

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME ELEMANLARDA ZAMANA BAĞLI ETKİLERİN ANALİTİK
YÖNTEMLER KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet ŞİNİKOĞLU**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

EYLÜL 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME ELEMANLARDA ZAMANA BAĞLI ETKİLERİN ANALİTİK
YÖNTEMLER KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet ŞİNİKOĞLU
(501071007)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Eylül 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Metin AYDOĞAN (İTÜ)
Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)**

EYLÜL 2010

ÖNSÖZ

Öncelikle inşaat yüksek mühendisliği eğitimine başladığım andan itibaren her zaman yanımda olan ve beni destekleyen aileme çok teşekkür ederim.Yapı mühendisliği programında aldığım eğitim sırasında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım aynı zamanda lisans eğitimimde betonarme dersi hocalığımı yapan Doç. Dr. A. Necmettin Gündüz' e teşekkürlerimi bir borç bilirim. 2008 yılının ağustos ayından itibaren birlikte çalışma fırsatı bulduğum Doç. Dr. Yılmaz Akkaya' ya da bu süreç içerisindeki desteğinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, üniversite öğrenimim sırasında tanıdığım ve bu zamana kadar birlikte yol aldığım aynı zamanda meslektaşlarım olan arkadaşlarım Ali Bahadır Başaran ve N. Deniz Gezen' e teşekkür ederim. Marmaray laboratuvarı' nda çalışmaya başlamamla birlikte tanışmış olduğum ve yardımlarını, desteklerini esirgemeyen aynı zamanda meslektaşlarım olan arkadaşlarım Utkan Çorbacıoğlu, A. Aslı Özbora ve Gülden Keskin' e teşekkür ederim. Son olarak yine Marmaray laboratuvarında tanışmış olduğum ve birlikte çalıştığım emektar ağabeylerime teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2010

Ahmet ŞİNİKOĞLU

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Hedef	2
2. MALZEME DAVRANIŞI.....	3
2.1 Betonun Şekil Değiştirmesi.....	3
2.2 Ani Şekil Değiştirme	4
2.3 Sünme Şekil Değiştirmesi	6
2.3.1 Sünme mekanizması ve etkili faktörler	7
2.3.2 Sünme bileşenleri	9
2.3.3 Yaş etkisi	10
2.3.4 Sünme katsayısı.....	11
2.3.5 Süperpozisyon prensibi	11
2.4 Rötire Şekil Değiştirmesi.....	12
3. SÜNME VE RÖTİRE DAVRANIŞLARINI BELİRLEMEDE	
KULLANILANANALİTİK TAHMİN YÖNTEMLERİ.....	13
3.1 Giriş	13
3.2 ACI 209 Yöntemi	13
3.2.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülünün zamana bağlı değişimi	14
3.2.2 Sünme davranışının zamana bağlı değişimi	15
3.2.2.1 İlk yükleme anındaki beton yaşının sünme üzerinde etkisi	15
3.2.2.2 Ortamın bağıl nem oranının sünme üzerinde etkisi	15
3.2.2.3 Eleman şekli ve boyutlarının sünme üzerindeki etkisi	16
3.2.2.4 Beton karışımının sünme üzerindeki etkisi	17
3.2.3 Rötire davranışının zamana bağlı değişimi	17
3.2.3.1 Ortamın bağıl nem oranının rötire üzerindeki etkisi	18
3.2.3.2 Eleman şekli ve boyutlarının rötire üzerindeki etkisi	18
3.2.3.1 Beton karışımının rötire üzerindeki etkisi	19
3.2.3.2 Uygulanan kür süresinin rötire üzerindeki etkisi	20
3.3 CEB - FIB Yöntemi.....	20
3.3.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülünün zamana bağlı değişimi	20
3.3.2 Sünme davranışının zamana bağlı değişimi	21
3.3.2.1 Sünme katsayısının belirlenmesi	22
3.3.3 Rötire davranışının zamana bağlı değişimi	24

4. ACI 209 VE CEB – FIB YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BETONARME ELEMANLARDA ZAMANA BAĞLI PARAMETRELERİN TAHMİN EDİLMESİ	27
4.1 Giriş	27
4.2 Betonarme Bir Kolonda Zamana Bağlı Parametrelerin Tahmin Edilmesi	27
4.2.1 ACI 209 yöntemi kullanılarak zamana bağlı parametrelerin tahmin edilmesi	28
4.2.1.1 Yöntemin uygulanmasında kullanılacak başlangıç verileri	28
4.2.1.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin zamana bağlı değişimi	29
4.2.1.3 Betondaki sünme davranışının zamana bağlı değişimi	31
4.2.1.4 Betondaki rötre davranışının zamana bağlı değişimi	33
4.2.2 CEB - FIB yöntemi kullanılarak zamana bağlı parametrelerin tahmin edilmesi	36
4.2.2.1 Yöntemin uygulanmasında kullanılacak başlangıç verileri	36
4.2.2.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin zamana bağlı değişimi	36
4.2.2.3 Betondaki sünme davranışının zamana bağlı değişimi	38
4.2.2.4 Betondaki rötre davranışının zamana bağlı değişimi	41
4.3 Betonarme Kiriş Kesiti İçin Zamana Bağlı Parametrelerin Tahmin Edilmesi	43
5. BETONARME YAPILARIN ZAMANA BAĞLI ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE UYGULAMALARI	47
5.1 Giriş	47
5.2 Betonarme Elemanların Zamana Bağlı Analizinde Kullanılan Hesap Yöntemleri	47
5.2.1 EM yöntemi	48
5.2.1.1 EM yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi	49
5.2.2 AEM yöntemi	55
5.2.2.1 AEM yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi	57
5.2.3 RC yöntemi	61
5.2.3.1 RC yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi	64
5.2.4 ID yöntemi	68
5.2.4.1 ID yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi	70
5.2.5 SS yöntemi	75
5.2.5.1 SS yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi	76
6. BETONARME KİRİŞİN ANALİTİK YÖNTEM KULLANILARAK ZAMANA BAĞLI ANALİZİ	81
6.1 Giriş	81
6.2 Tamamen Çatlamış Kesit Halindeki Kısa Süreli Davranış	81
6.3 Tamamen Çatlamış Kesit Halindeki Zamana Bağlı Davranış	83
6.4 Tamamen Çatlamış Kesit Halinde Rötre Etkisi	83
6.5 Tamamen Çatlamış Kesit Halinde Kısa Süreli Davranışın Hesaplanması	84
6.5.1 Tamamen çatlamış kesit halinde kısa süreli davranışın hesaplanması	85
6.5.1.1 Beton basınç bölgesi derinliği ve kesit özelliklerinin hesaplanması	85

6.5.1.2 Betonarme kiriş kesitinin başlangıç gerilme – şekil değiştirmesinin hesaplanması	87
6.6 Tam Çatlamış Kesit Halinde Zamana Bağlı Davranışın Hesaplanması	90
6.6.1 Tam çatlamış betonarme kesitin zamana bağlı analizinde kullanılan yöntem	90
6.6.2 Yalnızca eğilme momenti etkisindeki kiriş kesitinin zamana bağlı analizi	92
6.6.3 Hem eğilme momenti hem de normal kuvvet etkisindeki kiriş kesitinin zamana bağlı analizi	99
7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	105
KAYNAKLAR	107

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
CEB	: Comité Euro – International Du Béton
FIB	: Fédération Internationale Du Béton
EM	: Effective Modulus Method
AEM	: Age Adjusted Effective Modulus Method
RC	: Rate Of Creep
ID	: Improved Dischinger
SS	: Step By Step
TS	: Tension Stiffening

SEMBOL LİSTESİ

A	: Dönüştürülmüş toplam kesit alanı
A_c	: Beton kesit alanı
A'	: Yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesit alanı
A_{s1}	: Kesitteki basınç donatısı alanı
A_{s2}	: Kesitteki çekme donatısı alanı
a	: Betondaki yüzdece hava miktarı
β_a	: Agregatı tipine bağlı bir katsayı
α, β	: Çimento tipi ve kür koşuluna bağlı katsayılar
c	: Beton tasarımında kullanılan çimento miktarı
$\beta_{cc}(t)$	: Beton yaşına bağlı bir fonksiyon
$\beta_E(t)$	: τ günlük beton elastisite modülünün 28 günlük değerine oranı
$\beta(f_{cm})$	: Ortalama basınç dayanımına bağlı bir fonksiyon
β_{sc}	: Kullanılan çimento tipine bağlı bir katsayı
β_{RH}	: Ortamın bağıl nem oranına bağlı bir fonksiyon
$\Delta \epsilon_c$	: Sünme şekil değiştirmesindeki değişim
$\Delta \sigma$	: Betondaki gerilme değişimi
$\Delta \sigma_{rel}$	: Betonda görülen gevşemenin değişimi
$\Delta \sigma_{res}$	: Betondaki gerilme geri kazanımının değişimi
$\Delta \sigma_s$	: Donatıdaki gerilme değişimi
$\Delta \epsilon_{0i}$	: Üst lifteki şekil değiştirme değişimi
$\Delta \phi_i$	: Kesit eğriliğinde görülen değişim
ΔN	: Sünme ve rötreyi kısıtlayıcı eksenel iç kuvvet
ΔM	: Sünme ve rötreyi kısıtlayıcı eğilme momenti
d_{s1}	: Basınç donatısının kesit üst yüzüne olan uzaklığı
d_{s2}	: Çekme donatısının kesit üst yüzüne olan uzaklığı
d_n	: Beton basınç bölgesi derinliği
$\epsilon(t)$	: Toplam beton şekil değiştirmesi
$\epsilon_s(t)$	: Toplam donatı şekil değiştirmesi
$\epsilon_0(t)$	: Beton ani şekil değiştirmesi
$\epsilon_{sh}(t)$	: Beton rötre şekil değiştirmesi
ϵ_{sh}^*	: Beton rötre şekil değiştirmesinin alacağı sınır değer
$\epsilon_c(t)$	: Beton sünme şekil değiştirmesi
ϵ_{0i}	: Kesit üst lifindeki başlangıç şekil değiştirmesi
$\epsilon_d(t)$	: Sünmenin gecikmiş elastik şekil değiştirme bileşeni
$\epsilon_f(t)$	: Sünmenin plastik yayılma bileşeni
$\epsilon_{fb}(t)$	: Sünmenin ana yayılma bileşeni
$\epsilon_{fd}(t)$	: Sünmenin kuruma yayılma bileşeni
ϵ_{cs0}	: Teorik rötre şekil değiştirmesi
$\epsilon_s(f_{cm})$	: Ortalama beton basınç dayanımına bağlı fonksiyon
$E_c(28)$	: 28 günlük beton elastisite modülü değeri
E_c^*	: Teorik beton elastisite modülü değeri
E_0	: Beton etkili elastisite modülü değeri
E_0'	: Yaş düzeltmesi yapılmış beton etkili elastisite modülü değeri

E_s	: Donatı çeliği elastisite modülü değeri
$\phi (t, \tau)$	: Sünme katsayısı
$\phi^* (t, \tau)$	: Sünme katsayısının ulaşacağı sınır değeri
$\phi_{CEB-FIB}$	: CEB – FIB yöntemiyle elde edilen sünme katsayısı
ϕ_0	: Teorik sünme katsayısı
ϕ_{RH}	: Bağıl nem oranı ve eleman şekil – boyutlarına bağlı katsayı
$\phi^* (t, \tau)$	: RC yöntemine göre teorik sünme katsayısı
f_{cm}	: 28 günlük ortalama basınç dayanımı
ϕ_i	: Kesit eğriliği
γ_1	: İlk yükleme anındaki beton yaşının sünme üzerinde etkisi
γ_2	: Ortamın bağıl nem oranının sünme üzerinde etkisi
γ_2'	: Ortamın bağıl nem oranının rötre üzerinde etkisi
γ_3	: Eleman şekil – boyutlarının sünme üzerinde etkisi
γ_3'	: Eleman şekil – boyutlarının rötre üzerinde etkisi
γ_4	: Taze beton çökme değerinin sünme üzerinde etkisi
γ_4'	: Taze beton çökme değerinin rötre üzerinde etkisi
γ_5	: İnce agreganın miktarının sünme üzerinde etkisi
γ_5'	: İnce agreganın miktarının rötre üzerinde etkisi
γ_6	: Betondaki yüzde havanın sünme üzerinde etkisi
γ_6'	: Betondaki yüzde havanın rötre üzerinde etkisi
γ_7'	: Beton tasarımındaki çimento miktarının rötre üzerinde etkisi
γ_8'	: Uygulanan kür süresinin rötre üzerinde etkisi
h_0	: Ortalama kalınlık değeri
h_{ref}	: Referans kalınlık değeri
I_c	: Çalışan beton kesit alanının atalet momenti
I'	: Yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesitin atalet momenti
I	: Dönüştürülmüş kesitin atalet momenti
λ	: Yüzdece bağıl nem oranı
M_{net}	: Toplam eğilme momenti
N_{net}	: Toplam eksenel kuvvet
N_c	: Betondaki toplam normal kuvvet
N_s	: Donatıdaki toplam normal kuvvet
n	: Donatı çeliği elastisite modülünün beton elastisite modülüne oranı
n'	: Donatı çeliği elastisite modülünün etkili elastisite modülüne oranı
n''	: Donatı çeliği elastisite modülünün yaş düzeltmesi yapılmış etkili elastisite modülüne oranı
P	: Toplam dış yük
RH	: Yüzdece bağıl nem oranı
S	: RC yönteminde kullanılan gerilme değeri
S'	: ID yönteminde kullanılan gerilme değeri
s	: Kullanılan çimento tipine bağlı bir katsayı
ψ	: Yüzdece ince agreganın miktarı
ρ	: Donatı oranı
$\chi (t, \tau)$	: Yaş katsayısı
W_c	: Çalışan beton kesit alanının mukavemet momenti
W'	: Yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesitin mukavemet momenti
W	: Dönüştürülmüş kesitin mukavemet momenti
u	: Eleman kesit çevresi
V / S	: Eleman hacminin yüzey alanına oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	: Beton basınç dayanımı tahmininde kullanılan α ve β katsayılarının değerleri.....	14
Çizelge 3.2	: γ_3 değerinin h_0 ' a göre değişimi	16
Çizelge 3.3	: γ_3' değerinin h_0 ' a göre değişimi.....	18
Çizelge 3.4	: γ_8 değerinin uygulanan kür süresine göre değişimi.....	20
Çizelge 3.5	: s değerinin kullanılan çimento tipine göre değişimi	21
Çizelge 3.6	: β_{sc} değerinin kullanılan çimento tipine göre değişimi.....	24
Çizelge 4.1	: Beton basınç dayanımının zamana bağlı değişimi	30
Çizelge 4.2	: Elastisite modülü değerinin zamana bağlı değişimi	30
Çizelge 4.3	: Sünme davranışının zamana bağlı değişimi	33
Çizelge 4.4	: Rötire davranışının zamana bağlı değişimi	35
Çizelge 4.5	: Beton basınç dayanımının zamana bağlı değişimi	37
Çizelge 4.6	: Elastisite modülü değerinin zamana bağlı değişimi	38
Çizelge 4.7	: Sünme davranışının zamana bağlı değişimi	40
Çizelge 4.8	: CEB - FIB yöntemiyle hesaplanan rötire şekil değiştirmesinin zamana bağlı değişimi	42
Çizelge 4.9	: Betonarme kiriş kesiti için acı yöntemiyle hesaplanan sünme katsayısı değerleri.....	43
Çizelge 4.10	: Betonarme kiriş kesiti için acı yöntemiyle hesaplanan rötire şekil değiştirmesi değerleri	44
Çizelge 4.11	: Betonarme kiriş kesiti için ceb - fib yöntemiyle hesaplanan sünme katsayısı değerleri	44
Çizelge 4.12	: Betonarme kiriş kesiti için ceb - fib yöntemiyle hesaplanan rötire şekil değiştirmesi değerleri	44
Çizelge 5.1	: ACI yöntemine göre hesaplanan kolonun malzeme ve kesit özellikleri	51
Çizelge 5.2	: ACI yöntemine göre hesaplanan kolonda sünme ve rötire değerleri ..	51
Çizelge 5.3	: ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri	53
Çizelge 5.4	: CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki sünme ve rötire değerleri.....	54
Çizelge 5.5	: CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	54
Çizelge 5.6	: ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	60
Çizelge 5.7	: CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	61
Çizelge 5.8	: ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	67
Çizelge 5.9	: CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	68

Çizelge 5.10 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri	73
Çizelge 5.11 : CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri	75
Çizelge 5.12 : ACI' a göre elde edilen başlangıç değerleri	77
Çizelge 5.13 : ACI değerleriyle SS yöntemi kullanılarak elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri	79
Çizelge 5.14 : CEB - FIB' e göre elde edilen başlangıç değerleri.....	79
Çizelge 5.15 : CEB - FIB değerleriyle ss yöntemi kullanılarak elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri	80
Çizelge 6.1 : Betonarme kiriş kesitinin malzeme ve kesit özellikleri.....	85
Çizelge 6.2 : Yalnızca eğilme momenti etkisindeki kesitin özellikleri	87
Çizelge 6.3 : Hem eğilme momenti hem de normal kuvvet etkisindeki dönüştürülmüş kesitin özellikleri	87
Çizelge 6.4 : M – N etkisindeki kiriş kesitinde gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	89
Çizelge 6.5 : Zamana bağlı analizi yapılan betonarme kirişin malzeme özellikleri.....	93
Çizelge 6.6 : Yaş düzeltilmesi yapılmış tam çatlamış kesit halinde kesit özellikleri	94
Çizelge 6.7 : Hesaplanan $-\Delta N$ ve $-\Delta M$ kuvvetleri.....	96
Çizelge 6.8 : Zaman içerisinde üst lif şekil değiştirmesi ve kesit eğriliğindeki değişim.....	97
Çizelge 6.9 : Zaman içerisinde betonda meydana gelen gerilme değişimi.....	98
Çizelge 6.10 : Yaş düzeltilmesi yapılmış tam çatlamış kesit halinde kesit özellikleri	100
Çizelge 6.11 : Tam çatlamış kesit halinde çalışan beton kesit alanının özellikleri.....	100
Çizelge 6.12 : M – N etkisindeki kesitte hesaplanan $-\delta_n$ ve $-\delta_m$ kuvvetleri	101
Çizelge 6.13 : M – N etkisindeki kesitte zaman içerisinde betonda meydana gelen gerilme değişimi	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sürekli gerilme altındaki betonda şekil değiştirme bileşenleri	3
Şekil 2.2 : Basınç etkisi altındaki betonda gerilme – şekil değiştirme ilişkisi	5
Şekil 2.3 : Teorik ve gerçek şekil değiştirme bileşenleri.....	6
Şekil 2.4 : Yük şiddeti ve yük uygulama süresinin şekil değiştirme etkisi	8
Şekil 2.5 : Elastik ve plastik sünme bileşenleri	9
Şekil 2.6 : Kurumaya maruz kalan bir numunedeki sünme bileşenleri	10
Şekil 2.7 : İlk yükleme anındaki beton yaşının sünme şekil değiştirmesine etkisi....	11
Şekil 4.1 : 40x100 kolondaki sünme davranışının zaman içerisindeki değişimi	33
Şekil 4.2 : 40x100 kolondaki rötre davranışının zaman içerisindeki değişimi.....	36
Şekil 4.3 : 40x100 kolondaki sünme davranışının zaman içerisindeki değişimi.....	41
Şekil 4.4 : 40x100 kolondaki rötre davranışının zaman içerisindeki değişimi.....	43
Şekil 5.1 : Eksenel yük etkisi altındaki betonarme kolon.....	50
Şekil 5.2 : Sabit ve aşamalı yükleme durumlarındaki sünme davranışı	55
Şekil 5.3 : Yavaşça azalan gerilme geçmişi durumu	56
Şekil 5.4 : AEM yöntemiyle elde edilen sünme şekil değiştirmesi değişimi	59
Şekil 5.5 : RC yönteminde kullanılan paralel sünme eğrileri.....	62
Şekil 5.6 : RC yöntemiyle elde edilen sünme şekil değiştirmesi değişimi.....	66
Şekil 5.7 : Gerçek ve teorik şekil değiştirme - zaman eğrisi	69
Şekil 5.8 : ID yöntemiyle elde edilen sünme şekil değiştirmesi değişimi	74
Şekil 5.9 : SS yönteminin grafik olarak gösterimi.....	76
Şekil 6.1 : Betonarme bir yapı elemanı için kısa süreli moment- eğrilik ilişkisi.....	82
Şekil 6.2 : Kesit özelliklerinin belirlenmesinde gerekli büyüklükler	86
Şekil 6.3 : Eğilme momenti etkisinde kiriş kesitindeki beton gerilmesi dağılımı	89
Şekil 6.4 : Farklı yükleme süreleri için basınç donatısındaki gerilme değişimi.....	99
Şekil 6.5 : Farklı yükleme süreleri için çekme donatısındaki gerilme değişimi.....	99
Şekil 6.6 : M – N etkisindeki kesitte basınç donatısındaki gerilme değişimi.....	103
Şekil 6.7 : M – N etkisindeki kesitte çekme donatısındaki gerilme değişimi.....	103

BETONARME ELEMANLARDA ZAMANA BAĞLI ETKİLERİN ANALİTİK YÖNTEMLER KULLANILARAK TAHMİN EDİLMESİ

ÖZET

Her geçen gün biraz daha gelişen teknoloji, hayatın diğer alanlarında olduğu gibi yapı endüstrisinde de etkilerini göstermektedir. En temel yapı malzemelerinden biri olan beton da bu gelişmelerden etkilenmektedir. Gelişen beton teknolojisiyle birlikte artan beton dayanımı betonarme elemanlarda daha küçük kesitlerle tasarım yapılmasına olanak sağlamıştır. Betonarme eleman boyutlandırılmasında daha küçük kesitlerle çalışılmaya başlanması, getirdiği kolaylıklar karşısında azalan kesit rijitliği nedeniyle yer değiştirme konusunun daha titiz bir şekilde çalışılması gerekliliğini doğurmuştur. Beton, birden fazla bileşenin bir araya gelmesinden oluşan bir yapı malzemesi olduğundan gösterdiği farklı davranışlar üzerinde birçok farklı çalışma yapılmıştır. Zamana bağlı etkiler olan sünme ve rötre davranışı da bunlar arasındadır. Betonarme elemanlarda şekil ve yer değiştirme parametrelerinin daha önemli hale gelmesiyle bu iki konu üzerinde yapılan çalışmalar da yoğunlaşmış ve artmıştır çünkü sözü edilen bu iki davranışın zamanla ortaya çıkarabileceği etkiler önemli boyutlara ulaşarak betonarme yapılarda istenmeyen sonuçlar doğurabilir.

Bu çalışmada, betondaki sünme ve rötre davranışının zamanla değişimi ACI 209 ve CEB – FIB yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen bu davranışlar betonarme kolon ve kiriş kesitlerinde gerçekleştirilen zamana bağlı analizlerde farklı yöntemler kullanılarak uygulanmıştır. Elde edilen bu sonuçlardan yararlanılarak kolon ve kiriş kesitlerindeki gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin zaman içerisindeki değişimleri hesaplanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde çalışmanın kapsamı ve amacı açıklanmıştır. İkinci bölümde, malzeme davranışıyla ilgili genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, sünme ve rötre davranışını belirlemede kullanılan tahmin yöntemlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, üçüncü bölümde anlatılan tahmin yöntemleri bir kolon ve bir kiriş kesiti üzerinde uygulanmış; sünme ve rötre davranışlarının zamanla değişimi belirlenmiştir. Beşinci bölümde, farklı hesap yöntemleri yardımıyla sünme ve rötre etkileri göz önüne alınarak betonarme kolon kesitindeki gerilme ve şekil değiştirme değişimi belirlenmiştir. Altıncı bölümde, sünme ve rötre etkileri göz önüne alınarak kiriş kesitindeki gerilme ve şekil değiştirme değişimleri belirlenmiştir. Yedinci bölümde ise sonuçların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

PREDICTION OF TIME EFFECTS IN REINFORCED CONCRETE MEMBERS BY USING ANALYTICAL METHODS

SUMMARY

Technology which is developing each day not only affects the different areas of our lives but also shows its effects on the construction industry. Concrete, one of the basic construction materials, is being affected by this development. As a result of the advances in concrete technology, higher concrete strength values have been reached and this yielded to a decrease in the dimensions of cross sections used in the design of reinforced concrete members. Although the use of smaller cross sections has brought simplicities in different aspects, the study of displacements and strains has gained a vital importance because of the presence of lower stiffness values. Since concrete is a construction material that is made up of using different kinds of constituents, various kinds of studies have been performed to determine its characteristics. Creep and shrinkage, the time dependent properties of concrete are also the two characteristics of this material. As a consequence of the increase on the importance of displacements and strain parameters, studies that are related with creep and shrinkage have been increased with time since their possible effects can cause serious problems on the reinforced concrete structures.

In this study, the development of creep and shrinkage properties was determined by using ACI 209 and CEB – FIB methods. These results were used in different kinds of analysis methods to calculate the time dependent characteristics of column and beam cross sections. Therefore, the development of stress and strain values of the column and beam cross sections was determined. In section one, the scope and the aim of the study were expressed. In section two, general information was given about the material properties of concrete. In section three, the prediction methods used in the determination of creep and shrinkage properties were discussed. In section four, prediction methods expressed in section three were applied on specified column and beam cross sections and the development of creep and shrinkage values was determined. In section five, by using different analysis methods and taking creep and shrinkage properties into account, the change in stress and strain values of a reinforced concrete column section was determined. In section six, by taking the creep and shrinkage effects into account, the change in stress and strain was determined on a reinforced concrete beam cross section. Finally in the last section the evaluation of the results were shown.

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun, ürettiği yapılarda malzeme olarak betonu kullanması milattan önceki devirlere kadar uzanır. Değişim, yıllar içerisinde diğer birçok şeyde görüldüğü gibi betonda da görülmüştür. Zaman içerisinde betonun çelik ile birlikte kullanılmaya başlanmasıyla da betonarme yapılar ortaya çıkmaya başlamıştır. Giderek yaygınlaşan betonarme yapılar, kendisini meydana getiren bileşenlerin davranışlarının anlaşılmasını da elzem kılmıştır. Örneğin, E. Mörsch 1902’ de bir şirketin isteği üzerine betonarme elemanların davranışını belirlemek için deneyler yapmıştır[1]. Daha sonraki yıllarda bunun gibi birçok çalışma yapılmış ve her birinin sonucunda yeni bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen bu bilgiler yönetmeliklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. İlk yönetmelikler Almanya’ da 1904, Fransa’ da ise 1906 yılında yayımlanmıştır[1].

Yüksek dayanımlı betonların donatıyla ve ön germe çeliğiyle birlikte daha sık kullanılması, gelişen bilgisayar desteğiyle daha hassas yapısal analizlerin gerçekleştirilmeye başlanması daha hafif ve malzemeden tasarruf edilmesine olanak tanıyan yapısal eleman ve sistemlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu durum da, servis yükleri altındaki betonarme yapıların kısa ve uzun süreli davranışlarının daha iyi incelenmesi gerekliliğini doğurmuştur[2]. Betonun sünme ve rötre davranışı uzun süreli etkilerin hesabındaki iki ana bileşeni oluşturur. Bu elastik olmayan ve zamana bağlı şekil değiştirmeler; deformasyonlara, eğrilikte artışlara, öngerme kayıplarına ve kesit içindeki gerilmelerin yeniden dağılımına sebep olur. Servis yükleri altında, rötre ve sünme etkisi genellikle yer değiştirmelerin beklenenden fazla görülmesine neden olur. Sünme etkisiyle büyük sehimler gözlemlenebilir ya da öngerme elemanlarında kısalmalar ortaya çıkabilir. Bunun yanında rötre ise gözle rahatça farkedilebilir çatlakların meydana gelmesine sebep olur ve bu durum da durabilite problemlerine yol açarak yapının servis ömrünü etkiler[3].

Bu etkileri belirli bir doğrulukla ve etkili bir şekilde tahmin edebilmek amacıyla iki ön gereklilik bulunmaktadır:

- Beton karışımının sünme ve rötre davranışıyla ilgili veriler

- Yapı tasarımında zamana baēlı bu etkilerin de dikkate alındıēı analitik yöntemler[3].

Bu amaçla birçok yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemleri temel alarak birçok yönetmelik ve yayın ortaya çıkmıştır.

1.1 Amaç ve Hedef

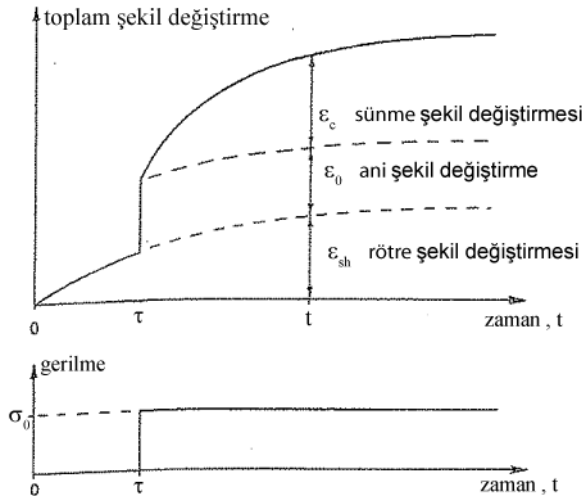
Bu çalışmada, ACI ve CEB – FIB’ de yer alan analitik yöntemler kullanılarak zamana baēlı parametreler hesaplanmış ve bu parametrelerden yararlanılarak betonarme kolon ve kiriş kesitlerinde zaman içerisinde meydana gelen gerilme ve şekil deēiştirme büyüklüklerinin deēişimleri incelenmiştir. Çalışma ayrıca, uzun süreli olarak yapılan hesaplarda kullanılan analiz yöntemlerini de içerir.

2. MALZEME DAVRANIŞI

2.1 Betonun Şekil Değiştirmesi

Sabit sıcaklıkta tek eksenli olarak yüklenmiş bir numunenin herhangi bir t anında, bir noktasındaki toplam şekil değiştirme ani, sünme ve rötre şekil değiştirmesi olarak düşünülebilir. Bu durum bir denklemle aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_o(t) + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 : Sürekli gerilme altındaki betonda şekil değiştirme bileşenleri

Sabit ve sürekli olarak, bir τ zamanında yüklenmiş numunenin şekil değiştirme bileşenleri Şekil 2.1 'de gösterilmiştir[3]. Beton prizini aldıktan ya da kürlenme tamamlandıktan sonra rötre ortaya çıkar ve azalan bir şekilde artmaya devam eder. Yükün uygulandığı anda şekil değiştirme diyagramında ani bir artış görülür ve bu da ani şekil değiştirmeye karşılık gelir. Yük sabit tutulup uygulanmaya devam edilirse şekil değiştirme diyagramında görülecek artışlar sünme şekil değiştirmesine karşılık gelir. Bir beton elemanın kritik noktalarında ölçülen bu şekil değiştirme bileşenlerinin belirli bir doğrulukla tahmini elemanın zamana bağlı davranışının belirlenmesinde büyük bir öneme sahiptir. Bu şekil değiştirme bileşenlerinin doğru bir şekilde tahmini için de gerilme geçmişi ve malzeme davranışı hakkında yeterli bilgi gerekmektedir. Gerilme geçmişi hem uygulanan yüke hem de problemin sınır koşullarına bağlıdır.

Betonun şekil değiştirme davranışı üzerinde yapılan çalışmalarda ortaya çıkan problemler iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki sünme problemi olup diğeri ise gevşeme problemidir. Sünme probleminde, sürekli gerilme altında şekil değiştirmenin yavaş bir şekilde artışı hesaplanırken gevşeme probleminde ise şekil değiştirme sabit tutularak zaman içerisinde gerilmede görülen azalma belirlenir. Sünme ve gevşeme problemleri sadece sınır koşullarında farklılık gösterir. Her iki problem de denklem 2.1’ de yer alan şekil değiştirme bileşenlerinin tahmin edilmesini amaçlar. Gevşeme probleminde ayrıca herhangi bir t anında şekil değiştirme bileşenlerinde görülen değişimin toplamının sıfır olduğu da göz önünde tutulur. Bu durum,

$$\Delta \varepsilon_0(t) + \Delta \varepsilon_c(t) + \Delta \varepsilon_{sh}(t) = 0 \quad (2.2)$$

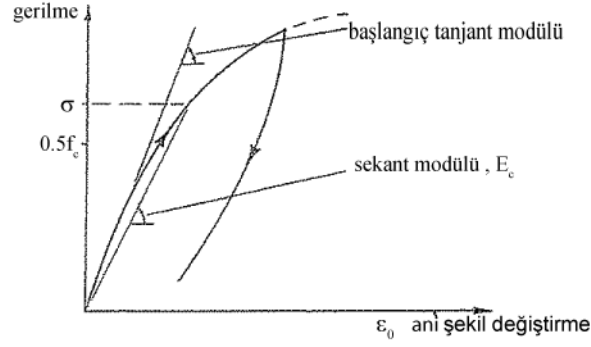
denklemlerle gösterilebilir.

Sünme ve gevşeme problemleri birbirinden farklı iki problem değildir, zira şekil değiştirme sabit tutulduğunda gerilmede zaman içerisinde görülen azalmanın nedeni sünme ve rötrenin aynı zaman süresi içerisindeki artışıyla ilgilidir. Denklem 2.2’ deki eşitliğin sağlanması için sünme ve rötredeki değişim zaman içerisinde artarken ani şekil değiştirmedeki değişim azalır ve bu durum da gerilmede azalmanın görülmesine neden olur.

Betonarme yapılarda karşılaşılan durumlar ne tam olarak sünme problemi ne de tam olarak gevşeme probleminin içerisinde kalır. Beton neredeyse hiçbir zaman herhangi bir engel olmadan şekil değiştirmez. Donatının varlığı sünme ve rötre etkisiyle şekil değiştiren bir eleman için iç engel teşkil ederken, elemanın mesnet koşulları da bir dış engel teşkil etmektedir[3].

2.2 Ani Şekil Değiştirme

Gerilmenin uygulanmaya başlanmasıyla birlikte ortaya çıkan ani şekil değiştirme ε_0 , gerilmenin büyüklüğüne, uygulanma hızına ve beton yaşına bağlıdır. Ani şekil değiştirmenin bir kısmı elastik bir kısmı da plastik türden şekil değiştirmeye karşılık gelir.



Şekil 2.2 : Basınç etkisi altındaki betonda gerilme – şekil değiştirme ilişkisi

Şekil 2.2’ de basınç gerilmesi etkisindeki betonun gerilme – şekil değiştirme bağıntısı gösterilmiştir[3]. Servis yükleri altındaki bir betonarme yapının herhangi bir noktasındaki basınç gerilmesi çok nadiren, kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımının 0,5’ini geçer. Bu küçük gerilme aralığında ani şekil değiştirmenin plastik olan kısmı düşük bir değer alır. Dolayısıyla, servis yükleri altında betonun ani şekil değiştirmesinin elastik olarak kabul edilmesi makul bir yaklaşımdır. Herhangi bir t anında ani şekil değiştirme şu denklemle ifade edilebilir:

$$\varepsilon_o = \frac{\sigma(t)}{E_c(t)} \quad (2.3)$$

Burada $E_c(t)$ betonun elastisite modülünü (sekant modülü) gösterir. $E_c(t)$ ‘nin değeri yükleme hızına da bağlı olup zamanla artar. Yük ne kadar hızlı uygulanırsa $E_c(t)$ ‘nin değeri de o kadar büyük olur.

Elastisite modülünün zamanla değişimi Pauw tarafından geliştirilen ve birçok yönetmelikte de yer alan aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanabilir[4].

$$E_c(t) = \rho^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{f_c(t)} \text{ (Mpa)} \quad (2.4)$$

Bu denklemde ρ , betonun birim hacim ağırlığını gösterirken $f_c(t)$ değeri de sonucun arandığı gündeki ortalama basınç dayanımı değerini Mpa cinsinden gösterir. Denklem 2.4 ile elde edilen değerler gerilme değerinin $0,4f_c(t)$ ‘yi geçmediği ve gerilme uygulama süresinin 5 dakikayı aşmadığı durumlarda geçerlidir. Gerilmenin 1 gün gibi daha uzun süre boyunca uygulandığı durumlarda sünmenin erken yaştaki hızlı değişimi nedeniyle şekil değiştirmede büyük artışlar gözlenebilir. Yine de 1 güne kadar olan gerilme uygulama süreleri genellikle kısa süreli olarak sınıflandırılır ve sünme etkisi dikkate alınmaz. Bu durum da önemli hesapta önemli hatalara neden

olabilir. Dolayısıyla 1 gün gibi gerilme uygulama sürelerinin mevcut olduğu durumlarda denklem 2.4 ile hesaplanan değerin 0,8 ile çarpılması tavsiye edilir[3].

Elastisite modülünün zamanla değişimini hesaplamaya yarayan diğer bir yöntem de Rüsch ve diğerleri tarafından ortaya konan ve agrega tipinin de etkisini göz önüne bir bağıntıdır [5]:

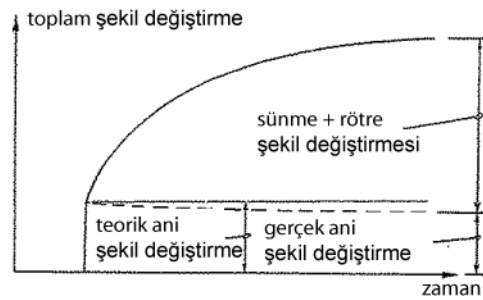
$$E_c(t) = 4,3 \times \beta_a \times \rho \times \sqrt[3]{f_c(t)} \quad (2.5)$$

burada β_a agrega tipiyle ilgili bir katsayı olup kumtaşı için 0,7, kireçtaşı ve granit için 0,9, kuvarsit için 1,0 ve bazalt için 1,1 değerlerini alır.

Gerilme sabitken denklem 2.3 ile hesaplanan ani şekil değiştirme elastisite modülünü zamanla artması nedeniyle yavaşça azalır. Fakat yapılan hesaplarda kolaylık sağlamak amacıyla ani şekil değiştirmenin zamanla değişmediği ve başlangıç değerine eşit olduğu kabul edilir. Şekil 2.3’ de teorik ve gerçek şekil değiştirme bileşenleri gösterilmiştir[3]. İlk olarak bir τ anında uygulanmaya başlanan σ_0 büyüklüğündeki bir gerilme etkisiyle herhangi bir $t > \tau$ anında ortaya çıkan ani şekil değiştirme,

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_0(\tau) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau)} \quad (2.6)$$

denklemleriyle hesaplanabilir.



Şekil 2.3 : Teorik ve gerçek şekil değiştirme bileşenleri

2.3 Sünme Şekil Değiştirmesi

Sünme şekil değiştirmesi üzerinde etkili olan beş tane faktör bu bölümde incelenecektir.

2.3.1 Sünme mekanizması ve etkili faktörler

Rötrenin olmadığı bir ortamda tutulan yüklü bir numunede ölçülen zamana bağlı yer değiştirmeler basit sünme olarak adlandırılır. Kuruyan bir numunede görülen ek sünme davranışı da kuruma sünmesi olarak bilinir. Dolayısıyla, kurumanın mevcut olduğu bir ortamda sadece sünme etkisiyle zamanla meydana gelen yer değiştirmeleri hesaplayabilmek için yüklü bir numunenin toplam yer değiştirmesinden benzer ama yüklü olmayan bir numunenin rötre etkisiyle meydana gelen yer değiştirmesi çıkarılır.

İlk yüklemeden hemen sonraki zaman aralığında, sünme şekil değiştirmesindeki artış oldukça hızlıyken daha sonraki aylarda bu artıştaki hız büyük ölçüde azalır. Dolayısıyla yükün uzun yıllar boyunca uygulanması halinde sünme şekil değiştirmesindeki artış oldukça küçük olacaktır. Yükün uygulandığı andan sonra geçen süre sonsuza ulaştığında ise sünmenin bir sınır değere ulaştığı varsayılır.

Beton sünmesinin, birçok kapiler boşluk içeren çimento jeline sahip sertleşmiş çimento hamurunda ortaya çıktığı düşünülür. Çimento jeli, emilen suyu içeren boşluklar tarafından ayrılmış kolloidal tabakalı kalsiyum silikat hidratlardan oluşmaktadır. Betondaki sünme davranışını açıklamak amacıyla birçok teori ortaya atılmış fakat bu teorilerden hiçbirisi tek başına yeterli olmamıştır[6]. Sünme davranışı, genellikle aşağıdaki mekanizmalarla ilişkilendirilir[7]:

- Çimento jelindeki kolloidal tabakaların emilmiş su yüzeyi arasından kayması (viskoz yayılma)
- Arayüzdeki suyun çimento jelinden akıp ayrışması (sızma)
- Agreganın elastik şekil değiştirmesi, jel kristallerinin viskoz yayılması ve çimento jelinde sızmanın ortaya çıkması (gecikmiş elastisite)
- Çimento jelinde fiziksel bağların parçalanıp oluşması etkisiyle ortaya çıkan yerel kırılma.

Yüksek gerilme seviyelerinde, çimento hamuru ve agrega arasındaki bağın kopması etkisiyle ek şekil değiştirmelerin ortaya çıkması mümkündür.

Sünmenin büyüklüğü ve gelişme hızı birçok etkene bağlıdır. Bunlardan bazıları beton karışımıyla ilgiliyken bazıları ise çevresel etkiler ve yükleme koşullarıyla ilgilidir.

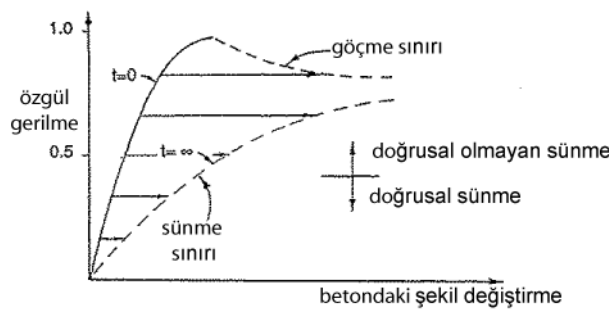
Beton dayanımındaki artış sünmede azalmaya sebep olur. Betonda kullanılan agrega miktarındaki artış, en büyük agrega dane çapındaki artış ve daha dayanıklı bir agrega türünün kullanılması sünme davranışını azaltıcı yönde etki yapar. Su / çimento oranı ve kullanılan çimento türünün de betonun dayanımında etkisi olduğundan bu iki faktör de sünme davranışında etkilidir.

Sünme büyüklüğü yükleme anındaki beton yaşıyla; ilk yükleme anındaki hidratasyon derecesiyle ilgilidir. İlk yükleme anındaki beton yaşı arttıkça sünme azalır. Uzun süre önce dökülmüş bir betonun sünmeye olan yatkınlığı tamamen ortadan kalkmasa da beton zaman içerisinde sertleşen bir malzeme olarak düşünülür[8].

Sünme davranışı kuruma üzerinde etkili olan faktörlere de bağlıdır. Ortamdaki nem oranı azaldıkça sünmede artış gözlemlenir. Bunun yanında, eleman boyutları arttıkça sünme azalır. Bir elemanın yüzeyinde daha kuru bir ortam mevcut olduğundan yüzeydeki sünme yüzeyden uzak bölgelerdekine oranla daha büyük olarak gözlemlenir.

Sıcaklıktaki artış da sünmenin artmasına sebep olur. Çimento hamurunun şekil değiştirme özelliği sıcaklık artışıyla birlikte arttığından ve kuruma hızlandığından sünme de artacaktır. Sünmenin sıcaklığa bağlılığı daha yüksek sıcaklık değerlerinde önem taşır. Örneğin, 0°C ila 20°C arasındaki sıcaklık değişimlerinin sünme davranışı üzerinde etkisi yoktur.

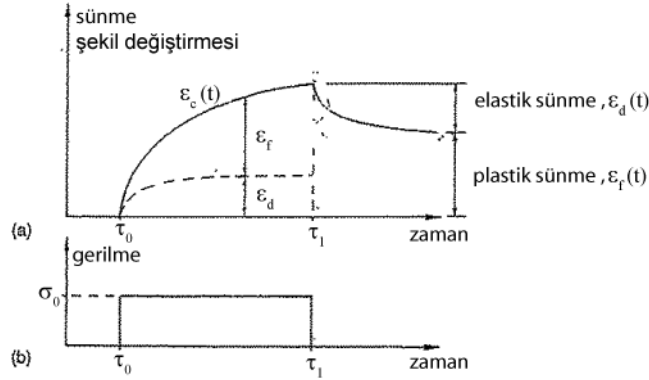
Sünme büyük ölçüde, uygulanan gerilmenin büyüklüğüne bağlıdır. Sürekli uygulanan gerilme değeri betonun basınç dayanımının yarısından daha az ise, sünme şekil değiştirmesi yaklaşık olarak gerilmeyle orantılıdır ve buna da doğrusal sünme denir. Daha yüksek gerilme değerlerinde, sünme daha hızlı bir şekilde artar ve gerilmeyle olan ilişkisi şekil 2.4’ deki gibi doğrusal olmayan bir davranış göstermeye başlar[3].



Şekil 2.4 : Yük şiddeti ve yük uygulama süresinin şekil değiştirme üzerindeki etkisi

2.3.2 Sünme bileşenleri

Sünme davranışının fiziksel olarak daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, sünme şekil değiştirmesi birçok bileşene ayrılmıştır.



Şekil 2.5 : Elastik ve plastik sünme bileşenleri

Şekil 2.5a' da, Şekil 2.5b' deki gerilme geçmişi nedeniyle ortaya çıkmış sünme şekil değiştirmesi gösterilmektedir[3]. Sürekli olarak uygulanan σ_0 gerilmesi etkisiyle sünme azalan bir şekilde artmaktadır. Gerilme τ_1 anında kaldırıldığında, sünme şekil değiştirmesinde ani bir değişimden ziyade zamanla gözlenen yavaş bir azalma gözlemlenir. Sünme şekil değiştirmesinin bir kısmı elastik karakterdeyken büyük bir kısmı plastik karakterdedir.

Sünme şekil değiştirmesinin geçici olarak kabul edilen elastik kısmı gecikmiş elastik şekil değiştirme olarak adlandırılır ve $\epsilon_d(t)$ ile gösterilir. Bu gecikmiş elastik özellik, uygulanan gerilmenin kaldırılmasından sonra viskoz çimento hamuru üzerindeki elastik agrega davranışıyla açıklanabilir. Uzun süreden beri yüklü tutulan bir beton numunesinden yük kaldırılırsa ortaya çıkacak gecikmiş elastik şekil değiştirme toplam elastik şekil değiştirmenin %50' sini oluştururken toplam sünme şekil değiştirmesinin %10 ila %30' una denk gelir. Gecikmiş elastik şekil değiştirme her ne kadar yük kaldırıldıktan sonra gözlemlense de yük altında geçen süre boyunca da aynı büyüklüğe sahip olduğu ve yüklemekten hemen sonraki zaman aralığında hızlı bir şekilde arttığı düşünülür. Rüsch' e göre gecikmiş elastik şekil değiştirme eğrisinin şekli numune yaşından, boyutlarından ve beton karışımından bağımsızdır[5].

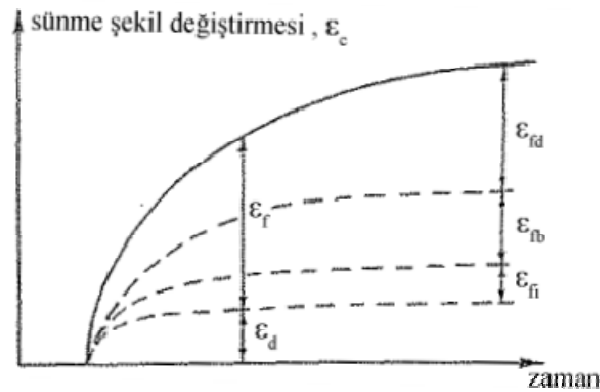
Sünme şekil değiştirmesinin büyük bir kısmı plastik karakterde olup yayılma olarak tanımlanır ve $\epsilon_f(t)$ ile gösterilir. Dolayısıyla herhangi bir andaki sünme şekil değiştirmesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir :

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_d(t) + \varepsilon_f(t) \quad (2.7)$$

Sünmenin yayılma bileşenini alt gruplara ayırmak mümkündür. Bunlardan ilki yüklemenden sonraki ilk 24 saatte görülen hızlı ilk yayılma olarak tanımlanır ve $\varepsilon_{fi}(t)$ ile gösterilir[5]. Hızlı ilk yayılma kalıcı şekil değiştirmeler doğmasına sebep olurken büyük ölçüde ilk yükleme anındaki beton yaşına bağlıdır. Numune ne kadar erken yüklenirse $\varepsilon_{fi}(t)$ değeri de o kadar büyük olur. Yüklemeden 1 gün sonra görülmeye başlanan ve yavaş bir şekilde gelişen yayılma şekil değiştirme bileşeni ortamın bağıl nemine bağlı olup kendi içerisinde basit yayılma bileşeni, $\varepsilon_{fb}(t)$ ve kuruma yayılma bileşeni $\varepsilon_{fd}(t)$ olmak üzere ikiye ayrılır. Kuruma yayılması, kuruyan bir ortamda yüklü olan numunede görülmesi mümkün kalıcı sünme şekil değiştirmesidir. Denklem 2.7, bu sünme bileşenlerini kullanarak aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_d(t) + \varepsilon_{fi}(t) + \varepsilon_{fb}(t) + \varepsilon_{fd}(t) \quad (2.8)$$

Basit yayılma bileşeni olan $\varepsilon_{fb}(t)$, agrega türüne, büyüklüğüne, miktarına, beton dayanımına ve yükleme anındaki beton yaşına bağlıdır. Kuruma yayılma bileşeni olan $\varepsilon_{fd}(t)$ ise nem miktarına, numune şekli ve boyutlarına bağlıdır.

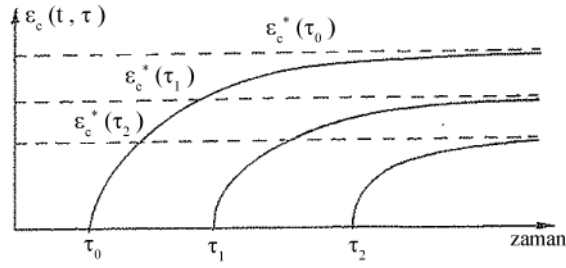


Şekil 2.6 : Kurumaya maruz kalan bir numunedeki sünme bileşenleri

Şekil 2.6’ da denklem 2.8’ de yer alan sünme bileşenlerini bir grafikte gösterilmiştir[3].

2.3.3 Yaş etkisi

Sünme şekil değiştirmesinin bileşenleri, ilk yükleme anında betonun yaşında olduğu gibi bir dereceye kadar hidrasyon derecesinden etkilenirler. Bu bileşenlerden en çok etkilenenler, hızlı ilk yayılma ε_{fi} ve basit yayılma ε_{fb} ‘ dir.



Şekil 2.7 : İlk yükleme anındaki beton yaşının sünme şekil değiştirmesine etkisi

Şekil 2.7’ de aynı özelliklere sahip fakat τ_0 , τ_1 ve τ_2 gibi farklı zamanlarda yüklenen numunelerde gözlenen sünme davranışının zamanla değişimi gösterilmektedir. İlk olarak τ anında uygulanan ve uygulanmasına devam edilen bir gerilme etkisiyle t anında ölçülen sünme şekil değiştirmesi $\varepsilon_c(t, \tau)$ ile gösterilir[3]. Yaş etkisi, zamanla birlikte değişen gerilme geçmişi altında sünme şekil değiştirmelerinin tahmin edilmesini zorlaştıran bir etmendir.

2.3.4 Sünme katsayısı

Sürekli olarak sabit gerilme altında tutulan bir numunenin herhangi bir t anındaki sünme şekil değiştirmesinin ani şekil değiştirmesine oranı sünme katsayısı olarak tanımlanır ve $\phi(t, \tau)$ olarak gösterilir.

Sünme şekil değiştirmesinin ilk yükleme anındaki beton yaşına bağlı olduğu gibi sünme katsayısının büyüklüğü de buna bağlıdır.

Sünme ve ani şekil değiştirme bileşenleri gerilmeyle orantılı olduğundan $\phi(t, \tau)$ sadece zamana bağlı bir fonksiyondur ve uygulanan gerimeden bağımsızdır. Zaman sonsuza yaklaştıkça sünme katsayısı da belirli bir son değere ulaşır ve bu da son sünme katsayısı olarak tanımlanır ve $\phi^*(\tau)$ ile gösterilir. Bu ulaşılan son değer betonun sünme kapasitesinin ifade edilmesinde kullanılan bir büyüklüktür.

$$\phi(t, \tau) = \frac{\varepsilon_c(t, \tau)}{\varepsilon_0(\tau)} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9 yardımıyla sünme katsayısının da bilindiği düşünülerek herhangi bir t anında hızlı bir şekilde sünme şekil değiştirmesine ulaşmak mümkündür.

2.3.5 Süperpozisyon prensibi

Betondaki yüke bağlı olan şekil değiştirmeler gerilmeyle orantılı olduğundan zamanla değişen gerilme altındaki yer değiştirmeleri tahmin edebilmek amacıyla

süperpozisyon prensibinden yararlanılır. Süperpozisyon prensibinin betona uygulanması ilk olarak McHenry tarafından yapılmış olup bu prensip, τ_1 anında uygulanan bir gerilme artımının etkisiyle ortaya çıkan şekil değiştirmenin diğer zamanlarda uygulanan gerilmelerden bağımsız olduğu düşüncesine dayanır[9].

2.4 Rötire Şekil Değiştirmesi

Sabit sıcaklıkta tutulan, yük uygulanmamış ve şekil değiştirmesi kısıtlanmamış bir numunede zamanla ölçülen şekil değiştirme rötire şekil değiştirmesi olarak bilinir. Rötire büyük ölçüde kurumayla ilişkili olduğundan rötire şekil değiştirmeleri yapı elemanlarının kalınlıkları boyunca farklı büyüklüklerde ölçülür ve atmosfere açık yüzeylerde en büyük değerlerini alırlar.

Rötire, betonun kurumasına etki eden bütün faktörler tarafından etkilenir. Bu faktörler arasında; betonun su içeriği, karışımın su / çimento oranı, elemanın şekli ve boyutları ve ortamın bağıl nemi sayılabilir. Diğer bütün faktörler aynıyken, su / çimento oranının artması, ortamın bağıl neminin azalması ve atmosfere maruz kalan yüzey alanının toplam hacme oranının artması ölçülen rötire şekil değiştirmesini artırır. Sıcaklık artışı da kurumayı hızlandırdığından rötreyi artırıcı yönde etki yapar.

Eleman boyutlarının rötire üzerindeki etkisi önemlidir. Döşeme gibi ince bir elemanda kurumunun tamamlanması birkaç yıl alabilecekken daha kalın bir elemanın iç bölgesindeki kuruma yapının bütün ömrü boyunca devam edebilir[3].

Rötire aynı zamanda karışımdaki agrega hacminden ve kullanılan agrega tipinden etkilenir. Betonda kullanılan agrega, çimento hamurunun rötresini engelleyici yönde etki yapar dolayısıyla kullanılan agrega hacmindeki artış daha düşük rötire şekil değiştirmelerinin ölçülmesine neden olur. Aynı zamanda daha büyük elastisite modülüne sahip olan agregaların kullanılması da görülecek rötreyi azaltacaktır.

3. SÜNME VE RÖTRE DAVRANIŞLARINI BELİRLEMEDE KULLANILAN ANALİTİK TAHMİN YÖNTEMLERİ

3.1 Giriş

Sünme ve rötre katsayılarının ulaşacağı sınır değeri tahmin edebilmenin en kesin yollarından biri kısa süreli test sonuçlarından yararlanmaktır. Sünme davranışı, sabit yükü yüklenmiş numunelerde göreceli olarak daha kısa bir süre boyunca ölçülür. Aynı süre zarfında aynı zamanda üretilmiş ve yüklenmemiş olan numunelerde de rötre davranışı ölçülmektedir. Gerçekleştirilen kısa süreli testlerden uzun süreli davranışa dair çıkarımlar yapabilmek amacıyla test sonuçlarından elde edilen rötre ve sünme eğrilerini değerlendirmek için birçok matematiksel ifade geliştirilmiştir. Ölçümler ne kadar uzun süre boyunca alınırsa tahminlerdeki doğruluk da o ölçüde artacaktır.

Uygulamada tasarım aşamasında, kullanılacak malzemenin davranışını belirleyebilmek için laboratuvar ortamındaki testlerin yerine rötre ve sünme davranışını tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bazı analitik yöntemlerden yararlanılır. Bu mevcut yöntemler zorluk derecesi bakımından farklılıklar gösterir. Bazılarının içeriği basit ve kullanımı kolaydır ve dolayısıyla sünme ve rötre katsayılarını tahmin etmek kolaylaşır. Bazı yöntemler ise sünme ve rötre büyüklüklerini ve değişimini etkileyen birçok parametreye bağlı birtakım katsayıların elde edilmesini gerektirdiğinden karmaşık yapıdadır. Yöntemin basit ya da karmaşık yapısı hesaplar sonucunda elde edilecek tahmini değerin yaklaşıklığı hakkında bir bilgi vermez ve değişik yöntemlerin verdiği sonuçlar büyük farklılıklar ortaya koyar[3].

Çalışmanın bu bölümünde mevcut analitik yöntemlerden iki tanesi incelenecektir.

3.2 ACI 209 Yöntemi

Yöntem ; betonarme yapılarda gözlenen nem değişimi, sürekli yük durumu ve sıcak değişimi etkilerini bir arada inceler. Yükün kaldırılması etkisiyle meydana gelecek elastik geri dönüş yöntemdeki analitik çıkarımlar yapılırken göz önüne alınmamıştır.

Çalışmanın bu bölümünde, zamana bağlı davranışı tahmin etmekte kullanılacak olan parametrelerin bağlı olduğu faktörler ve bunların hesaplanma şekilleri ortaya konmuştur[10].

3.2.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülünün zamana bağlı değişimi

Betonarme bir elemanın zamana bağlı davranışının incelenmesinde betonun zaman içerisinde sertleşmekte olduğu düşünülerek basınç dayanımında ve buna bağlı olarak da elastisite modülü değerinde değişim görülecektir. Dolayısıyla herhangi bir τ zamanındaki basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerini belirleyebilmek amacıyla bazı denklemlerden yararlanılır.

$$f_c(\tau) = \frac{\tau}{\alpha + \beta \times \tau} \times f_c(28) \quad (3.1)$$

3.1 denklemini kullanarak yaşı τ olan bir betonun basınç dayanımını Mpa cinsinden elde etmek mümkündür.

Çizelge 3.1 : Beton basınç dayanımı tahmininde kullanılan α ve β katsayılarının değerleri

Çimento Tipi	Kür Koşulları	α	β
CEM I N	Normal Kür	4.00	0.85
	Buhar Kürü	1.00	0.95
CEM III R	Normal Kür	2.30	0.92
	Buhar Kürü	0.70	0.98

Denklem 3.1’ de yer alan α ve β katsayıları kullanılan çimento tipine ve uygulanan kür koşullarına bağlı olup aldıkları değerler Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir[3]. Denklemdaki $f_c(28)$ ifadesi ise betonun 28 günlük karakteristik basınç dayanımı değeridir. Bu verilerin ışığında, tasarımda kullanılacak betonun herhangi bir zamandaki basınç dayanımını elde etmek mümkün hale gelir.

Betonun elastisite modülü değeri de zamanla artan bir davranışa sahiptir. Betonun basınç dayanımının tahminindekine benzer bir şekilde elastisite modülünün herhangi bir τ zamanındaki değerini hesaplayabilmek amacıyla denklem 3.2’ den yararlanılır.

$$E_c(\tau) = \rho^{1.5} \times 0.043 \times \sqrt{f_c(\tau)} \quad (3.2)$$

Denklem 2.2 kullanılarak elastisite modülü değeri istenilen beton yaşında Mpa cinsinden hesaplanabilir. Denklemdeki ρ değeri betonun birim hacim ağırlığının kg / m³ cinsinden değerini gösterirken $f_c(\tau)$ ise denklem 3.1 ile elde edilen basınç dayanımı değeridir.

3.2.2 Sünme davranışının zamana bağlı değişimi

Betondaki sünme davranışının zamanla olan ilişkisini açıklamak amacıyla ACI 209 hiperbolik bir fonksiyondan yararlanır :

$$\phi(t, \tau) = \frac{(t - \tau)^{0.60}}{10 + (t - \tau)^{0.60}} \times \phi^*(\tau) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3' deki τ yükleme anındaki beton yaşının gün cinsinden değerini, $(t - \tau)$ yükün uygulanış süresinin gün cinsinden değerini ve $\phi^*(\tau)$ de sünme katsayısının zaman içerisinde ulaşacağı sınır değeri gösterir. Sünme katsayısının ulaşacağı sınır değeri gösteren $\phi^*(\tau)$:

$$\phi^*(\tau) = 2.35 \times \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3 \times \gamma_4 \times \gamma_5 \times \gamma_6 \quad (3.4)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Denklem 3.4' de yer alan ve γ_1 'den γ_6 'ya kadar olan katsayılar, betonun sünme davranışını etkileyen faktörlere bağlı katsayılardır.

3.2.2.1 İlk yükleme anındaki beton yaşının sünme üzerinde etkisi

Sünme katsayısının sınır değerinin hesaplanmasında kullanılan katsayılardan γ_1 katsayısı elemanın ilk yüklendiği andaki beton yaşıyla ilgilidir ve alacağı değer betona normal kür ya da buhar kürü uygulanmasına göre farklılık gösterir :

$$\gamma_1 = 1.25 \times \tau^{-0.118}, \tau > 7 \text{ gün} \quad (3.5.a)$$

$$\gamma_1 = 1.13 \times \tau^{-0.094}, \tau > 3 \text{ gün} \quad (3.5.b)$$

Denklem 3.5.a ve 3.5.b 'deki τ ifadesi yükün ilk uygulandığı andaki beton yaşının gün cinsinden değeridir.

3.2.2.2 Ortamın bağıl nem oranının sünme üzerinde etkisi

Ortam koşullarının sünme davranışı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Ortamın bağıl nem oranı da bunlardan biridir. Ortamın bağıl nem oranındaki değişimleri göz önüne alan γ_2 katsayısı :

$$\gamma_2 = 1.27 - 0.0067 \times \lambda \quad \lambda > \%40 \quad (3.6)$$

denklemini yardımıyla hesaplanır. Bu denklemde yer alan λ ifadesi ortamın bağıl neminin yüzde değeri gösterir.

3.2.2.3 Eleman şekli ve boyutlarının sünme üzerindeki etkisi

Eleman geometrisi de sünme üzerinde etkili faktörlerden biridir. Eleman şekli ve boyutlarına bağlı olan λ_3 katsayısını belirleyebilmek için iki ayrı yol mevcuttur. Bunlardan birisi ortalama kalınlık denilen h_0 değerinin hesaplanması diğeri ise V / S olarak gösterilen hacim / yüzey alanı oranının belirlenmesidir. Ortalama kalınlık olarak ifade edilen h_0 :

$$h_0 = 4 \times \frac{V}{S} \quad (\text{mm}) \quad (3.7)$$

denklemini yardımıyla hesaplanır. Denklem 3.7' deki V ifadesi eleman hacminin mm^3 cinsinden değerini gösterirken S ifadesi ise eleman yüzey alanının mm^2 cinsinden değerini gösterir.

Çizelge 3.2 : γ_3 değerinin h_0 ' a göre değişimi

h_0 (mm)	50	75	100	125	150
γ_3	1.30	1.17	1.11	1.04	1.00

Ortalama kalınlık, $h_0 \leq 150$ mm ise γ_3 değerinin Çizelge 3.2' den elde etmek mümkündür. Ortalama kalınlık, $150 \text{ mm} < h_0 < 380$ mm ise :

$$\gamma_3 = 1.14 - 0.00092 \times h_0 \quad t - \tau \leq 365 \text{ gün} \quad (3.8.a)$$

$$\gamma_3 = 1.10 - 0.00067 \times h_0 \quad t - \tau > 365 \text{ gün} \quad (3.8.b)$$

denklem 3.8.a ve denklem 3.8.b kullanılarak γ_3 değeri elde edilir. Ortalama kalınlık, $h_0 \geq 380$ mm ise :

$$\gamma_3 = \frac{2}{3} \times \left[1 + 1.13 \times e^{-0.0213 \times (V/S)} \right] \quad (3.9)$$

denklemini kullanarak γ_3 değerini hesaplamak mümkündür.

3.2.2.4 Beton karışımının sünme üzerindeki etkisi

Tasarımda kullanılacak betonun içeriği de sünme davranışı üzerinde etkilidir. Bunlardan ilki taze beton deneylerinde uygulanan çökme deneyi sonucunda mm cinsinden elde edilen çökme miktarıdır.

$$\gamma_4 = 0.82 + 0.00264 \times s \quad (3.10)$$

Sünme davranışında betonun çökme değerinin etkisi denklem 3.10 kullanılarak γ_4 katsayısının hesaplanmasıyla elde edilir. Denklemdaki s ifadesi mm cinsinden betondaki çökme değerini gösterir.

Dane boyutu 4 mm' den küçük olan ince agreganın yüzde olarak kütlece toplam agrega miktarına oranı da sünme davranışını etkileyen faktörlerden biridir.

$$\gamma_5 = 0.88 + 0.0024 \times \psi \quad (3.11)$$

Denklem 3.11 yardımıyla λ_5 katsayısı hesaplanarak ince agrega miktarının sünme davranışı üzerindeki etkisi belirlenmiş olur. Denklemdaki ψ değeri, ince agreganın yüzde olarak kütlece toplam agrega miktarına oranına karşılık gelir.

Taze betonda ölçülen hava miktarının da sünme davranışı üzerinde etkisi bulunmaktadır.

$$\gamma_6 = 0.46 + 0.09 \times a \quad (3.12)$$

Denklem 3.12 yardımıyla λ_6 hesaplanarak taze betonda yüzdece ölçülen hava miktarının sünme davranışı üzerindeki etkisi göz önüne alınmış olur. Denklemdaki a değeri hava miktarının yüzdece değerini gösterir.

3.2.3 Rötire davranışının zamana bağlı değişimi

Teorik olarak rötrenin, beton prizini aldıktan ya da uygulanan kür tamamlandıktan sonra kurumunun ortaya çıkmasıyla başladığı kabul edilir. Kuruma başladıktan sonra herhangi bir t anındaki rötire değerini elde edebilmek için :

Normal kür uygulanmış bir betonda,

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{t + 35} \times \varepsilon_{sh}^* \quad (3.13.a)$$

Buhar kürü uygulanmış bir betonda,

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{t + 55} \times \varepsilon_{sh}^* \quad (3.13.b)$$

bağıntılarından yararlanılır. Denklem 3.13.a ve 3.13.b ‘deki t değeri gün cinsinden zamanı gösterirken ε_{sh}^* değeri ise rötrenin ulaşacağı sınır değeri gösterir.

$$\varepsilon_{sh}^* = 780 \times \gamma_2' \times \gamma_3' \times \gamma_4' \times \gamma_5' \times \gamma_6' \times \gamma_7 \times \gamma_8 \quad (3.14)$$

Denklem 3.14 kullanılarak rötrenin ulaşacağı sınır değeri hesaplanabilir. Denklemde bulunan γ_2' ‘den γ_8 ‘ e kadar olan ifadeler rötreye üzerinde etkili olan faktörlere bağlı katsayılarıdır.

3.2.3.1 Ortamın bağıl nem oranının rötreye üzerindeki etkisi

Ortam koşullarının sünmede olduğu gibi rötreye de etkisi vardır. Ortamın bağıl nem oranı yüzde olarak bilindiğinde bu değer rötreye üzerindeki etkisini belirlemek için :

$$\gamma_2' = 1.40 - 0.01 \times \lambda \quad 40 \leq \lambda \leq 80 \text{ için} \quad (3.15.a)$$

$$\gamma_2' = 3.00 - 0.03 \times \lambda \quad 80 < \lambda \leq 100 \text{ için} \quad (3.15.b)$$

denklemlerinden yararlanılır. Denklemler 3.15.a ve 3.15.b ‘deki λ ifadesi yüzde bağıl nem miktarını göstermektedir. Böylece ortamın bağıl nem oranına bağlı olan γ_2' katsayısı hesaplanmış olur.

3.2.3.2 Eleman şekli ve boyutlarının rötreye üzerindeki etkisi

Eleman geometrisi hem sünmeyi hem de rötreyi etkileyen bir başka etkidir. Rötrenin sınır değerinin belirlenmesinde gerekli olan γ_3' katsayısının hesaplanması için sünme durumunda olduğu gibi h_0 ortalama derinlik ifadesinin düşebileceği değişik aralıklara bağlı olarak kullanılması gereken denklemler de farklılık gösterir.

Çizelge 3.3 : γ_3' değerinin h_0 ’ a göre değişimi

H_0 (mm)	50	75	100	125	150
γ_3'	1.35	1.25	1.17	1.08	1.00

Ortalama derinlik değeri, $50 \text{ mm} \leq h_0 \leq 150 \text{ mm}$ aralığında ise Çizelge 3.3’ de verilen değerler yardımıyla γ_3' katsayısı elde edilir.

Ortalama derinlik değeri, $150 \text{ mm} < h_0 \leq 380 \text{ mm}$ aralığında ise :

$$\gamma_3' = 1.23 - 0.0015 \times h_0 \quad t \leq 365 \text{ gün ise} \quad (3.16.a)$$

$$\gamma_3' = 1.17 - 0.0011 \times h_0 \quad t > 365 \text{ gün ise} \quad (3.16.b)$$

denklemlerinden biri kullanılarak γ_3' katsayısı elde edilir.

Ortalama derinlik değeri, $h_0 > 380$ mm ise :

$$\gamma'_3 = 1.2 \times e^{-0.00472 \times (V/S)} \quad (3.17)$$

denklemini kullanarak γ'_3 katsayısı elde edilir. Denklem 3.17 ' deki (V/S) ifadesi hacim ile yüzey alanı arasındaki oranı gösterir ve mm cinsindendir.

3.2.3.3 Beton karışımının rötire üzerindeki etkisi

Tasarımda kullanılacak betonun bileşenleri sünme üzerinde olduğu gibi rötire üzerinde de etkilidir. Rötrenin alacağı sınır değerin hesaplanmasında kullanılan denklem 3.14' deki γ'_4 , γ'_5 , γ'_6 ve γ'_7 ifadeleri sırasıyla taze betonda mm cinsinden ölçülen çökme değerine, dane boyutu 4 mm' den küçük olan ince agreganın yüzde olarak kütlece toplam agrega miktarına oranına, taze betonda yüzdece ölçülen hava miktarına ve kg / m^3 cinsinden kullanılan çimento miktarına bağlı olan katsayılarıdır.

$$\gamma'_4 = 0.89 + 0.00161 \times s \quad (3.18)$$

Denklem 3.18' deki s ifadesi taze betonda mm cinsinden ölçülen çökme değerine karşılık gelir ve bu denklem yardımıyla çökme değerinin rötire üzerinde etkisi göz önüne alınmış olur.

$$\gamma'_5 = 0.30 + 0.0014 \times \psi \quad \psi \leq \% 50 \text{ ise} \quad (3.19.a)$$

$$\gamma'_5 = 0.90 + 0.002 \times \psi \quad \psi > \% 50 \text{ ise} \quad (3.19.b)$$

İnce agrega miktarındaki değişime göre 3.19.a ya da 3.19.b denklemlerinden biri kullanılarak yüzdece ince agrega miktarının rötire üzerindeki etkisi göz önüne alınmış olur. Denklemdaki ψ ifadesi kullanılan ince agreganın yüzde olarak miktarını vermektedir.

$$\gamma'_6 = 0.95 + 0.008 \times a \quad (3.20)$$

Betonun içerdiği hava miktarının rötire üzerindeki etkisi denklem 3.20 kullanılarak belirlenir ve denklemden yer alan a ifadesi betondaki hava miktarının yüzde olarak değeridir.

$$\gamma'_7 = 0.75 + 0.00061 \times c \quad (3.21)$$

Beton tasarımında kullanılan çimento miktarının kg / m^3 cinsinden ifadesi olan c denklem 3.21' de yerine konduğunda kullanılan çimento miktarının rötire üzerindeki etkisi belirlenmiş olur.

3.2.3.4 Uygulanan kür süresinin rötre üzerindeki etkisi

Betona uygulanan kürleme işlemi sona erdikten sonra kuruma ve dolayısıyla rötre davranışı ortaya çıktığından betona uygulanan kür süresinin de rötre üzerinde bir etkisi bulunmaktadır.

Çizelge 3.4 : γ_8 değerinin uygulanan kür süresine göre değişimi

T_c [gün]	1.0	3.0	7.0	14.0	28.0	90.0
γ_8	1.20	1.10	1.00	0.93	0.86	0.75

Çizelge 3.3’ de belirli kür sürelerine karşılık gelen γ_8 değerleri kullanılarak kür süresinin rötre üzerindeki etkisini belirlemek mümkündür.

3.3 CEB - FIB Yöntemi

Yöntem, en güncel hali 1990 yılında yayımlanan CEB-FIB yönetmeliğinin zamana bağlı etkiler bölümünde yer almaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, zamana bağlı etkilerin hesaplarında kullanılan sünme katsayısı, rötre şekil değiştirmesi değerlerinin hesaplanması amacıyla gerekli olan parametrelere etkiyen faktörler açıklanmış ve bunların hesaplanmasında kullanılacak denklemler verilmiştir[11].

3.3.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülünün zamana bağlı değişimi

Herhangi bir t zamanındaki beton basınç dayanımı; kullanılan çimento tipine, sıcaklığa ve kür koşullarına bağlıdır. Ortalama 20°C sıcaklık ve standart kür koşullarında tutulan bir beton numunesi için değişik beton yaşlarında ortalama beton basınç dayanımı olan f_{cm} ‘nin herhangi bir beton yaşındaki değerini hesaplamak için:

$$f_{cm}(\tau) = \beta_{cc}(\tau) \times f_{cm} \quad (3.22)$$

denkleminde yararlanılır. Denklem 3.22 ‘ deki τ ilk yüklemenin yapıldığı andaki beton yaşını gösterirken f_{cm} değeri ise betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımını gösterir. Denklem 3.22’ deki $\beta_{cc}(\tau)$ ise beton yaşına bağlı bir fonksiyon olup:

$$\beta_{cc}(\tau) = \exp\left\{s \times \left[1 - \sqrt{28/t}\right]\right\} \quad (3.23)$$

denklemini yardımıyla hesaplanır. Denklem 3.23’ deki s değeri kullanılan çimento tipiyle ilgili bir katsayı olup alabileceği değerler Çizelge 3.5’ de gösterilmiştir[12].

Çizelge 3.5 : s değerinin kullanılan çimento tipine göre değişimi

Kullanılan Çimento Tipi	s değeri
R tipi yüksek mukavemetli çimento	0.20
N ve R tipi çimento	0.25
SL tipi çimento	0.38

Elastisite modülünün zamana bağlı değişimini elde edebilmek amacıyla ilk olarak elastisite modülünün 28 günlük değerini belirlemek gerekmektedir. $E_c(28)$ olarak gösterilen bu değeri hesaplayabilmek için:

$$E_c(28) = 21500 \times [(f_{ck} + \Delta f) / f_{cm0}]^{1/3} \quad (3.24)$$

denkleminde yararlanılır. Bu hesaplarda bulunan değer tanjant modülünü verir. Denklem 3.24’ de bulunan f_{ck} değeri 28 günlük karakteristik basınç dayanımını gösterirken Δf ve f_{cm0} değerleri, sabit değerler olup sırasıyla 8 ve 10 Mpa’ ya eşittirler. Sünme analizi dışındaki elastik analizlerde bu değer 0.85 ile azaltılması gerekmektedir. $E_c(28)$ değeri elde edildikten sonra elastisite modülünü herhangi bir beton yaşında belirlemek mümkün olur:

$$E_c(t) = \beta_E(t) \times E_c(28) \quad (3.25)$$

Denklem 3.25 kullanılarak elastisite modülü herhangi bir beton yaşında tayin edilebilir. Bu denklemde yer alan $E_c(28)$ ifadesi 28 günlük betonun tahmini elastisite modülü değeri iken $\beta_E(t)$ ifadesi ise:

$$\beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (3.26)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır.

3.3.2 Sünme davranışının zamana bağlı değişimi

Bu yöntemde betonun sünme davranışının zamanla değişimi, elde edilecek bir sünme katsayısının zaman içerisinde alacağı değerle belirlenecektir. Sünme katsayısını veren ifade, ilk yükleme anındaki beton yaşına bağlı olan teorik bir sünme katsayısıyla sünmenin zamanla değişimini gösteren bir fonksiyonun çarpımından oluşmaktadır. Sünme katsayısını hesaplamakta kullanılacak bağıntılar ampiriktir. Bu

ampirik ifadeler, laboratuvar koşullarındaki beton numunelerin basınç altındaki sünme davranışlarını elde etmek için uygulanan testlere dayandırılır.

Yöntemde herhangi bir t anındaki şekil değiştirme:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_c(\tau)}{E_c(\tau)} \times \left[1 + \frac{E_c(\tau)}{E_c(28)} \times \phi_{CEB-FIB}(t, \tau) \right] \quad (3.27)$$

denklemlerle ifade edilmiştir. Bu denklemde $\sigma_c(\tau)$ uygulanan gerilme değerini, $E_c(\tau)$ ilk yükleme anındaki elastisite modülü değerini, $E_c(28)$ 28 günlük betonun elastisite modülü değerini ve $\phi_{CEB-FIB}$ ise yöntemle hesaplanan sünme katsayısını gösterir. Çalışmada herhangi bir t anındaki şekil değiştirme:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_c(\tau)}{E_c(\tau)} \times [1 + \phi(t, \tau)] \quad (3.28)$$

denklemlerle ifade edildiğinden bu yöntemle hesaplanan sünme katsayısı ile hesaplarda kullanılan sünme katsayısı arasında:

$$\phi = \phi_{CEB-FIB} \times \frac{E_c(\tau)}{E_c(28)} \quad (3.29)$$

denklem 3.29 ile gösterilen bağıntı bulunmaktadır[12].

3.3.2.1 Sünme katsayısının belirlenmesi

Denklem 3.27 ve denklem 3.28’deki farklılıktan dolayı kullanılacak olan katsayı $\beta_E(\tau)$:

$$\beta_E(\tau) = \frac{E_c(\tau)}{E_c(28)} \quad (3.30)$$

denklemlerinden yararlanılarak elde edilir. Denklem 3.30’deki $E_c(\tau)$, ilk yükleme anındaki elastisite modülü değerini gösterirken $E_c(28)$, 28 günlük betonun elastisite modülü değeridir. Elastisite modülü değerlerinin birimi Mpa’ dır.

Hesaplanacak olan sünme katsayısı $\phi(t, \tau)$; τ yaşındaki betonun ortalama basınç dayanımı değeri olan $f_{cm}(\tau)$ ‘nin %40’ından az olduğu gerilme değerlerinde, ortamın bağıl nem değerinin %40 ila %100, ortalama ortam sıcaklığının ise 5° C ila 30° C arasında değiştiği koşullarda karakteristik basınç dayanımı değeri 12 ila 80 Mpa arasında olan beton için geçerlidir.

$$\phi(t, \tau) = \phi_0 \times \beta_c(t - \tau) \times \beta_E(\tau) \quad (3.31)$$

Yöntemdeki sünme katsayısı denklem 3.31 kullanılarak hesaplanır. Denklem 3.31’ de yer alan ϕ_0 teorik sünme katsayısını gösterirken $\beta_c (t - \tau)$ ise bir fonksiyon olup yüklemekten sonra sünmenin zamanla değişimini gösterir. Teorik sünme katsayısı ϕ_0 :

$$\phi_0 = \phi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(\tau) \quad (3.32)$$

denklemini yardımıyla hesaplanır. Denklem 3.32’ de yer alan ϕ_{RH} ifadesi ortam koşulları, eleman şekli ve boyutlarıyla ilgili olup :

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - (RH / 100)}{0.46 \times \left(\frac{h_0}{h_{ref}}\right)^{1/3}} \quad (3.33)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Denklem 3.33’ de yer alan RH, yüzdece ortamın bağıl nem değerini gösterirken h değeri teorik boyut olup elemanın kesit şekli ve boyutlarıyla ilgilidir.

Bu değeri hesaplamak için:

$$h_0 = \frac{2 \times A}{u} \quad (3.34)$$

denkleminde yararlanılır. Denklem 3.34’ de bulunan A değeri atmosfere maruz kalan kesit alanının mm^2 olarak büyüklüğünü gösterirken u ise kesit çevresinin mm olarak büyüklüğünü gösterir. Denklem 3.34 kullanılarak hesaplanan teorik kalınlık ile aynı tanıma sahip olan h_{ref} değeri 100 mm’ ye eşittir. Denklem 3.32’ de yer alan $\beta(f_{cm})$ ortalama basınç dayanımı değerine bağlı bir fonksiyon olup:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{f_{cm} / f_{cm0}}} \quad (3.35)$$

denkleminde kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde yer alan f_{cm} değeri Mpa olarak betonun ortalama basınç dayanımı değeridir ve f_{cm0} değeri de 10 Mpa’ ya eşit olan bir sabittir. Teorik sünme katsayısı olan ϕ_0 ‘ın hesabında ilk yükleme anındaki beton yaşı da göz önüne alınır ve bu etki:

$$\beta(\tau) = \frac{1}{0.1 + \tau^{0.2}} \quad (3.36)$$

denklemini kullanılarak hesap edilir. Denklem 3.36’ da yer alan τ ifadesi ilk yükleme anındaki beton yaşını gün olarak gösterir.

Yük uygulanışından sonra sünme davranışının değişimini ifade etmekte yararlanılan $\beta_c (t - \tau)$ fonksiyonu:

$$\beta_c(t-\tau) = \frac{t-\tau}{\beta_H + (t-\tau)} \quad (3.37)$$

denklemi yardımıyla hesaplanır. Denklem 3.37’ de yer alan β_H ifadesi teorik kalınlık ve ortamın bağıl nem değerine bağlı bir fonksiyon olup:

$$\beta_H = \frac{150 \times h_0}{h_{ref}} \times [1 + (0.012 \times RH)^{18}] + 250 \leq 1500mm \quad (3.38)$$

denklemi yardımıyla hesaplanır. Denklem 3.38’ de yer alan h_0 ve h_{ref} ifadeleri teorik kalınlıkla ilgiliyken RH ifadesi de ortamın bağıl nem değerini gösterir.

3.3.3 Rötire davranışının zamana bağlı değişimi

Betona uygulanan kürün tamamlandığı zaman olan t_s ‘ den sonra görülen büzülme davranışı rötire olarak tanımlanır. Herhangi bir t zamanındaki rötire şekil değiştirmesi

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \times \beta_s(t - t_s) \quad (3.39)$$

denklemi kullanılarak hesaplanır. Denklem 3.39’ da yer alan ε_{cs0} ifadesi teorik rötire değerini gösterir ve :

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \times \beta_{RH} \quad (3.40)$$

denklemi kullanılarak hesaplanır. Denklem 3.40’ da yer alan $\varepsilon_s(f_{cm})$ ifadesi ortalama beton basınç dayanımı f_{cm} ‘ ye bağlı olan bir fonksiyondur. Denklemde yer alan β_{RH} ifadesi ise ortamın bağıl nem oranına bağlı bir fonksiyondur.

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = 10^{-6} \times [160 + 10 \times \beta_{sc} \times (9 - f_{cm} / f_{cm0})] \quad (3.41)$$

Denklem 3.41’ de yer alan β_{sc} ifadesi kullanılan çimento tipine bağlı bir katsayı olup alabileceği değerler Çizelge 3.6’ de verilmiştir.

Çizelge 3.6 : β_{sc} değerinin kullanılan çimento tipine göre değişimi

Çimento Tipi	β_{sc} değeri
SL Tipi Çimento	4
N veya R tipi çimento	5
R tipi yüksek mukavemetli çimento	8

Çizelge 3.6’ in de yardımıyla denklem 3.41 kullanılarak $\varepsilon_s(f_{cm})$ ‘ yi hesaplamak mümkün olur.

$$\beta_{RH} = -1.55 \times \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] \quad (3.42)$$

Denklem 3.42 kullanılarak ortamın yüzdece bağıl neminin rötre üzerindeki etkisi hesaplanabilir. Denklem 3.42, bağıl nem değeri $\%40 \leq RH < \%99$ aralığındayken geçerli olur.

Herhangi bir t zamanıyla kürün uygulanmasının bittiği zaman arasında geçen süreye, eleman şekli ve boyutlarına bağlı olan $\beta_s(t - t_s)$ fonksiyonu :

$$\beta_s(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{350 \times \left(\frac{h_0}{h_{ref}} \right)^2 + (t - t_s)} \quad (3.43)$$

denklemini kullanarak hesaplanır. Denkler 3.43' de yer alan h_{ref} değeri bir sabit olup 100 mm' ye eşittir. Denklemde yer alan h_0 değeri ise teorik kalınlık olup denklem 3.34 yardımıyla hesaplanır.

4. ACI 209 VE CEB – FIB YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BETONARME ELEMANLARDA ZAMANA BAĞLI PARAMETRELERİN TAHMİN EDİLMESİ

4.1 Giriş

Çalışmanın bu bölümünde, bir önceki bölümde anlatılan tahmin yöntemleri kullanılarak sonraki bölümlerde yapılacak olan zamana bağlı analizlere gerekli olan parametreler belirlenmiştir. Bu amaçla, betondaki sünme davranışını tahmin edebilmek amacıyla belirli günler için sünme katsayısı hesaplanmıştır. Betondaki rötre davranışı da sünme gibi zamana bağlı bir büyüklük olduğundan bu davranışı tahmin edebilmek amacıyla yine belirli günlerdeki rötre şekil değiştirmeleri hesaplanmıştır.

Beton, özelliğinden ötürü zaman içerisinde dayanım kazanır ve buna bağlı olan elastisite modülü de zaman içerisinde artar. Zamana bağlı davranış hesaplarında malzeme özellikleri de önemli olduğundan betona ait bu parametrelerin zaman içerisindeki değişimi de tahmin yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Bir sonraki bölümde zamana bağlı olan davranışı incelenecek olan kolon 40x100 boyutlarındadır. Zamana bağlı davranış incelenecek olan kiriş ise 30x60 boyutlarındadır. Her iki betonarme elemanda da beton sınıfı C25' dir. Kullanılan donatı çeliği ise S420' dir.

4.2 Betonarme Bir Kolonda Zamana Bağlı Parametrelerin Tahmin Edilmesi

Zamanla değişen parametrelerin tahmin edileceği betonarme kolon 40x100 boyutlarındadır. Kolonda kullanılan beton sınıfı C25, donatı çeliği ise S420 sınıfıdır. Parametreler ilk olarak ACI 209 yöntemine göre hesaplanmış daha sonra ise CEB – FIB yöntemi kullanılmıştır. ACI 209' a göre hesapta hacim ve yüzey alanı değerleri de hesaplanması gerektiğinden eleman boyu 3 m olarak alınmıştır.

4.2.1 ACI 209 yöntemi kullanılarak zamana bağlı parametrelerin tahmin edilmesi

Betonarme kolon ile ilgili parametrelerin zaman içindeki değişimlerinin tahmini için Bölüm 3.2' de sözü edilen ACI 209 yönteminin uygulanabilmesi için bazı başlangıç verileri gerekmektedir. Bu veriler sünme, rötre, basınç dayanımı ve elastisite modülü parametrelerinin zaman içerisindeki değişimlerini etkileyen faktörlerle ilgilidir.

4.2.1.1 Yöntemin uygulanmasında kullanılacak başlangıç verileri

İlk olarak, beton basınç dayanımının zamanla değişimi için gerekli olan başlangıç verilerinden söz edilebilir. Bunlar; betonun 28 günlük karakteristik basınç dayanımı değeri, kullanılan çimento tipi ve uygulanan kür koşullarıdır. Zamana bağlı parametrelerin değişiminin tahmin edileceği kolon C25 beton sınıfında olup kolon betonunda N tipi çimentonun kullanıldığı ve betonun normal kür koşullarında tutulduğu düşünülmüştür.

Betonun elastisite modülünün değişiminde, betonun birim hacim ağırlığı değeri ve elastisite modülünün hesaplanacağı günlük basınç dayanımı değeri önem taşır. Basınç dayanımının zaman içerisindeki değişiminin elde edilmesiyle elastisite modülünün de zaman içerisindeki değişimini elde etmek mümkün olur. Hesaplarda, beton birim hacim ağırlığı 2325 kg / m^3 olarak alınmıştır.

Betonda görülen sünme davranışının zaman içerisindeki değişimini etkileyen faktörler Bölüm 3.2.2' de açıklanmıştır. Bu faktörlerin her biri için bir başlangıç verisi belirlenmiş ve sünme katsayısı hesabı bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Yük ilk uygulanmaya başlandığında beton yaşının 10 gün olduğu kabul edilmiştir. Ortamın bağıl nem oranının %70 olduğu düşünülmüştür. Taze beton özellikleri olan çökme değeri 20 mm, hava oranı ise % 6 olarak alınmıştır. Beton karışımında 4 mm elekten geçen ince malzeme miktarının toplam agregâ miktarına oranı % 25 olarak kabul edilmiştir. Eleman boyutlarına bağlı olarak da ortalama kalınlık h_0 değeri hesaplanmıştır.

Betonda görülen rötre davranışını etkileyen faktörler de Bölüm 3.2.3' de açıklanmıştır. Sözü edilen her bir etkili faktör için başlangıç verisi belirlenmiştir. Betondaki sünme ve rötre davranışında etkili olan bazı ortak faktörler vardır dolayısıyla bu faktörlere ait veriler aynı kabul edilmiştir. Bu veriler; ortamın bağıl nem oranı, beton karışımında 4 mm elekten geçen ince malzeme miktarının toplam

agrega miktarına oranı, taze betonda ölçülen çökme değeri ve yüzdece hava miktarıdır. Bunun haricindeki faktörlerden biri beton karışımında kullanılan çimento miktarıdır ve hesaplarda 320 kg / m³ olarak alınmıştır. Bir diğer faktör ise uygulanan kür süresidir ve bu süre 10 gün olarak alınmıştır. Ortalama kalınlık değeri eleman şekli ve boyutlarıyla ilgili olup sünme katsayısı hesaplarında kullanılan değer ile aynıdır.

4.2.1.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin zamana bağlı değişimi

Zamana bağlı hesap yapılırken yükün ilk uygulandığı anda beton yaşı 10 gün olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle basınç dayanımının değişimi bu zamandan itibaren hesaplanmaya başlanmış olup hesap 10000 güne kadar yapılmıştır. Benzer şekilde elastisite modülünün zamana bağlı değişimi belirlenirken de başlangıç zamanı olarak 10. gün alınmıştır.

Denklem 3.1’ de yer alan α ve β katsayıları, N tipi çimento ve normal kür koşulları için Çizelge 3.1 kullanılarak sırasıyla 4.00 ve 0.85 olarak elde edilir. 28 günlük karakteristik basınç dayanımı $f_{ck} = 25$ Mpa olan betonun $\tau = 10$ günlük basınç dayanımı denklem 3.1 kullanılarak:

$$f_c(10) = \frac{10}{4 + 0.85 \times 10} \times 25 = 20.0 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu şekilde farklı günler için hesaplanarak elde edilen beton basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Beton basınç dayanımının zamana bağlı değişimi

Zaman [gün]	Beton basınç dayanımı [Mpa]	Zaman [gün]	Beton basınç dayanımı [Mpa]	Zaman [gün]	Beton basınç dayanımı [Mpa]
10	20,0	200	28,5	2000	29,5
20	24,0	250	29,0	2500	29,5
30	25,5	260	29,0	3000	29,5
35	26,0	300	29,0	3500	29,5
40	26,5	350	29,0	4000	29,5
50	27,0	400	29,0	4500	29,5
60	27,5	450	29,0	7000	29,5
100	28,0	500	29,0	9000	29,5
110	28,0	1000	29,5	10000	29,5
150	28,5	1500	29,5	10010	29,5

Elastisite modülü beton basınç dayanımına bağlı bir parametredir. Beton basınç dayanımı hesaplarında olduğu gibi elastisite modülü değerlerini de farklı günler için hesaplamak mümkündür. Elastisite modülü hesabında denklem 3.2 kullanılmıştır. Beton birim hacim ağırlığı 2325 kg / m³ olarak alınmıştır. Denklem 3.2 kullanılarak $\tau = 10$ günlük betonun elastisite modülü değeri:

$$E_c(10) = 2325^{1.5} \times 0.043 \times \sqrt{20.0} = 21559 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu şekilde farklı günler için hesaplanarak elde edilen elastisite modülü değerleri Çizelge 4.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Elastisite modülü değerinin zamana bağlı değişimi

Zaman [gün]	Elastisite Modülü [Mpa]	Zaman [gün]	Elastisite Modülü [Mpa]	Zaman [gün]	Elastisite Modülü [Mpa]
10	21559	200	27560	2000	27752
20	25885	250	27602	2500	27757
30	26457	260	27609	3000	27760
35	26630	300	27630	3500	27762
40	26763	350	27651	4000	27763
50	26954	400	27666	4500	27764
60	27084	450	27678	7000	27768
100	27352	500	27688	9000	27769
110	27389	1000	27731	10000	27770
150	27490	1500	27745	10010	27770

Sonuçlardan görülebileceği gibi, beton basınç dayanımı ve ona bağlı olarak gelişen elastisite modülü değerleri erken yaşlarda daha hızlı olarak artarken belirli bir yaş değerine ulaşıldığında yaklaşık olarak sabit bir değere sahip olurlar.

4.2.1.3 Betondaki sünme davranışının zamana bağlı değişimi

Sünme davranışının zamana bağlı değişimini elde etmek amacıyla ilk olarak sünme katsayısının uzun bir yükleme süresi sonunda ulaşacağı sınır değer olan $\phi^*(\tau)$ hesap edilmiştir. Bu çalışmada, sonsuzdaki zamanı temsilen kullanılan yükleme süresi 10000 gündür.

İlk yükleme anındaki beton yaşının betonun sünme davranışı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Yöntemde bu etki denklem 3.5.a kullanılarak göz önüne alınmıştır. İlk yükleme anındaki beton yaşı olan $\tau = 10$ gün için bu değer :

$$\gamma_1 = 1.25 \times 10^{-0.118} = 0.953$$

olarak hesaplanmıştır.

Sünme davranışının bağlı olduğu bir diğer değişken ise ortamın bağıl nem oranıdır. Bağıl nem oranının sünme üzerindeki etkisi denklem 3.6 kullanılarak:

$$\gamma_2 = 1.27 - 0.0067 \times 70 = 0.801$$

olarak hesaplanmıştır.

Eleman şekli ve boyutlarının sünme üzerindeki etkisini hesaplayabilmek amacıyla ilk olarak denklem 3.7 kullanılarak ortalama kalınlık değeri hesap edilmiş ve 520 mm bulunmuştur. Elde edilen ortalama kalınlık değeri h_0 , $h_0 > 380$ mm aralığına düştüğünden bu etkinin hesabında değişen yükleme süresine göre denklem 3.9 kullanılmıştır. Sünme katsayısının ulaşacağı sınır değer olan $\phi^*(\tau)$ 'nin hesabında kullanılan $(t - \tau) = 10000$ yükleme süresi için γ_3 değeri:

$$\gamma_3 = \frac{2}{3} \times \left[1 + 1.13 \times e^{-0.0213 \times 130} \right] = 0.909$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton karışımının sünme üzerindeki etkisini göz önüne alan üç farklı katsayı bulunmaktadır. Bunlardan ilki taze betonun çökme değeriyle ilgilidir, bu değer 20 mm için denklem 3.10 kullanılarak:

$$\gamma_4 = 0.82 + 0.00264 \times 20 = 0.873$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton karışımıyla ilgili olan diğer katsayı ise 4 mm elekten geçen ince malzeme miktarının toplam agrega miktarına oranıdır ve hesaplarda %25 olarak alınan bu değer denklem 3.11 kullanılarak:

$$\gamma_5 = 0.88 + 0.0024 \times 25 = 0.940$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton karışımıyla ilgili olan son katsayı ise taze betonda ölçülen yüzdece hava oranıyla ilgili olup %6 hava oranı için denklem 3.12 kullanılarak:

$$\gamma_6 = 0.46 + 0.09 \times 6 = 1.000$$

olarak hesaplanmıştır.

Sünme katsayısının uzun bir yükleme süresi sonrasında ulaşacağı sınır değer olan ϕ^* (τ) yukarıda sözü edilen katsayıların hesaplanmasının ardından denklem 3.4 kullanılarak:

$$\phi^*(\tau) = 2.35 \times 0.953 \times 0.801 \times 0.909 \times 0.873 \times 0.940 \times 1.000 = 1.34$$

olarak hesaplanmıştır.

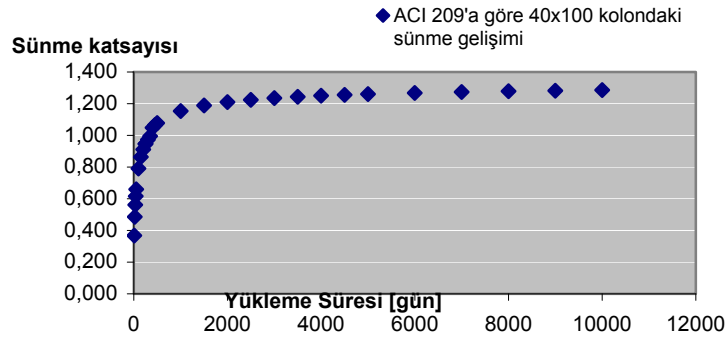
Sünme davranışının zamanla olan değişiminin tahmin edilmesinde denklem 3.3 kullanılmıştır.

Denklem 3.3 ile yapılan hesaplar sonucunda elde edilen sünme katsayısı değerleri belirli günler için Çizelge 4.3' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Sünme davranışının zamana bağlı değişimi

Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı
5	0,268	150	0,863	3000	1,235
8	0,333	175	0,889	3500	1,244
10	0,367	200	0,911	4000	1,250
13	0,410	213	0,921	4500	1,256
20	0,486	233	0,935	5000	1,261
25	0,527	245	0,943	5125	1,262
30	0,561	250	0,946	6000	1,268
33	0,579	300	0,973	7000	1,274
40	0,616	350	0,994	8000	1,278
45	0,639	400	1,049	9000	1,282
50	0,660	450	1,064	9825	1,285
63	0,704	500	1,078	9925	1,285
75	0,737	1000	1,154	9963	1,285
83	0,757	1500	1,189	9983	1,285
95	0,782	2000	1,210	9995	1,285
100	0,791	2500	1,225	10000	1,285

Sünme davranışının zaman içerisindeki değişimi ise Şekil 4.1’ de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : 40x100 kolondaki sünme davranışının zaman içerisindeki değişimi

4.2.1.4 Betondaki rötre davranışının zamana bağlı değişimi

Rötre şekil değiştirmesinin zaman içerisindeki değişimini elde edebilmek amacıyla ilk olarak uzun bir sürenin ardından rötrene ulaşacağı sınır değer olan ϵ_{sh}^* değerinin hesaplanması gerekir. Sözü edilen bu uzun süre hesaplarda 10000 gün olarak alınmıştır. Bu amaçla ilk olarak denklem 3.14’ de yer alan katsayıların hesaplanması gerekmektedir.

Ortamin bağıl nem oranıyla ilgili olan γ_2 katsayısını hesaplamak için denklem 3.15.a kullanılmıştır. Bu denklem kullanılarak:

$$\gamma'_2 = 1.40 - 0.01 \times 70 = 0.700$$

olarak hesaplanmıştır.

Eleman şekli ve boyutları hem sünme hem rötre üzerinde etkili olduğundan sünme hesapları yapılırken ortalama kalınlık değeri olan h_0 hesaplanmış ve 520 mm olarak bulunmuştur. Bu değere bağlı olarak hesaplanması gereken γ'_3 katsayısı, farklı zaman aralıklarından dolayı farklılık gösteren denklem 3.17 kullanılarak hesaplanır. Rötre şekil değiştirmesinin sınır değeri aranırken zaman olarak 10000 gün alındığından bu katsayı bu değere göre denklem 3.16.a' da yerine konulursa:

$$\gamma'_3 = 1.2 \times e^{-0.00472 \times 130} = 0.855$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton karışımının rötre üzerindeki etkisi dört farklı katsayı ile ilişkilendirilmiştir. Bunlardan ilki taze betonda ölçülen çökme değeri ile ilgilidir ve 20 mm için denklem 3.18 kullanılarak:

$$\gamma'_4 = 0.89 + 0.00161 \times 20 = 0.922$$

olarak hesaplanmıştır.

Bir diğer katsayı 4 mm elekten geçen ince agreganın toplam agreganın miktarına oranının yüzde değeri kullanılarak elde edilir. İnce agreganın oranı %25 olan karışım için denklem 3.19.a kullanılarak bu katsayı:

$$\gamma'_5 = 0.30 + 0.0014 \times 25 = 0.335$$

olarak hesaplanmıştır.

Taze betonda ölçülen yüzde hava miktarı sünmede olduğu gibi rötrede de etkilidir. Bu etkiyle ilgili olan γ'_6 katsayısı %6'lık hava oranı için denklem 3.20 kullanılarak:

$$\gamma'_6 = 0.95 + 0.008 \times 6 = 0.998$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton tasarımında kullanılan çimento miktarı 320 kg / m³ olarak kabul edilmiş olup bu değer denklem 3.21' de yerine konulmuş ve γ_7' katsayısı:

$$\gamma_7' = 0.75 + 0.00061 \times 320 = 0.945$$

olarak hesaplanmıştır.

Uygulanan kür süresi de rötre üzerinde etkili diğer bir faktördür. Bu etkiyi göz önüne alan γ_8 katsayısı Çizelge 3.3' deki değerler arasında interpolasyon yapılarak 10 günlük kür süresi için 0.97 olarak hesaplanmıştır.

Rötre üzerinde etkili olan faktörleri temsil eden katsayıların hesaplanmasının ardından denklem 3.14 kullanılarak rötre şekil değiştirmesinin 10000 gün sonundaki değeri:

$$\varepsilon_{sh}^* = 780 \times 0.700 \times 0.855 \times 0.922 \times 0.335 \times 0.998 \times 0.945 \times 0.970 = 132 \times 10^{-6}$$

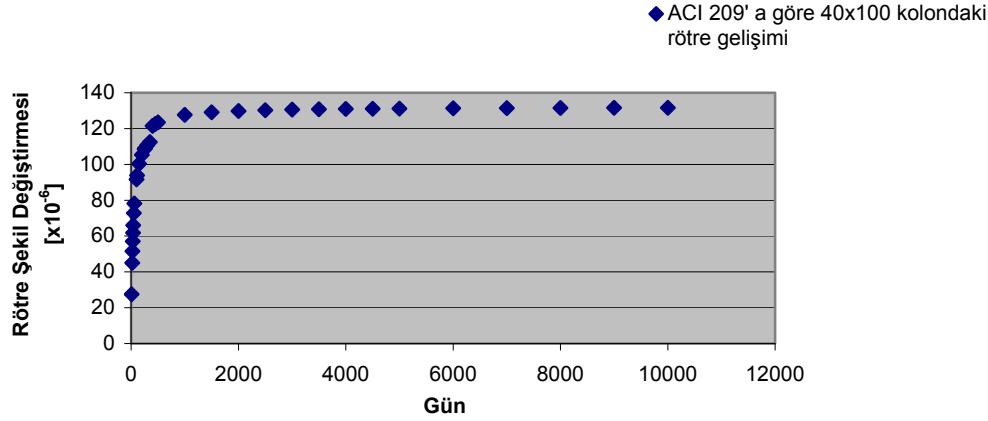
olarak hesaplanmıştır.

Rötrenin ulaştığı sınır değeri belirledikten sonra normal kür uygulanmış beton için rötre şekil değiştirmesinin belirli zamanlarda aldığı değerler denklem 3.13.a ile hesaplanmış ve sonuçlar toplu olarak Çizelge 4.4' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Rötre davranışının zamana bağlı değişimi

Zaman [Gün]	Rötre Şekil Değiştirilmesi [x10 ⁻⁶]	Zaman [Gün]	Rötre Şekil Değiştirilmesi [x10 ⁻⁶]	Zaman [Gün]	Rötre Şekil Değiştirilmesi [x10 ⁻⁶]
10	27	200	105	2500	130
20	45	250	109	3000	131
25	52	260	109	3500	131
30	57	300	111	4000	131
35	62	350	112	4500	131
40	66	400	121	5000	131
50	73	450	123	6000	131
60	78	500	123	7000	131
100	92	1000	128	8000	132
110	94	1500	129	9000	132
150	100	2000	130	10000	132

Çizelge 4.4' de farklı zamanlar için hesaplanmış rötre şekil değiştirmesi değerleri grafik olarak Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : 40x100 kolondaki rötre davranışının zaman içerisindeki değişimi

4.2.2 CEB - FIB yöntemi kullanılarak zamana bağlı parametrelerin tahmin edilmesi

Bir önceki bölümde zamana bağlı parametreleri ACI yöntemine göre hesaplanan 40x100 boyutlarındaki kolon için bu parametreler CEB – FIB yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. ACI yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de hesapların gerçekleştirilebilmesi için bazı katsayılar hesaplanacaktır. Başlangıç verileri olarak ACI 209' da kullanılan veriler kullanılmıştır dolayısıyla aynı koşullarda iki farklı yöntemin karşılaştırılmasının yapılabilmesi mümkün olmuştur.

4.2.2.1 Yöntemin uygulanmasında kullanılacak başlangıç verileri

Kullanılan malzemenin özellikleri ve ortam koşulları değiştirilmeden hesaplar, yöntemin uygulanması için gerekli olan değerlerin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Başlangıç verilerinde görülen bazı farklılıklara ilgili bölümlerde değinilmiştir.

4.2.2.2 Basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin zamana bağlı değişimi

Herhangi bir zamandaki basınç dayanımı değerinin tahmin edilmesi için denklem 3.22 kullanılmıştır. Denklemden yer alan f_{cm} 28 günlük ortalama basınç dayanımı değeridir. Bu değer elde edilmesi için karakteristik basınç dayanımı değeri f_{ck} ile Δf değeri toplanır. 8 Mpa' ya eşit olan Δf değeri ile 25 Mpa olan f_{ck} toplanarak f_{cm} değeri 33 Mpa olarak elde edilir. Denklem 3.22' de yer alan $\beta_{cc}(\tau)$ ifadesi zamana bağlı bir fonksiyondur ve zamana bağlı değişimin hesabında kullanılır. Bu

fonksiyonun farklı zamanlarda alacağı değerleri belirlemek için denklem 3.23 kullanılmıştır. Denklem 3.23’ de yer alan s katsayısı kullanılan çimento tipiyle ilgili olup Çizelge 3.4 kullanılarak N tipi çimento için 0.25 olarak alınmıştır. Beton 10 günlük iken ilk yüklemeye başlandığından başlangıç zamanı olarak bu zaman değeri alınırsa denklem 3.22 yardımıyla $\beta_{cc}(\tau)$:

$$\beta_{cc}(10) = \exp\left\{0.25 \times \left[1 - \sqrt{28/10}\right]\right\} = 0.845$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu değerin elde edilmesiyle 10 günlük betonun ortalama basınç dayanımı değeri:

$$f_{cm}(10) = 0.845 \times 33 = 28.0 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu şekilde farklı günler için hesaplanarak elde edilen beton basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.5’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : Beton basınç dayanımının zamana bağlı değişimi

Zaman [gün]	Beton basınç dayanımı [Mpa]	Zaman [gün]	Beton basınç dayanımı [Mpa]	Zaman [gün]	Beton basınç dayanımı [Mpa]
10	28,0	200	38,5	2000	41,0
20	31,5	250	39,0	2500	41,5
30	33,5	260	39,0	3000	41,5
35	34,0	300	39,5	3500	41,5
40	34,5	350	39,5	4000	41,5
50	35,0	400	39,5	4500	41,5
60	35,5	450	40,0	7000	41,5
100	37,0	500	40,0	9000	42,0
110	37,5	1000	40,5	10000	42,0
150	38,0	1500	41,0	10010	42,0

Elastisite modülünün zamanla değişimini elde etmek için ilk olarak 28 günlük betonunun elastisite modülü değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla denklem 3.24 kullanılmıştır. Böylelikle $E_c(28)$ değeri:

$$E_c(28) = 21500 \times [(25 + 8)/10]^{1/3} = 32009 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Elastisite modülü değerinin zamanla değişimini elde etmek amacıyla denklem 3.25 kullanılmıştır. Denklemden yer alan $\beta_E(t)$ katsayısı $\beta_{cc}(t)$ fonksiyonunun alacağı

değerlerin kareköküne eşittir. 10 günlük beton için hesaplanan $\beta_{cc}(t)$ fonksiyonu için β_E değeri:

$$\beta_E(10) = \sqrt{0.845} = 0.919$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu iki parametre ayrı ayrı hesaplanarak elastisite modülü değerinin belirli zamanlardaki değerleri elde edilmiş ve Çizelge 4.6' da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Elastisite modülü değerinin zamana bağlı değişimi

Zaman [gün]	Elastisite Modülü [Mpa]	Zaman [gün]	Elastisite Modülü [Mpa]	Zaman [gün]	Elastisite Modülü [Mpa]
10	29426	200	34614	2000	35739
20	31285	250	34785	2500	35795
30	32145	260	34814	3000	35836
35	32435	300	34912	3500	35868
40	32670	350	35011	4000	35894
50	33032	400	35091	4500	35915
60	33303	450	35158	7000	35986
100	33950	500	35214	9000	36019
110	34054	1000	35521	10000	36032
150	34364	1500	35657	10010	36032

4.2.2.3 Betondaki sünme davranışının zamana bağlı değişimi

Bu yöntemde de ACI 209' da olduğu gibi sünme davranışının zamanla olan değişimini belirleyebilmek amacıyla sünme katsayısı hesaplanmıştır. İlk olarak denklem 3.27 ve denklem 3.28' deki farklılıktan dolayı kullanılan $\beta_E(t)$ katsayısının hesabı denklem 3.30 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu katsayı $\tau = 10$ gün için hesaplanırsa:

$$\beta_E(10) = \frac{29426}{32009} = 0.919$$

olarak elde edilir.

Denklem 3.31 kullanarak sünme katsayısını hesaplamadan önce teorik sünme katsayısı olan ϕ_0 hesaplanmıştır. Teorik sünme katsayısı denklem 3.32 kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde yer alan ilk ifade olan ϕ_{RH} değerinin hesaplanması için teorik boyut denklem 3.34 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesap sonucunda bu değer 286 mm olarak bulunmuştur. ACI yöntemine göre yapılan hesapta ortamın

bağıl nem değeri %70 olarak alındığı belirtilmişti. Bu değerlerin yardımıyla ϕ_{RH} denklem 3.33 kullanılarak:

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - (70/100)}{0.46 \times \left(\frac{286}{100}\right)^{1/3}} = 1.46$$

olarak hesaplanmıştır.

Denklem 3.32’ de yer alan bir diğer ifade ortalama basınç dayanımı değerine bağlı olan $\beta(f_{cm})$ fonksiyonudur. Fonksiyonun alacağı değer denklem 3.35 kullanılarak:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{33/10}} = 2.92$$

olarak hesaplanmıştır.

Teorik sünme katsayısı yükleme anındaki beton yaşına da bağlıdır ve bu etkiyi göz önüne almak amacıyla denklem 3.36 kullanılmıştır. Bu denklem kullanılarak

$\beta(\tau = 10)$ değeri:

$$\beta(10) = \frac{1}{0.1 + 10^{0.2}} = 0.59$$

olarak hesaplanmıştır.

Teorik sünme katsayısının hesabında gerekli olan bu üç parametrenin hesaplanmasının ardından denklem 3.32 kullanılarak teorik sünme katsayısı:

$$\phi_0 = 1.46 \times 2.92 \times 0.59 = 2.53$$

olarak hesaplanmıştır.

Sünmenin zamanla değişimini hesaplamakta kullanılan ve denklem 3.37 ile verilen $\beta(t - \tau)$ fonksiyonunun değerlerini belirmeden önce bu fonksiyonun bağlı bulunduğu bir parametre olan β_H denklem 3.38 kullanılarak:

$$\beta_H = \frac{150 \times 286}{100} \times [1 + (0.012 \times 70)^{18}] + 250 = 697 \text{ mm}$$

olarak hesaplanmıştır.

Yükleme süresi $t - \tau$ ’nin sonsuzdaki değeri olarak 10000 alınmış olup sünme katsayısının sınır değerini elde etmek amacıyla ilk olarak denklem 3.37 kullanılarak:

$$\beta_c(10000) = \frac{10000}{697 + 10000} = 0.98$$

değeri elde edilir.

Bu değer kullanılarak yükleme süresi 10000 gün tutulursa sünme katsayısının ulaşacağı sınır değer denklem 3.31 kullanılarak:

$$\phi'(\tau) = 2.53 \times 0.98 \times 0.919 = 2.28$$

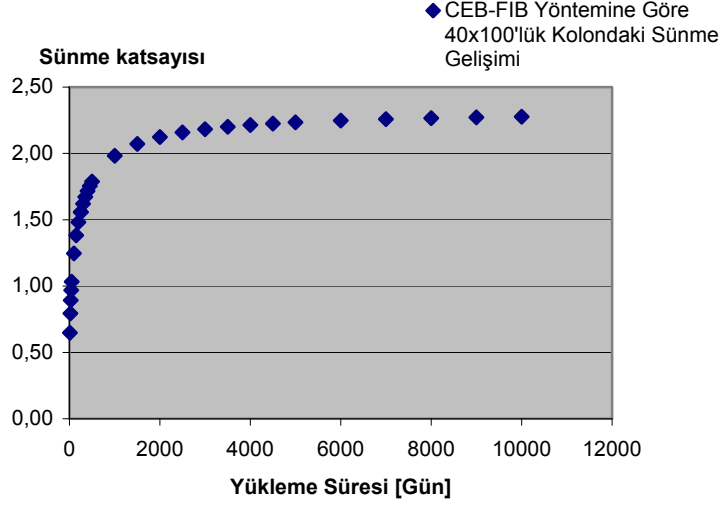
olarak hesaplanmıştır.

Denklem 3.31 kullanılarak farklı yükleme zamanları için sünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Sünme katsayısının zaman içerisinde aldığı değerler Çizelge 4.7' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Sünme davranışının zamana bağlı değişimi

Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı
5	0,527	150	1,382	3000	2,182
8	0,606	175	1,435	3500	2,200
10	0,648	200	1,481	4000	2,214
13	0,700	213	1,503	4500	2,225
20	0,794	233	1,534	5000	2,234
25	0,847	245	1,551	5125	2,236
30	0,893	250	1,558	6000	2,248
33	0,918	300	1,620	7000	2,258
40	0,969	350	1,672	8000	2,266
45	1,002	400	1,717	9000	2,272
50	1,032	450	1,755	9825	2,276
63	1,101	500	1,788	9925	2,277
75	1,154	1000	1,983	9963	2,277
83	1,186	1500	2,072	9983	2,277
95	1,230	2000	2,124	9995	2,277
100	1,246	2500	2,158	10000	2,277

Çizelge 4.7' de farklı zamanlar için hesaplanan sünme katsayıları Şekil 4.3' de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : 40x100 kolondaki sünme davranışının zaman içerisindeki değişimi

4.2.2.4 Betondaki rötre davranışının zamana bağlı değişimi

Betondaki sünme davranışının zaman içerisindeki değişimini belirlemekte olduğu gibi rötre için de teorik bir değer hesaplanması gerekir. Teorik rötre değerini hesaplamak için denklem 3.40 kullanılır. Denklem 3.40' da yer alan $\varepsilon_s (f_{cm})$ ortalama basınç dayanımı değerine bağlı bir fonksiyondur ve denklem 3.41 kullanılarak hesap edilir. Denklem 3.41' de yer alan ve kullanılan çimento tipiyle ilgili olan β_{sc} değeri Çizelge 3.5' den yararlanılarak 5 olarak alınmıştır. Ortalama basınç dayanımı değerine bağlı olarak değişen bu fonksiyon denklem 3.41 kullanılarak:

$$\varepsilon_s(33) = 10^{-6} \times [160 + 10 \times 5 \times (9 - 33/10)] = 445 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Denklem 3.40' daki diğer ifade olan β_{RH} %70 bağıl nem oranı için denklem 3.42 kullanılarak:

$$\beta_{RH} = -1.55 \times \left[1 - \left(\frac{70}{100} \right)^3 \right] = -1.02$$

olarak hesaplanmıştır.

Denklem 3.41 ve denklem 3.42 kullanılarak elde edilen sonuçların denklem 3.40' da yerine konmasıyla teorik rötre değeri:

$$\varepsilon_{cs0} = 445 \times 10^{-6} \times -1.02 = -453 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Denklem 3.43 kullanılarak kürün bittiği süreyle herhangi bir t zamanı arasındaki farkın fonksiyonu olan $\beta_s(t - t_s)$ 10000 gün için:

$$\beta_s(t - t_s) = \left(\frac{10000}{350 \times \left(\frac{286}{100} \right)^2 + 10000} \right)^{0.5} = 0.882$$

olarak hesaplanmıştır.

Denklem 3.43 ve denklem 3.40 ile hesaplanan değerler kullanılarak kürün bitmesinden 10000 gün sonra rötre şekil değiştirmesinin ulaşacağı sınır değer denklem 3.39 kullanılarak:

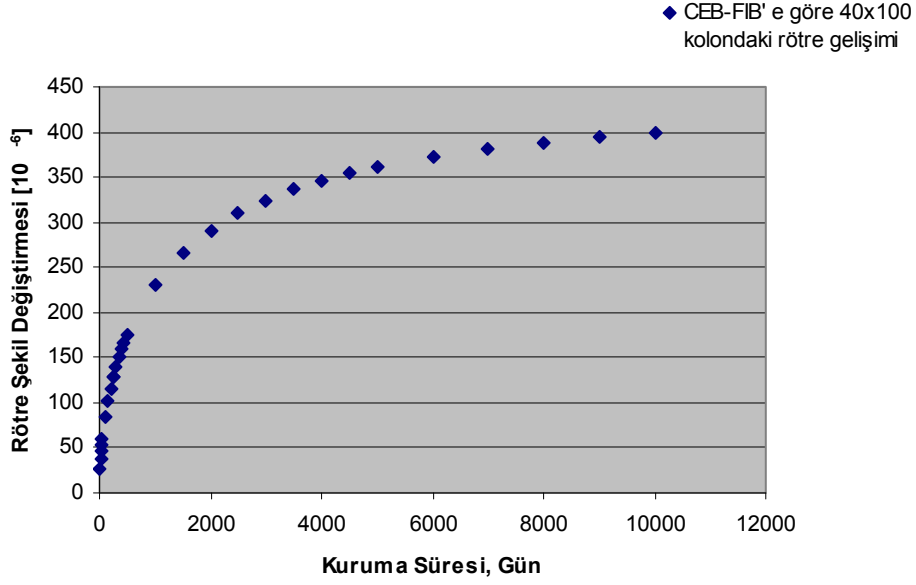
$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = 453 \times 10^{-6} \times 0.882 = 400 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8’ de farklı zamanlar için hesaplanmış rötre şekil değiştirmesi değerleri grafik olarak Şekil 4.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 : CEB - FIB yöntemiyle hesaplanan rötre şekil değiştirmesinin zamana bağlı değişimi

Zaman [Gün]	Rötre Şekil Değiştirmesi [$\times 10^{-6}$]	Zaman [Gün]	Rötre Şekil Değiştirmesi [$\times 10^{-6}$]	Zaman [Gün]	Rötre Şekil Değiştirmesi [$\times 10^{-6}$]
10	27	200	116	2500	310
20	38	250	129	3000	324
25	42	260	131	3500	336
30	46	300	140	4000	346
35	50	350	150	4500	354
40	53	400	159	5000	362
50	59	450	167	6000	373
60	65	500	175	7000	382
100	83	1000	231	8000	389
110	87	1500	266	9000	395
150	101	2000	291	10000	400



Şekil 4.4 : 40x100 kolondaki rötire davranışının zaman içerisindeki değişimi

4.3 Betonarme Kiriş Kesiti İçin Zamana Bağlı Parametrelerin Tahmin Edilmesi

Çalışmanın bu bölümünde zamana bağlı analizi yapılacak 30x60 cm boyutlarındaki kiriş kesitinin sünme katsayısı ve rötire şekil değiştirme değerleri hem ACI hem de CEB – FIB kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplar kolon kesiti için yapılan hesaplar ile aynıdır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar tablo ve grafik halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : Betonarme kiriş kesiti için acı yöntemiyle hesaplanan sünme katsayısı değerleri

Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı
10	0,401	350	1,086	3500	1,322
20	0,530	400	1,115	4000	1,329
30	0,613	450	1,132	4500	1,335
40	0,673	500	1,146	5000	1,340
50	0,720	1000	1,227	6000	1,348
100	0,864	1500	1,264	7000	1,354
150	0,943	2000	1,287	8000	1,359
200	0,995	2500	1,302	9000	1,363
250	1,033	3000	1,313	10000	1,367
300	1,063				

ACI yöntemi kullanılarak belirli yüklem süreleri için hesaplanan sünme katsayısı değerleri Çizelge 4.9' da gösterilmiştir. Daha sonra yine ACI yöntemi kullanılarak rötire şekil değiştirme hesapları yapılmıştır.

Çizelge 4.10 : Betonarme kiriş kesiti için acı yöntemiyle hesaplanan rötre şekil değiştirmesi değerleri

Zaman [gün]	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Zaman [gün]	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Zaman [gün]	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]
20	52	350	131	3500	145
30	66	400	135	4000	145
40	77	450	136	4500	146
50	84	500	137	5000	146
100	106	1000	142	6000	146
150	116	1500	143	7000	146
200	122	2000	144	8000	146
250	126	2500	145	9000	146
300	129	3000	145	10000	146

Rötre şekil değiştirmesini elde etmek için yapılan hesaplar sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.10’ da gösterilmiştir.

Sünme ve rötre değerlerinin zaman içerisinde aldığı değerler belirlemek için CEB – FIB yöntemi de kullanılmıştır.

Çizelge 4.11 : Betonarme kiriş kesiti için ceb - fib yöntemiyle hesaplanan sünme katsayısı değerleri

Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı	Yükleme Süresi [gün]	Sünme Katsayısı
10	0,717	350	1,812	3500	2,310
20	0,878	400	1,856	4000	2,322
30	0,987	450	1,894	4500	2,332
40	1,070	500	1,927	5000	2,340
50	1,139	1000	2,113	6000	2,352
100	1,370	1500	2,196	7000	2,360
150	1,513	2000	2,243	8000	2,367
200	1,617	2500	2,273	9000	2,372
250	1,696	3000	2,294	10000	2,376
300	1,760				

Çizelge 4.11’ de CEB – FIB yöntemi kullanılarak hesaplanan sünme katsayısı değerleri yer almaktadır. Sünme katsayısının farklı yükleme süreleri için hesaplanmasının ardından rötre şekil değiştirmesi değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12 : Betonarme kiriş kesiti için ceb - fib yöntemiyle hesaplanan rötre şekil değiştirmesi değerleri

Zaman [gün]	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Zaman [gün]	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Zaman [gün]	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]
20	54	350	203	3500	383
30	66	400	214	4000	390
40	76	450	223	4500	396
50	84	500	232	5000	401
100	117	1000	293	6000	408
150	141	1500	326	7000	414
200	160	2000	348	8000	418
250	176	2500	363	9000	422
300	190	3000	374	10000	424

Hesaplanan rötre Şekil değiştirmesinin farklı günler için aldığı değerler izelge 4.12’ de gösterilmiştir.

5. BETONARME YAPILARIN ZAMANA BAĞLI ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE UYGULAMALARI

5.1 Giriş

Çalışmanın bu bölümünde, betonarme elemanların zamana bağlı analizinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Bu yöntemlerin teorik olarak anlatımı yapıldıktan sonra her bir yöntemin uygulaması 40x100 cm boyutlarında olan ve sabit eksenel yük etkisinde bulunan bir kolon üzerinde yapılmıştır. Böylelikle beton ve donatıdaki gerilme – şekil değiştirme verilerinin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir ve bölümün sonunda her bir yöntemle bulunan sonuçların karşılaştırılmaları yapılmıştır.

5.2 Betonarme Elemanların Zamana Bağlı Analizinde Kullanılan Hesap Yöntemleri

Betonarme bir elemanın zamana bağlı analizi, yapı ömrü süresince kritik noktalardaki şekil değiştirme, gerilme, eğrilik ve yer değiştirmelerin belirlenmesi esasına dayanır. Eğer yapının herhangi bir noktasındaki beton gerilmesi σ zamanla değişmiyor ise, her şekil değiştirme bileşenini aşağıdaki denklemle hesaplayabilmek mümkündür:

$$\varepsilon(t, \tau) = \frac{\sigma}{E_c(\tau)} + \frac{\sigma}{E_c(\tau)} \times \phi(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (5.1)$$

Eğer herhangi bir noktadaki beton gerilmesi σ zamanla değişiyor ise, sünme şekil değiştirmesinin belirlenmesi daha karmaşık bir hale gelir. Betonarme elemanlarda, sabit sürekli yük halinde bile gerilme değerleri nadiren sabittir. Bu nedenle, zamana bağlı şekil değiştirme hesaplarında denklem 3.1 kullanılamaz zira böylesi bir durumda gerilme geçimişi ve yaş etkilerinin de göz önüne alınması gerekir. Bu bölümde, betonarme elemanların zamana bağlı analizinde kullanılan bazı hesaplama yöntemlerinden söz edilecektir.

5.2.1 EM yöntemi

Faber tarafından geliştirilen yöntem, zamana bağlı analizde kullanılan en basit ve eski yöntemdir[3]. Bu yöntemde sünme şekil değiştirmesi gecikmiş elastik şekil değiştirme gibi düşünülür ve hesaplardaki etkisi beton elastisite modülü değerinin sünme katsayısı ile bölünmesi ile elde edilen etkili elastisite modülü değerinin kullanılmasıyla göz önüne alınmış olunur. Yöntem, hesaplarda beton elastisite modülü E_c yerine azaltılmış E_0 etkili elastisite modülünün kullanıldığı elastik bir hesaptan ibarettir.

$$\varepsilon(t, \tau) = \frac{\sigma}{E_c(\tau)} \times [1 + \phi(t, \tau)] + \varepsilon_{sh}(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (5.2)$$

Denklem 5.2 τ anında yüklenmeye başlanan bir betonarme elemanın kesitindeki şekil değiştirmeyi hesaplamak için kullanılır. Denklem 5.2 yukarıdaki gibi düzenlendiğinde ortaya çıkan E_0 ifadesi Mpa cinsinden betonun etkili elastisite modülü değeridir. Bu denklemde yer alan E_0 ifadesi etkili elastisite modülü olarak tanımlanır ve :

$$E_0(t, \tau) = \frac{E_c(\tau)}{1 + \phi(t, \tau)} \quad (5.3)$$

denklemi kullanılarak hesaplanır. Denklem 5.3' de yer alan $E_c(\tau)$ ifadesi yükün uygulandığı τ anında betonun elastisite modülünü gösterir. Denklemdeki $\phi(t, \tau)$ ifadesi ise betonun sünme katsayısı değerini gösterir.

Bu yöntemde gerilme sadece göz önüne alınan andaki mevcut gerilme değerine bağlıymış gibi düşünülür dolayısıyla gerilme geçmişi göz önüne alınmaz. Betonun yaş etkisi de ihmal edilmektedir. Gerçek davranışa bakıldığında bu iki durum söz konusu olmadığından yöntem, artarak değişen gerilme geçmişi halinde sünme etkisini olduğundan daha büyükmüş gibi tahmin ederken azalarak değişen bir gerilme geçmişi halinde ise sünme etkisi olduğundan az olarak tahmin edilir. Yöntem, aynı zamanda sünme şekil değiştirmesi davranışını bütünüyle elastik olarak kabul eder fakat gerçekte her zaman bu şekil değiştirmenin plastik bir bileşeni bulunmaktadır. Betondaki gerilmenin zamanla değişmediği, beton yaş etkisinin azaldığı bir zamanda ilk yükleme yapıldığı durumlarda bu yöntem iyi sonuçlar verir.

5.2.1.1 EM yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi

Çalışmanın bu bölümünde yöntemin prensipleri açıklanarak yöntemin 40x100 cm boyutlarındaki betonarme kolon için uygulaması yapılacaktır. Yöntemin uygulanmasında esas alınan üç temel koşul bulunmaktadır ve bu koşullar sırasıyla aşağıdaki gibidir:

a. Denge Koşulu:

Herhangi bir t anında betonda ve donatıda ortaya çıkacak iç kuvvetler uygulanan dış yük olan P' ye eşittir.

$$P = N_c(t) + N_s(t) \quad (5.4)$$

Denklem 5.4' te yer alan P kuvveti uygulanan toplam dış kuvveti gösterirken $N_c(t)$ ve $N_s(t)$ ise betonarme elemanın kesitinde dış yük etkisiyle sırasıyla beton ve donatıda ortaya çıkan iç kuvvetleri göstermektedir. Bu iç kuvvetler zamana bağlı olarak değişen fonksiyonlardır.

b. Uygunluk Koşulu

Herhangi bir t anında betondaki şekil değiştirme donatıdaki şekil değiştirmeye eşittir. Bu eşitlik,

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_s(t) \quad (5.5)$$

denkleminde ifade edilir. Denklem 5.5' de yer alan $\varepsilon(t)$ ve $\varepsilon_s(t)$ sırasıyla beton ve donatıdaki şekil değiştirmeyi gösterir ve bu iki ifade zamana bağlı fonksiyonlardır.

c. Gerilme – Şekil Değiştirme Bağlantısı

Betondaki gerilme – şekil değiştirme bağlantısı denklem 5.6.a ile verilmiştir. Donatıdaki gerilme – şekil değiştirme bağlantısı ise denklem 5.6.b ile verilmiş olup doğrusal elastik olduğu kabul edilir.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0(t)} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (5.6.a)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{\sigma_s(t)}{E_s} \quad (5.6.b)$$

Denge denklemi yeniden düzenlenirse:

$$P = \sigma(t) \times A_c + \sigma_s(t) \times A_s \quad \text{bağlantısı elde edilir.}$$

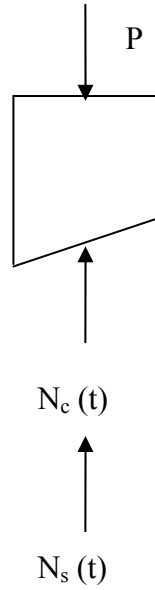
Bu bağıntı düzenlenirse:

$$\sigma_s(t) = \frac{P - \sigma(t) \times A_c}{A_s} \quad (5.7)$$

denklemini elde edilir. Donatıdaki gerilme olan $\sigma_s(t)$ 'yi hesaplamak için kullanılan Denklem 5.7' de yer alan P eksenel dış yükü, $\sigma(t)$ betondaki gerilmeyi, A_c ve A_s ise sırasıyla beton ve donatı kesit alanlarını gösterir. Bütün bu denklemlerden yararlanılarak herhangi bir t anında betondaki gerilmeyi hesaplayabilmek için aşağıdaki denklemden yararlanılır:

$$\sigma(t) = \frac{P}{A_c \times (1 + n' \times \rho)} - \frac{\varepsilon_{sh}(t) \times E_s \times \rho}{1 + n' \times \rho} \quad (5.8)$$

Herhangi bir t anında betondaki gerilme yukarıdaki denklemle hesaplandıktan sonra aynı t anında donatıdaki gerilme değerini hesaplamak mümkün olur. Donatıdaki gerilme hesaplandıktan sonra donatıdaki şekil değiştirme hesaplanır. Uygunluk koşulu gereği betondaki şekil değiştirme değeri de bu değere eşittir.



Şekil 5.1 : Eksenel yük etkisi altındaki betonarme kolon

Şekil 5.1' de $P = 2000$ kN' lik eksenel basınç kuvveti altında bulunan kolonda $N_c(t)$ ve $N_s(t)$ iç kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Bu iç kuvvetler sonucu 40×100 cm boyutlarındaki betonarme kolon kesitindeki gerilme ve şekil değiştirme değerleri EM yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Rötire şekil değiştirmelerinin başlangıç zamanı olarak kolonun ilk kez yüklenmeye başlandığı yaş olan $\tau_0 = 10$ gün seçilmiştir. Betonarme kolon C25 beton sınıfında olup donatı olarak S420 donatı çeliği seçilmiştir. Zamana bağlı analizde kullanılacak olan ve betonun sünme ve rötire

davranışının hesaplardaki etkisini göz önüne alan değerler ACI ve CEB – FIB yönetmeliklerinde yer alan yöntemler kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.1 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolonun malzeme ve kesit özellikleri

Kolon Boyutları [cm]	Beton Sınıfı	E_c [Mpa]	E_s [Mpa]	ρ
40X100	C25	24424	200000	0,013

Kullanılan yöntemler arasındaki farklılıklar elastisite modülü, sünme katsayısı ve rötre şekil değiştirmesi değerlerinin farklı olarak elde edilmesine yol açmıştır. Hesaplar ilk olarak ACI yöntemi kullanılarak yapılmış ve buradaki başlangıç değerleri Çizelge 5.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolonda sünme ve rötre değerleri

Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]
10	0,37	27	350	1,00	112	4000	1,25	131
20	0,49	45	400	1,05	121	4500	1,26	131
30	0,56	57	450	1,06	123	5000	1,26	131
40	0,62	66	500	1,08	123	6000	1,27	131
50	0,66	73	1000	1,15	128	7000	1,27	131
100	0,79	92	1500	1,19	129	8000	1,28	132
150	0,87	100	2000	1,21	130	9000	1,28	132
200	0,91	105	2500	1,22	130	10000	1,29	132
250	0,95	109	3000	1,24	131			
300	0,98	111	3500	1,24	131			

Çizelge 5.2’ de betonarme kolonun zamana bağlı hesabında kullanılacak olan sünme ve rötre değerleri ACI yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

İlk yüklenme anında yani $t - \tau = 0$ iken betonun elastisite modülü değerinde herhangi bir azaltma yapılmamış ve o günkü elastisite modülü değeri hesaplarda kullanılmıştır. Böylelikle uygulanan eksenel basınç kuvveti etkisiyle betonda ve donatıda ortaya çıkan başlangıç gerilmeleri elde edilmiştir. Bu amaçla denklem 5.8 kullanılarak betondaki başlangıç $\sigma(t)$ gerilmesi,

$$\sigma(\tau_0) = \frac{2000 \times 1000}{4000 \times 100 \times (1 + 8.189 \times 0.013)} = 4.53 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Betondaki başlangıç gerilmesinin elde edilmesinin ardından donatıdaki başlangıç gerilmesini hesaplamak da mümkün olur. Donatıdaki başlangıç gerilmesi denklem 5.7 kullanılarak donatıdaki başlangıç $\sigma_s(t)$ gerilmesi,

$$\sigma_s(\tau_0) = \frac{2000 \times 1000 - 4.53 \times 4000 \times 100}{5024} = 57.13 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Uygunluk koşulunun gereği olarak herhangi bir t anında donatıdaki şekil değiştirme betondakine eşittir. Donatı doğrusal elastik davranış gösterir ve denklem 5.6.b kullanılarak başlangıçta donatıdaki şekil değiştirme,

$$\varepsilon_s(\tau_0) = \frac{57.13}{200000} = 186 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu şekil değiştirme değeri aynı zamanda betondaki başlangıç şekil değiştirmesi değeridir. Böylelikle yükün uygulandığı andaki gerilme ve şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Başlangıç değerlerinin elde edilmesinin ardından zamana bağlı davranışın belirlenmesine geçilmiştir ve zamana bağlı yapılan hesapta sünme ve rötre etkileri göz önüne alınmıştır. Elastisite modülü değerinin azaltılmasıyla sünmenin hesaplar üzerinde etkisi gösterilmiştir. Yükleme süresi t – τ = 10 gün için etkili elastisite modülü değeri denklem 5.3 kullanılarak,

$$E_0(t) = \frac{24424}{1 + 0.37} = 17846 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

10 günlük yükleme süresi için betondaki gerilme denklem 5.8 kullanılarak,

$$\sigma(t) = \frac{2000 \times 1000}{4000 \times 100 - (1 + 11.207 \times 0.013)} - \frac{27 \times 10^{-6} \times 200000 \times 0.013}{1 + 11.207 \times 0.013} = 4.32 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Betondaki gerilme değeri elde edildikten sonra denklem 5.7 kullanılarak donatıdaki gerilme,

$$\sigma_s(t) = \frac{2000 \times 1000 - 4.32 \times 4000 \times 100}{5024} = 53.94 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton ve donatıdaki gerilme değerlerinin hesaplanmasının ardından denklem 5.6.b kullanılarak donatıdaki dolayısıyla betondaki şekil değiştirme değeri,

$$\varepsilon_s(t) = \frac{53.94}{200000} = 270 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

Yükleme Süresi [gün]	E ₀ [Mpa]	n'	φ	ε _{sh} [x10 ⁻⁶]	σ(t) [Mpa]	σ _s (t) [Mpa]	ε _s (t) = ε(t)
10	17846	11,207	0,37	27	4,32	53,94	270
20	16423	12,178	0,49	45	4,24	60,62	303
30	15626	12,799	0,56	57	4,18	64,97	325
40	15091	13,253	0,62	66	4,14	68,12	341
50	14698	13,607	0,66	73	4,11	70,54	353
100	13616	14,689	0,79	92	4,03	77,48	387
150	13088	15,281	0,87	100	3,98	80,93	405
200	12760	15,674	0,91	105	3,96	83,07	415
250	12531	15,960	0,95	109	3,94	84,56	423
300	12360	16,181	0,98	111	3,92	85,66	428
350	12226	16,359	1,00	112	3,91	86,51	433
400	11922	16,776	1,05	121	3,88	89,35	447
450	11832	16,904	1,06	123	3,87	89,94	450
500	11755	17,014	1,08	123	3,86	90,44	452
1000	11340	17,637	1,15	128	3,83	93,09	465
1500	11158	17,924	1,19	129	3,82	94,23	471
2000	11051	18,098	1,21	130	3,81	94,89	474
2500	10979	18,217	1,22	130	3,80	95,33	477
3000	10926	18,305	1,24	131	3,80	95,65	478
3500	10886	18,373	1,24	131	3,80	95,89	479
4000	10853	18,428	1,25	131	3,79	96,09	480
4500	10827	18,473	1,26	131	3,79	96,25	481
5000	10804	18,511	1,26	131	3,79	96,38	482
6000	10769	18,572	1,27	131	3,79	96,60	483
7000	10741	18,620	1,27	131	3,78	96,76	484
8000	10720	18,657	1,28	132	3,78	96,89	484
9000	10702	18,689	1,28	132	3,78	96,99	485
10000	10687	18,715	1,29	132	3,78	97,08	485

İki aşaması detaylı olarak gösterilen hesaplar sonraki yüklem süreleri için yapıldığında çizelge 5.3’ deki sonuçlar elde edilmiştir.

Hesaplar aynı zamanda CEB – FIB’ e göre hesaplanan sünme katsayısı ve rötre değerleri kullanılarak da yapılmıştır.

Çizelge 5.4 : CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolonda sünme ve rötre değerleri

Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]
10	0,65	27	350	1,67	150	4000	2,21	346
20	0,79	38	400	1,72	159	4500	2,23	354
30	0,89	46	450	1,75	167	5000	2,23	362
40	0,97	53	500	1,79	175	6000	2,25	373
50	1,03	59	1000	1,98	231	7000	2,26	382
100	1,25	83	1500	2,07	266	8000	2,27	389
150	1,38	101	2000	2,12	291	9000	2,27	395
200	1,48	116	2500	2,16	310	10000	2,28	400
250	1,56	129	3000	2,18	324			
300	1,62	140	3500	2,20	336			

CEB – FIB yöntemi kullanılarak elde edilen sünme katsayısı ve rötre şekil değiştirmesi değerleri zamana bağlı hesapta kullanılmak üzere elde edilmiştir ve bu değerler Çizelge 5.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

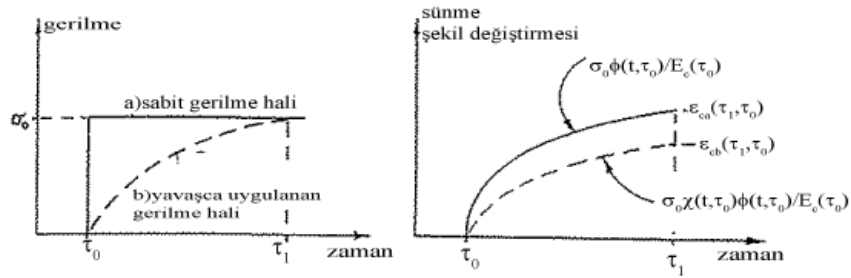
Yükleme Süresi [gün]	E_0 [Mpa]	n'	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	$\sigma(t)$ [Mpa]	$\sigma_s(t)$ [Mpa]	$\epsilon_s(t) = \epsilon(t)$
10	14824	13,491	0,65	27	4,22	62,26	311
20	13615	14,689	0,79	38	4,14	68,39	342
30	12903	15,500	0,89	46	4,09	72,60	363
40	12402	16,126	0,97	53	4,05	75,91	380
50	12018	16,642	1,03	59	4,01	78,65	393
100	10872	18,395	1,25	83	3,89	88,25	441
150	10253	19,507	1,38	101	3,81	94,60	473
200	9844	20,317	1,48	116	3,75	99,40	497
250	9548	20,947	1,56	129	3,70	103,27	516
300	9321	21,458	1,62	140	3,66	106,52	533
350	9139	21,884	1,67	150	3,63	109,31	547
400	8991	22,245	1,72	159	3,60	111,76	559
450	8866	22,557	1,75	167	3,57	113,94	570
500	8760	22,830	1,79	175	3,54	115,90	579
1000	8189	24,423	1,98	231	3,38	128,76	644
1500	7950	25,156	2,07	266	3,29	135,99	680
2000	7818	25,582	2,12	291	3,23	140,82	704
2500	7734	25,861	2,16	310	3,19	144,34	722
3000	7675	26,058	2,18	324	3,15	147,03	735
3500	7632	26,205	2,20	336	3,13	149,18	746
4000	7599	26,319	2,21	346	3,10	150,93	755
4500	7573	26,410	2,23	354	3,09	152,38	762
5000	7552	26,484	2,23	362	3,07	153,62	768
6000	7520	26,597	2,25	373	3,05	155,60	778
7000	7496	26,680	2,26	382	3,03	157,12	786
8000	7478	26,743	2,27	389	3,01	158,33	792
9000	7465	26,793	2,27	395	3,00	159,32	797
10000	7453	26,834	2,28	400	2,99	160,13	801

CEB – FIB yöntemi kullanılarak elde edilen sünme katsayısı ve rötre şekil değiştirmesi değerleriyle betonarme kolon kesitinde yapılan zamana bağlı analiz

sonucunda beton ve donatıda elde edilen gerilme – şekil değıştirme değeri Çizelge 5.5’ de gösterilmiştir.

5.2.2 AEM yöntemi

EM yönteminden farklı olarak betonun yaş etkisinin de göz önüne alındığı bir yöntemdir.



Şekil 5.2 : Sabit ve aşamalı yükleme durumlarındaki sünme davranışı

Şekil 5.2’ de iki farklı biçimde yüklenen numunelerin gerilme – zaman ve sünme şekil değıştirmesi – zaman grafikleri gösterilmiştir[3]. İlk durumda τ_0 anında σ_0 gerilmesiyle yüklenen bir numune diğer durumda ise τ_0 anında yüklenmeye başlanan numune τ_1 anında σ_0 gerilmesine ulaşıncaya kadar yüklenmiştir. Bunun sonucunda τ_0 ‘ dan büyük herhangi bir t anında ilk durumda yüklenen numunede ikinci durumda yüklenen numuneden daha büyük sünme şekil değıştirmesi ölçülmüştür. Bunun sebebi betondaki yaş etkisi olup numune ne kadar erken yüklenmeye başlanırsa ölçülecek sünme şekil değıştirmesi de o kadar büyük olacaktır. Dolayısıyla yavaşça yüklenen bir numunenin sünme şekil değıştirmesi hesabında azaltıcı bir katsayı kullanılmalıdır. Kullanılması gereken bu katsayıya yaş katsayısı denir, $\chi(t, \tau_0)$ ile gösterilir ve alabileceği değeri genellikle 0,6 ila 0,9 arasında değışir. Yaş katsayısı tıpkı sünme katsayısı gibi ilk yükleme anındaki beton yaşına, yük uygulama süresine, eleman şekil ve boyutları gibi faktörlere bağlıdır. Herhangi bir t anında $t-\tau_0$ süresi boyunca yavaşça uygulanan $\sigma(t)$ gerilmesi etkisiyle ortaya çıkacak sünme şekil değıştirmesi,

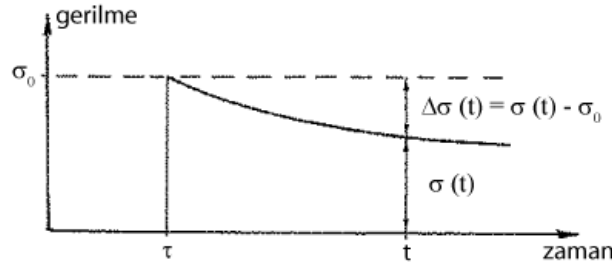
$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)}{E_c(t)} \times \chi(t, \tau_0) \times \phi(t, \tau_0) \quad (5.9)$$

denklemini kullanarak hesaplanır. Denklem 5.9’ da yer alan ε_c ifadesi sünme şekil değıştirmesini gösterirken $\sigma(t)$, $E_c(t)$, $\chi(t, \tau_0)$ ve $\phi(t, \tau_0)$ sırasıyla t anındaki gerilme, elastisite modülü, yaş katsayısı ve sünme katsayısı değeri gösterir. Betonda yaş etkisinin göz önüne alınmasıyla EM yönteminde kullanılan etkili

elastisite modülü kavramının yerini yaş düzeltilmesi yapılmış etkili elastisite modülü kavramı alır. Bu değeri hesaplayabilmek için,

$$E_0'(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0) \times \phi(t, \tau_0)} \quad (5.10)$$

denklemini kullanılır. Denklem 5.10 kullanılarak EM yönteminde olduğu gibi herhangi bir t anındaki elastisite modülü değeri azaltılır fakat bu azaltma sırasında betonun yaş etkisi de göz önüne alınır.



Şekil 5.3 : Yavaşça azalan gerilme geçmişi durumu

Şekil 5.3' de, τ_0 anında uygulanan σ_0 gerilmesi zamanla yavaşça azalmaktadır[3]. Zamanla görülen bu gerilme azalması dış yüklere, sünme ve rötreyi engelliyici faktörlere, sıcaklığa veya bütün bu etkilerin toplamına bağlı olabilir. Böyle bir gerilme geçmişine sahip bir numune için herhangi bir t anında sünme şekli değiştirmesi hesaplanmak istenirse,

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \times [1 + \phi(t, \tau_0)] + \frac{\Delta\sigma(t)}{E_c(\tau_0)} \times [1 + \chi(t, \tau_0) \times \phi(t, \tau_0)] + \varepsilon_{sh}(t) \quad (5.11)$$

denkleminde yararlanılır. Denklem 5.11 düzenlenirse,

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0'(t, \tau_0)} + \frac{\Delta\sigma(t)}{E_0'(t, \tau_0)} + \varepsilon_{sh}(t)$$

halini alır. AEM yöntemiyle hesap yapılırken denge koşulları ve uygunluk şartları EM yönteminde olduğu gibidir. Gerilme – şekil değiştirme ilişkisi ise beton için,

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0(t)} + \frac{\Delta\sigma(t)}{E_0'(t)} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (5.12)$$

denkleminde ifade edilir. Donatıdaki gerilme – şekil değiştirme ilişkisi EM yöntemindeki gibi düşünülür. Başlangıçtaki gerilme değeri EM yönteminde olduğu gibi hesaplanır. Sünme ve rötre etkisiyle gerilmede meydana gelen değişimi gösteren $\Delta\sigma(t)$ gerilmesi problemin bilinmeyenini oluşturur. Herhangi bir t anındaki beton gerilmesi,

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \Delta\sigma(t) \quad (5.13)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Yöntem kullanılarak hesaplanan betonda zamanla görülen gerilme değişimi olan $\Delta\sigma(t)$ denklem 5.13' de yerine konulursa sözü geçen t anında betondaki gerilme değerini hesaplayabilmek mümkün olur. Aynı t anında donatıdaki gerilme hesaplayabilmek için denklem 5.7 kullanılır.

AEM yöntemi de EM yöntemi gibi elastik hesap esasına dayanır. Betondaki gerilmenin zamanla değişimi olan $\Delta\sigma(t)$ değeri,

$$\Delta\sigma(t) = \frac{1}{1 + n'' \times \rho} \times \left[\frac{P}{A_c} - \sigma_0 \times (1 + n' \times \rho) - \varepsilon_{sh}(t) \times E_s \times \rho \right] \quad (5.14)$$

denklemi kullanılarak hesaplanır. Denklem 5.14' de yer alan n' ifadesi kullanılan donatının elastisite modülü değerinin yaş düzeltilmesi yapılmış beton elastisite modülü değerine oranıdır ve,

$$n'' = \frac{E_s}{E'_0(t)} \quad (5.15)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Betondaki gerilme azalmasının zamanla değişiminin hesaplanmasıyla herhangi bir t anında donatıda ve betondaki gerilme değerlerini elde etmek mümkün olur.

5.2.2.1 AEM yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi

Çalışmanın bu bölümünde, EM yöntemi kullanılarak zamana bağlı analizi yapılan betonarme kolon kesiti üzerinde AEM yönteminin uygulaması yapılmıştır. Böylelikle daha önceden belirlenmiş zaman aralıkları için betonarme kolon kesitinde, uygulanan dış yük etkisiyle betonda ve donatıda ortaya çıkan gerilme – şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Yöntem prensip olarak EM yöntemiyle aynıdır; bu yöntemde de üç temel koşulun sağlanması gerekir.

AEM yönteminde EM yönteminden farklı olarak yaş katsayısı olan $\chi(t, \tau_0)$ değeri kullanılarak betonun yaş etkisi göz önüne alınmıştır. Yapılan hesaplarda bu değer 0.8 olarak alınmıştır. Böylelikle EM yöntemindeki etkili elastisite modülü kavramının yerini yaş düzeltilmesi yapılmış etkili elastisite modülü kavramı almıştır.

İlk yükleme anında beton ve donatıda ortaya çıkacak gerilme ve şekil değiştirme değerleri bir farklılık göstermez zira ilk yükleme anında sünme ve rötre değerlerinin sıfır olduğu kabul edilir. Dolayısıyla $t - \tau_0 = 0$ için aşağıdaki değerler geçerlidir,

$$\sigma(\tau_0) = 4.53 \text{ Mpa} \quad \sigma_s(\tau_0) = 57.13 \text{ Mpa} \quad \varepsilon_s(\tau_0) = \varepsilon(\tau_0) = 186 \times 10^{-6}$$

İlk yükleme anında beton ve donatıdaki başlangıç gerilme ve şekil değiştirmeleri bilindiğinden zamana bağlı hesabın yapılmasına geçilmiştir. İlk olarak $t - \tau_0 = 10$ gün için hesap yapılmıştır. Zamana bağlı yapılan hesap ilk olarak ACI yöntemi kullanılarak elde edilen sünme katsayısı ve rötre şekil değiştirmesi değerleri kullanılarak yapılmıştır.

İlk olarak yaş düzeltilmesi yapılmış elastisite modülü değeri hesaplanmıştır. Bu amaçla denklem 5.10 kullanılarak,

$$E'_0(t) = \frac{24424}{1 + 0.8 \times 0.369} = 18862 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Kullanılan donatının elastisite modülü ile hesapta kullanılacak beton elastisite modülü arasındaki oran olan n'' değeri ise denklem 5.15 kullanılarak,

$$n'' = \frac{200000}{18862} = 10.604$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu başlangıç değerlerinin belirlenmesinin ardından yükleme süresi 10 gün olarak düşünülerek hesap yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak betonda zamanla görülecek olan gerilme azalması $\Delta\sigma(t)$ hesaplanmıştır. Betondaki gerilme değişimini ifade eden $\Delta\sigma(t)$ değeri denklem 5.14 kullanılarak,

$$\Delta\sigma(t) = \frac{1}{1 + 10.604 \times 0.013} \times \left[\frac{2000 \times 1000}{4000 \times 100} - 4.53 \times (1 + 11.207 \times 0.013) - 27 \times 10^{-6} \times 200000 \times 0.013 \right] = -0.83 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Betondaki gerilme azalması belirlendikten sonra denklem 5.13 kullanılarak toplam beton gerilmesi,

$$\sigma(t) = 4.53 - 0.83 = 3.71 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Betondaki gerilme değerinin hesaplanmasının ardından donatıdaki gerilme değeri denklem 5.7 kullanılarak,

$$\sigma_s(t) = \frac{2000 \times 1000 - 3.71 \times 4000 \times 100}{5024} = 103.10 \text{ Mpa} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Donatıdaki gerilme değerinin hesaplanmasının ardından denklem 5.6.b kullanılarak,

$$\varepsilon_s(t) = \frac{103.10}{200000} = 515 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu şekil değiştirme değeri uygunluk koşulu gereği betondaki şekil değiştirme değerine eşittir dolayısıyla betondaki şekil değiştirme değeri $\varepsilon(t) = 515 \times 10^{-6}$ olarak bulunur.

Betondaki mevcut gerilmenin hesaplanmasının ardından ani şekil değiştirme değeri ε_e değeri,

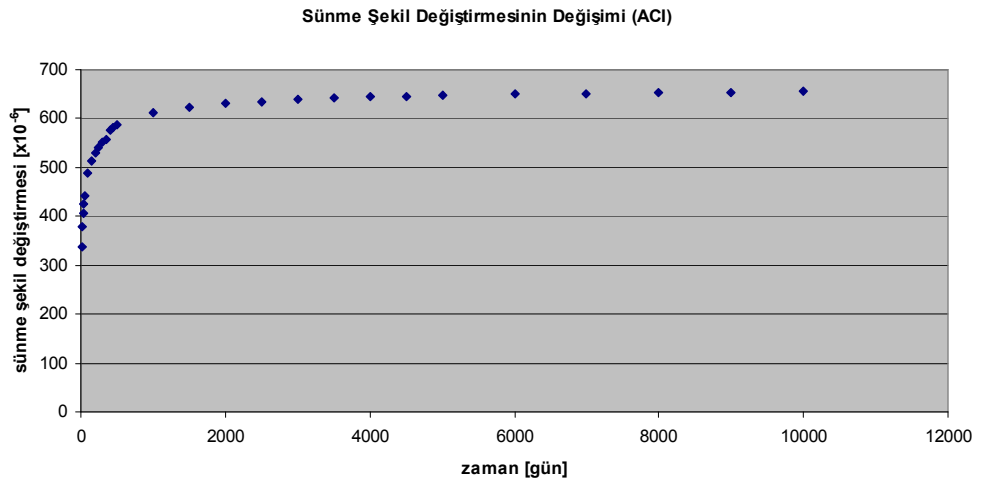
$$\varepsilon_e = \frac{3.71}{24424} = 152 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Söz konusu t anındaki rötre şekil değiştirmesi $\varepsilon_{sh} = 27 \times 10^{-6}$ olduğundan sünme şekil değiştirmesi toplam şekil değiştirme değerinden bu iki şekil değiştirme değerinin çıkarılmasıyla elde edilmiş ve,

$$\varepsilon_c(t) = (515 - 152 - 27) = 336 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.4 : AEM yöntemiyle elde edilen sünme şekil değıştirmesi değışimi

Daha sonraki yükleme süreleri için yapılan hesaplar sonucu elde edilen sünme şekil değiştirmesi değerlerinin değişimi Şekil 5.4’ de grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

Yükleme Süresi [gün]	E_0 [Mpa]	E_0' [Mpa]	n'	n''	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	$\Delta\sigma$ (t) [Mpa]	$\sigma(t)$ [Mpa]	σ_s (t) [Mpa]	ϵ_s (t) = $\epsilon(t)$
10	17846	18862	11,207	10,604	0,37	27	-0,83	3,71	103,10	515
20	16423	17574	12,178	11,380	0,49	45	-0,97	3,57	114,00	570
30	15626	16839	12,799	11,877	0,56	57	-1,06	3,48	121,12	606
40	15091	16340	13,253	12,240	0,62	66	-1,12	3,41	126,33	632
50	14698	15970	13,607	12,524	0,66	73	-1,17	3,36	130,36	652
100	13616	14938	14,689	13,389	0,79	92	-1,32	3,21	142,23	711
150	13088	14427	15,281	13,863	0,87	100	-1,40	3,14	148,38	742
200	12760	14108	15,674	14,177	0,91	105	-1,45	3,09	152,29	761
250	12531	13883	15,960	14,406	0,95	109	-1,48	3,05	155,06	775
300	12360	13715	16,181	14,583	0,98	111	-1,51	3,03	157,15	786
350	12226	13583	16,359	14,725	1,00	112	-1,53	3,01	158,79	794
400	11922	13282	16,776	15,058	1,05	121	-1,59	2,94	163,67	818
450	11832	13192	16,904	15,161	1,06	123	-1,60	2,93	164,83	824
500	11755	13116	17,014	15,249	1,08	123	-1,62	2,92	165,82	829
1000	11340	12701	17,637	15,747	1,15	128	-1,68	2,85	171,22	856
1500	11158	12518	17,924	15,977	1,19	129	-1,71	2,82	173,61	868
2000	11051	12410	18,098	16,116	1,21	130	-1,73	2,80	175,03	875
2500	10979	12337	18,217	16,211	1,22	130	-1,74	2,79	175,99	880
3000	10926	12284	18,305	16,281	1,24	131	-1,75	2,78	176,69	883
3500	10886	12243	18,373	16,336	1,24	131	-1,76	2,77	177,23	886
4000	10853	12210	18,428	16,380	1,25	131	-1,77	2,77	177,66	888
4500	10827	12183	18,473	16,416	1,26	131	-1,77	2,76	178,02	890
5000	10804	12161	18,511	16,447	1,26	131	-1,77	2,76	178,31	892
6000	10769	12124	18,572	16,496	1,27	131	-1,78	2,75	178,79	894
7000	10741	12097	18,620	16,533	1,27	131	-1,78	2,75	179,16	896
8000	10720	12075	18,657	16,564	1,28	132	-1,79	2,75	179,45	897
9000	10702	12056	18,689	16,589	1,28	132	-1,79	2,74	179,69	898
10000	10687	12041	18,715	16,610	1,29	132	-1,79	2,74	179,89	899

Yükleme süresinin 10 gün olduğu düşünülerek başlanan zamana bağlı hesap diğer yükleme süreleri için de yapılmıştır. Gerilme azalması, betondaki ve donatıdaki gerilme – şekil değiştirme değerlerinin zaman içerisindeki değişimi Çizelge 5.6’ da gösterilmiştir.

Çizelge 5.4’ de gösterilen değerlerden yararlanılarak betonarme kolon kesitinin zamana bağlı hesabı CEB – FIB’ e göre de yapılmıştır.

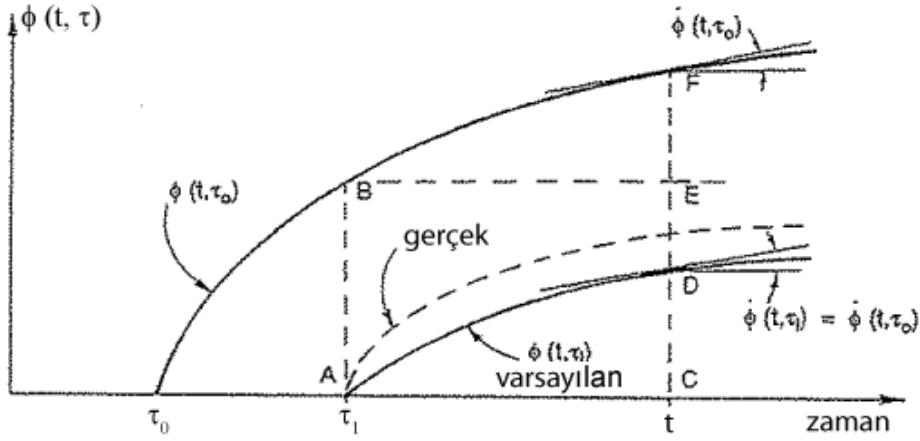
Çizelge 5.7 : CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

Yükleme Süresi [gün]	E_0 [Mpa]	E_0' [Mpa]	n'	n''	ϕ	ε_{sh} [$\times 10^{-6}$]	$\Delta\sigma$ (t) [Mpa]	σ (t) [Mpa]	σ_s (t) [Mpa]	ε_s (t) = ε (t)
10	14824	16089	13,491	12,431	0,65	27	-1,04	3,49	120,28	601
20	13615	14937	14,689	13,389	0,79	38	-1,18	3,35	131,46	657
30	12903	14247	15,500	14,038	0,89	46	-1,28	3,25	139,18	696
40	12402	13756	16,126	14,539	0,97	53	-1,36	3,18	145,23	726
50	12018	13377	16,642	14,951	1,03	59	-1,42	3,11	150,27	751
100	10872	12229	18,395	16,354	1,25	83	-1,64	2,89	167,90	840
150	10253	11599	19,507	17,243	1,38	101	-1,79	2,74	179,55	898
200	9844	11179	20,317	17,891	1,48	116	-1,90	2,63	188,33	942
250	9548	10872	20,947	18,395	1,56	129	-1,99	2,55	195,39	977
300	9321	10636	21,458	18,804	1,62	140	-2,06	2,47	201,28	1006
350	9139	10447	21,884	19,145	1,67	150	-2,13	2,41	206,32	1032
400	8991	10291	22,245	19,434	1,72	159	-2,18	2,35	210,72	1054
450	8866	10161	22,557	19,684	1,75	167	-2,23	2,30	214,61	1073
500	8760	10049	22,830	19,902	1,79	175	-2,27	2,26	218,09	1090
1000	8189	9445	24,423	21,176	1,98	231	-2,55	1,98	240,51	1203
1500	7950	9190	25,156	21,762	2,07	266	-2,71	1,83	252,68	1263
2000	7818	9048	25,582	22,103	2,12	291	-2,81	1,73	260,64	1303
2500	7734	8958	25,861	22,327	2,16	310	-2,88	1,65	266,35	1332
3000	7675	8895	26,058	22,484	2,18	324	-2,93	1,60	270,67	1353
3500	7632	8849	26,205	22,602	2,20	336	-2,98	1,56	274,08	1370
4000	7599	8813	26,319	22,693	2,21	346	-3,01	1,52	276,84	1384
4500	7573	8785	26,410	22,766	2,23	354	-3,04	1,49	279,13	1396
5000	7552	8762	26,484	22,825	2,23	362	-3,06	1,47	281,07	1405
6000	7520	8728	26,597	22,916	2,25	373	-3,10	1,43	284,15	1421
7000	7496	8702	26,680	22,982	2,26	382	-3,13	1,40	286,51	1433
8000	7478	8683	26,743	23,033	2,27	389	-3,16	1,38	288,37	1442
9000	7465	8668	26,793	23,072	2,27	395	-3,17	1,36	289,88	1449
10000	7453	8656	26,834	23,105	2,28	400	-3,19	1,34	291,13	1456

CEB – FIB yönetmeliğinden yararlanılarak elde edilen sünme ve rötre değerleri kullanılarak yapılan zamana bağlı hesap ile elde edilen gerilme – şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.7 ile gösterilmiştir.

5.2.3 RC yöntemi

Bu yöntem, sünmedeki zamanla değişimin ilk yüklenme anındaki beton yaşı olan τ' dan bağımsız olduğu kabulüne dayanır. Bu kabul de farklı zamanlarda yüklenen numunelerin sünme eğrilerinin birbirine paralel olacağı sonucunu doğurur. Sünme eğrisinin yüklenme yaşından bağımsız düşünülmesi herhangi bir gerilme geçmişi için tek bir sünme eğrisinin kullanılabilmesi kolaylığını sağlar.



Şekil 5.5 : RC yönteminde kullanılan paralel sünme eğrileri

Şekil 5.5’ deki birbirine paralel sünme eğrilerinde EF ve CD doğrularının birbirine eşit oldukları kabul edilir, $CD = CF - AB$ ’ dir. Bu eşitlik, $\phi(t, \tau_i) = \phi(t, \tau_0) - \phi(\tau_i, \tau_0)$ olarak da ifade edilebilir[3]. Böylelikle herhangi bir τ_i anında uygulanan gerilme sonucunda ortaya çıkan sünme – zaman eğrisi $\phi(t, \tau_0)$ gibi tek bir sünme eğrisiyle ifade edilebilir. Burada τ_0 , ilk yükleme anındaki beton yaşını gösterir. Dolayısıyla herhangi bir τ_i anında uygulanan σ_i büyüklüğündeki sabit gerilme etkisiyle herhangi bir t anında ortaya çıkan sünme şekil değiştirmesi,

$$\varepsilon_c(t, \tau_i) = \frac{\sigma_i}{E_c(\tau_0)} \times \phi(t, \tau_i) = \frac{\sigma_i}{E_c(\tau_0)} \times [\phi(t, \tau_0) - \phi(\tau_i, \tau_0)] \quad (5.16)$$

denklemini kullanılarak hesaplanabilir. τ_i anında yüklenen bir numunenin hesaplanma İlk yüklemmeden sonra t_1 ve t_2 zaman aralıkları arasında sünme şekil değiştirmesindeki değişim,

$$\Delta \varepsilon_c(t, \tau_i) = \varepsilon_c(t_2, \tau_i) - \varepsilon_c(t_1, \tau_i) = \frac{\sigma_i}{E_o} \times [\phi(t_2, \tau_0) - \phi(t_1, \tau_0)] \quad (5.17)$$

denklemini yardımıyla hesaplanabilir.

Sürekli olarak değişen bir gerilme geçmişi δt gibi küçük aralıklara bölünüp her aralıkta $\sigma(t)$ gerilmesinin sabit olduğu düşünülürse, sünme şekil değiştirmesindeki değişim denklem 5.17 kullanılarak hesaplanabilir. Limit halde δt sıfıra yaklaşırken sünmedeki artım sadece o andaki mevcut gerilmeye ve o andaki sünme

katsayısındaki artıma bağlı olur ve $\frac{d\varepsilon_c}{dt} = \frac{\sigma(t)}{E_c(\tau)} \times \frac{d\phi(t, \tau_0)}{dt}$ ya da

$$\dot{\varepsilon}_c(t, \tau) = \frac{\sigma(t)}{E_c(t)} \times \dot{\phi}(t, \tau_0) \text{ bağıntısıyla gösterilir.}$$

Herhangi bir anda ani elastik şekil değiştirmedeki artım gerilmedeki artıma bağlıdır

$$\text{ve } \frac{d\varepsilon_0(t)}{dt} = \frac{1}{E_c(\tau_0)} \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad \text{ya da } \dot{\varepsilon}_0(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_c(\tau_0)} \text{ bağıntısıyla gösterilir.}$$

Rötrenin de sünme gibi aynı büyüklükte artımlara sahip olduğu kabul edilir. Bunun

$$\text{matematiksel ifadesi, } \varepsilon_{sh}(t) = \frac{\varepsilon_{sh}(\infty)}{\phi(\infty, \tau_0)} \times \phi(t, \tau_0) \text{ şeklindedir. } \phi(\infty, \tau_0) \text{ ve } \varepsilon_{sh}(\infty)$$

ifadeleri sırasıyla sünme ve rötre değerlerinin ulaşacakları sınır değerleri gösterir.

Rötrenin zamanla artımının matematiksel ifadesi ise,

$$\dot{\varepsilon}_{sh}(t) = \frac{\varepsilon_{sh}(\infty)}{\phi(\infty, \tau_0)} \times \dot{\phi}(t, \tau_0) = \frac{\dot{\varepsilon}_{sh}}{\dot{\phi}(\tau_0)} \times \dot{\phi}(t, \tau_0)$$

şeklindedir.

Her üç şekil değiştirmedeki artımların elde edilmesiyle toplam şekil değiştirmedeki artım,

$$\dot{\varepsilon}(t, \tau) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_c(\tau_0)} + \dot{\phi}(t, \tau_0) \times \left[\frac{\sigma(t)}{E_c(\tau_0)} + \frac{\varepsilon_{sh}}{\phi(\tau_0)} \right] \quad (5.18)$$

diferansiyel denklemiyle hesaplanır.

Matematik açıdan gelişmiş bir yöntem gibi görünse de RCM birçok eksiklik içerir. İleri beton yaşlarında yapılan analizlerde sünme şekil değiştirmelerini olması gerekenden daha az tahmin eder. İlerleyen zamanla birlikte sünme katsayısındaki artım sıfıra yaklaşır bu da RCM'ye göre sünme şekil değiştirmesindeki değişimin sıfıra yaklaşması demektir. Daha erken yaşlardaki bir betondan az olsa bile beton ileri yaşlarda da sünme davranışı gösterir. Dolayısıyla artan bir gerilme geçmişi durumunda yöntem sünme şekil değiştirmelerinin olduğundan daha az hesaplanmasına neden olur. Bu hata, eğer gerilmedeki değişimler önemli boyutlardaysa daha da büyüyecektir. Buna ek olarak yönteme göre gerilme kaldırıldığında, sünmedeki değişimin sıfırlandığı kabul edilmektedir, plastik şekil değiştirmeler göz önüne alınmaz. Bu nedenle, azalan gerilme geçmişi durumunda sünme şekil değiştirmeleri olduğundan daha fazla hesaplanır. Gerilmenin büyük değişimler göstermediği durumlarda ve daha erken beton yaşlarında yöntemin iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

5.2.3.1 RC yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi

Yöntem diferansiyel denklemler kullanılarak ifade edildiğinden diğer yöntemlerde yararlanılan ana denklemler diferansiyel olarak ifade edilmiştir. Sağlanması gereken şartlar diğer yöntemlerde olduğu gibi üç tanedir,

a) Denge Şartı:

Diğer yöntemlerde kullanılan denge denklemi diferansiyel olarak yazılırsa,

$$\dot{P} = \dot{N}_c + \dot{N}_s = \dot{\sigma} \times A_c + \dot{\sigma}_s \times A_s = 0 \quad (5.19)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Uygulanan P kuvveti sabit olduğundan bu kuvvetin diferansiyeli sıfıra eşit olacaktır ve bu da denklem 5.19' un sağ tarafını sıfır yapar.

b) Uygunluk Koşulu

Herhangi bir t anında uygulanan dış yük etkisiyle betonda görülecek şekil değiştirme donatıdakine eşittir prensibi burada şekil değiştirmede görülen değişim için düşünülür ve dolayısıyla $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_s$ olur.

c) Gerilme – Şekil Değiştirme Bağıntısı

Betondaki gerilme – şekil değiştirme bağıntısı,

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E_c} + \dot{\phi}_0 \times \left[\frac{\sigma}{E_c} + \frac{\varepsilon_{sh}}{\phi_0} \right] \quad (5.20)$$

diferansiyel denklemi kullanılarak ifade edilir. Donatıdaki gerilme – şekil değiştirme bağıntısı ise,

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{\dot{\sigma}_s}{E_s} \quad (5.21)$$

diferansiyel denkleminle ifade edilir. Burada $\dot{\phi}_0 = \dot{\phi}(t, \tau)$, $\dot{\varepsilon}_{sh} = \dot{\varepsilon}_{sh}(\infty)$, $\phi_0 = \phi(\infty, \tau_0)$ olarak düşünülür. Yöntemin uygulanmasında kullanılan iki denklem bulunmaktadır. İlk olarak bir S gerilmesi hesaplanır. Bu S gerilmesi,

$$S = \frac{\varepsilon_{sh}^* \times E_c}{\phi_0^*} \quad (5.22)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Denklem 5.22’ de yer alan ε_{sh}^* ve ϕ_0^* ifadeleri rötre ve sünme şekil değiştirmelerinin alacağı maksimum sınır değerleridir. Bu ifadenin hesaplanmasının ardından herhangi bir t anında betondaki gerilmeyi elde etmek mümkündür. Herhangi bir t anında betondaki gerilme,

$$\sigma(t) = [(\sigma(\tau_0) + S)] \times e^{\frac{-n \times \rho}{1+n \times \rho} \times \phi(t, \tau_0)} - S \quad (5.23)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Betondaki gerilme hesaplandıktan sonra denklem 5.7 kullanılarak donatıdaki gerilme hesaplanır. Beton ve donatıdaki gerilme değerlerinin elde edilmesinin ardından hesaplanır. Donatıdaki gerilme değeri elde edildikten sonra da donatıdaki şekil değiştirme, gerilme - şekil değiştirme bağıntısı yardımıyla hesaplanır.

Hesaplar 40x100 cm’ lik betonarme kolon kesiti için yapılmıştır. İlk yükleme anında betondaki gerilme değeri $\sigma(\tau_0) = 4.53 \text{ Mpa}$ ’ dır. Yapılan zamana bağlı hesapta ilk olarak denklem 5.23’ de yer alan sabitler hesaplanmıştır. Bu sabitlerden biri,

$$\frac{n \times \rho}{1 + n \times \rho} = \frac{8.189 \times 0.013}{1 + 8.189 \times 0.013} = 0.093$$

olarak hesaplanmıştır.

Sabitlerden bir diğeri ise S gerilmesi olarak ifade edilmiş ve denklem 5.22 kullanılarak,

$$S = \frac{132 \times 10^{-6} \times 24424}{1.285} = 2.50 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

İlk yükleme anında beton ve donatıda ortaya çıkan gerilme – şekil değiştirme değerleri diğer yöntemlerdeki değerlerden farklı değildir. Dolayısıyla bu değerler,

$$\sigma(\tau_0) = 4.53 \text{ Mpa} \quad \sigma_s(\tau_0) = 57.13 \text{ Mpa} \quad \varepsilon_s(\tau_0) = \varepsilon(\tau_0) = 186 \times 10^{-6}$$

şeklindedir.

RC yöntemi kullanılarak ilk olarak 10 günlük yükleme süresi için hesap yapılmıştır. Hesapta kullanılan sünme ve rötre değerleri ACI yöntemiyle hesaplanan değerlerdir ve bu değerler Çizelge 5.2’ den alınmıştır. 10 günlük yükleme süresi için çizelgeden okunan değerler denklem 5.23’ de yerine konulduğunda betondaki gerilme değeri,

$$\sigma(t) = [4.53 + 2.50] \times e^{-0.093 \times 0.369} - 2.50 = 4.30 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Betondaki gerilme değerinin hesaplanmasından sonra donatıdaki gerilmeyi bulmak için denklem 5.7 kullanılmıştır ve böylece donatıdaki gerilme değeri,

$$\sigma_s(t) = \frac{2000 \times 1000 - (4.30 \times 4000 \times 100)}{5024} = 56.06 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton ve donatıdaki gerilme değerlerinin hesaplanmasının ardından donatıdaki dolayısıyla betondaki toplam şekil değiştirmeyi hesaplamak için denklem 5.6.b' den yararlanılmış ve bu değer,

$$\varepsilon_s(t) = \frac{56.06}{200000} = 280 \times 10^{-6}$$

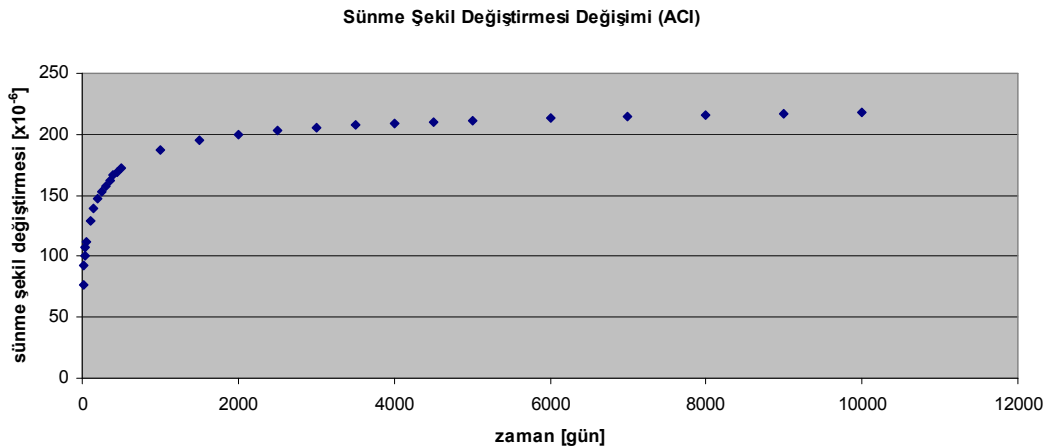
olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu şekil değiştirme değeri uygunluk koşulu gereği aynı zamanda betondaki toplam şekil değiştirme değerine eşittir. Yükleme süresi 10 gün iken ani şekil değiştirme değeri,

$$\varepsilon_e = \frac{4.30}{24424} = 176 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Aynı t zamanı için sünme şekil değiştirme değeri ise $\varepsilon_c(t) = (280 - 27 - 176) = 77 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.6 : RC yöntemiyle elde edilen sünme şekil değıştirmesi değışimi

Sünme şekil değıştirmesi değeri daha sonraki yükleme süreleri için de hesaplanmıştır ve bu değeri şekil 5.6’ de grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değıştirme değeri

Yükleme Süresi [gün]	E_0 [Mpa]	n'	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	$\sigma(t)$ [Mpa]	$\sigma_s(t)$ [Mpa]	$\epsilon_s(t) = \epsilon(t)$
10	17846	11,207	0,37	27	4,30	56,06	280
20	16423	12,178	0,49	45	4,22	62,02	310
30	15626	12,799	0,56	57	4,17	65,79	329
40	15091	13,253	0,62	66	4,14	68,53	343
50	14698	13,607	0,66	73	4,11	70,67	353
100	13616	14,689	0,79	92	4,03	77,11	386
150	13088	15,281	0,87	100	3,99	80,61	403
200	12760	15,674	0,91	105	3,96	82,92	415
250	12531	15,960	0,95	109	3,94	84,60	423
300	12360	16,181	0,98	111	3,92	85,89	429
350	12226	16,359	1,00	112	3,91	86,92	435
400	11922	16,776	1,05	121	3,88	89,34	447
450	11832	16,904	1,06	123	3,87	90,08	450
500	11755	17,014	1,08	123	3,86	90,72	454
1000	11340	17,637	1,15	128	3,82	94,30	471
1500	11158	17,924	1,19	129	3,79	95,94	480
2000	11051	18,098	1,21	130	3,78	96,93	485
2500	10979	18,217	1,22	130	3,77	97,61	488
3000	10926	18,305	1,24	131	3,77	98,11	491
3500	10886	18,373	1,24	131	3,76	98,50	492
4000	10853	18,428	1,25	131	3,76	98,81	494
4500	10827	18,473	1,26	131	3,76	99,07	495
5000	10804	18,511	1,26	131	3,75	99,28	496
6000	10769	18,572	1,27	131	3,75	99,63	498
7000	10741	18,620	1,27	131	3,75	99,90	499
8000	10720	18,657	1,28	132	3,74	100,11	501
9000	10702	18,689	1,28	132	3,74	100,29	501
10000	10687	18,715	1,29	132	3,74	100,44	502

İleriki yükleme süreleri için beton ve donatıda elde edilen gerilme – şekil değıştirme değeri Çizelge 5.8’ de gösterilmiştir.

Betonarme kolon kesitinin zamana bağılı analizi CEB – FIB yönetmeliğıyle elde edilen sünme ve rötre değeri kullanılarak da gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.9 : CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

Yükleme Süresi [gün]	E_0 [Mpa]	n'	ϕ	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	$\sigma(t)$ [Mpa]	$\sigma_s(t)$ [Mpa]	$\epsilon_s(t) = \epsilon(t)$
10	14824	13,491	0,65	27	4,02	78,31	392
20	13615	14,689	0,79	38	3,90	87,27	436
30	12903	15,500	0,89	46	3,83	93,27	466
40	12402	16,126	0,97	53	3,77	97,86	489
50	12018	16,642	1,03	59	3,72	101,62	508
100	10872	18,395	1,25	83	3,57	114,24	571
150	10253	19,507	1,38	101	3,47	122,11	611
200	9844	20,317	1,48	116	3,40	127,78	639
250	9548	20,947	1,56	129	3,34	132,16	661
300	9321	21,458	1,62	140	3,30	135,68	678
350	9139	21,884	1,67	150	3,26	138,60	693
400	8991	22,245	1,72	159	3,23	141,07	705
450	8866	22,557	1,75	167	3,20	143,20	716
500	8760	22,830	1,79	175	3,18	145,05	725
1000	8189	24,423	1,98	231	3,04	155,74	779
1500	7950	25,156	2,07	266	2,98	160,60	803
2000	7818	25,582	2,12	291	2,95	163,40	817
2500	7734	25,861	2,16	310	2,92	165,23	826
3000	7675	26,058	2,18	324	2,91	166,52	833
3500	7632	26,205	2,20	336	2,90	167,48	837
4000	7599	26,319	2,21	346	2,89	168,22	841
4500	7573	26,410	2,23	354	2,88	168,81	844
5000	7552	26,484	2,23	362	2,87	169,29	846
6000	7520	26,597	2,25	373	2,86	170,02	850
7000	7496	26,680	2,26	382	2,86	170,56	853
8000	7478	26,743	2,27	389	2,85	170,97	855
9000	7465	26,793	2,27	395	2,85	171,30	856
10000	7453	26,834	2,28	400	2,85	171,56	858

Çizelge 5.9’ da CEB – FIB yönetmeliği kullanılarak hesaplanan sünme ve rötre değerlerinin kullanıldığı zamana bağlı analiz sonucunda beton ve donatıda elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri gösterilmiştir.

5.2.4 ID yöntemi

ID yöntemi, uzun süreli davranışı daha iyi tahmin edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Sünme, gecikmiş elastik bileşen ϵ_d ve plastik yayılma bileşeni olan ϵ_f ‘ den meydana gelmektedir. RC yönteminin eksik kaldığı sünme şekil değiştirmesinin geriye dönüş karakterini de göz önüne almak amacıyla ϵ_d ani elastik şekil değiştirmenin bir parçasıymış gibi düşünülür ve geriye kalan ϕ_f bileşeni RC yöntemindeki sünme karakterini temsil eder. Gecikmiş elastik sünme bileşeni katsayısı ϕ_d ($\epsilon_d = \epsilon_0$), ilk yüklemeye anındaki beton yaşından bağımsızdır ve 0.4’ e eşittir[3]. Yöntemin yaptığı kabule göre toplam şekil değiştirme,

$$\begin{aligned}
\varepsilon(t, \tau) &= \varepsilon_0(t) + \varepsilon_c(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \\
\varepsilon(t, \tau) &= \varepsilon_0(t) + \varepsilon_d(t) + \varepsilon_f(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \\
\varepsilon(t, \tau) &= \varepsilon'_e(t) + \varepsilon_f(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t)
\end{aligned} \tag{5.24}$$

şeklinde düşünülür. Buradaki ε'_e ifadesi teorik şekil değiştirme olup ani elastik şekil değiştirme ve gecikmiş elastik şekil değiştirme değerlerinin toplamını ifade eder ve yükün uygulanmasıyla birlikte ortaya çıktığı kabul edilir. İlk yükleme zamanı τ_0 ' da σ_0 büyüklüğündeki bir gerilmeyle yüklenen bir betonarme eleman kesitindeki toplam şekil değiştirme,

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \times (1 + \phi_d) + \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \times \phi_f(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \tag{5.25}$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Bu denklem düzenlenirse,

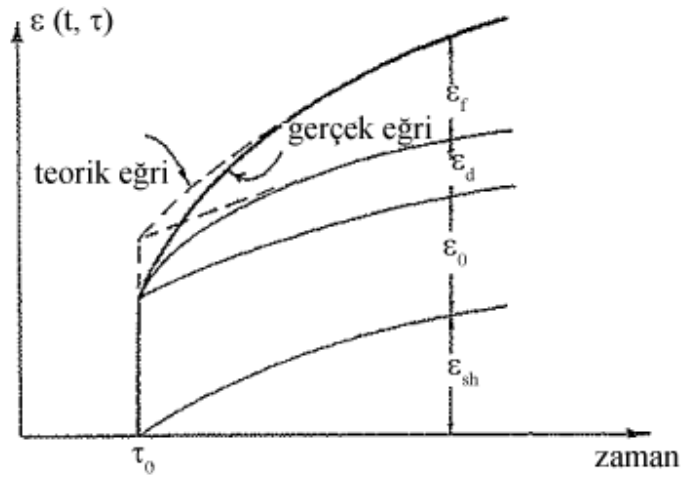
$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c^*(\tau_0)} + \frac{\sigma_0}{E_c^*(\tau_0)} \times \phi^*(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \tag{5.26}$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemdeki teorik elastisite modülü ve sünme katsayıları olan $E_c^*(\tau_0)$ ve $\phi^*(t, \tau_0)$,

$$E_c^*(\tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \phi_d} \tag{5.27}$$

$$\phi^*(t, \tau) = \frac{\phi_f(t, \tau_0)}{1 + \phi_d} = \frac{\phi(t, \tau_0) - \phi_d}{1 + \phi_d} \tag{5.28}$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır.



Şekil 5.7 : Gerçek ve teorik şekil değiştirme - zaman eğrisi

Yöntemde, yayılma bileşenin yükleme anındaki yaştan bağımsız olduğu kabul edilir dolayısıyla ε_f eğrileri birbirlerine paraleldir. Rötrenin hesabında ise,

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{\varepsilon_{sh}^*}{\phi^*(\tau_0)} \times \phi(t, \tau_0) \quad (5.29)$$

denklemi kullanılır. Şekil 5.7' de gerçek ve teorik şekil değiştirme eğrilerinin zamanla değişimi gösterilmiştir[3].

ID yöntemi hem EM yöntemi hem de RC yönteminin parametrelerini içerir. Azaltılmış elastisite modülü ve sünme katsayısı değerleri kullanılarak sünme davranışının yük kaldırıldıktan sonraki elastik geri dönüş özelliği dikkate alınmış olur. Bunun dışında, yöntemin formülasyonu ve uygulanması RC yönteminde olduğu gibidir. RC yönteminin geliştirilmiş hali olan yöntem zaman içerisinde herhangi bir yük boşaltılması durumunda daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Artan veya azalan gerilme geçmiş durumlarında yöntem iyi sonuç verir. Birbirine paralel yayılma eğrileri kabulü dolayısıyla yöntem betonun ileri yaşlarında sünme davranışını olduğundan daha az tahmin eder. Aynı zamanda yüklemekten hemen sonraki dönemde erken yaşlardaki rötre davranışının tahmininde yöntem eksik kalmaktadır. Yüklemeden sonra geçen 6 ay süresince yöntemin verdiği sonuçlar AEM ve RC yöntemlerindeki kadar kesin olmasa da uzun süreli davranışın tahmininde oldukça iyi sonuçlar verir.

5.2.4.1 ID yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi

Bu yöntem RC yöntemine benzer bir yöntemdir. Herhangi bir t anında betondaki gerilmeyi hesaplayabilmek için,

$$\sigma(t) = \left[\sigma(\tau_0) + S' \right] \times e^{-\frac{n' \times \rho}{1+n' \times \rho} \times \phi(t, \tau_0)} - S' \quad (5.30)$$

denklemi kullanılır. Denklemden yer alan S' Mpa cinsinden gerilme olup bu gerilme değeri,

$$S' = \frac{\varepsilon_{sh}^* \times E_c'}{\phi_0^*} \quad (5.31)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Denkleminde yer alan ε_{sh}^* ve ϕ_0^* ifadeleri sırasıyla rötre ve sünme değerlerinin zamanla ulaşacağı sınır değeri gösterir. E_c' ise betonun yönteme göre düzenlenmiş elastisite modülü değeri olup ilk yükleme anındaki beton elastisite modülü değerinin 1.4' e bölünmesiyle elde edilir.

İlk yüklemenin ardından beton ve donatıdaki gerilme – şekil değiştirme değerleri diğer yöntemlerde hesaplanandan farklı değildir. Bu değerler,

$$\sigma(\tau_0) = 4.53 \text{ Mpa} \quad \sigma_s(\tau_0) = 57.13 \text{ Mpa} \quad \varepsilon_s(\tau_0) = \varepsilon(\tau_0) = 186 \times 10^{-6}$$

şeklindedir.

Önceki yöntemlerde olduğu gibi bu yöntemde de 40x100 cm betonarme kolon kesitinde $P = 2000 \text{ kN}$ 'luk eksenel basınç kuvveti etkisi altında beton ve donatıdaki gerilme değişimleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

Bu amaçla ilk olarak denklem 5.27 kullanılarak düzeltilmiş elastisite modülü hesaplanmıştır. Denkleminde yer alan ϕ_d ifadesi 0.4' e eşittir ve bu elastisite modülü değeri,

$$E_c^* = \frac{24424}{1 + 0.4} = 17446 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Düzeltilmiş sünme katsayısı ise yükleme süresinin 20 gün olduğu durumda denklem 5.28 kullanılarak,

$$\phi^*(t, \tau) = \frac{0.487 - 0.40}{1.40} = 0.062$$

olarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplarda sonsuz t zamanı olarak 10000 gün alınmıştır. Yükleme süresinin 10000 gün olduğu durum için düzeltilmiş sünme katsayısı denklem 5.28 kullanılarak,

$$\phi^*(\infty, \tau) = \frac{1.285 - 0.40}{1.40} = 0.632$$

olarak hesaplanmıştır.

RC yönteminde yer alan S gerilmesi ID yönteminde düzeltilmiş olarak S' halini alır ve bu gerilme değeri denklem 5.31 kullanılarak,

$$S' = \frac{132 \times 10^{-6} \times 17446}{0.632} = 3.63 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan düzeltilmiş beton elastisite modülü değeri kullanılarak hesaplanan n' oranı,

$$n' = \frac{200000}{17446} = 11.464$$

olarak hesaplanmıştır.

Yükleme süresi 20 güne ulaşınca betondaki mevcut gerilme denklem 5.30 kullanılarak,

$$\sigma(t) = [(4.53 + 3.63)] \times e^{-0.126 \times 0.062} - 3.63 = 4.05 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Betondaki gerilme değeri hesaplandıktan sonra diğer yöntemlerde olduğu gibi donatıdaki gerilme değeri denklem 5.7 kullanılarak,

$$\sigma_s(t) = \frac{2000 \times 1000 - 4.05 \times 4000 \times 100}{5024} = 75.81 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Donatıdaki gerilmenin hesaplanmasının ardından gerilme – şekil değiştirme bağıntısı kullanılarak donatıdaki ve uygunluk koşulu gereği donatıdaki şekil değiştirmeye eşit olan betondaki şekil değiştirme,

$$\varepsilon_s(t) = \frac{75.81}{200000} = 379 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.10 : ACI yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϕ'	ϵ_{sh} [$\times 10^{-6}$]	ϵ_{sh}' [$\times 10^{-6}$]	$\sigma(t)$ [Mpa]	$\sigma_s(t)$ [Mpa]	$\epsilon_s(t) = \epsilon(t)$
20	0,49	0,06	45	4	4,05	75,81	379
30	0,56	0,12	57	11	3,97	81,63	408
40	0,62	0,16	66	16	3,92	85,84	429
50	0,66	0,19	73	22	3,88	89,11	446
100	0,79	0,28	92	41	3,76	98,97	495
150	0,87	0,33	100	53	3,69	104,31	522
200	0,91	0,37	105	61	3,65	107,82	539
250	0,95	0,39	109	67	3,61	110,36	552
300	0,98	0,41	111	72	3,59	112,32	562
350	1,00	0,43	112	76	3,57	113,89	569
400	1,05	0,46	121	89	3,52	117,55	588
450	1,06	0,47	123	92	3,51	118,67	593
500	1,08	0,48	123	94	3,50	119,64	598
1000	1,15	0,54	128	109	3,43	125,05	625
1500	1,19	0,56	129	115	3,40	127,53	638
2000	1,21	0,58	130	119	3,38	129,02	645
2500	1,22	0,59	130	121	3,37	130,04	650
3000	1,24	0,60	131	123	3,36	130,79	654
3500	1,24	0,60	131	125	3,35	131,37	657
4000	1,25	0,61	131	126	3,34	131,84	659
4500	1,26	0,61	131	127	3,34	132,23	661
5000	1,26	0,61	131	127	3,34	132,56	663
6000	1,27	0,62	131	129	3,33	133,08	665
7000	1,27	0,62	131	130	3,32	133,48	667
8000	1,28	0,63	132	130	3,32	133,80	669
9000	1,28	0,63	132	131	3,32	134,07	670
10000	1,29	0,63	132	132	3,31	134,29	671

İleri yüklem süreleri için yapılan hesaplar sonucunda beton ve donatıda elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.10' da verilmiştir.

Beton ve donatıdaki şekil değiştirme değerlerinin hesaplanmasının ardından şekil değiştirme bileşenleri farklı yüklem süreleri için belirlenmiş ve sünme şekil değiştirmesinin değişimi elde edilmiştir. Bu amaçla 20 günlük yüklem süresi için ani şekil değiştirme bileşeni ϵ_e ,

$$\epsilon_e = \frac{4.05}{24424} = 166 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Teorik ani şekil değiştirme bileşeni ϵ_e' ise,

$$\epsilon_e' = \frac{4.05}{17446} = 232 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu iki değer şekil değiştirmenin elastik bileşenleridir. Bu iki değer kullanılarak gecikmiş elastik şekil değiştirme bileşeni,

$$\varepsilon_d = (232 - 166) \times 10^{-6} = 68 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Sünme şekil değiştirmesinin yayılma bileşeni olan ε_f ise,

$$\varepsilon_f = (379 - 232 - 4) \times 10^{-6} = 143 \times 10^{-6}$$

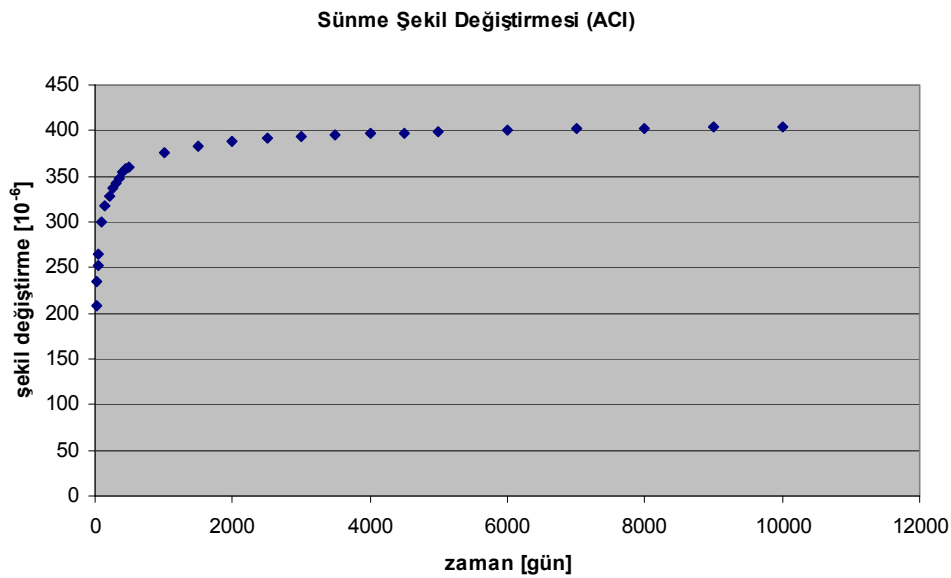
olarak hesaplanmıştır.

Sünme şekil değiştirmesi ε_c , ε_d ve ε_f şekil değiştirmelerinin toplamına eşittir.

Dolayısıyla 20 günlük yükleme süresi için ε_c ,

$$\varepsilon_c = (68 + 143) = 209 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8 : ID yöntemiyle elde edilen sünme şekil değiştirmesi değişimi

İleriki yükleme süreleri için de betondaki şekil değiştirme bileşenlerinin değerleri hesaplanmış ve şekil 5.6' da gösterilmiştir.

ACI yöntemiyle elde edilen sünme ve rötre değerlerinin yanında hesaplar CEB – FIB yönetmeliği kullanılarak elde edilen sünme ve rötre değerleri kullanılarak da gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.11 : CEB - FIB yöntemine göre hesaplanan kolondaki gerilme – şekil değiştirme değerleri

Yükleme Süresi [gün]	ϕ	ϕ'	ε_{sh} [$\times 10^{-6}$]	ε_{sh}' [$\times 10^{-6}$]	$\sigma(t)$ [Mpa]	$\sigma_s(t)$ [Mpa]	$\varepsilon_s(t) = \varepsilon(t)$
20	0,79	0,28	38	8	3,61	110,87	554
30	0,89	0,35	46	12	3,50	119,56	598
40	0,97	0,41	53	16	3,41	126,20	631
50	1,03	0,45	59	20	3,35	131,61	658
100	1,25	0,60	83	38	3,12	149,72	749
150	1,38	0,70	101	53	2,98	160,95	805
200	1,48	0,77	116	67	2,88	169,01	845
250	1,56	0,83	129	79	2,80	175,22	876
300	1,62	0,87	140	91	2,74	180,20	901
350	1,67	0,91	150	101	2,68	184,33	922
400	1,72	0,94	159	111	2,64	187,81	939
450	1,75	0,97	167	121	2,60	190,80	954
500	1,79	0,99	175	129	2,57	193,40	967
1000	1,98	1,13	231	195	2,38	208,37	1042
1500	2,07	1,19	266	237	2,30	215,14	1076
2000	2,12	1,23	291	267	2,25	219,04	1095
2500	2,16	1,26	310	290	2,22	221,58	1108
3000	2,18	1,27	324	308	2,19	223,37	1117
3500	2,20	1,29	336	323	2,18	224,70	1124
4000	2,21	1,30	346	335	2,16	225,73	1129
4500	2,23	1,30	354	345	2,15	226,55	1133
5000	2,23	1,31	362	353	2,15	227,21	1136
6000	2,25	1,32	373	367	2,13	228,23	1141
7000	2,26	1,33	382	378	2,12	228,98	1145
8000	2,27	1,33	389	387	2,12	229,54	1148
9000	2,27	1,34	395	394	2,11	229,99	1150
10000	2,28	1,34	400	400	2,11	230,35	1152

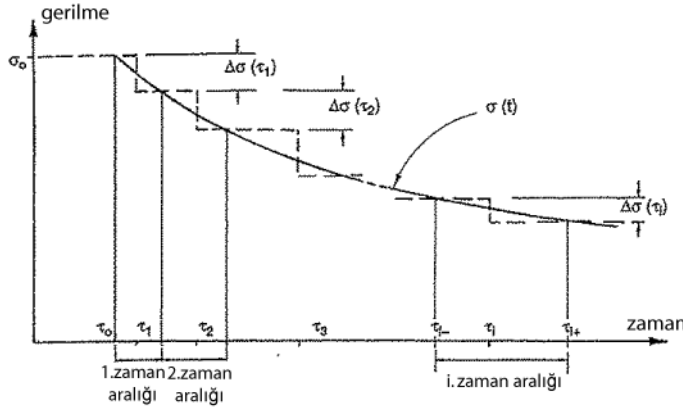
CEB – FIB yönetmeliği kullanılarak elde edilen sünme ve rötre değerleri sonucunda gerçekleştirilen zamana bağlı hesapta beton ve donatıda elde edilen gerilme – şekil değiştirme bileşenleri Çizelge 5.11’ de gösterilmiştir.

5.2.5 SS yöntemi

Bu yöntemde, betonun belirli aralıklardaki sünme davranışı süperpoze edilerek sayısal bir çözümleme tekniği kullanılır. Zaman, belirli sayıda dilimlere ayrılır. Bu zaman dilimlerinin sayısı ne kadar fazla ise hesaplardaki kesinlik de o ölçüde artar. Zaman aralıkları artan karakterde seçilmeli ve her zaman aralığında sünme katsayısının sınır değeri eşit oranda dağılmış olmalıdır. SS yöntemi genel bir yöntem olup herhangi bir gerilme veya şekil değiştirme geçmişine bağlı olarak her sünme veya rötre eğrisi için kullanılabilir.

Sürekli değişkenlik gösteren gerilme geçmişi için, i. zaman aralığındaki gerilme artımı o zaman aralığının ortasında, şekil 5.9’ a göre bir τ_i anında uygulanmış gibi düşünülür[3]. Artımın olduğu τ_i anındaki elastisite modülü $E_c(\tau_i)$ ve sünme katsayısı $\phi(t, \tau_i)$ değerleri kullanılarak meydana gelen gerilme değişimi $\Delta\sigma(\tau_i)$ etkisiyle ani

şekil değiştirme – sünme şekil değiştirmesi toplamında görülen artım hesaplanır. Her zaman aralığındaki toplam şekil değiştirme ise önceki zaman aralıklarındaki gerilme değişimleri etkisiyle şekil değiştirmede meydana gelen artımlar ile rötre şekil değiştirmesinin toplanmasıyla elde edilir.



Şekil 5.9 : SS yönteminin grafik olarak gösterimi

Her zaman aralığı için, $E_c(\tau_i)$ ve $\phi(t, \tau_i)$ değerleri belirlenmeli ve bir önceki gerilme geçmişi de göz önüne alınmalıdır. SS yöntemi diğer yöntemlerin içerdiği ve işlemleri daha basitleştiren kabuller içermese de en genel ve en kesin yöntem olarak bilinir. Birçok pratik problemin çözümünde, 6 ila 10 arasında zaman aralığı kullanılması halinde yöntem iyi sonuçlar verir.

5.2.5.1 SS yöntemi kullanılarak normal kuvvet etkisi altındaki betonarme bir kolonun zamana bağlı analizi

Diğer yöntemler kullanılarak zamana bağlı hesabı yapılan 40x100 cm boyutlarıdaki betonarme kolon için SS yöntemi kullanılarak hesap yapılmıştır. Bu amaçla, toplam zaman aralığı 6' ya bölünmüştür. Gerilme değişimi olan $\Delta\sigma$ 'nin her zaman aralığının ortasında gerçekleştiği düşünüldüğünden her zaman aralığının ortası için elastisite modülü ve sünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. İlk yükleme anında beton ve donatıda hesaplanan gerilme ve şekil değiştirme değerleri diğer yöntemlerdeki değerler ile aynıdır. Bu değerler,

$$\sigma(\tau_0) = 4.53 \text{ Mpa} \quad \sigma_s(\tau_0) = 57.13 \text{ Mpa} \quad \varepsilon_s(\tau_0) = \varepsilon(\tau_0) = 186 \times 10^{-6}$$

şeklindedir.

İlk yükleme anında beton ve donatıda ortaya çıkan gerilmelerin elde edilmesinin ardından 10 günlük yükleme süresi için hesap yapılmıştır. Diğer yükleme süreleri

için benzer şekilde hesaplar yapılmıştır. Herhangi bir zaman aralığının sonunda betondaki gerilmeyi hesaplayabilmek için,

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \times [1 + \phi(t, \tau_0)] + \sum_{j=1}^i \frac{\Delta\sigma(\tau_j)}{E_c(\tau_j)} \times [1 + \phi(\tau_{i+}, \tau_j) + \varepsilon_{sh}(\tau_{i+})] \quad (5.32)$$

süperpozisyon denklemi kullanılır. Yapılmış olan zaman bağlı hesaplarda denklem 5.32' den yararlanılmıştır.

Çizelge 5.12 : ACI' a göre elde edilen başlangıç değerleri

aralıklar	0	1	2	3	4	5	6
T_i (gün)	10	15	27,5	47,5	85	185	4885
T_{i+} (gün)	10	20	35	60	110	260	10010
$T_{i+} - T_o$ (gün)	0	10	25	50	100	250	10000
$\Phi(t_{i+}, t_0)$	0,000	0,369	0,529	0,662	0,794	0,949	1,285
$\Phi(t_{i+}, t_1)$		0,269	0,487	0,641	0,784	0,946	1,285
$\Phi(t_{i+}, t_2)$			0,334	0,581	0,759	0,938	1,285
$\Phi(t_{i+}, t_3)$				0,412	0,706	0,924	1,285
$\Phi(t_{i+}, t_4)$					0,529	0,892	1,285
$\Phi(t_{i+}, t_5)$						0,740	1,285
$\Phi(t_{i+}, t_6)$							1,262
$E_c(T_i)$ [Mpa]	24424	25885	26630	27084	27389	27609	27770
$\varepsilon_{sh}(T_{i+})$	0	45	62	78	94	109	132
zaman aralıkları uzunluğu [gün]	0	10	15	25	50	150	9750

Çizelge 5.12' de ACI kullanılarak elde edilen sünme, rötre ve elastisite modülü değerleri yöntemin gerektirdiği zamanlar için hesaplanarak gösterilmiştir. Yükleme süresi 10 gün olduğunda denklem 5.32 ve çizelge 5.12' den yararlanılarak,

$$\varepsilon(\tau_{1+}) = \frac{4.53}{24424} \times [1 + 0.369] + \frac{\Delta\sigma(\tau_1)}{25585} + (1 + 0.269) + 45 \times 10^{-6}$$

denklemini elde edilir.

Bu denklem düzenlenirse,

$299 \times 10^{-6} + 49 \times 10^{-6} \Delta\sigma(\tau_1)$ halini alır. Uygunluk koşulu gereği aynı t anında betondaki toplam şekil değiştirme donatıdakine eşit olacağından bu denklem,

$$\varepsilon_s(\tau_{1+}) = \frac{\sigma_s(\tau_{1+})}{200000} = 5 \times 10^{-6} \sigma_s(\tau_{1+})$$

denkleminde eşittir.

Bu eşitlikten yararlanılarak,

$49\Delta\sigma(\tau_1) - 5\sigma_s(\tau_{1+}) = -299$ denklemi elde edilir. Denklem iki bilinmeyenli olduğundan çözümü için bir denkleme daha ihtiyaç vardır. Aranılan ikinci denklem ise denge koşulundan yararlanılarak elde edilir. Denge koşulu gereği,

$$\sigma(\tau_0) \times A_c + \Delta\sigma(\tau_1) \times A_c + \sigma_s(\tau_{1+}) \times A_s = P \quad (5.33)$$

olmalıdır. Bu denklemden yola çıkılarak gerekli olan ikinci denklem,

$$\Delta\sigma(\tau_1) + 0.013\sigma_s(\tau_{1+}) = 0.470$$

olarak elde edilir.

Elde edilen bu iki denklem kullanılarak,

$$\Delta\sigma(\tau_1) = -0.25 \text{ Mpa} \quad \text{ve} \quad \sigma_s(\tau_{1+}) = 57.35 \text{ Mpa} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Birinci zaman aralığının sonundaki zaman betondaki başlangıç gerilmesi $\sigma(\tau_0)$ ' dan gerilme azalması $\Delta\sigma(\tau_1)$ değerinin çıkarılmasıyla elde edilir. Dolayısıyla birinci zaman aralığı sonundaki beton gerilmesi,

$$\sigma(\tau_1) = 4.18 \text{ Mpa} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Beton ve donatıdaki gerilme değerlerinin elde edilmesinin ardından donatıdaki şekil değiştirme değeri denklem 5.6.b kullanılarak,

$$\varepsilon_s(\tau_{1+}) = \frac{57.35}{200000} = 287 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu şekil değiştirme değeri uygunluk koşulu gereği aynı zaman aralığının sonundaki toplam beton şekil değiştirme değerine eşittir. Betondaki ani şekil değiştirme değeri ise 176×10^{-6} olarak hesaplanmıştır. Söz konusu zaman aralığının sonundaki sünme şekil değiştirmesi,

$$\varepsilon_c(\tau_{1+}) = (287 - 176 - 45) \times 10^{-6} = 66 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.13 : ACI değerleriyle SS yöntemi kullanılarak elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri

İlk yüklemenden sonra geçen zaman [gün]	Betondaki Gerilme [Mpa]	Donatıdaki Gerilme [Mpa]	Toplam Şekil Değişirme [$\times 10^{-6}$]	Ani Şekil Değişirme [$\times 10^{-6}$]	Sünme Şekil Değişirmesi [$\times 10^{-6}$]	Rötre Şekil Değişirmesi [$\times 10^{-6}$]
0	4,53	37,13	186	186	0	0
10	4,28	57,35	287	176	66	45
25	4,18	65,21	326	172	92	62
50	4,09	72,11	361	169	114	78
100	4,01	78,54	393	166	149	94
250	3,93	85,54	428	163	156	109
10000	3,77	98,16	491	157	202	132

Hesaplar benzer şekilde daha sonraki zaman aralıkları için de yapılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 5.13’ de gösterilmiştir.

Yöntem, CEB – FIB yönetmeliğiyle elde edilen sünme, rötre ve elastisite modülü değerleri kullanılarak da uygulanmıştır.

Çizelge 5.14 : CEB - FIB’ e göre elde edilen başlangıç değerleri

aralıklar	0	1	2	3	4	5	6
T_i (gün)	10	15	27,5	47,5	85	185	4885
T_{i+} (gün)	10	20	35	60	110	260	10010
$T_{i+} - T_0$ (days)	0	10	25	50	100	250	10000
$\Phi(t_{i+}, t_0)$	0,000	0,648	0,847	1,032	1,246	1,558	2,277
$\Phi(t_{i+}, t_1)$		0,527	0,794	1,002	1,230	1,551	2,277
$\Phi(t_{i+}, t_2)$			0,606	0,918	1,186	1,534	2,277
$\Phi(t_{i+}, t_3)$				0,700	1,101	1,503	2,277
$\Phi(t_{i+}, t_4)$					0,847	1,435	2,277
$\Phi(t_{i+}, t_5)$						1,154	2,276
$\Phi(t_{i+}, t_6)$							2,236
$E_c(T_i)$ [Mpa]	29426	31285	32435	33303	34054	34814	36032
$\epsilon_{sh}(T_{i+1})$	0	38	53	83	101	140	400
zaman aralığı uzunlukları [gün]	0	10	15	25	50	150	9750

CEB – FIB ‘ e göre elde edilen başlangıç değerleri Çizelge 5.14’ de gösterilmiştir.

Bu değerler kullanılarak denklem 5.32 yardımıyla hesaplar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.15 : CEB - FIB değerleriyle ss yöntemi kullanılarak elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri

İlk yüklemenden sonra geçen zaman [gün]	Betondaki Gerilme [Mpa]	Donatıdaki Gerilme [Mpa]	Toplam Şekil Değişirme [$\times 10^{-6}$]	Ani Şekil Değişirme [$\times 10^{-6}$]	Sünme Şekil Değişirmesi [$\times 10^{-6}$]	Rötre Şekil Değişirmesi [$\times 10^{-6}$]
0	4,53	37,13	186	186	0	0
10	4,30	55,92	280	147	95	38
25	4,20	63,79	319	144	122	53
50	4,07	73,89	369	140	147	83
100	3,97	82,11	411	137	191	101
250	3,80	95,84	479	132	208	140
10000	3,07	153,33	767	112	255	400

Yapılan hesaplar sonucunda beton ve donatıda elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.15’ de gösterilmiştir.

6. BETONARME KİRİŞİN ANALİTİK YÖNTEM KULLANILARAK ZAMANA BAĞLI ANALİZİ

6.1 Giriş

Sadece normal kuvvet etkisinde olan betonarme kolon için zamana bağlı analizin yapılmasının ardından bu bölümde sadece eğilme ve hem eğilme hem de normal kuvvet etkisi altında olduğu düşünülen betonarme kirişin hem kısa süreli hem de zamana bağlı analizi yapılmıştır. Bu amaçla 30x60 cm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip bir kiriş kullanılmıştır. Betonarme kiriş elemanı basit kiriş olarak düşünülmüş olup 8 m açıklığa sahiptir. Uygulanan yük yayılı yük olup 50 kN / m büyüklüğündedir. Bu yükün etkisiyle açıklığın ortasında 400 kNm büyüklüğünde bir moment ortaya çıkmıştır. Yapılan kesit hesapları da açıklığın ortasındaki kesit için gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı hesaplarda analitik yöntemlerden AAM yöntemi kullanılmıştır. Hesaplar, hem ACI kullanılarak elde edilen sünme ve rötne değerleri hem de CEB – FIB kullanılarak elde edilen sünme ve rötne değerleriyle yapılmıştır.

6.2 Tamamen Çatlamış Kesit Halindeki Kısa Süreli Davranış

Bir noktadaki çekme gerilmesi betonun çekme dayanımına ulaşırsa, çatlak oluşur. Çatlama kalıcı olan bir durumdur. Çatlamadan sonra çatlağa dik olan herhangi bir büyüklüğe sahip olan çekme gerilmeleri taşınamaz hale gelir. Taşınabilen çekme gerilmeleri sadece çatlak boyunca mevcut donatı tarafından taşınanlardır. Bu yüzden, tümüyle çatlamış bir kesitteki iç kuvvetler mevcut donatı ve çatlamamış beton bölgesi tarafından taşınacaktır.

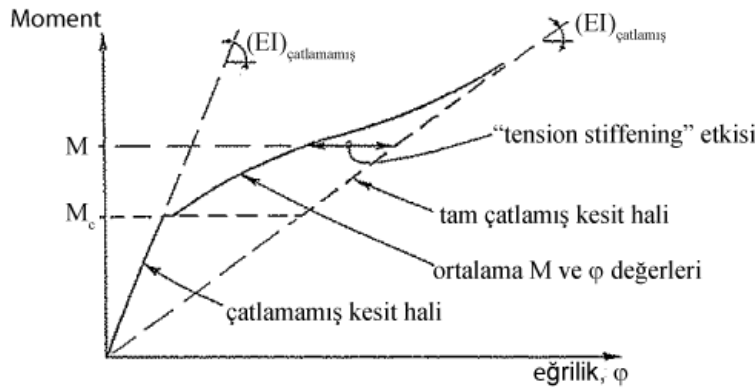
Eğilme etkisi altında olan elemanlarda çatlak oluştuğunda ve elemanın bir tarafında beton çekme dayanımına erişildiğinde rijitlikte ani bir azalma meydana gelir ve kısa süreli moment – eğrilik ilişkisi doğrusal olmaktan çıkar. Elemanın çekme bölgesinde çatlaklar oluşmaya başlar. Oluşan bu çatlaklar kendiliğinden bir h_0 derinliğine ulaşır. Bu h_0 derinliği donatı kalitesine, mevcut eksenel kuvvete ve öngerme değerine göre değişir. Sadece eğilme momenti etkisinde olan betonarme elemanlarda, çatlamadan hemen sonra ölçülen h_0 derinliği göreceli olarak daha

fazladır ve artan moment değerlerinde yaklaşık olarak değişmeden kalır. Öngerme uygulanmış elemanlarda ya da eğilme momentinin normal kuvvet ile birlikte etki ettiği elemanlarda bu derinliğin ilk zamanlarda daha az olduğu ve artan moment değeriyle birlikte yavaş bir şekilde arttığı söylenebilir.

Çatlağın olduğu bir kesitin özelliklerinin belirlenmesinde beton çekme bölgesinin göz önüne alınmadığı dönüştürülmüş kesit analizinden yararlanılır. Çatlamadan hemen sonra komşu çatlaklar arasındaki beton bölgesi bir miktar çekme gerilmesi taşımaya devam eder. Taşınan bu gerilmeler genellikle mevcut donatı doğrultusunda olup bu davranış donatı ve beton arasındaki aderansla açıklanır[3].

Betondaki ortalama çekme gerilmesi beton çekme dayanımının önemli bir bölümünü oluşturur. Donatıdaki gerilme, çatlağın olduğu yerde mevcut çekme gerilmesinin tümünü karşıladığından en yüksek değerine ulaşır; çatlaklar arasındaki bölge ise donatı gerilmesinin en düşük değerine ulaştığı bölgedir. Böylelikle beton çekme bölgesinin hiç gerilme almadığının düşünüldüğü tam çatlamış kesit durumundaki rijitlikten nispeten daha büyük bir rijitlik değerine ulaşıldığı söylenebilir[3].

Birincil çatlakların oluşumuna neden olan moment değerinde artışlar devam ettikçe ikincil çatlaklar oluşmaya başlayacaktır. Bu çatlaklar donatı etrafında ve birincil çatlakların arasında gözlemlenir. İkincil çatlakların oluşmasıyla birlikte ortalama çekme dayanımı azalırken “tension stiffening” etkisi azalma gösterir.



Şekil 6.1 : Betonarme bir yapı elemanı için kısa süreli moment- eğrilik ilişkisi

Şekil 6.1’ de betonarme bir yapı elemanının kesiti için kısa süreli davranış için çizilen moment – eğrilik grafiği gösterilmiştir[3]. Çatlamadan sonra moment değerinin artmasıyla, ilk çatlağın olduğu andaki çatlamamış kesitin eğilme rijitliği azalmaya başlayacak; moment değeri büyüdükçe ve “tension stiffening” etkisi

önemsiz hale geldikçe de tümüyle çatlamış kesitin eğilme rijitliği değerine ulaşacaktır.

Servis yükleri altındaki çatlamış kesitte, birincil çatlakların yüksekliği olan h_0 ve dolayısıyla tarafsız eksene olan mesafe moment değeri arttıkça sabit kalacaktır. Çok yüksek yük değerlerinde basınç etkisindeki betonun ve çekme etkisindeki donatının doğrusal olmayan davranışı nedeniyle değişmeye başlayacaktır.

6.3 Tamamen Çatlamış Kesit Halindeki Zamana Bağlı Davranış

Tek donatılı çatlamamış kesit durumunda, çekme donatısı çekmedeki sünmeyi bir miktar engeller. Bu durum da beton çekme bölgesinde oluşan gerilmelerin yeniden dağılımına sebep olur. Bu dağılımda, donatıdaki çekme gerilmesi artarken beton tarafından taşınan çekme gerilmesinde azalma görülür. Bunun sonucunda tarafsız eksen biraz aşağıya kayar. En üst lifteki beton basınç gerilmesinde de bir miktar azalma gözlenir.

Bütünüyle çatlamış bir kesitte sünme sadece beton basınç bölgesinde görülür ve çekme gerilmelerinin tamamı donatı tarafından karşılanır. Üst lifteki şekil değiştirme arttıkça tarafsız eksen aşağıya doğru kayar dolayısıyla beton basınç bölgesi büyür. Yüklemeden bir süre sonra beton basınç bölgesinde sünme başlayacağından yaş etkisi sünme şekil değiştirmelerinin doğrusal olmayan davranış göstermesine sebep olur. Eğer düzlem kesitlerin düzlem olarak kaldığı varsayımı kullanılırsa doğrusal olmayan sünme şekil değiştirmesi basınç bölgesindeki doğrusal olmayan asal gerilmelerle karşılanmalıdır. Dolayısıyla basınç gerilmesi dağılımı doğrusal olmaktan çıkar. Üst lifteki basınç gerilmesinde görülen toplam azalma, ek sünme değiştirmelerine neden olur. Donatıdaki gerilme değeri de yavaşça artarak kesitteki iç kuvvetlerin dengesini sağlar.

6.4 Tamamen Çatlamış Kesit Halinde Rötire Etkisi

Rötire etkisi, tek donatılı betonarme bir kesitte önemli ölçüde eğrilik meydana getirir, bu durum da betonarme bir elemandaki uzun süreli yer değiştirmelerde dikkate değer büyüklere ulaşılmasına sebep olur[3].

Beton büzüldükçe donatı üzerinde basınç etkisi yaratır, kuvvetlerin dengesi prensibi gereği bu basınç kuvvetine karşılık donatı seviyesinde ΔT büyüklüğünde bir çekme

kuvveti meydana gelir. Zamanla birlikte yavaşça artan bu çekme kuvveti betonarme kesitin merkezinde bir miktar dış merkezlilik yaratır. Bu dış merkezlilik nedeniyle elastik ve sünme karakterli eğrilik ortaya çıkar ve kirişte yavaşça gelişen bir eğilme meydana gelir. ΔT kuvveti, kesitteki donatı oranına ve kesitin çatlamış ya da çatlamamış olmasına bağlıdır.

Rötre, betonarme elemanlarda genellikle zaman içerisinde çatlakların oluşmasına neden olur. Rötre çatlaklarının ortaya çıkması, yapıdaki iç ve dış engellerin derecesine (donatı-mesnet), mevcut çekme gerilmesinin büyüklüğüne, elemanın serbestçe uzayabilmesine ve betonun dayanımına bağlıdır. Eğer rötre etkisiyle zamanla artan, sünme etkisiyle de zamanla azalan çekme gerilmesi betonun çekme dayanımı değerini aşmazsa çatlak oluşmaz. Beton çekme dayanımı değeri betonun elastisite modülü değeriyle birlikte zamanla artsa da rötre etkisiyle oluşan çekme gerilmesi de artacaktır. Bununla birlikte sünme etkisi zamanla birlikte azalacağından rötreyi sınırlandırıcı etkisi de azalır. Çatlamamış kesitlerde dış yük etkisiyle ortaya çıkan çekme gerilmeleri de çatlak oluşumunu hızlandırıcı yönde etki yapar. Dolayısıyla rötre etkisi betonarme elemanların servis yükleri altındaki davranışında önemli bir rol oynamaktadır.

6.5 Tamamen Çatlamış Kesit Halinde Kısa Süreli Davranışın Hesaplanması

Çalışmanın bu bölümünde 30x60 cm boyutlarında ve 8 m'lik açıklığa sahip betonarme kiriş elemanının önce sadece eğilme daha sonra hem eğilme hem de normal kuvvet etkisi altında olduğunda kısa süreli davranışı incelenmiştir. Hesaplara başlamadan evvel aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- a) Düzlem kesitler düzlem kalır dolayısıyla kesit boyunca ortaya çıkacak şekil değiştirmeler doğrusal bir davranış gösterir.
- b) Betonla donatı arasındaki aderans kusursuzdur dolayısıyla beton ve donatıdaki şekil değiştirme değerleri eşit olacaktır.
- c) Betondaki çekme gerilmesi ihmal edilir; betonun çekme bölgesi hesaplarda dikkate alınmaz.
- d) Betonun malzeme davranışı doğrusal - elastiktir.

6.5.1 Tamamen çatlamış kesit halinde kısa süreli davranışın hesaplanması

Çalışmanın bu bölümünde, dış yük etkisiyle tamamen çatlamış olduğu düşünülen bir betonarme kiriş kesitinin kısa süreli davranışı belirlenmiştir. Yapılan hesaplar betonarme kiriş açıklığının tam ortasındaki kesit için yapılmıştır. Hesaplarda dış yük olarak $M_d = 400$ kNm ve $N = 1500$ kN olarak alınmıştır. Yapılan hesaplarda ilk olarak kirişin yalnızca eğilme etkisi altında olduğu düşünülmüş daha sonra ise hem eğilme momenti hem de normak kuvvet etkisi altındaki davranış incelenmiştir. Dış yük olarak kiriş boyunca 50 kN / m büyüklüğündeki yayılı yük ve normal kuvvet olarak da kiriş uçlarından $N_d = 1500$ kN dış yük uygulandığı düşünülmüştür.

Çizelge 6.1 : Betonarme kiriş kesitinin malzeme ve kesit özellikleri

Kolon Boyutları [cm]	Beton Sınıfı	E_c [Mpa]	E_s [Mpa]	ρ	ρ'
30X60	C25	24424	200000	0,017	0,006

Çizelge 6.1’ de sözü edilen betonarme kiriş kesitinin malzeme ve kesit özellikleri özetlenmiştir. Başlangıç gerilme ve şekil değiştirme dağılımları betonarme kesitin üst lifindeki şekil değiştirme ve eğrilik değerleri ile ifade edilebilir. Üst lifin herhangi bir y mesafesi altındaki başlangıç şekil değiştirme değeri,

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - y\varphi_i \quad (6.1)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Denklem 6.1’ de yer alan ε_{0i} ifadesi üst lifteki başlangıç şekil değiştirmesini gösterirken φ_i ise başlangıçtaki kesit eğrilik değerini gösterir. Bu şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerilme değeri ise,

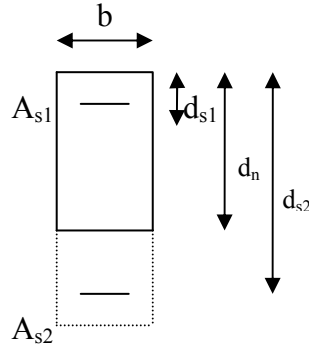
$$\sigma_i = E_c \times (\varepsilon_{0i} - y\varphi_i) , y \leq d_n \quad (6.2.a)$$

$$\sigma_i = 0 , y > d_n \quad (6.2.b)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir.

6.5.1.1 Beton basınç bölgesi derinliği ve kesit özelliklerinin hesaplanması

Denklem 6.2.a ve 6.2.b’ de yer alan d_n ifadesi beton basınç bölgesi derinliğini gösterir. Hem kısa süreli davranışı hem de uzun süreli davranışı belirleyebilmek için ilk olarak beton basınç bölgesi derinliğinin hesaplanması gerekir.



Şekil 6.2 : Kesit özelliklerinin belirlenmesinde gerekli büyüklükler

Şekil 6.2’ de kesit özellikleri belirlenirken kullanılan büyüklükler gösterilmiştir. Beton basınç bölgesi normal kuvvetin olmadığı ve olduğu durumlarda farklı şekilde hesaplanır. Kesitte yalnızca eğilme momenti olması durumunda,

$$\int_0^{d_n} (d_n - y) dA + \sum_{k=1}^m n A_{sk} (d_n - d_{sk}) = 0 \quad (6.3)$$

denkleminde yararlanılır. Denklem 6.3’ de yer alan d_n beton basınç bölgesi derinliğini, d_{sk} ise mevcut donatının yeri ile üst lif arasındaki mesafeyi gösterir. Normal kuvvetin sıfıra eşit olmadığı durumda ise beton basınç bölgesi derinliği,

$$\frac{\int_0^{d_n} (d_n - y) y dA + \sum_{k=1}^m n A_{sk} d_{sk} (d_n - d_{sk})}{\int_0^{d_n} (d_n - y) dA + \sum_{k=1}^m n A_{sk} (d_n - d_{sk})} = - \frac{M_{net}}{N_{net}} \quad (6.4)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır.

İlk olarak kesitin yalnızca eğilme momenti etkisi altında olduğu düşünülmüştür ve denklem 6.3 kullanılarak beton basınç bölgesi derinliği $d_n = 216$ mm olarak hesaplanmıştır.

Kesitin hem normal kuvvet hem eğilme momenti etkisi altında olduğu durumda normal kuvvetin bir dış merkezlikle etki ettiği düşünülmüştür. Normal kuvvet 1500 kN büyüklüğünde olup kesitin üst lifinin 225 mm aşağısından etmektedir. Bu durumda net moment değeri,

$$M_{net} = 400 - 0.225 \times 1500 = 62.5 \text{ kNm} \text{ olarak hesaplanmıştır. } N_{net} = 1500 \text{ kN' dir.}$$

Kesit bu iki dış yük etkisinde iken beton basınç bölgesi derinliğini bulmak için denklem 6.4 kullanılır. Yapılan hesap sonucunda beton basınç bölgesi derinliği $d_n = 409$ mm bulunmuştur.

Beton basınç bölgesi derinliklerinin belirlenmesinin ardından betonarme kiriş kesitinin kesit özellikleri belirlenmiştir. Kesitin alan A, mukavemet momenti W ve atalet momenti değerlerini hesaplayabilmek için,

$$A = b \times d_n + (n-1) \times A_{s1} + n \times A_{s2} \quad (6.5)$$

$$W = \frac{1}{2} \times b \times d_n^2 + (n-1) \times A_{s1} \times d_{s1} + n \times A_{s2} \times d_{s2} \quad (6.6)$$

$$I = \frac{1}{3} \times b \times d_n^3 + (n-1) \times A_{s1} \times d_{s1}^2 + n \times A_{s2} \times d_{s2}^2 \quad (6.7)$$

denklemlerinden yararlanılmıştır. Mevcut betonarme kiriş kesiti dönüştürülmüş kesit haline getirilerek hesaplar yapılmıştır. Dönüştürülmüş kesit halinde kesitteki mevcut donatı alanı beton alanına dönüştürülerek birlikte düşünülür. Dönüştürülmüş kesitin tamamen çatlamış olduğu düşünüldüğünden kesitin çekme bölgesi hesaplarda dikkate alınmamıştır.

Çizelge 6.2 : Yalnızca eğilme momenti etkisindeki dönüştürülmüş kesitin özellikleri

M [kNm]	N [kN]	d _n [mm]	A [mm ²]	W [mm ³]	I [mm ⁴]
400	-	216	64800	7.33x10 ⁶	1020.87x10 ⁶

Çizelge 6.2’ de kiriş kesiti sadece eğilme momenti etkisindeyken tam çatlamış dönüştürülmüş kesitin alan, mukavemet momenti ve atalet momenti değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Hem eğilme momenti hem de normal kuvvet etkisindeki dönüştürülmüş kesitin özellikleri

M [kNm]	N [kN]	d _n [mm]	A [mm ²]	W [mm ³]	I [mm ⁴]
400	1500	409	122700	25.42x10 ⁶	6854.89x10 ⁶

Çizelge 6.3’ de betonarme kiriş kesiti hem eğilme momenti hem de normal kuvvet etkisindeyken tam çatlamış dönüştürülmüş kesitin özellikleri gösterilmektedir.

6.5.1.2 Betonarme kiriş kesitinin başlangıç gerilme – şekil değiştirmesinin hesaplanması

Bir önceki bölümde tam çatlamış dönüştürülmüş kesite ait özelliklerin her iki yük durumu için de elde edilmesinin ardından çalışmanın bu bölümünde başlangıç şekil değiştirmesi, eğrilik ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

Hesaplanan başlangıç değerlerinden ilki kesitin üst lifindeki şekil değiştirme değeridir ve bu değer,

$$\varepsilon_{0i} = \frac{W \times M_{net} + I \times N_{net}}{E_c \times (A \times I - W^2)} \quad (6.8)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Başlangıç anında kesitin eğriliği ise,

$$\varphi_i = \frac{A \times M_{net} + W \times N_{net}}{E_c \times (A \times I - W^2)} \quad (6.9)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır.

İlk olarak betonarme kiriş kesitinin $M = 400 \text{ kNm}$ 'lik eğilme momenti etkisi altında olduğu düşünülmüştür. Çizelge 6.2' de gösterilen kesit özelliklerinin kullanılmasıyla kesitin üst lifindeki şekil değiştirme değeri denklem 6.8 kullanılarak,

$$\varepsilon_{0i} = \frac{7.33 \times 10^6 \times 400 \times 10^6}{24424 \times (64800 \times 1020.87 \times 10^6 - (7.33 \times 10^6)^2)} = 863 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Aynı dış yük altında başlangıç anındaki eğrilik değeri denklem 6.9 kullanılarak,

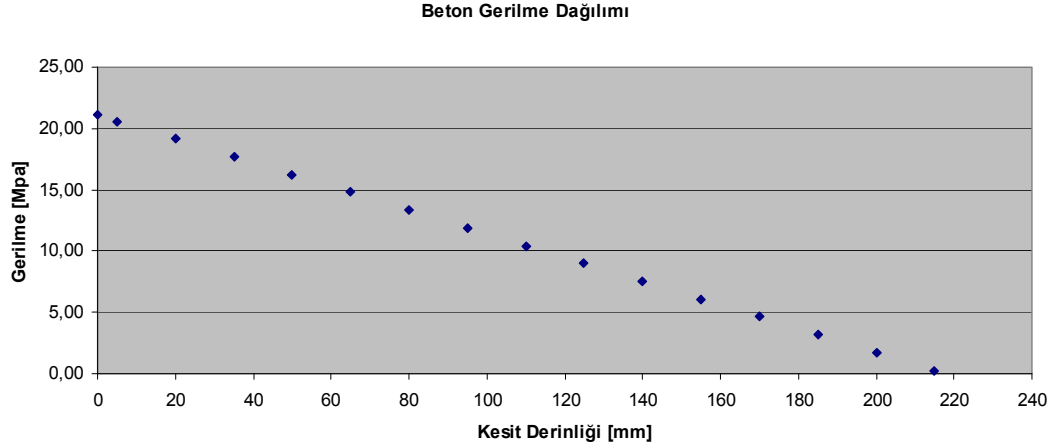
$$\varphi_i = \frac{64800 \times 400 \times 10^6}{24424 \times (64800 \times 1020.87 \times 10^6 - (7.33 \times 10^6)^2)} = 3.96 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

olarak hesaplanmıştır.

Şekil değiştirme değerlerinin hesaplanmasının ardından kesit derinliği boyunca gerilme değerlerini elde etmek mümkün hale gelir. Üst lifteki gerilme değeri $y = 0$ için denklem 6.2.a kullanılarak,

$$\sigma_i = 24424 \times 863 \times 10^{-6} = 21.07 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.3 : Eğilme momenti etkisinde olan kiriş kesitindeki beton gerilmesi dağılımı

Farklı y derinlikleri için de hesap yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 6.3’ de gösterilmiştir. Betondaki gerilme dağılımının belirlenmesinin ardından donatıdaki başlangıç gerilmesi hesaplanmıştır.

Kesitteki mevcut donatılardaki gerilme değerleri,

$$\sigma_{sk} = E_s \times (\varepsilon_{0i} - d_{sk} \times \varphi_i) \quad (6.10)$$

denklemi kullanılarak hesaplanır. Denklem 6.10’ da yer alan d_{sk} kesitte mevcut olan her bir donatının üst life olan mesafesini göstermektedir. Hesabı yapılan çift donatılı kesit için denklem 6.10 kullanılarak basınç bölgesinde yer alan donatıdaki başlangıç gerilmesi,

$$\sigma_{s1} = 200000 \times (863 \times 10^{-6} - 40 \times 3.96 \times 10^{-6}) = 140.88 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çekme bölgesinde yer alan donatıdaki başlangıç gerilmesi ise,

$$\sigma_{s2} = 200000 \times (863 \times 10^{-6} - 560 \times 3.96 \times 10^{-6}) = -270.82 \text{ Mpa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4 : M – N etkisindeki kiriş kesitinde gerilme – şekil değiştirme değerleri

M [kNm]	N [kN]	ε_{0i}	φ_i [mm] 1	σ_i (y=0) [Mpa]	σ_{s1} [Mpa]	σ_{s2} [Mpa]
400	1500	2204×10^{-6}	7.19×10^{-6}	53.83	383.23	-364.94

6.6 Tam Çatlamış Kesit Halinde Zamana Bağlı Davranışın Hesaplanması

Tam çatlamış bir kesit belirli bir süre boyunca sürekli yükleme altında olursa ortaya çıkacak sünme davranışı kesitin tarafsız ekseninin değişmesine neden olur. Genellikle, tarafsız eksen derinliği zamanla birlikte artar. Bu bölümde yapılan zaman bağlı hesaplarda tam çatlamış kesitin zaman içerisinde sabit kaldığı varsayılmıştır. Böylelikle, zaman içerisindeki gerilme ve şekil değiştirme artımları birbirinden ayrı olarak hesaplanmış ve birbirine eklenerek toplam şekil değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

Tam çatlamış betonarme kesit için yapılacak zamana bağlı hesapta AEM yönteminden yararlanılmıştır. Yöntem, kesit hem sadece eğilme momenti etkisindeyken hem de normal kuvvetin eğilme momentiyle birlikte etkidiği durum için yapılmıştır.

6.6.1 Tam çatlamış betonarme kesitin zamana bağlı analizinde kullanılan yöntem

Tam çatlamış betonarme kiriş kesitinin zamana bağlı analizinde rölaksasyon prensibinden yararlanılmıştır[3]. Bu prensibe göre, herhangi bir zaman aralığında, şekil değiştirmenin sabit kaldığı düşünülür. Şekil değiştirmenin sabit kaldığı düşünülürse, sünme ve rötre şekil değiştirmeleri zaman içerisinde değişeceğinden ani şekil değiştirme bileşeninin de aynı ve ters yönde değişmesi gerekecektir. Ani şekil değiştirme bileşeni değiştikçe betondaki gerilme değeri de değişecektir. Dolayısıyla, bu rölaksasyon etkisiyle kesitteki gerilme değerleri değişecektir. Gerilme değerlerinin değişmesiyle de iç kuvvetler değişecek ve mevcut iç kuvvetler dengesi bozulacaktır. Bu dengeyi sağlamak açısından kesite ΔN aksenal kuvveti ve ΔM eğilme momenti etkililmelidir.

Sünme ve rötre etkisiyle şekil değiştirmede meydana gelen değişim $-\Delta N$ ve $-\Delta M$ kuvvetlerinin varlığıyla kısıtlanır. ΔN ve ΔM kuvvetleri kesite uygulandığında, bu kısıtlayıcı kuvvetler ortadan kalkar ve denge korunmuş olur. ΔN ve ΔM kuvvetleri, betondaki serbest sünme ve rötreyi kısıtlayıcı kuvvetler olarak düşünülebilir. Bu kuvvetlerin yalnızca sünmeyi kısıtlayıcı bileşenleri,

$$-\Delta N_{\text{sünme}} = -E_0 \phi(t, \tau) [A_c \varepsilon_{0i} - W_c \varphi_i] \quad (6.11)$$

$$-\Delta M_{sünme} = -E_0' \phi(t, \tau) [-W_c \varepsilon_{0i} + I_c \varphi_i] \quad (6.12)$$

denklemleriyle gösterilir. Denklem 6.11 ve 6.12 yer alan kesit alanı, mukavemet momenti ve atalet momenti değerleri çalışan beton kesiti için donatı varlığı göz ardı edilerek hesaplanır zira sünmenin betonda görüldüğü düşünülür. Kullanılan elastisite modülü değeri ise yaş düzeltilmesi yapılmış etkili elastisite modülü değeridir. Bu kuvvetlerin rötreyi kısıtlayıcı bileşenleri ise,

$$-\Delta N_{rötreye} = -E_0' \varepsilon_{sh} A_c \quad (6.13)$$

$$-\Delta M_{rötreye} = +E_0' \varepsilon_{sh} W_c \quad (6.14)$$

denklemleriyle gösterilir. Betondaki sünme ve rötreyi kısıtlayıcı bu kuvvetlerin toplamı ΔN ve ΔM olarak düşünülür ve bu kuvvetler,

$$-\Delta N = -E_0' \{ \phi(t, \tau) [A_c \varepsilon_{0i} - W_c \varphi_i] + \varepsilon_{sh} A_c \} \quad (6.15)$$

$$-\Delta M = -E_0' \{ \phi(t, \tau) [-W_c \varepsilon_{0i} + I_c \varphi_i] - \varepsilon_{sh} W_c \} \quad (6.16)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. ΔN ve ΔM kuvvetlerinin hesaplanmasının ardından bu kuvvetler etkisiyle üst lifteki şekil değiştirme değişimi $\Delta \varepsilon_0$ ve kesit eğriliğindeki değişim $\Delta \varphi$,

$$\Delta \varepsilon_0 = \frac{W' \Delta M + I' \Delta N}{E_0' (A' I' - W'^2)} \quad (6.17)$$

$$\Delta \varphi = \frac{A' \Delta M + W' \Delta N}{E_0' (A' I' - W'^2)} \quad (6.18)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Denklemlerde yer alan alan, mukavemet momenti ve atalet momenti değerleri tam dönüştürülmüş kesit için yaş düzeltilmesi yapılmış elastisite modülü kullanılarak elde edilen n' oranı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu kesit özelliklerinin hesaplanmasında yaş düzeltilmesi yapılmış değerlerin kullanılmasının nedeni ΔN ve ΔM kuvvetlerinin zaman içerisinde etkiyen kuvvetler olmasıdır. Hesaplanan kesit özellikleri kesitin üst yüzü referans alınarak hesaplanmıştır.

Üst lifteki şekil değiştirme ve kesitteki eğrilik değişiminin elde edilmesinin ardından zaman içerisinde görülen gerilme değişimi hesaplanmıştır. Bu gerilme değişimi rölaksasyon etkisiyle meydana gelen gerilme kaybı ve kuvvetler dengesini korumak

için uygulanan ΔN ve ΔM kuvvetleri etkisiyle ortaya çıkan gerilme değişiminin toplamından oluşur. Rölaksasyon nedeniyle meydana gelen gerilme kaybı,

$$\Delta\sigma_{rel} = -E_0 \left\{ \phi(t, \tau) [\varepsilon_{0i} - y\varphi_i] + \varepsilon_{sh} \right\} \quad (6.19)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Gerilme kaybı nedeniyle ortadan kalkan dengeyi sağlamak için uygulanan kuvvetler etkisiyle ortaya çıkan gerilme,

$$\Delta\sigma_{res} = E_0 [\Delta\varepsilon_0 - y\Delta\varphi] \quad (6.20)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Betonda gerilmede meydana gelen değişim bu iki gerilme değerinin toplamına eşittir. Betondaki gerilme değişiminin hesaplanmasının ardından donatıdaki gerilme değişimi hesaplanmıştır. Donatıdaki gerilme değişimini hesaplamak için,

$$\Delta\sigma_s = E_s (\Delta\varepsilon_0 - d\Delta\varphi) \quad (6.21)$$

denklemleri kullanılmıştır. Denklem 6.21’ de yer alan d mevcut donatının kesit üst yüzüne mesafesini göstermektedir.

6.6.2 Yalnızca eğilme momenti etkisindeki kiriş kesitinin zamana bağlı analizi

Çalışmanın bu bölümünde, kısa süreli analizi yapılarak başlangıç şekil değiştirme ve gerilme değerleri belirlenen betonarme kiriş kesitinin zamana bağlı analizi yapılmıştır. Yapılan analiz AEM yöntemine göre gerçekleştirilmiş olup hesaplarda kullanılan sünme ve rötre değerleri ACI’ a göre elde edilen değerlerdir. Yaş düzeltmesi için kullanılan katsayı 0.8 olarak alınmıştır. Dönüştürülmüş kesitin özellikleri Çizelge 6.2’ de gösterilmiştir. Betonarme kiriş beton yaşı 10 gün iken yüklenmeye başlanmıştır.

Çizelge 6.5 : Zamana bağlı analizi yapılan betonarme kirişin malzeme özellikleri

Gün	İlk yüklemekten sonra geçen süre [gün]	E_c [Mpa]	$E_c'(t_0)$ [Mpa]	n'	$\phi(t, t_0)$	$\epsilon_{sh}(t, t_0)$
10	0	24424	24424	8,189	0	0
20	10	25885	19594	7,726	0,401	52
30	20	26457	18576	7,559	0,530	66
35	25	26630	18237	7,510	0,575	72
40	30	26763	17958	7,473	0,613	77
50	40	26954	17518	7,420	0,673	84
60	50	27084	17182	7,384	0,720	91
100	90	27352	16336	7,312	0,843	106
110	100	27389	16194	7,302	0,864	109
150	140	27490	15763	7,275	0,930	116
200	190	27560	15406	7,257	0,986	122
250	240	27602	15157	7,246	1,026	126
260	250	27609	15115	7,244	1,033	129
300	290	27630	14913	7,238	1,066	131
350	340	27651	14765	7,233	1,091	133
400	390	27666	14646	7,229	1,111	135
450	440	27678	14546	7,226	1,128	136
500	490	27688	14462	7,223	1,143	137
1000	990	27731	14002	7,212	1,226	142
1500	1490	27745	13798	7,208	1,263	143
2000	1990	27752	13678	7,207	1,286	144
2500	2490	27757	13597	7,205	1,302	145
3000	2990	27760	13537	7,205	1,313	145
3500	3490	27762	13492	7,204	1,322	145
4000	3990	27763	13455	7,204	1,329	145
4500	4490	27764	13425	7,203	1,335	146
5000	4990	27765	13400	7,203	1,340	146
6000	5990	27767	13359	7,203	1,348	146
7000	6990	27768	13328	7,203	1,354	146
8000	7990	27769	13303	7,202	1,359	146
9000	8990	27769	13283	7,202	1,363	146
10000	9990	27770	13266	7,202	1,367	146
10010	10000	27770	13266	7,202	1,367	146

Çizelge 6.5' de zamana bağlı analizi yapılan betonarme kiriş elemanının malzeme özellikleri gösterilmiştir. Çizelge 6.5' de yer alan yaş düzeltmesi yapılmış elastisite modülü değerleri kullanılarak yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesite ait özellikler hesaplanmıştır. Yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesit özellikleri hesaplanırken tek fark beton için yaş düzeltmesi yapılmış elastisite modülü değerinin kullanılarak n' oranının hesaplanmasıdır. Yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesite ait özellikler denklem 6.5, 6.6 ve 6.7 kullanılarak hesaplanmıştır. Yükleme süresi 10 gün olduğunda kesit alanı denklem 6.5 kullanılarak,

$$A' = (216 \times 300) + (10.207 - 1) \times 1000 + 10.207 \times 3000 = 104628 \text{ mm}^2$$

olarak hesaplanmıştır.

Sözü edilen yükleme süresi için kesitin mukavemet momenti denklem 6.6 kullanılarak,

$$W' = [0.5 \times 300 \times 216^2] + [(10.207 - 1) \times 1000 \times 40] + [10.207 \times 3000 \times 560] = 24.51 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

olarak hesaplanmıştır.

Sözü edilen yükleme süresi için kesitin atalet momenti denklem 6.7 kullanılarak,

$$I' = \left[\frac{1}{3} \times 300 \times 216^3 \right] + [(10.207 - 1) \times 1000 \times 40^2] + [10.207 \times 3000 \times 560^2] = 10625.23 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.6 : Yaş düzeltilmesi yapılmış tam çatlamış kesit halinde kesit özellikleri

Gün	İlk yüklemekten sonra geçen süre [gün]	E_c' [Mpa]	n'	A' [mm ²]	W' [x10 ⁶] [mm ³]	I' [x10 ⁶] [mm ⁴]
10	0	24424	8,189	96555	21,04	8723,28
20	10	19594	10,207	104628	24,51	10625,23
30	20	18576	10,767	106867	25,48	11152,80
35	25	18237	10,967	107668	25,82	11341,45
40	30	17958	11,137	108349	26,11	11501,91
50	40	17518	11,417	109466	26,59	11765,14
60	50	17182	11,640	110361	26,98	11975,97
100	90	16336	12,243	112770	28,02	12543,58
110	100	16194	12,350	113201	28,20	12644,99
150	140	15763	12,688	114551	28,78	12963,11
200	190	15406	12,982	115726	29,29	13240,00
250	240	15157	13,195	116581	29,65	13441,48
260	250	15115	13,232	116726	29,72	13475,63
300	290	14913	13,411	117446	30,03	13645,16
350	340	14765	13,545	117981	30,26	13771,15
400	390	14646	13,656	118423	30,45	13875,32
450	440	14546	13,749	118797	30,61	13963,36
500	490	14462	13,829	119118	30,75	14039,07
1000	990	14002	14,284	120937	31,53	14467,54
1500	1490	13798	14,495	121779	31,89	14665,94
2000	1990	13678	14,622	122288	32,11	14785,93
2500	2490	13597	14,709	122637	32,26	14868,24
3000	2990	13537	14,774	122896	32,37	14929,08
3500	3490	13492	14,824	123096	32,46	14976,34
4000	3990	13455	14,864	123258	32,53	15014,38
4500	4490	13425	14,898	123391	32,58	15045,82
5000	4990	13400	14,926	123504	32,63	15072,34
6000	5990	13359	14,971	123684	32,71	15114,90
7000	6990	13328	15,006	123824	32,77	15147,79
8000	7990	13303	15,034	123936	32,82	15174,16
9000	8990	13283	15,057	124028	32,86	15195,88
10000	9990	13266	15,076	124106	32,89	15214,16
10010	10000	13266	15,077	124106	32,89	15214,32

Sonraki yükleme süreleri için de benzer hesaplar yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6' da gösterilmiştir. Yaş düzeltilmesi yapılmış dönüştürülmüş kesitin özellikleri belirlendikten sonra ΔN ve ΔM kuvvetlerinin hesabında kullanılacak olan çalışan beton kesit alanına ait alan, mukavemet momenti ve atalet momenti değerleri hesaplanmıştır. Çalışan beton kesit alanı denklem 6.5 kullanılarak,

$$A_c = 216 \times 300 = 64800 \text{ mm}^2$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu kesitin mukavemet momenti değeri denklem 6.6 kullanılarak,

$$W_c = \frac{1}{2} \times 300 \times 216^2 = 7 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

olarak hesaplanmıştır.

Kesitin atalet momenti değeri denklem 6.7 kullanılarak,

$$I_c = \frac{1}{3} \times 300 \times 216^3 = 1007.77 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplarda kesitte bulunan mevcut donatının varlığı ihmal edilmiştir. Çalışan beton kesit alanının özelliklerinin elde edilmesinin ardından sünme ve rötre davranışını sınırlayıcı olan ΔN ve ΔM kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesaplar ilk olarak 10 günlük yükleme süresi için yapılmıştır. 10 günlük yükleme süresi için denklem 6.15 kullanılarak ΔN kuvveti,

$$-\Delta N = -19594 \times [0.401 \times [64800 \times 863 \times 10^{-6} - 7 \times 10^6 \times 3.96 \times 10^{-6}] + 52 \times 10^{-6} \times 64800] = -288.05 \text{ kN}$$

olarak hesaplanmıştır.

Diğer sınırlayıcı kuvvet olan ΔM momenti ise denklem 6.16 kullanılarak,

$$-\Delta M = -19594 \times [0.401 \times [-7 \times 10^6 \times 863 \times 10^{-6} + 1007.77 \times 10^6 \times 3.96 \times 10^{-6}] + 52 \times 10^{-6} \times 7 \times 10^6] = 23.27 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanmıştır.

Sonraki yükleme süreleri için de benzer şekilde hesaplar yapılmıştır.

Çizelge 6.7 : Hesaplanan $-\Delta N$ ve $-\Delta M$ kuvvetleri

Gün	İlk yüklemekten sonra geçen süre [gün]	$E_c'(t_0)$ [Mpa]	$\phi(t, t_0)$	$\epsilon_{sh}(t, t_0)$	$-\Delta N$ [kN]	$-\Delta M$ [kNm]
10	0	24424	0	0	0,00	0,00
20	10	19594	0,401	52	-288,05	23,27
30	20	18576	0,530	66	-357,61	28,80
35	25	18237	0,575	72	-380,73	30,65
40	30	17958	0,613	77	-399,51	32,17
50	40	17518	0,673	84	-428,48	34,51
60	50	17182	0,720	91	-450,02	36,26
100	90	16336	0,843	106	-500,89	40,36
110	100	16194	0,864	109	-508,94	41,01
150	140	15763	0,930	116	-532,28	42,87
200	190	15406	0,986	122	-550,41	44,29
250	240	15157	1,026	126	-562,41	45,22
260	250	15115	1,033	129	-567,02	45,66
300	290	14913	1,066	131	-575,24	46,27
350	340	14765	1,091	133	-581,80	46,77
400	390	14646	1,111	135	-586,97	47,16
450	440	14546	1,128	136	-591,18	47,48
500	490	14462	1,143	137	-594,68	47,74
1000	990	14002	1,226	142	-612,54	49,04
1500	1490	13798	1,263	143	-619,80	49,55
2000	1990	13678	1,286	144	-623,90	49,83
2500	2490	13597	1,302	145	-626,60	50,02
3000	2990	13537	1,313	145	-628,53	50,15
3500	3490	13492	1,322	145	-630,00	50,25
4000	3990	13455	1,329	145	-631,15	50,33
4500	4490	13425	1,335	146	-632,10	50,39
5000	4990	13400	1,340	146	-632,88	50,44
6000	5990	13359	1,348	146	-634,12	50,52
7000	6990	13328	1,354	146	-635,07	50,59
8000	7990	13303	1,359	146	-635,81	50,63
9000	8990	13283	1,363	146	-636,42	50,67
10000	9990	13266	1,367	146	-636,92	50,71
10010	10000	13266	1,367	146	-636,93	50,71

Çizelge 6.7' de sünme ve rötreyi kısıtlayıcı kuvvetlerin ileriki yükleme süreleri için hesaplanan değerleri gösterilmektedir. Bu kuvvetlerin hesaplanmasının ardından kesitin üst lifindeki şekil değiştirme değişimi $\Delta\epsilon_0$ ve kesitteki eğrilik değişimi $\Delta\phi$ hesaplanmıştır. Bu hesaplar için yaş düzeltilmesi yapılmış tam çatlamış dönüştürülmüş kesitin özellikleri kullanılmıştır. Bu kesite ait değerler için Çizelge 6.6 kullanılmıştır. Buna göre üst lifteki şekil değiştirme değişimi olan $\Delta\epsilon_0$ 10 günlük yükleme süresi için denklem 6.17 kullanılarak,

$$\Delta\epsilon_0 = \frac{24.51 \times 10^6 \times -23.27 \times 10^6 + 10625.23 \times 10^6 \times 288.05 \times 10^3}{19594 \times [104628 \times 10625.23 \times 10^6 - (24.51 \times 10^6)^2]} = 249 \times 10^{-6}$$

olarak hesaplanmıştır.

Aynı yükleme süresi için kesitteki eğrilik değişimi $\Delta\phi$, denklem 6.18 kullanılarak,

$$\Delta\phi = \frac{104628 \times -23.27 \times 10^6 + 24.51 \times 10^6 \times 288.05 \times 10^3}{19594 \times [104628 \times 10625 \times 10^6 - (24.51 \times 10^6)^2]} = 0.462 \times 10^6 \text{ mm}^{-1}$$

olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.8 : Zaman içerisinde üst lif şekil değiştirmesi ve kesit eğriliğindeki değişim

Gün	İlk yüklemenden sonra geçen süre [gün]	A' [mm ²]	W' [mm ³] [x10 ⁶]	I' [mm ⁴] [x10 ⁶]	E _c '(t ₀) [Mpa]	ΔN [kN]	ΔM [kNm]	Δε ₀ [x10 ⁻⁶]	Δφ [x10 ⁻⁶]
10	0	96555	21,04	8723,28	24424	0,00	0,00	0	0
20	10	104628	24,51	10625,23	19594	288,05	-23,27	249	0,462
30	20	106867	25,48	11152,80	18576	357,61	-28,80	323	0,598
35	25	107668	25,82	11341,45	18237	380,73	-30,65	349	0,646
40	30	108349	26,11	11501,91	17958	399,51	-32,17	371	0,686
50	40	109466	26,59	11765,14	17518	428,48	-34,51	405	0,749
60	50	110361	26,98	11975,97	17182	450,02	-36,26	432	0,798
100	90	112770	28,02	12543,58	16336	500,89	-40,36	501	0,922
110	100	113201	28,20	12644,99	16194	508,94	-41,01	512	0,943
150	140	114551	28,78	12963,11	15763	532,28	-42,87	547	1,006
200	190	115726	29,29	13240,00	15406	550,41	-44,29	576	1,058
250	240	116581	29,65	13441,48	15157	562,41	-45,22	597	1,094
260	250	116726	29,72	13475,63	15115	567,02	-45,66	603	1,105
300	290	117446	30,03	13645,16	14913	575,24	-46,27	618	1,132
350	340	117981	30,26	13771,15	14765	581,80	-46,77	630	1,154
400	390	118423	30,45	13875,32	14646	586,97	-47,16	640	1,171
450	440	118797	30,61	13963,36	14546	591,18	-47,48	648	1,186
500	490	119118	30,75	14039,07	14462	594,68	-47,74	654	1,198
1000	990	120937	31,53	14467,54	14002	612,54	-49,04	691	1,265
1500	1490	121779	31,89	14665,94	13798	619,80	-49,55	708	1,294
2000	1990	122288	32,11	14785,93	13678	623,90	-49,83	717	1,311
2500	2490	122637	32,26	14868,24	13597	626,60	-50,02	724	1,323
3000	2990	122896	32,37	14929,08	13537	628,53	-50,15	728	1,331
3500	3490	123096	32,46	14976,34	13492	630,00	-50,25	732	1,338
4000	3990	123258	32,53	15014,38	13455	631,15	-50,33	735	1,343
4500	4490	123391	32,58	15045,82	13425	632,10	-50,39	737	1,347
5000	4990	123504	32,63	15072,34	13400	632,88	-50,44	739	1,351
6000	5990	123684	32,71	15114,90	13359	634,12	-50,52	743	1,357
7000	6990	123824	32,77	15147,79	13328	635,07	-50,59	745	1,361
8000	7990	123936	32,82	15174,16	13303	635,81	-50,63	747	1,365
9000	8990	124028	32,86	15195,88	13283	636,42	-50,67	749	1,368
10000	9990	124106	32,89	15214,16	13266	636,92	-50,71	750	1,370
10010	10000	124106	32,89	15214,32	13266	636,93	-50,71	750	1,370

Daha sonraki yükleme süreleri için de benzer hesaplar yapılmıştır ve elde edilen

değerler Çizelge 6.8' de gösterilmiştir.

Şekil değiştirmedeki ve eğrilikteki değişimlerin elde edilmesinin ardından hem beton hem de donatıdaki gerilme değişimleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.9 : Zaman içerisinde betonda meydana gelen gerilme değişimi

Gün	İlk yüklemeden sonra geçen süre [gün]	$\phi(t, t_0)$	$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ [$\times 10^{-6}$]	$E_c'(t_0)$ [Mpa]	Beton basınç bölgesi derinliği [mm]	$\Delta\varepsilon_0$ [$\times 10^{-6}$]	$\Delta\phi$ [$\times 10^{-6}$]	$\Delta\sigma$ [Mpa]
10	0	0,000	0	24424	0	0	0	0,00
20	10	0,401	52	19594	13	249	0,462	-2,66
30	20	0,530	66	18576	19	323	0,598	-3,20
35	25	0,575	72	18237	26	349	0,646	-3,24
40	30	0,613	77	17958	32	371	0,686	-3,22
50	40	0,673	84	17518	39	405	0,749	-3,26
60	50	0,720	91	17182	45	432	0,798	-3,22
100	90	0,843	106	16336	52	501	0,922	-3,40
110	100	0,864	109	16194	58	512	0,943	-3,21
150	140	0,930	116	15763	65	547	1,006	-3,13
200	190	0,986	122	15406	71	576	1,058	-3,00
250	240	1,026	126	15157	78	597	1,094	-2,80
260	250	1,033	129	15115	84	603	1,105	-2,53
300	290	1,066	131	14913	91	618	1,132	-2,29
350	340	1,091	133	14765	97	630	1,154	-2,03
400	390	1,111	135	14646	104	640	1,171	-1,76
450	440	1,128	136	14546	110	648	1,186	-1,47
500	490	1,143	137	14462	117	654	1,198	-1,17
1000	990	1,226	142	14002	123	691	1,265	-0,93
1500	1490	1,263	143	13798	130	708	1,294	-0,63
2000	1990	1,286	144	13678	136	717	1,311	-0,31
2500	2490	1,302	145	13597	143	724	1,323	0,02
3000	2990	1,313	145	13537	149	728	1,331	0,36
3500	3490	1,322	145	13492	156	732	1,338	0,70
4000	3990	1,329	145	13455	162	735	1,343	1,04
4500	4490	1,335	146	13425	169	737	1,347	1,39
5000	4990	1,340	146	13400	175	739	1,351	1,74
6000	5990	1,348	146	13359	182	743	1,357	2,08
7000	6990	1,354	146	13328	188	745	1,361	2,43
8000	7990	1,359	146	13303	195	747	1,365	2,79
9000	8990	1,363	146	13283	201	749	1,368	3,14
10000	9990	1,367	146	13266	208	750	1,370	3,49
10010	10000	1,367	146	13266	214	750	1,370	3,84

Çizelge 6.9’ da farklı yükleme süreleri için hesaplanmış betondaki gerilme değişimleri gösterilmiştir. Kesitteki mevcut donatılardaki gerilme değişimleri de hesaplanmıştır. 10 günlük yükleme süresi için denklem 6.21 kullanılarak basınç donatısındaki gerilme değişimi,

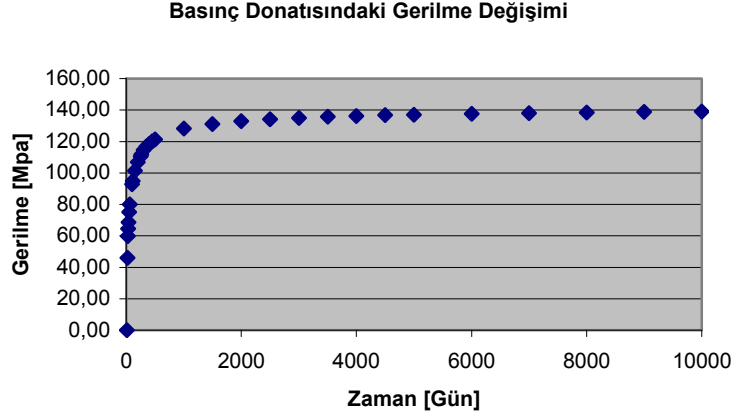
$$\Delta\sigma_{sb} = 200000 \times (249 \times 10^{-6} - 40 \times 0.462 \times 10^{-6}) = 46.07.Mpa$$

olarak hesaplanmıştır.

Aynı yük uygulama süresi için çekme bölgesindeki gerilme değişimi denklem 6.21 kullanılarak,

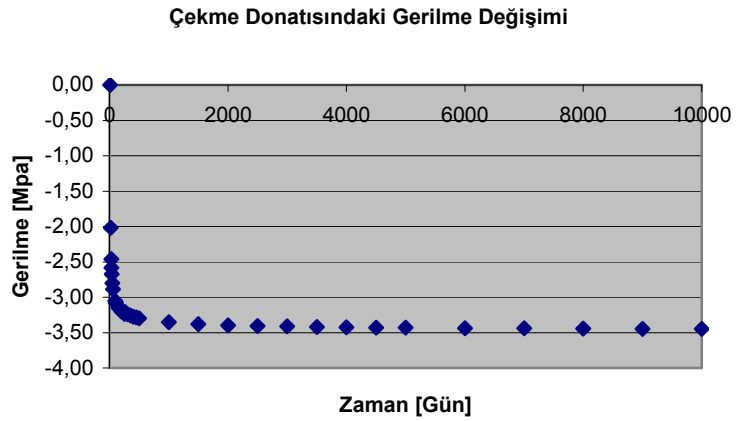
$$\Delta\sigma_{sc} = 200000 \times (249 \times 10^{-6} - 560 \times 0.462 \times 10^{-6}) = -2.02Mpa$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.4 : Farklı yükleme süreleri için basınç donatısındaki gerilme değişimi

Şeki 6.4’ de daha uzun yükleme süreleri için yapılan hesaplar sonucunda elde edilen basınç donatısındaki gerilme değişimi grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Farklı yükleme süreleri için çekme donatısındaki gerilme değişimi

Şekil 6.5’ de daha uzun yükleme süreleri için yapılan hesaplar sonucu çekme donatısında elde edilen gerilme değişimi grafik olarak gösterilmiştir.

6.6.3 Hem eğilme momenti hem de normal kuvvet etkisindeki kiriş kesitinin zamana bağlı analizi

Çalışmanın bu bölümünde, betonarme kiriş kesitinin hem 400 kNm’ lik eğilme momenti hem de $N = 1500$ kN’ lik normal kuvvet etkisinde olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle beton basınç bölgesi derinliği d_n değişmiştir ve 409 mm olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak kesit özellikleri de değişmiştir.

Yapılan hesaplarda betonarme kirişin malzeme özellikleri için Çizelge 6.5’ de yer alan değerler kullanılmıştır. İlk olarak yaş düzeltmesi yapılmış dönüştürülmüş kesitin özellikleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.10 : Yaş düzeltilmesi yapılmış tam çatlamış kesit halinde kesit özellikleri

Gün	İlk yüklemekten sonra geçen süre [gün]	E_c' [Mpa]	n'	A' [mm ²]	W' [x10 ⁶] [mm ³]	I' [x10 ⁶] [mm ⁴]
10	0	24424	8,189	154455	39,14	14557,30
20	10	19594	10,207	162528	42,61	16459,25
30	20	18576	10,767	164767	43,57	16986,82
35	25	18237	10,967	165568	43,92	17175,47
40	30	17958	11,137	166249	44,21	17335,93
50	40	17518	11,417	167366	44,69	17599,16
60	50	17182	11,640	168261	45,07	17809,99
100	90	16336	12,243	170670	46,11	18377,61
110	100	16194	12,350	171101	46,29	18479,01
150	140	15763	12,688	172451	46,88	18797,14
200	190	15406	12,982	173626	47,38	19074,03
250	240	15157	13,195	174481	47,75	19275,50
260	250	15115	13,232	174626	47,81	19309,65
300	290	14913	13,411	175346	48,12	19479,18
350	340	14765	13,545	175881	48,35	19605,17
400	390	14646	13,656	176323	48,54	19709,34
450	440	14546	13,749	176697	48,70	19797,38
500	490	14462	13,829	177018	48,84	19873,10
1000	990	14002	14,284	178837	49,62	20301,57
1500	1490	13798	14,495	179679	49,98	20499,96
2000	1990	13678	14,622	180188	50,20	20619,95
2500	2490	13597	14,709	180537	50,35	20702,26
3000	2990	13537	14,774	180796	50,46	20763,11
3500	3490	13492	14,824	180996	50,55	20810,37
4000	3990	13455	14,864	181158	50,62	20848,40
4500	4490	13425	14,898	181291	50,68	20879,84
5000	4990	13400	14,926	181404	50,72	20906,37
6000	5990	13359	14,971	181584	50,80	20948,93
7000	6990	13328	15,006	181724	50,86	20981,82
8000	7990	13303	15,034	181836	50,91	21008,18
9000	8990	13283	15,057	181928	50,95	21029,90
10000	9990	13266	15,076	182006	50,98	21048,18
10010	10000	13266	15,077	182006	50,98	21048,35

Yaş düzeltmesi yapılmış tam çatlamış kesit halindeki kesit özellikleri farklı yükleme süreleri için Çizelge 6.10’ da verilmiştir.

Çizelge 6.11 : Tam çatlamış kesit halinde çalışan beton kesit alanının özellikleri

M [kNm]	N [kN]	d_n [mm]	A_c [mm ²]	W_c [mm ²]	I_c [mm ⁴]
400	1500	409	122700	25.09x10 ⁶	6841.79x10 ⁶

Ardından sünme ve rötre davranışını kısıtlayıcı kuvvetlerin hesabında kullanılan tam çatlamış kesit halinde çalışan beton kesit alanı özellikleri hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 6.11’ de gösterilmiştir. Bu kesit özelliklerinin belirlenmesinin ardından

sünme ve rötre davranışını kısıtlayıcı rolü olan ΔN ve ΔM kuvvetlerinin hesabı yapılmıştır.

Çizelge 6.12 : M – N etkisindeki kesitte hesaplanan $-\delta_n$ ve $-\delta_m$ kuvvetleri

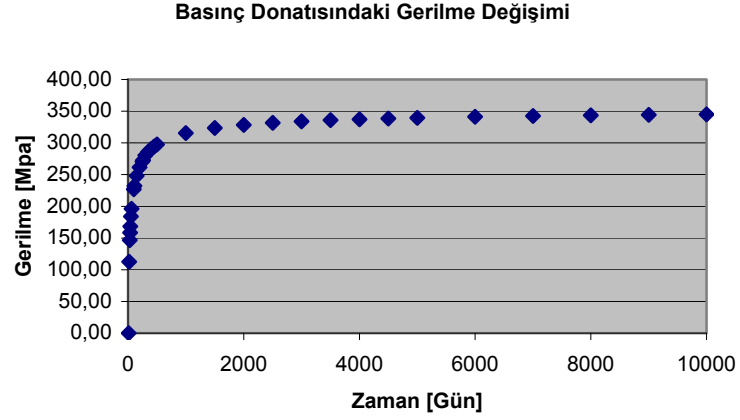
Gün	İlk yüklemeden sonra geçen süre [gün]	$E_c'(t_0)$ [Mpa]	$\phi(t, t_0)$	$\epsilon_{sh}(t, t_0)$	$-\Delta N$ [kN]	$-\Delta M$ [kNm]
10	0	24424	0	0	0,00	0,00
20	10	19594	0,401	52	-833,81	77,94
30	20	18576	0,530	66	-1038,46	96,38
35	25	18237	0,575	72	-1105,72	102,60
40	30	17958	0,613	77	-1160,16	107,67
50	40	17518	0,673	84	-1243,89	115,53
60	50	17182	0,720	91	-1306,07	121,38
100	90	16336	0,843	106	-1453,41	135,13
110	100	16194	0,864	109	-1476,89	137,28
150	140	15763	0,930	116	-1545,46	143,49
200	190	15406	0,986	122	-1599,35	148,22
250	240	15157	1,026	126	-1635,45	151,31
260	250	15115	1,033	129	-1646,38	152,84
300	290	14913	1,066	131	-1672,25	154,82
350	340	14765	1,091	133	-1692,35	156,47
400	390	14646	1,111	135	-1708,33	157,75
450	440	14546	1,128	136	-1721,40	158,79
500	490	14462	1,143	137	-1732,33	159,64
1000	990	14002	1,226	142	-1789,24	163,87
1500	1490	13798	1,263	143	-1812,97	165,51
2000	1990	13678	1,286	144	-1826,58	166,42
2500	2490	13597	1,302	145	-1835,60	167,01
3000	2990	13537	1,313	145	-1842,12	167,42
3500	3490	13492	1,322	145	-1847,09	167,74
4000	3990	13455	1,329	145	-1851,03	167,98
4500	4490	13425	1,335	146	-1854,26	168,18
5000	4990	13400	1,340	146	-1856,95	168,34
6000	5990	13359	1,348	146	-1861,22	168,60
7000	6990	13328	1,354	146	-1864,47	168,79
8000	7990	13303	1,359	146	-1867,06	168,94
9000	8990	13283	1,363	146	-1869,17	169,07
10000	9990	13266	1,367	146	-1870,93	169,17
10010	10000	13266	1,367	146	-1870,95	169,17

Çizelge 6.12’ de farklı yükleme süreleri için betonda görülen sünme ve rötreyi kısıtlayıcı kuvvetler olan ΔN ve ΔM ’ nin aldığı değerler gösterilmiştir. Bu kısıtlayıcı kuvvetlerin hesaplanmasının ardından betondaki ve donatodaki gerilme değişimleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.13 : M – N etkisindeki kesitte zaman içerisinde betonda meydana gelen gerilme değişimi

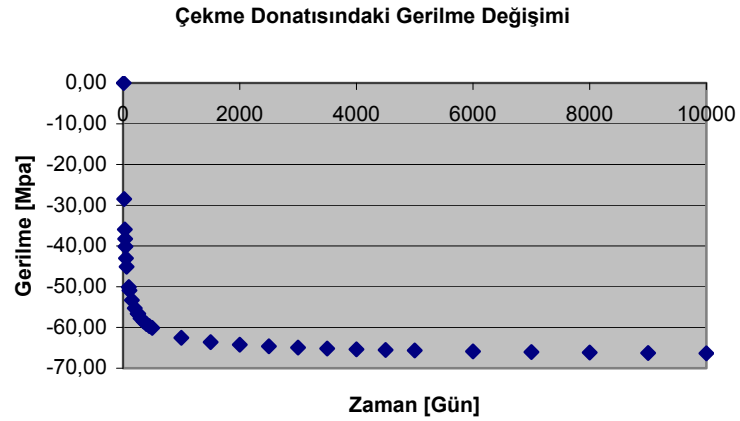
Gün	İlk yüklemeden sonra geçen süre [gün]	$\phi(t, t_0)$	$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ [$\times 10^{-6}$]	$E_c'(t_0)$ [Mpa]	Beton basınç bölgesi derinliği [mm]	$\Delta\varepsilon_0$ [$\times 10^{-6}$]	$\Delta\phi$ [$\times 10^{-6}$]	$\Delta\sigma$ [Mpa]
10	0	0,000	0	24424	0	0	0	0,00
20	10	0,401	52	19594	13	618	1,357	-5,42
30	20	0,530	66	18576	19	804	1,756	-6,73
35	25	0,575	72	18237	26	868	1,892	-6,99
40	30	0,613	77	17958	32	922	2,004	-7,13
50	40	0,673	84	17518	39	1007	2,182	-7,45
60	50	0,720	91	17182	45	1073	2,319	-7,59
100	90	0,843	106	16336	52	1241	2,663	-8,32
110	100	0,864	109	16194	58	1269	2,721	-8,15
150	140	0,930	116	15763	65	1356	2,898	-8,29
200	190	0,986	122	15406	71	1429	3,045	-8,31
250	240	1,026	126	15157	78	1480	3,148	-8,19
260	250	1,033	129	15115	84	1491	3,169	-7,85
300	290	1,066	131	14913	91	1531	3,250	-7,65
350	340	1,091	133	14765	97	1562	3,312	-7,39
400	390	1,111	135	14646	104	1587	3,362	-7,09
450	440	1,128	136	14546	110	1608	3,404	-6,76
500	490	1,143	137	14462	117	1626	3,440	-6,42
1000	990	1,226	142	14002	123	1723	3,636	-6,34
1500	1490	1,263	143	13798	130	1767	3,723	-6,05
2000	1990	1,286	144	13678	136	1793	3,775	-5,68
2500	2490	1,302	145	13597	143	1810	3,810	-5,28
3000	2990	1,313	145	13537	149	1823	3,836	-4,86
3500	3490	1,322	145	13492	156	1833	3,855	-4,43
4000	3990	1,329	145	13455	162	1841	3,871	-3,98
4500	4490	1,335	146	13425	169	1848	3,884	-3,54
5000	4990	1,340	146	13400	175	1853	3,896	-3,08
6000	5990	1,348	146	13359	182	1862	3,913	-2,63
7000	6990	1,354	146	13328	188	1869	3,927	-2,18
8000	7990	1,359	146	13303	195	1874	3,938	-1,72
9000	8990	1,363	146	13283	201	1879	3,946	-1,25
10000	9990	1,367	146	13266	208	1882	3,954	-0,79
10010	10000	1,367	146	13266	214	1882	3,954	-0,31

Yapılan hesaplar sonucunda farklı yükleme süreleri için betonda görülen gerilme değişimi Çizelge 6.13’ de gösterilmiştir. Betondaki gerilme değişimi hesaplandıktan sonra donatıdaki gerilme değişiminin hesabı yapılmıştır.



Şekil 6.6 : M – N etkisindeki kesitte farklı yükleme süreleri için basınç donatısındaki gerilme değişimi

Farklı yükleme süreleri için yapılan hesaplar sonucunda basınç donatısındaki gerilme değişimi şekil 6.6’ da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : M – N etkisindeki kesitte farklı yükleme süreleri için çekme donatısındaki gerilme değişimi

Farklı yükleme süreleri için çekme donatısındaki gerilme değişimi ise Şekil 6.7’ de grafik olarak gösterilmiştir.

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Betonarme yapı elemanlarının servis yükleri altındaki davranışının incelenmesi ve servis yükleri altında zaman içerisinde ortaya çıkacak deformasyonların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalıp kalmadığının anlaşılması açısından zamana bağlı davranışın belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla bu çalışmada betonun iki önemli davranışı olan sünme ve rötrein betonarme yapı elemanlarındaki gerilme ve şekil değiştirme değerlerindeki etkisi 10000 günlük bir zaman süresi için incelenmiştir.

İlk olarak, ACI 209 ve CEB – FIB’ de verilen yöntemlerden yararlanılarak betonun sünme ve rötre büyüklükleri tahmin edilmiştir. Sünmenin zamana bağlı davranıştaki etkisi, tanım olarak sünme şekil değiştirmesinin ani şekil değiştirmeye oranı sünme katsayısının farklı yükleme süreleri için elde edilmesiyle açıklanmaya çalışılmıştır. Benzer şekilde beton kürü bittikten sonra ölçülmeye başlanan rötre şekil değiştirmelerinin de zaman içerisindeki değişimi belirlenmiştir. Bu iki farklı yöntemle hesaplanan değerler arasında farklılıklar olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum literatürde yer alan tahmin yöntemlerinin genel bir özelliği olup daha tutarlı sonuçlar elde etmek amacıyla mümkünse test sonuçlarından yararlanılmalıdır. Yine de mevcut tahmin yöntemleri yardımıyla, ele alınan sünme ve rötre davranışı için bir alt ve üst limit belirlenebilir ve yapılacak tasarımda bu limit değerlerden yararlanılabilir. Betonun sünme ve rötre davranışının uzun süreli davranış üzerindeki etkisini tahmin etmek için kullanılan bu tahmin yöntemleri pratik olmaları açısından tasarım aşamasında bazı kolaylıklar sağlamaktadır.

Betonun sünme ve rötre büyüklüklerinin 10000 günlük süre içerisindeki değişimlerinin elde edilmesinin ardından betonarme kolon ve betonarme kiriş kesitlerinin zamana bağlı analizleri yapılmış ve hem beton hem de donatıdaki gerilme – şekil değiştirme değerlerinin zaman içerisindeki değişimleri ortaya konmuştur. Bu amaçla beş farklı yöntemden yararlanılmıştır. Yapılan hesaplar sonucu elde edilen sonuçlar yöntemler arasındaki farkı ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçların ortak bir noktası olarak betonda hesaplanan toplam şekil değiştirmenin

zaman içerisinde başlangıç şekil değıştirme değeri 2 ila 3 katına çıktığıdır. Benzer bir sonuç beton ve donatıdaki gerilme için de söylenebilir.

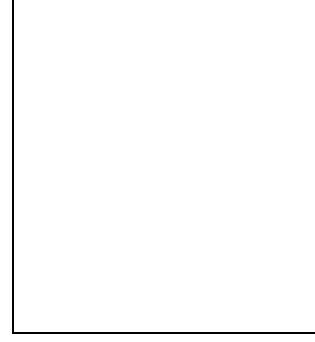
Kullanılan yöntemler arasında matematiksel olarak karmaşık görülebilecekler kadar matematiksel olarak çok basit olanlar da mevcuttur. Burada önemli olan sünme ve rötre davranışını mümkün olduğunca iyi bir şekilde hesaplanama yöntemine yansıtabilmiş olan yöntemin kullanılmasıdır. Bu da gerçek koşullar altında ya da yapılan testler sonucunda elde edilen verilerin bu tür hesaplama yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla ilişkilendirilmesiyle ortaya konulabilir.

Betonun sünme ve rötre davranışı birçok parametreye bağlı karmaşık bir davranıştır. Bu davranışın betonarme yapı elemanlarının servis ömürleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan analitik hesap yöntemleri sayesinde yapı tasarımında zamana bağlı davranışın etkileri daha pratik bir şekilde yansıtılabilir. Yöntemlerin sonuçlarının saha ya da laboratuvar koşullarındaki sonuçlarla desteklenmesi, yöntemlerin uygulanabilirliğini ve geliştirilmesini sağlar.

KAYNAKLAR

- [1] **Celep, Z., Kumbasar, N.**, 2005 , *Betonarme Yapılar*, Beta Dağıtım
- [2] **ACI 435R – 95** : 2003 , Control of Deflections in Concrete Structures, *ACI Committee 435*
- [3] **Gilbert, R. I.** , 1988 , *Time Effects In Concrete Structures*, Elsevier Science Publishers
- [4] **Pauw, A.**, December 1960 , Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density, *ACI Journal*, Vol57, No6, , sayfa 679 – 687
- [5] **Rüsch, H., Jungwirth, D., Hilsdorf, H.K.**, 1983 , *Creep and Shrinkage – Their Effect on the Behaviour of Concrete Structures*, Springer – Verlag
- [6] **Neville, A.M.**, 1970 , *Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed*, North Hollanda Publishing Co., Amsterdam
- [7] **Bazant, Z.P., Wittman, F.H. (editors)**, 1983 , *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley and Sons Ltd.,
- [8] **Trost, H.**, Nisan 1978, Creep and Creep Recovery of Very Old Concrete, *RILEM Colloquim on Creep of Concrete*, Leeds, İngiltere,
- [9] **Mc Henry, D.**, 1943 , *A new Aspect of Creep in Concrete and its Application to Design*, *Proc. ASTM*, 43 , Sayfa 1069 – 1084
- [10] **ACI 209R -92** : 1997, Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, *ACI Committee 209*
- [11] **CEB – FIB 1990**: 1990 , Model Code for Concrete Structures, *Thomas Telford Services Ltd.*
- [12] **Ghali, A., Favre, R., Elbadry, M.**, 2002 , *Concrete Structures – Stresses and Deformations Third Edition*, Spon Press

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet Şinikoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: Çankırı, 1985

Lise: Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi