarı, beton üretim şartları gibi bir çok faktör sünme üzerinde etkilidir.

Uygulanan Gerilme: Genel olarak beton mukavemetinin yaklaşık %40'ına karşılık gelen gerilmelere kadar sünme deformasyonunun uygulanan gerilmeyle lineer ilişkide olduğu varsayılır. Sünmeyi etkileyen, gerilmenin mutlak değeri değil f_c/f_{ck} oranının değeridir. Burada f_c , betona uygulanan basınç gerilmesi, f_{ck} ise betonun karakteristik basınç mukavemetidir. f_c/f_{ck} oranını sabit tutmak suretiyle, mukavemeti değişik betonlar aynı miktar nihai sünme yaparlar. Değişik tip çimentolarla üretilen ve değişik bakım koşulları altında tutulan betonlarda da sünme f_c/f_{ck} ile orantılıdır. Çimento tipinin ve bakım koşullarının etkileri f_c/f_{ck} faktörünün etkisi yanında önemsiz kalmaktadır (Tanrıcan, 1996).

Yaklaşık $f_c/f_{ck} > 0.5$ olduğunda iki durum ortaya çıkar. Birincisi, gerilmenin sünme mukavemetinden küçük olması halidir. Bu durumda beton fazla miktarda sünme yapmasına rağmen mukavemetini kaybetmez. İkincisi, betonun sünme mukavemetini aşan büyük gerilmelere maruz kalmasıdır. Bu tür gerilmeler, beton basınç mukavemetinden küçük olmasına rağmen, belirli bir süre sonra kırılmaya neden olur (Postacıoğlu, 1981).

$f_c/f_{ck} > 0.5$ durumunda mikro çatlaklar sünmeye katkıda bulunur ve sünme-gerilme ilişkisi nonlineer hale gelir (Tanrıcan, 1996).

Betonun Yaşı: Belirli bir f_c gerilmesi uygulandığında betonun yaşı ne kadar küçük ise meydana gelen sünme, özellikle nihai sünme, o kadar büyük değerler alır. Beton yaşı küçük iken çimento hamuru, hidratasyon olayının yavaş bir şekilde gelişmesinden dolayı büyük rijitliğe sahip olmadığından deformasyona karşı koyma özelliği gelişmiş durumda değildir. Yaşı küçük betonlarda f_c/f_{ck} oranı, f_c sabit olmak üzere, yaşı daha ilerlemiş betonlara göre daha büyüktür.

Betonun zamana bağlı şekil değiştirmesinin yani sünmesinin yükleme anındaki betonun yaşı ile bağıntısı Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de verilen değerler, betonun yüklendiği andaki yaşına bağlı olarak, 2-3 yıl gibi uzun bir süre sonunda erişilecek değerlerdir. Burada L_e , eşdeğer kalınlık; A_c , gövde kesiti beton alanı (kirişlerde gövde kesiti, kolonlarda ise tüm kesit beton alanı); u ise eleman çevre uzunluğudur (TS 500, 2000).

Boyut: Numune boyutlarını artmasıyla suyun beton içindeki hareketinin azalmasından dolayı sünme daha küçük değerler alır (Kocataşkın, 2000). Su içinde saklanan betonlarda sünme numune boyutuna bağlı değildir. Bunu, su içinde tutulan betonların içindeki rutubet dağılımının homojen olmasıyla açıklamak mümkündür.

Çizelge 1. Betonun yüklenme anındaki yaşına bağlı olarak sünme katsayısı, ϕ_{ce}

Yükleme Anında Beton Yaşı	Kuru Ortam (Bağıl Nem %50)			Nemli Ortam (Bağıl Nem %80)		
	Eşdeğer Kalınlık (mm), $L_e=2A_c/u$					
	50	150	600	50	150	600
1 gün	5,4	4,4	3,6	3,5	3,0	2,6
7 gün	3,9	3,2	2,5	2,5	2,1	1,9
28 gün	3,2	2,5	2,0	1,9	1,7	1,5
90 gün	2,6	2,1	1,6	1,6	1,4	1,2
365 gün	2,0	1,6	1,2	1,2	1,0	1,0

2.3. Sünme-Rötre İlişkisi

Betondaki çimentonun hidratasyonu için gerekli su miktarı çimento ağırlığının yaklaşık %25'i kadardır. Ancak işlenebilir bir beton elde etmek için katılan su miktarı %25'in çok üstündedir. Bu nedenle, beton kalıplara yerleştirildikten sonra hidratasyon için gerekmeyen su buharlaşarak betondan ayrılır. Beton buharlaşma nedeni ile su kaybettikçe hacimsel küçülme olur, başka bir deyişle beton büzülerek kısalır. Bu olaya büzülme veya rötre denir. Rötre buharlaşmaya ve buharlaşmanın hızına bağlı olduğundan, ortamın sıcaklığı, nemi ve elemanın bu ortama açık olan yüzeyinin büyüklüğü rötre etkiler.

Rötre olayı yükten bağımsız, malzemenin su miktarına ve çevre koşullarına bağlı olurken sünme ise diğer etkilerin yanında daha çok yüke ve zamana bağlıdır. Rötrenin hızı azalarak uzun süre devam etse de, büyük bölümü beton döküldükten sonra üç ay içinde oluşur, ancak sünme olayı üç yıla kadar devam eden bir deformasyondur.

Sünmeden dolayı oluşacak şekil değiştirmeler, rötreden dolayı oluşacak şekil değiştirmelere göre daha büyüktür.

2.4. Sünmenin Elastisite Modülüne Etkisi

Doğrusal olmayan bir davranış gösteren betonun elastisite modülü gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimine eşit olduğuna göre, gerilme mertebesine göre değişecektir. Ayrıca elastisite modülü yüklenme hızına göre de değişir. Bunun nedeni, betonun zamana bağlı deformasyon yapan bir malzeme oluşudur. Yapılan deneyler, kalıcı yükler altında betondaki deformasyonun büyük ölçüde arttığını, dolayısı ile elastisite modülünün azaldığını göstermiştir. Elastisite modülünün değeri, kalıcı yükün mertebesine ve zamana bağlıdır. Elastisite modülünün zamanla ilk değerinin yarısına veya üçte birine kadar azalması doğaldır.

Sünme nedeni ile elastisite modülünün azalması, elemanların eğilme rijitliğini de azaltır. Bu nedenle yüksek düzeyde kalıcı yük altındaki kirişlerde, yükün uygulanmasından 1-2 yıl sonraki deplasman (sehim), yükün uygulandığı andaki deplasmanın 2 veya 3 katına kadar çıkabilir (Ersoy, 1987; Tuna, 1992).

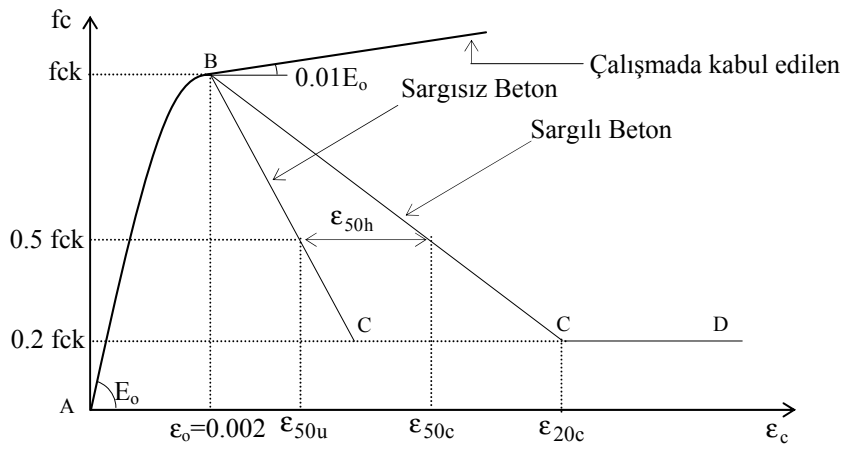
Başlangıç elastisite modülü, σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasına çizilen teğetin eğimi olarak tanımlanabilir. Gerilmelerin küçük olması halinde, özellikle betonun basınç mukavemetinin üçte birinden küçük olduğu taktirde başlangıçtaki teğetin gerilme-deformasyon eğrisi ile çakıştığını pratik bakımdan kabul etmek mümkündür. Bu nedenle beton çok düşük gerilmelere maruz ise, başlangıç elastisite modülü kullanılarak gerçekçi sonuçlar alınabilir (Postacıoğlu, 1981; Ersoy, 1987). Pratikte elastisite modüllerinden hangisinin kullanılacağı, söz konusu olan probleme bağlıdır. Bu çalışmada uzun süreli yüklerle

maruz yapıları incelediğimiz için, daha güvenli tarafta kalacağından teğet elastisite modülü kullanılmıştır.

Bu çalışmada, Kent ve Park tarafından tek eksenli basınç altındaki sargılı ve sargısız betonlar için önerilen, Şekil 1'de verilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı kullanılmıştır. Bu diyagramda gösterilen AB bölgesi 2. dereceden bir paraboldür. Sargılı ve sargısız her iki tür beton için de geçerli olan bu bölge, betonun maksimum basınç mukavemeti olan f_{ck} 'da son bulur. Betonun karakteristik basınç mukavemeti f_{ck} 'ya karşı gelen şekil değiştirme, $\varepsilon_o = 0.002$ olarak alınmıştır. Bu bölge için kabul edilen bağıntı;

$$f_c = f_{ck} \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

şeklindedir (Kent ve Park, 1971). Bu bağıntıda ε_c , f_c beton basınç gerilmesine karşı gelen şekil değiştirmedir.



Şekil 1. Sargılı ve sargısız beton için önerilen gerilme-şekil değiştirme dağıntısı

AB bölgesinde ε_c şekil değiştirmesine karşı gelen E_t tanjant modülü (1) bağıntısının ε_c 'ye göre birinci türevinin alınmasıyla elde edilir.

$$E_t = \frac{df_c}{d\varepsilon_c} = 1000 f_{ck} \left[1 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right] \quad (2)$$

2.5. Kabuller

Bu çalışmada aşağıda belirtilen basitleştirici kabuller yapılmıştır;

1. Çerçeve çubukları ortogonal ve doğru eksenlidir.
2. Rötire etkisi ihmal edilmiştir.
3. Statik analiz, brüt beton kesitleri esas alınarak hesaplanan atalet mom. göre yapılmıştır.
4. Uygulanan yüklerin doğrultularının değişmediği kabul edilmiştir.
5. Kirişlere gelen normal kuvvetlerin çok az olması nedeniyle bu elemanların elastisite modüllerinin sabit kaldığı kabul edilmiştir.
6. Kolonların elastisite modülleri ise şekil değiştirme miktarına bağlı olarak azaltılmıştır. Ancak bu yapılırken, kolon elemanların elastisite modülünün başlangıç elastisite modülünün %1'inden daha az olamayacağı sınır şartı getirilmiştir. Böylece rijitlik matrisinin stabilitesi sağlanmış ve ardışık çözüm yapılabilmiştir.

3. YÖNTEM

Yapı sistemlerinin hesabının amacı, statik ve dinamik dış etkiler altında, sistemlerde meydana gelen iç kuvvetlerin, deformasyonların ve deplasmanların tayin edilmesidir. Hesap edilecek sistemler, düğüm noktaları denilen sonlu uzaklıktaki noktalarda bilinen elemanlardan meydana gelmektedir. Bir çubuk, bir çubuklar sistemi veya bir sürekli ortam parçası olabilen her elemanda dış etkilerden meydana gelen iç tesirlerin tayin edilebileceği kabul edilmektedir. Bundan dolayı, bütün matris hesap metodlarının amacı, sistemde dış etkilerden meydana gelen uç kuvvetlerin ve uç deplasmanların tayini olmaktadır (Çakıroğlu vd., 1992).

Matris deplasman yöntemi genel olarak,

$$\{P\} = [K] \times \{D\} + \{F\} \quad (3)$$

denkleminin çözümüdür. Burada,

$\{P\}$: Direk yük vektörü (Düğüm noktalarına doğrudan etki eden yükler)

$[K]$: Sistem rijitlik matrisi

$\{D\}$: Uç deplasmanları matrisi (Bilinmeyenler matrisi)

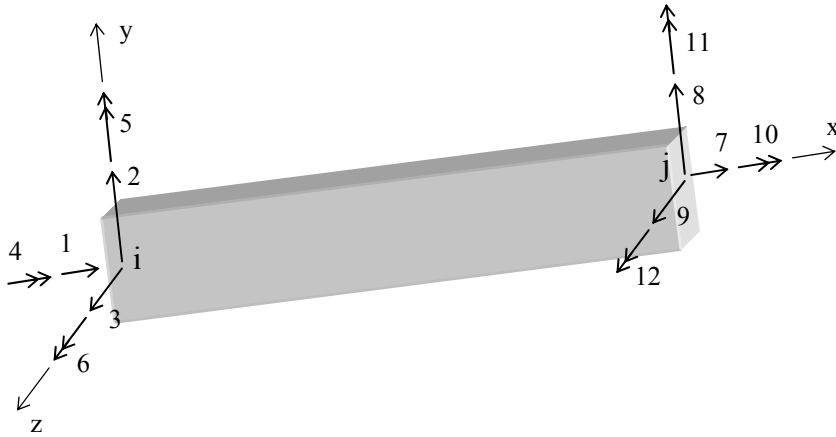
$\{F\}$: Yükleme matrisi

olarak tanımlanmıştır. Matris deplasman yönteminin çözüm adımları aşağıda verilmiştir.

3.1. Eleman Rijitlik Matrisinin Oluşturulması

Eleman rijitlik matrisi $[K_e]$, Şekil 2’de verilen doğru eksenli prizmatik uzay çubuk eleman için, elemanın özelliklerine göre;

$$[K_e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$



Şekil 2. Doğru eksenli prizmatik uzay çubuk eleman

olarak yazılır. Burada;

A : Kesit Alanı (m^2)

I_x : Burulma rijitliği (m^4)

I_y : y-y kesiti atalet momenti (m^4)

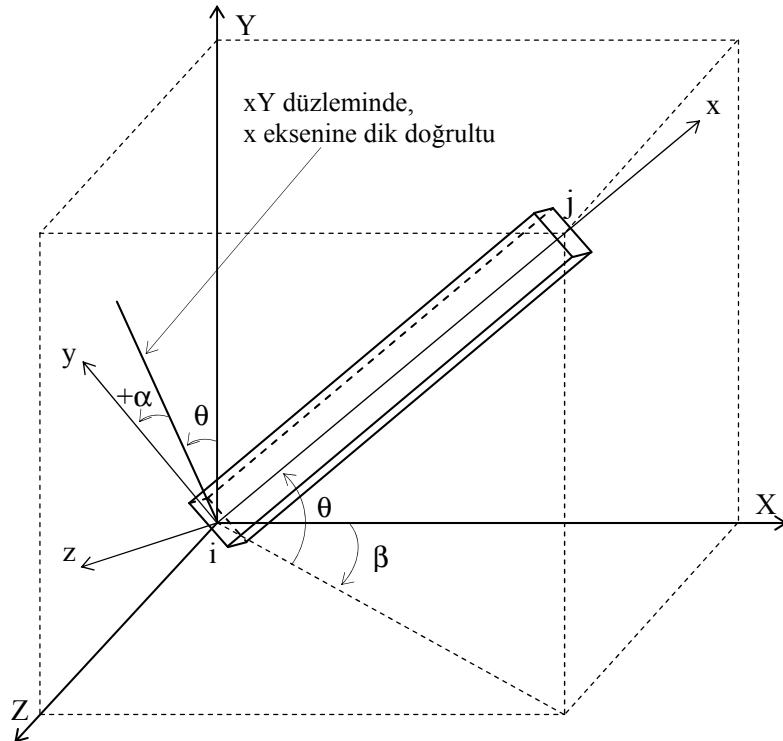
I_z : z-z kesiti atalet momenti (m^4)

G : Kayma modülü (t/m^2)

E : Elastisite modülü (t/m^2)

L : Çubuk boyu (m) olarak tanımlanmıştır.

3.2. Transformasyon Matrisinin Oluşturulması



Şekil 3. Lokal eksen takımı (x,y,z) ile global eksen takımı (X,Y,Z) arasındaki ilişki

Sistem rijitlik matrisini oluşturacak olan eleman rijitlik matrislerinin bazıları global koordinatlar ile aynı koordinat eksenlerine sahip olabilirler. Yine de ilk olarak bu matrislerin tümünü global koordinatlara dönüştürmek gerekir. Bunun için; Şekil 3'te görüldüğü gibi α , β ve θ global eksen takımı ile lokal eksen takımı arasındaki açılar olmak üzere, oluşturulacak [T] transformasyon matrisinden faydalanılır. Şekil 3'te x, y ve z lokal eksen takımını; X, Y ve Z ise global eksen takımını göstermektedir (Vanderbilt, 1974).

$$[T] = \begin{bmatrix} [R] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [R] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [R] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [R] \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) bağıntısında verilen rotasyon matrisi [R], aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos b \times \cos q & \sin q & \sin b \times \cos q \\ -\cos a \times \cos b \times \sin q - \sin a \times \sin b & \cos a \times \cos q & -\cos a \times \sin b \times \sin q + \sin a \times \cos b \\ \sin a \times \cos b \times \sin q - \cos a \times \sin b & -\sin a \times \cos q & \sin a \times \sin b \times \sin q + \cos a \times \cos b \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3. Yük Vektörünün Oluşturulması

Bir taşıyıcı sistemin üzerine tesir eden dış yükler, tesir ettikleri yer bakımından iki grupta toplanabilir.

- 1) Direk dış yükler (doğrudan doğruya sistemin düğüm noktalarına tesir eden)
- 2) Endirek dış yükler (çubukların eksenleri boyunca tesir eden)

(3) bağıntısında {F} kolon vektörü betonarme sistemi oluşturan elemanların yükleridir. Sistemin düğüm noktası deformasyonları hangi eksen takımında seçilmiş ise {F}'ler da aynı doğrultuda verilmiş olmalıdır. Lokal koordinat sisteminde elde edilen eleman yükleme matrisi {F_e} transformasyon matrisi ile çarpılarak global koordinatlara dönüştürülmüş yükleme matrisi {F_e}_s oluşturulur. Burada s indisi global koordinatları ifade etmektedir.

$$\{F_e\}_s = [T] \times \{F_e\} \quad (7)$$

Doğrudan doğruya global koordinatlarda elde edilen direk düğüm noktası yükleri, global koordinatlara dönüştürülmüş {F} vektörüne eklenerek sistem yük vektörü teşkil edilir. (Vanderbilt, 1974).

3.4. Sistem Rijitlik Matrisinin Teşkili

Lokal koordinatlarda elde edilen eleman rijitlik matrisleri transformasyon matrisleri ile çarpılarak global koordinatlara dönüştürülür. Dönüştürülmüş eleman rijitlik matrisleri sistem rijitlik matrisi içine yerleştirilir.

Lokal koordinatlardaki eleman rijitlik matrisi önce transformasyon matrisinin transpozesi ile sonra transformasyon matrisi ile çarpılır ve global koordinatlara dönüştürülmüş eleman rijitlik matrisi [K_e]_s aşağıdaki gibi elde edilir. Burada s indisi global koordinatları ifade etmektedir.

$$[K_e]_s = [T] \times [K_e] \times [T]^T \quad (8)$$

3.5. Uç Kuvvetlerinin Hesabı

Global koordinatlarda teşkil edilen eleman rijitlik matrisleri ve yük vektörleri toplanarak, sistem rijitlik matrisi ve sistem yük vektörü elde edilir. Bu şekilde oluşturulan (3) denklemi çözülür ve bilinmeyenler vektörü $\{D\}$ hesaplanır. Global koordinatlarda hesaplanan $\{D\}$ deplasman vektörü ve $[K_e]_s$ matrisi yardımıyla global koordinatlarda çubuk uç kuvvetleri $\{FE\}_s$ hesaplanır.

$$\{FE\}_s = [K_e]_s \times \{D_e\}_s + \{F_e\}_s \quad (9)$$

(9) bağıntısındaki $\{D_e\}$ vektörü, uzay çubuk elemanın deplasman vektörü olup 12×1 boyutludur. Hesaplanan çubuk uç kuvvetleri $\{FE\}_s$ sistem koordinatlarındadır. Sistem koordinatlarındaki çubuk uç kuvvetleri transformasyon matrisi ile çarpılır ve elemanların uç kuvvetleri lokal koordinatlarda hesaplanmış olur.

$$\{FE\} = [T] \times \{FE\}_s \quad (10)$$

4. BİLGİSAYAR PROGRAMI

Betonarme çerçevelerin üç boyutlu statik analizini yapmak için Sframe isimli Fortran programlama dilinde kodlanmış bilgisayar programından yararlanılmıştır (Vanderbilt, 1974).

Program, bazı eklemeler yapılarak kullanım amacına uygun hale getirilmiştir. Böylece programda, elemanların maksimum momentlerinin ve sünme etkilerinin hesaplanması da sağlanmıştır.

Programda bütün elemanlar için sabit olarak girilen elastisite modülü ve kayma modülü değerleri her bir eleman için farklı tanımlanmıştır. Bu şekilde, farklı şekil değiştirmeler nedeniyle elemanların elastisite modüllerindeki değişim göz önüne alınabilmiştir.

Her bir çözüm adımı sonucunda elde edilen deplasmanlar başlangıç düğüm noktası koordinatlarına eklenerek yeni düğüm noktası koordinatları bulunmuş ve buna göre sistem yeniden çözülmüştür. Bu işleme son iki çözümdeki deplasmanlar birbirine eşit olana kadar ardışık şekilde devam edilmiştir. Bu şekilde geometri değişimlerinin etkisi göz önüne alınabilmiştir. Ardışık çözümlenme sırasında uygulanan yüklerin doğrultusunun değişmediği kabul edilmiştir.

Sistemde bulunan elemanların eşdeğer kalınlığına ve bağıl nemine bağlı TS 500'de verilen tabloya göre sünme katsayılarını hesaplayan bir alt program eklenmiştir.

Kent ve Park tarafından tek eksenli basınç altındaki sargılı ve sargısız betonlar için önerilen, Şekil 1'de verilen gerilme-şekil değiştirme diyagramına ve yeni deplasmanlara göre yeni elastisite modülünü hesaplayan bir alt program eklenmiştir.

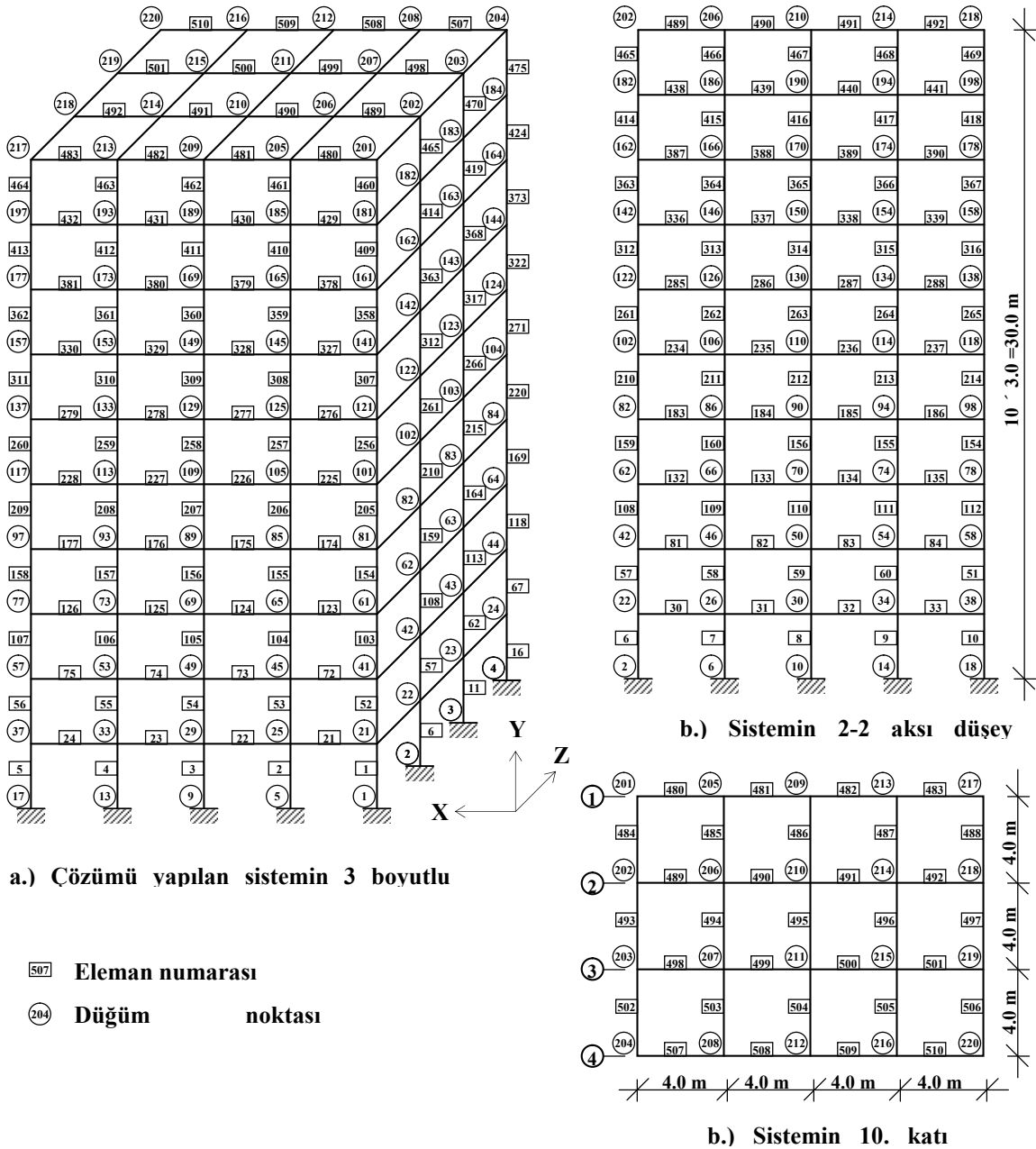
Yeni elastisite modülüne göre sistem tekrar çözülmüş ve sünme etkilerinin de dahil olduğu yeni düğüm noktası deplasmanları ve eleman uç kuvvetleri bulunmuştur. Kullanılan bilgisayar programının akış şeması özet olarak ekte verilmiştir (Ek: A).

Kullanılan bilgisayar programının doğruluğunu test etmek için, planda her iki doğrultuda 3 açıklığı bulunan 3 katlı bir yapının SAP2000 paket programı ile de çözümü yapılmış ve aynı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak SAP2000 ile yapılan çözümde, her çözüm adımı tek tek yapılmış ve her adımda düğüm noktası koordinatları ve çubuk elemanların elastisite modülleri yeniden girilmiştir (SAP2000[®], 1999; Şener, 2003).

5. SAYISAL UYGULAMALAR

Sayısal örnek olarak X doğrultusunda 4 açıklığı ($4 \times 4.0\text{m} = 16.0\text{m}$), Y doğrultusunda 3 açıklığı ($3 \times 4.0\text{m} = 12.0\text{m}$) bulunan 10 katlı ($10 \times 3.0\text{m} = 30.0\text{m}$) bir betonarme yapı seçilmiştir. Bütün kiriş elemanlarının boyutları $25 \times 50 \text{ cm}^2$ olarak alınmış ve üzerlerinde 3.0 t/m^2 lik uniform yayılı yük bulunduğu kabul edilmiştir. Bütün elemanlar için başlangıç elastisite modülü $E = 2000000 \text{ t/m}^2$ olarak alınmıştır. Seçilen yapının data dosyası çeşitli kriterlere göre bir çok kez hazırlanarak Sframe isimli programla çözülmüştür.

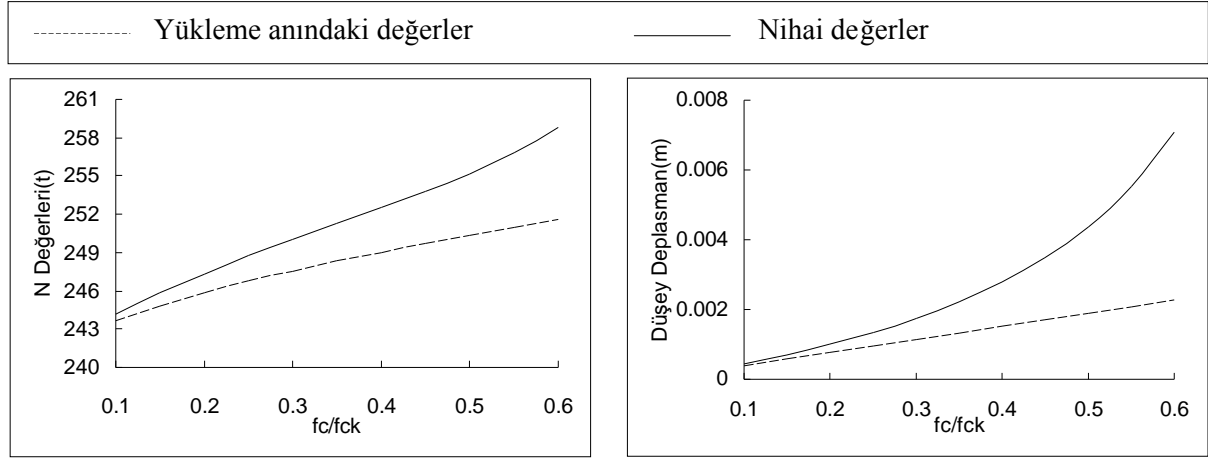
Farklı örnekleri seçerken, kiriş boyutları sabit ($25 \times 50 \text{ cm}^2$) tutularak, yapının kolon boyutlandırılmasında değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerle, kolon boyutlandırılması yapılırken dikkat edilmesi gereken hususların neler olduğu sonucuna ulaşılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4. Çözümü yapılan betonarme çerçeve taşıyıcı sistemin boyutları, eleman ve düğüm noktası numaraları

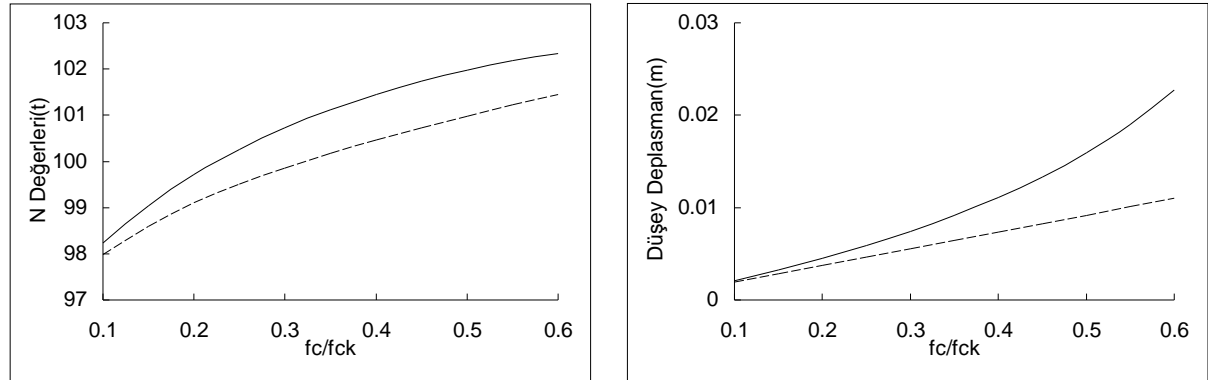
5.1. Bütün Kolon Boyutlarının Farklı Olması Halinde Kesit Tesirlerinde ve Dügüm Noktası Deplasmanlarının Değişimi

Bu bölümde yapılan çözümlerde, yapıya ait bütün kolonlarda f_c/f_{ck} oranları sabit olacak şekilde kolonlar boyutlandırılmıştır. Bunun için öncelikle, kolon etkili alanları esas alınarak yaklaşık kolon boyutları belirlenmiş ve statik hesap yapılmıştır. Bu hesap sonucunda elde edilen normal kuvvet değerlerine göre, her bir kolon eleman için aynı f_c/f_{ck} oranını verecek şekilde kolonlar boyutlandırılmıştır. Yapının yüklenme yaşı 90. gün olarak alınmıştır.



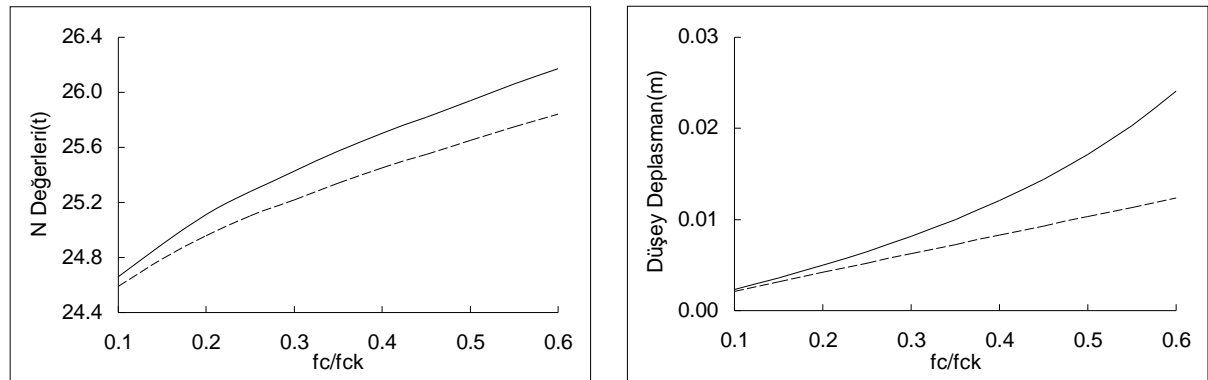
Şekil 5. 7 No'lu kolonun N değişimleri

Şekil 8. 30 No'lu d.n. düşey deplasmanları



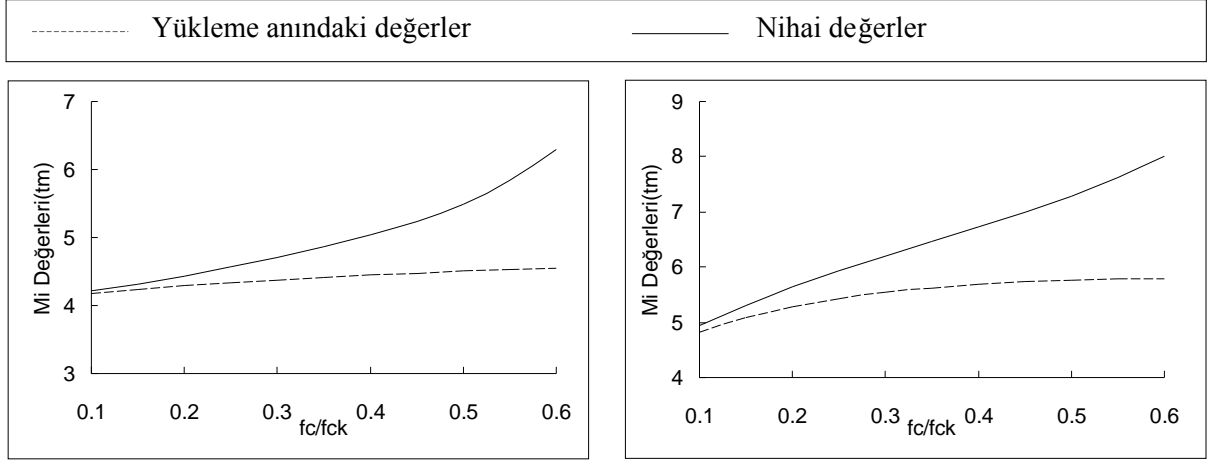
Şekil 6. 313 No'lu kolonun N değişimleri

Şekil 9. 150 No'lu d.n. düşey deplasmanları



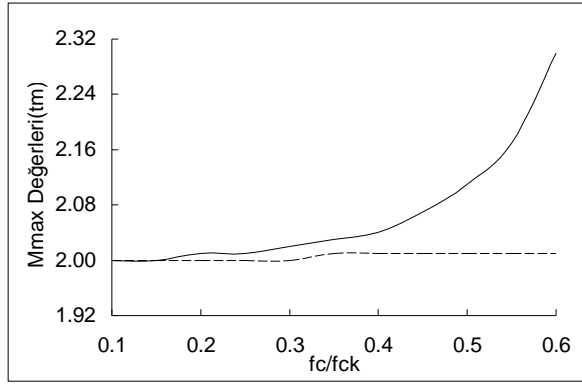
Şekil 7. 466 No'lu kolonun N değişimleri

Şekil 10. 210 No'lu d.n. düşey deplasmanları

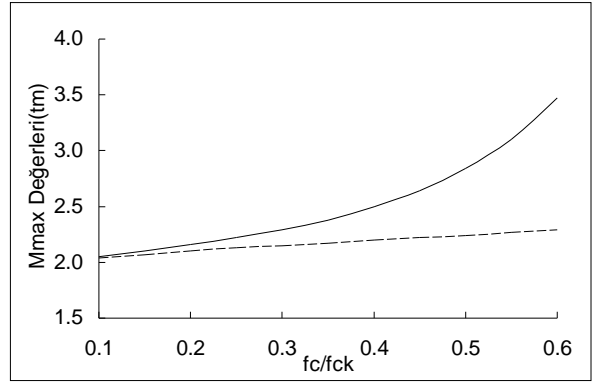


Şekil 11. 31 No'lu kirişin Mi momentleri

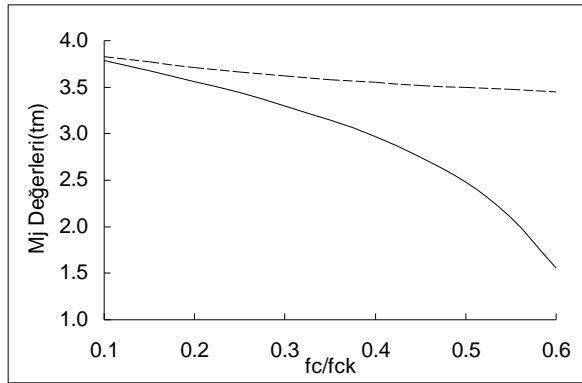
Şekil 14. 490 No'lu kirişin Mi momentleri



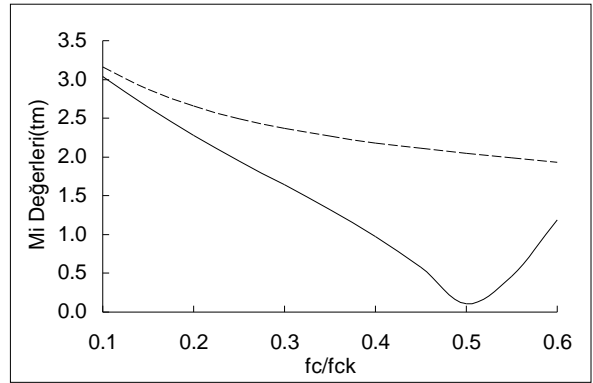
Şekil 12. 31 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 15. 490 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 13. 31 No'lu kirişin Mj momentleri

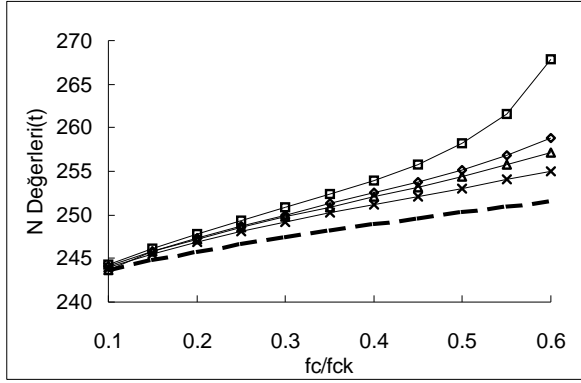
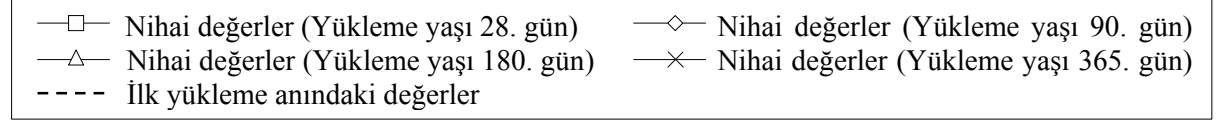


Şekil 16. 490 No'lu kirişin Mj momentleri

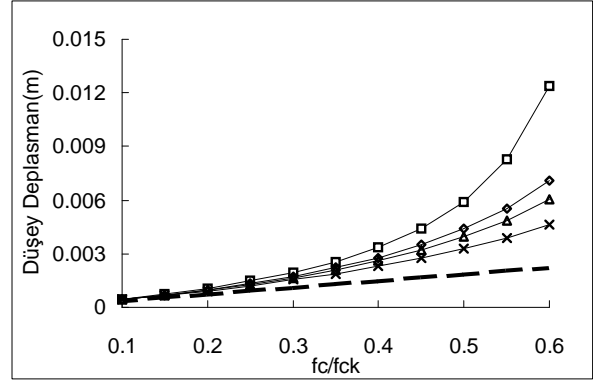
Nihai N değerleri arasındaki fark, düşük f_c/f_{ck} oranları için daha az, yüksek f_c/f_{ck} oranları ise daha fazladır. Toplam düşey yük sabit olduğu için N değeri bazı kolon elemanlarda artış, bazı kolon elemanlarda ise azalış şeklinde olacaktır (Şekil 5-7). f_c/f_{ck} oranı arttıkça ilk çözüm ile nihai çözüm arasındaki düşey deplasman farkı artmaktadır. Üstelik bu artım lineer değil daha çok paraboliktir. Bunun nedeni, yapıya etki eden düşey yüklerin artması (f_c/f_{ck} oranının artması) sonucu bütün düşey taşıyıcı elemanların yani kolonların elastisite modüllerinin ve buna bağlı olarak uzama rijitliklerinin azalmasıdır (Şekil 8-10). Kiriş elemanların açıklık momentlerinde ise bir artış gözlenmektedir (Şekil 12, Şekil 15).

5.2. Bütün Kolon Boyutlarının Farklı Olması Halinde Yükleme Yaşına Göre Kesit Tesirlerinin ve Dügüm Noktası Deplasmanlarının Değişimi

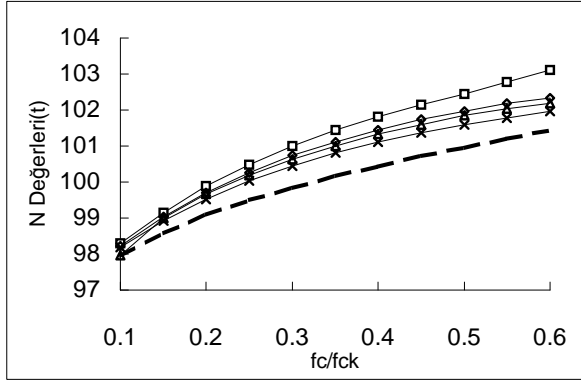
Bu bölümde, Bölüm 5.1'de açıklandığı şekilde boyutlandırılmış taşıyıcı sistemin, yükleme yaşına göre kesit tesiri ve düğüm noktası deplasmanlarındaki değişimler verilmiştir. Parantez içindeki değerler yapının tam yük ile yüklendiği yaşı göstermektedir.



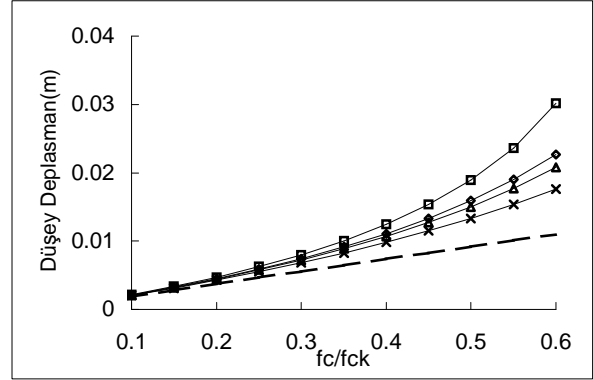
Şekil 17. 7 No'lu kolonun N değişimleri



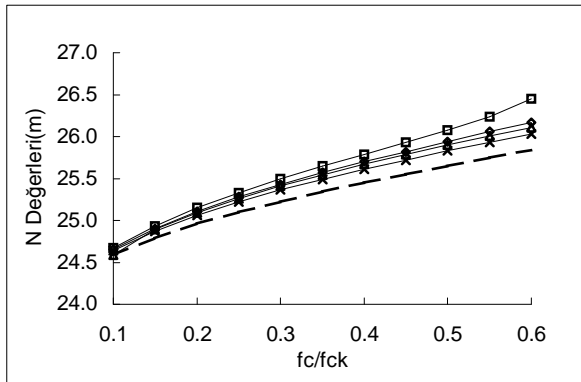
Şekil 20. 30 No'lu d.n. düşey deplasmanları



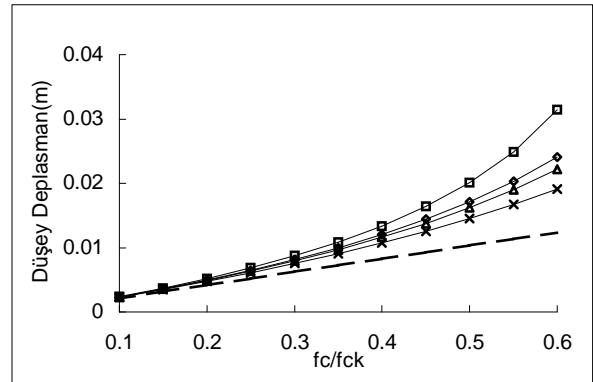
Şekil 18. 313 No'lu kolonun N değişimleri



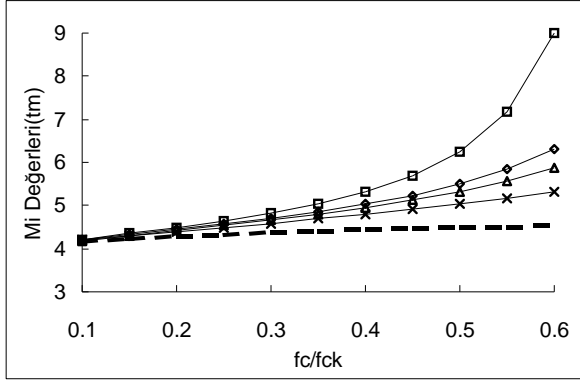
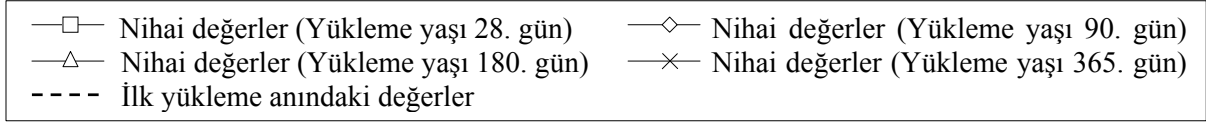
Şekil 21. 150 No'lu d.n. düşey deplasmanları



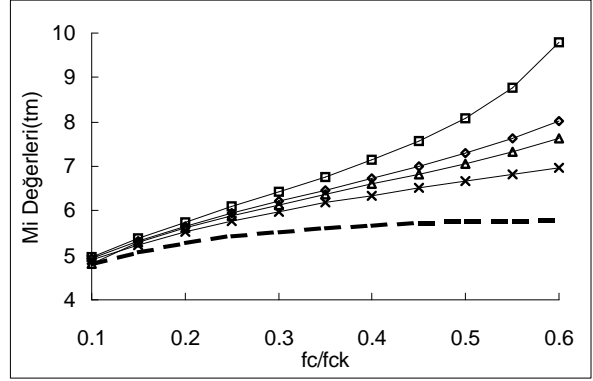
Şekil 19. 466 No'lu kolonun N değişimleri



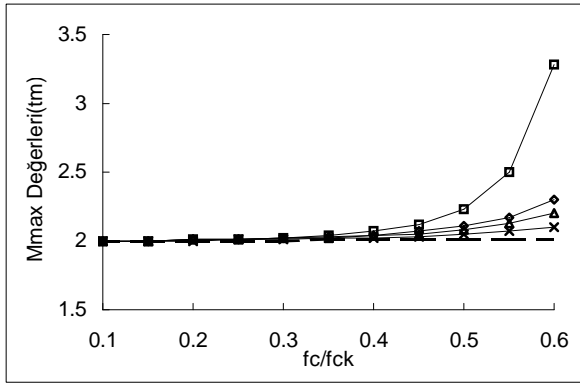
Şekil 22. 210 No'lu d.n. düşey deplasmanları



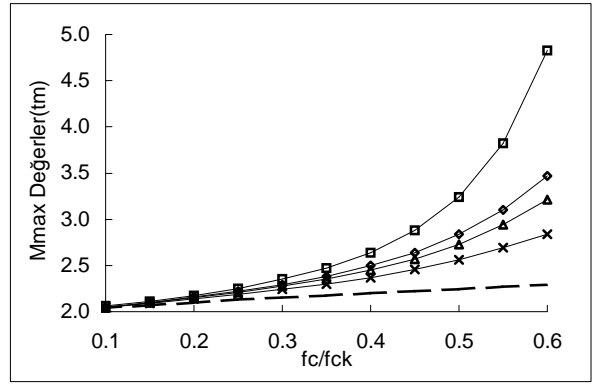
Şekil 23. 31 No'lu kirişin Mi momentleri



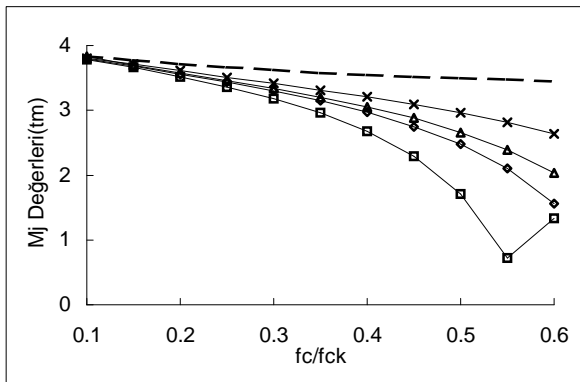
Şekil 26. 490 No'lu kirişin Mi momentleri



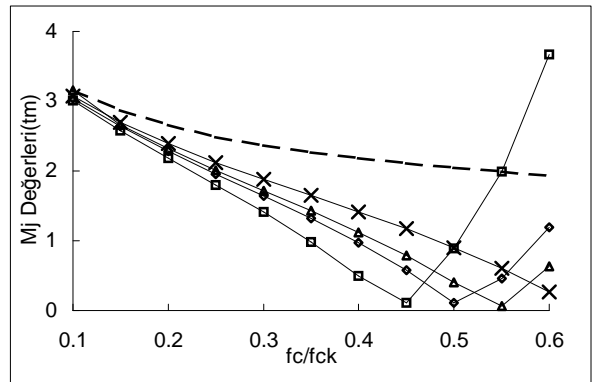
Şekil 24. 31 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 27. 490 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 25. 31 No'lu kirişin Mj momentleri

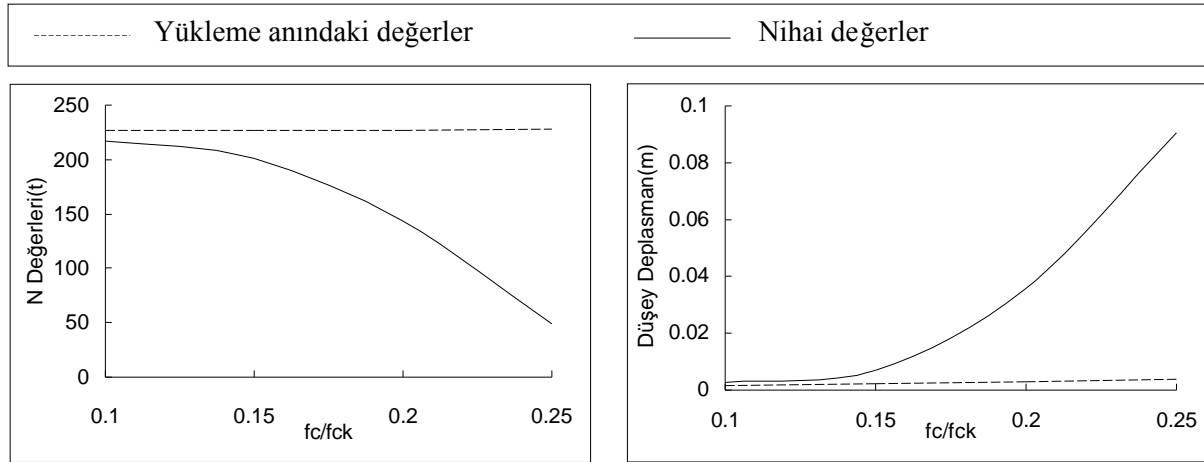


Şekil 28. 490 No'lu kirişin Mj momentleri

Kolon elemanların aksenal normal kuvvetleri de yüklenme yaşına bağlı olarak değişim göstermektedir (Şekil 17-19). 28. günde yüklenen betonun nihai düşey deplasmanının en fazla olduğu ve yüklenme yaşı arttıkça düşey deplasmanının azaldığı şekillerde de açıkça görülmektedir (Şekil 20-22). Yani, erken yüklenmiş beton sünme nedeniyle daha çok düşey deplasman yapmaktadır. Kiriş elemanların açıklık momentlerinde ise bir artış gözlenmektedir. Ancak, kolonların elastisite modüllerinin farklı oranlarda azalması nedeniyle kiriş uç momentlerinin değişimlerinde düzensizlikler meydana gelmiştir (Şekil 23-28).

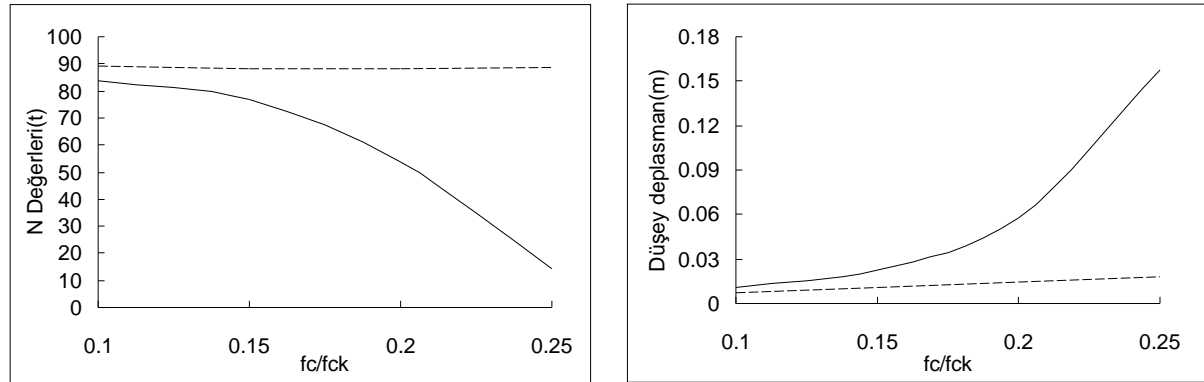
5.3. Bütün Kolon Boyutlarının Eşit Olması Halinde Kesit Tesirleride ve Düğüm Noktası Deplasmanlarının Değişimi

Bu bölümde yapılan çözümlerde, kolon boyutlandırması yapılırken yapıdaki bütün kolon boyutları eşit alınmıştır. Zemin kata gelen düşey yükler, o kattaki kolon sayısına bölünerek her bir kolona gelen eksenel normal kuvvet hesaplanmış ve tüm kolon boyutları eşit olacak şekilde boyutlandırma yapılmıştır. Yapının yüklenme yaşı 90. gün olarak alınmıştır.



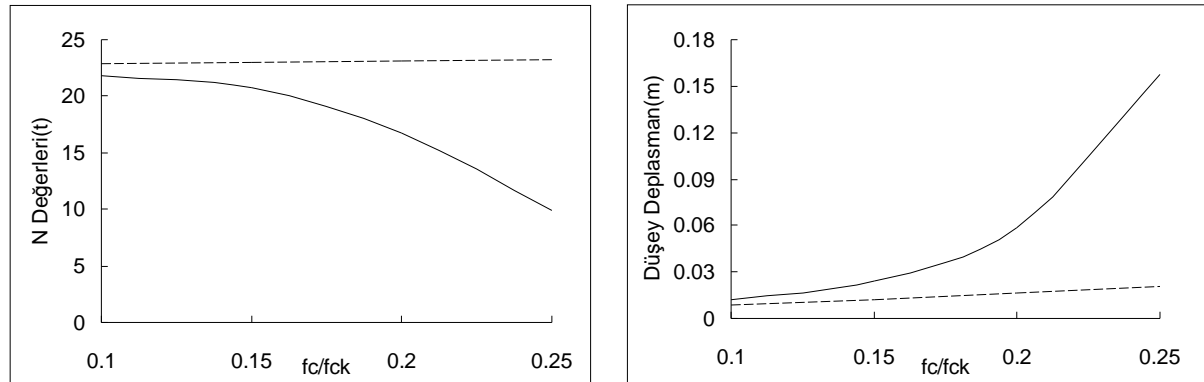
Şekil 29. 7 No'lu kolonun N değişimleri

Şekil 32. 30 No'lu d.n. düşey deplasmanları



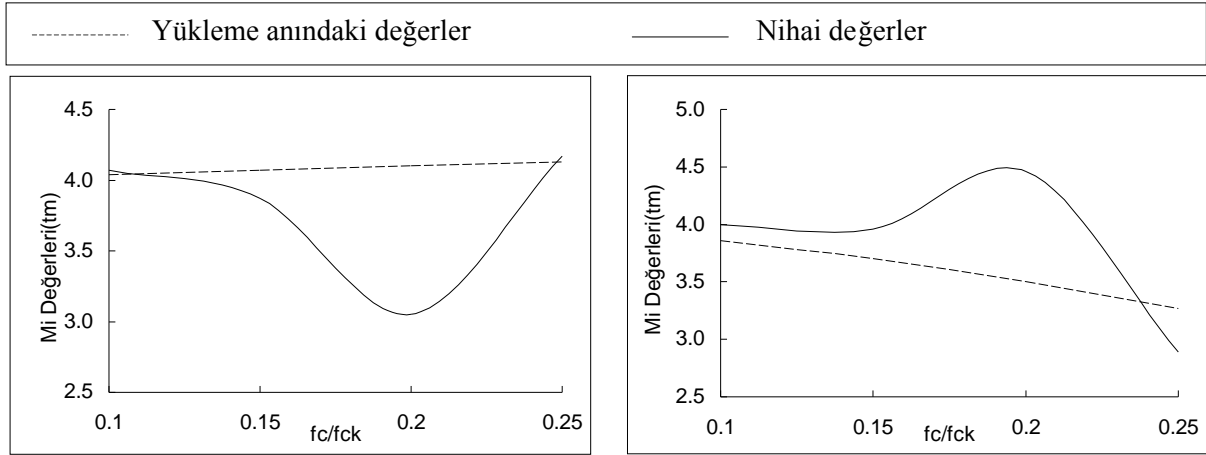
Şekil 30. 313 No'lu kolonun N değişimleri

Şekil 33. 150 No'lu d.n. düşey deplasmanları



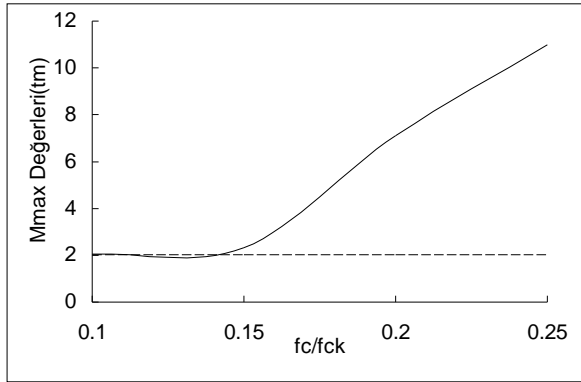
Şekil 31. 466 No'lu kolonun N değişimleri

Şekil 34. 210 No'lu d.n. düşey deplasmanları

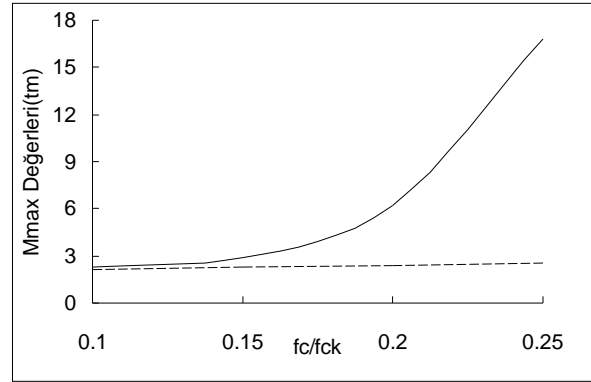


Şekil 35. 31 No'lu kirişin Mi momentleri

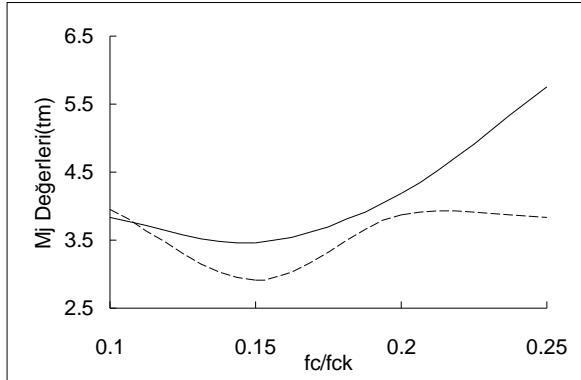
Şekil 38. 490 No'lu kirişin Mi momentleri



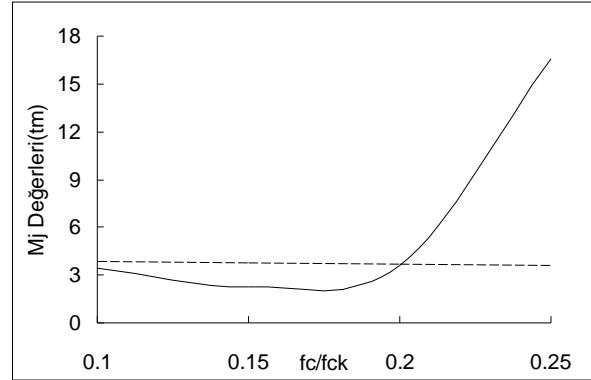
Şekil 36. 31 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 39. 490 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 37. 31 No'lu kirişin Mj momentleri

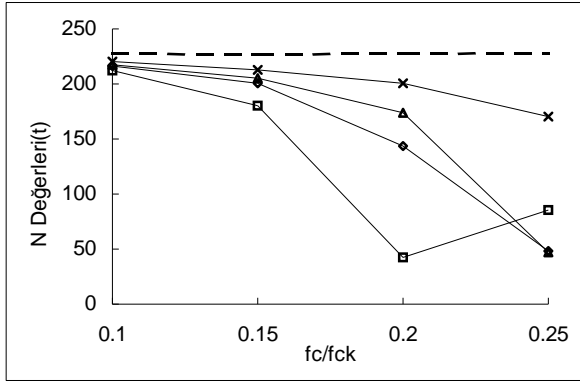
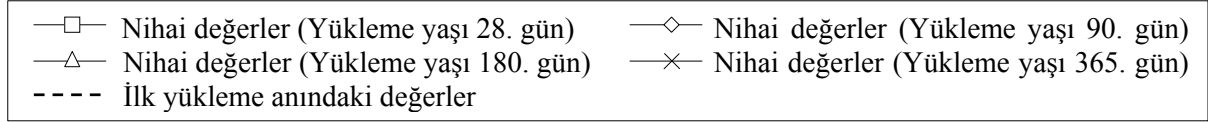


Şekil 40. 490 No'lu kirişin Mj momentleri

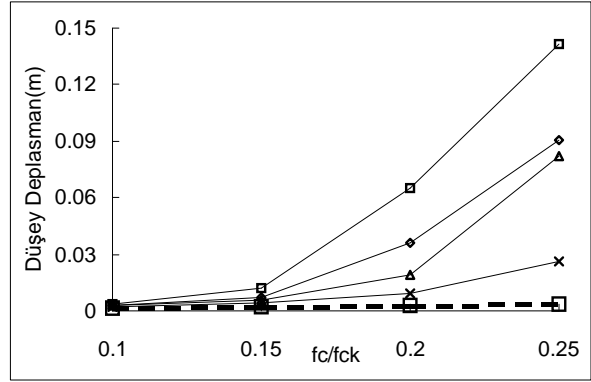
Şekil 29-40'da her kattaki kolon boyutlarının sabit olmasına göre yapılan örneklerin çözümünde ilk yükleme anındaki ile nihai, düğüm noktası deplasmanları ve kesit tesirlerindeki değişimleri verilmiştir. Bölüm 5.1 ve 5.2'de f_c/f_{ck} oranının 0.6 değerine kadarki değişimler gösterilmiştir. Bu bölümde ise f_c/f_{ck} değeri 0.25'e kadar alınmıştır. Bunun nedeni, f_c/f_{ck} değeri 0.25 ve daha üst değerlerde, bazı elemanlarda elastisite modülü çok azalmış ve düğüm noktası deplasmanları ile kesit tesirlerini etkilemiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, mimari kaygılarla kolonları aynı kesitlerde yapmak, kolon boyutlarının küçük olması halinde (f_c/f_{ck} artar) kesit tesirlerindeki büyük değişimlere, kolon boyutlarının büyük olması halinde ise (f_c/f_{ck} azalır) ekonomiden uzaklaşılmasına neden olur.

5.4. Bütün Kolon Boyutlarının Eşit Olması Halinde Yükleme Yaşına Göre Kesit Tesirlerinin ve Dügüm Noktası Deplasmanlarının Değişimi

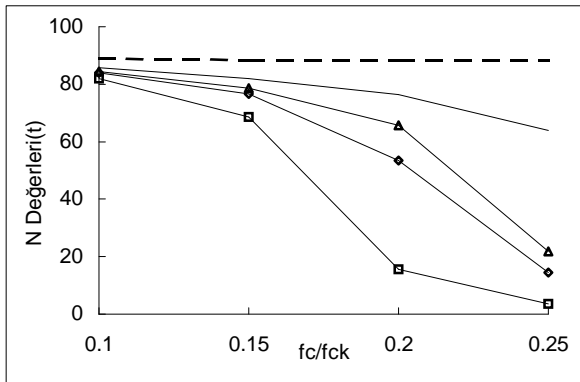
Bu bölümde, Bölüm 5.3'te açıklandığı şekilde boyutlandırılmış taşıyıcı sistemin, yükleme yaşına göre kesit tesiri ve düğüm noktası deplasmanlarındaki değişimler verilmiştir. Parantez içindeki değerler yapının tam yük ile yüklendiği yaşı göstermektedir.



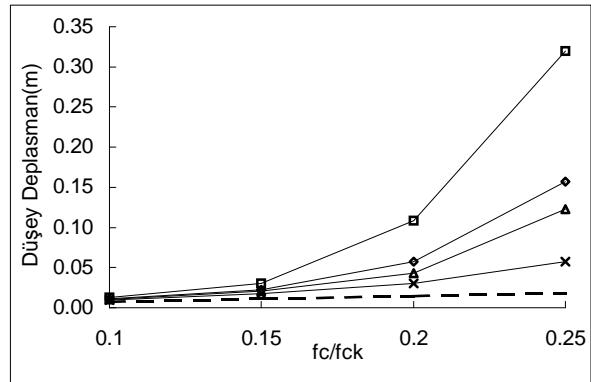
Şekil 41. 7 No'lu kolonun N değişimleri



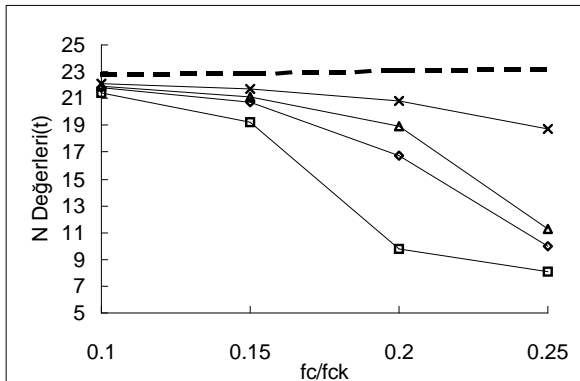
Şekil 44. 30 No'lu d.n. düşey deplasmanları



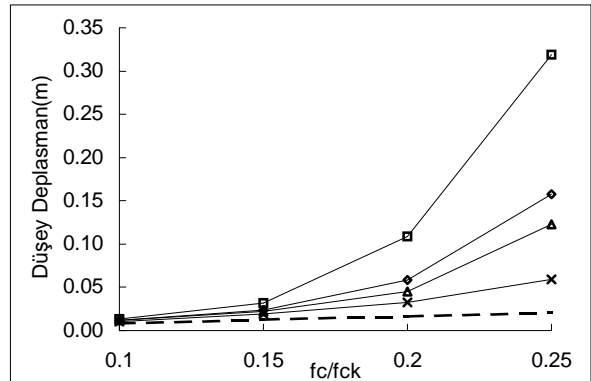
Şekil 42. 313 No'lu kolonun N değişimleri



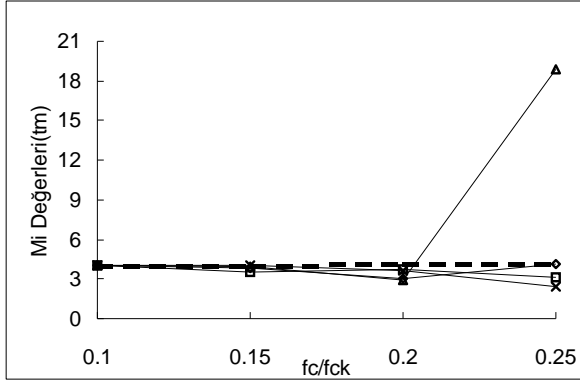
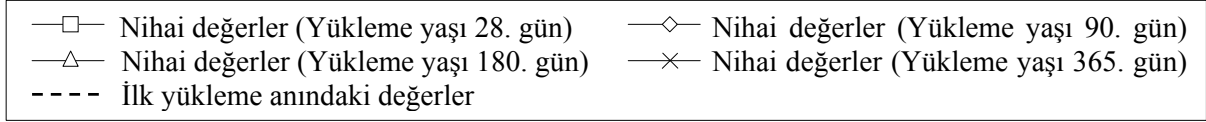
Şekil 45. 150 No'lu d.n. düşey deplasmanları



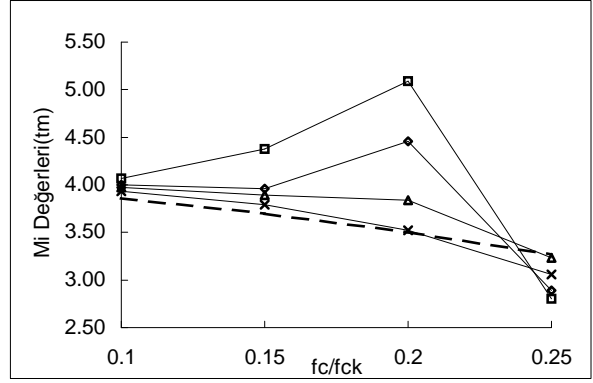
Şekil 43. 466 No'lu kolonun N değişimleri



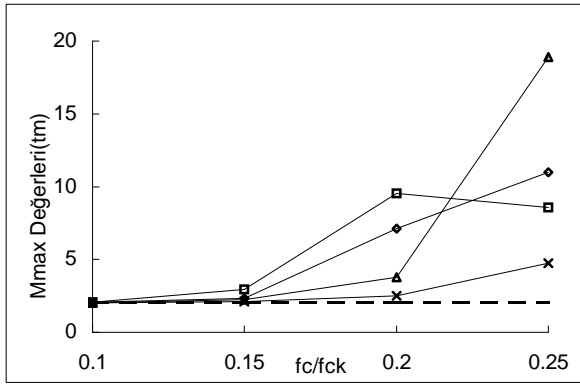
Şekil 46. 210 No'lu d.n. düşey deplasmanları



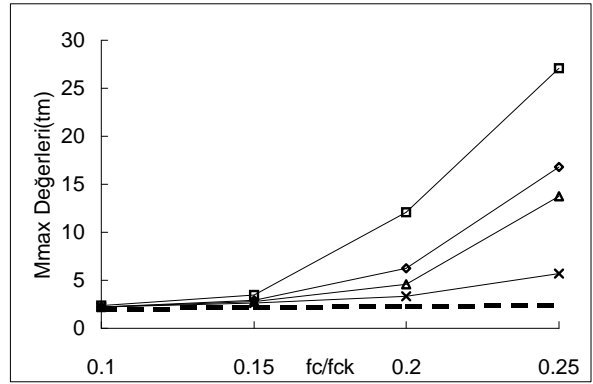
Şekil 47. 31 No'lu kirişin Mi momentleri



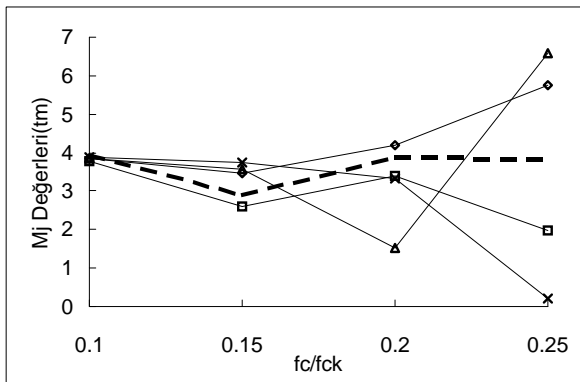
Şekil 50. 490 No'lu kirişin Mi momentleri



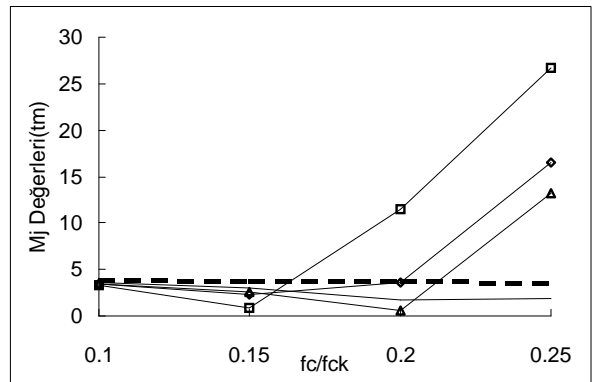
Şekil 48. 31 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 51. 490 No'lu kirişin Mmax momentleri



Şekil 49. 31 No'lu kirişin Mj momentleri



Şekil 52. 490 No'lu kirişin Mj momentleri

Düğüm noktası düşey deplasmanlarının değerleri f_c/f_{ck} oranı arttıkça artmakta ancak bu artış yüklemeye yaşı arttıkça azalmaktadır. Buradan da yüklemeye yaşının önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır (Şekil 44-46). Kesit tesirlerindeki değişimler ise daha düzensizdir. Kolon normal kuvvetleri yüklemeye yaşından bağımsız (f_c/f_{ck} oranına bağlı) olarak azalmakta veya artmaktadır (Şekil 41-43). Kiriş momentleri için bu değişim daha düzensizdir. Bunun nedeni bazı kolon elemanlardaki elastisite modülünün çok azalmasıyla, bu tür kolonların düğüm noktalarının daha kolay dönme deformasyonu yapabilmesidir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yükleme yaşının etkilerinin incelendiği örnekler sonucunda yapının yüklenme yaşı arttıkça sünme deformasyonunun azaldığı gözlenmiştir. Yüklenme yaşının sünme üzerine etkisi bir yıla kadar devam etmektedir. Yüklenme yaşı bir yıldan fazla olan yapıların ihmal edilecek kadar az sünme yaptıkları sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum TS 500’de verilen sünme katsayısı tablosundan da görülmektedir.

Yapının f_c/f_{ck} değerleri 0.1 ile 0.6 arasında değişecek şekilde kolon boyutları farklı farklı alınmış ve yapı çözülmüştür. Bunun sonucunda da f_c/f_{ck} değeri büyüdükçe deplasmanların arttığı gözlenmiştir. Yapılan çözümlerinde kolon boyutları aksenal kuvvete bağlı olarak azaltıldığında yapı rijitliğinin azaldığı ve sünme deformasyonunun arttığı gözlenmiştir. Aksenal kuvvetle orantılı şekilde boyutlandırma yapıldığında bu değişimin, f_c/f_{ck} değeri 0.6 alındığında bile aşılmadığı gözlenmiştir.

Bütün kolon boyutları eşit alınarak yapılan çözümler sonucunda da, f_c/f_{ck} oranına bağlı olarak deplasmanların arttığı görülmüştür. Elastisite modülü için getirilen %1 sınır şartının f_c/f_{ck} değerinin 0.25 değerine bile ulaşmadan aşıldığı gözlenmiştir. Oysa boyutlandırmada her bir kolon için aksenal kuvvet göz önüne alınan örneklerde elastisite modülü sınır şartının f_c/f_{ck} değeri 0.6 olduğu örneklerde de aşılmadığı görülmüştür.

Kolon boyutu büyüdükçe deplasmanlar azalmaktadır. Uzun süreli yükler altındaki yapılarda kolon boyutlandırmasında aksenal kuvvete öncelikle dikkat edilmelidir.

‘Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik’te kolonların brüt en kesit alanına $A_c \geq N_{max}/(0.5 \times f_{ck})$ koşulunun getirilmesi bu konuda yardımcı olmaktadır.

Yapılan örnekler göre yapı boyutlandırması yapılırken f_c/f_{ck} değerinin küçük olmasına dikkat edilmelidir. Özellikle bir kattaki kolon boyutlarının sabit olması istendiği durumlarda Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte kolonların brüt en kesit alanı için getirilen $A_c \geq N_{max}/(0.5 \times f_{ck})$ koşulundaki 0.5 katsayısı daha küçük değerlerde alınmalıdır. Bu şekilde, kolonların yapmış olduğu farklı düzey deplasmanların kesit tesirlerinde çok büyük değişimlere neden olmayacak seviyelerde kalması sağlanabilir.

Bu çalışmanın devamı olarak; yatay yükler, yapı elemanlarının çatlamış kesit atalet momentleri, donatılı kesit atalet momentleri ve dinamik etkiler göz önüne alınarak daha kapsamlı çözümler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aka İ., Keskinel F., Çılı F., Çelik O.C. (2001) : “Betonarmeye Giriş”, İstanbul, Birsen Yayınevi, 637 s.
- Çakıroğlu A., Özden E., Özmen G. (1992): “Yapı Sistemlerinin Hesabı için Matris Metotları ve Elektronik Hesap Makinası Programları : Cilt-I, Cilt-II”, İstanbul, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 792 s.
- Ersoy U. (1987): “Betonarme, Cilt 1”, İstanbul, Evrim Kitapevi, 643 s.
- Kent D.C., Park R. (1971): “Flexural Members with Confined Concrete”, Journal of the Structural Division, Vol. 97, No. ST7, pp. 1969-1990.
- Kocataşkın F. (2000): “Yapı Malzemesi Bilimi”, İstanbul, Birsen Yayınevi, 132 s.
- Postacıoğlu B. (1981) : “Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri : Cilt 1”, Gümüşsuyu, İ.T.Ü. Matbaası, 615 s.
- SAP2000® (1999): “Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”, Berkeley, California, USA.

- Şener S. (2003): “Betonarme Yapılarda Kesit tesirlerinin Zamana Bağlı Değişimi”, Balıkesir, BAÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 146 s.
- Tanrıcan B. (1996): “Tek Eksenli Gerilme Altında Betonun Sünmesi ve Hasarı”, İstanbul, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68 s.
- TS 500 (2000): “Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, Ankara, TSE, 67 s.
- Tuna M.E. (1992): “Betonarme”, Ankara, Gazi Üniv. Müh.-Mim. Fak., s. 21-22.
- Vanderbilt M.D. (1974): “Matrix Structural Analysis”, New York, Quantum Publishers, INC, 397 p.

EK A: BİLGİSAYAR PROGRAMI AKIŞ DİYAGRAMI

