

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİSKOELASTİK MALZEMELER İÇİN
GELİŞTİRİLMİŞ BİR GERİLME – ŞEKİL
DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN CAM
ELYAF TAKVİYELİ PLASTİK ÇUBUK
SİSTEMLERE UYGULANMASI**

Mutlu SEÇER

Haziran, 2010

İZMİR

**VİSKOELASTİK MALZEMELER İÇİN
GELİŞTİRİLMİŞ BİR GERİLME – ŞEKİL
DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN CAM
ELYAF TAKVİYELİ PLASTİK ÇUBUK
SİSTEMLERE UYGULANMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı

Mutlu SEÇER

Haziran, 2010

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MUTLU SEÇER, tarafından DOÇ. DR. MEHMET EMİN KURAL yönetiminde hazırlanan “VİSKOELASTİK MALZEMELER İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ BİR GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN CAM ELYAF TAKVİYELİ PLASTİK ÇUBUK SİSTEMLERE UYGULANMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet Emin KURAL

Danışman

Prof. Dr. Yıldırım ERTUTAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Atilla ORBAY

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Ömer Zafer ALKU

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Sinan ALTIN

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluşması sırasında, kıymetli yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimi ve rehberliği ile çalışmalarına değer kazandıran değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin KURAL'a gösterdiği yakın ilgi ve desteğinden dolayı sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Yol gösterici değerli görüş ve katkılarıyla çalışmama büyük katkı sağlayan, Tez İzleme Komitesi Üyeleri değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Yıldırım ERTUTAR ve Sayın Prof. Dr. Atilla ORBAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora Yeterlilik Sınavı Jüri Üyesi değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN ve Sayın Prof. Dr. Hikmet Hüseyin ÇATAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın deneysel kısmında kullanılan CTP malzemelerin tedarikini sağlayan PULTECH–FRP firmasına malzeme destekleri için teşekkür ederim. Tasarladığım çelik deney sistemlerinin imalatında emeği geçen Sayın Ramazan TEKİN'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasının deneysel kısmında yardımları ile yanımda olan değerli arkadaşlarım Sayın Dr. Rıfat KAHYAOĞLU, Sayın Dr. H. Murat TANARSLAN ve Sayın Dr. Serdar AYDIN'a teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, büyük bir özveri ile maddi manevi hiçbir desteği benden sakınmayan, babam İnş. Yük. Müh. Tefik SEÇER ve annem Prof. Dr. Müzeyyen SEÇER'e sonsuz minnettarlığımı sunarım. Ayrıca, kardeşim Can SEÇER ve kuzenim Neşet DÜLGE'ye yardımları için teşekkür ederim.

Doktora çalışması TÜBİTAK – BİDEB bursu kapsamında desteklenmiştir.

Mutlu SEÇER

VİSKOELASTİK MALZEMELER İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ BİR GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN CAM ELYAF TAKVİYELİ PLASTİK ÇUBUK SİSTEMLERE UYGULANMASI

ÖZ

Yapı mühendisliği uygulamalarında, yapı malzemesi davranışı oldukça önemli bir role sahiptir. Bazı özel yapıların analizinde veya yapı malzemesinin viskoelastik davranış gösterdiği durumlarda, malzeme davranışının gerçekçi olarak göz önüne alınması gerekir. Bu çalışmada, viskoelastik malzemeli Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkileri deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Çalışmada, CTP profillerden yapılmış tipik taşıyıcı çubuk sistemler laboratuarda uzun süreli yükler altında test edilmiş ve deformasyonları ölçülmüştür. Bu deformasyonların hesaplanabilmesi için hesap yöntemi sunulmuştur.

Çalışmada, viskoelastik davranış açıklanmış ve çözüm yöntemleri örnekler ile incelenmiştir. Viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi için gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi sunulmuş ve bu ilişki sabit, değişken gerilme durumları için araştırılmıştır. Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılarak düzlem kafes ve çerçeve sistemler için geliştirilmiş hesap yöntemleri sunulmuştur.

Çalışmada, CTP profillerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için zamana bağlı olmayan aksenal çekme ve üç nokta eğilme numune deneyleri yapılmıştır. Zamana bağlı davranış numune deneyleri ve tam ölçekli deney sistemleri ile araştırılmıştır. Zamana bağlı numune deneyleri; kısa süreli üç nokta eğilme ve uzun süreli aksenal çekmedir. Kısa süreli üç nokta eğilme ve uzun süreli aksenal çekme numune deneyleri sırasıyla; 24 saat ve 100 gün süresince farklı gerilme seviyeleri için gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı tam ölçekli deneyler ise; tek açıklıklı kiriş, tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve, kafes sistem deneyleridir. Çalışmada sunulan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılarak tek açıklıklı çerçeve ve kafes

sistemlerin zamana bağlı davranışı 100 gün için hesaplanmış ve bu sonuçlar 100 günlük deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve analitik çalışmadan elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Çalışma sonunda, sonuçlar yorumlanmış ve öneriler sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Viskoelastik Davranış, Zamana Bağlı Davranış, Sünme, Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) Profiller, ubuk Sistemler.

**APPLICATION OF A DEVELOPED STRESS – STRAIN – TIME
RELATIONSHIP FOR VISCOELASTIC MATERIALS ON GLASS FIBER
REINFORCED PLASTIC BAR SYSTEMS**

ABSTRACT

In the structural engineering practices, material behavior has a significant role. In the analysis of special structures or under conditions which the structural material is viscoelastic, the material behavior has to be considered realistically. In this study, stress – strain – time relationship for bar systems which are made of viscoelastic Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) profiles are investigated using experimental and analytical methods. Typical structural GFRP bar systems are tested under long-term loads in the laboratory and their deformations are monitored. In order to calculate these deformations an analysis method is presented.

In the study, viscoelastic behavior is summarized and solution methods are investigated using examples. Stress – strain – time relationships for linear and nonlinear viscoelastic analysis of bar systems are derived and the relation is examined for stationary and non-stationary creep problems. The analysis methods for plane truss and frame systems are proposed using the predefined stress – strain – time relationship.

In the study, time-independent tensile and three-point bending coupon test are carried out to find out the mechanical characteristics of GFRP material. Time-dependent behavior is investigated using coupon and full scale tests. Time-dependent coupon tests are; short-term three-point bending and long-term tensile tests. Short-term three-point bending and long-term tensile tests are carried out for 24 hours and 100 days accounting different stress levels, respectively. Time-dependent full scale test are; simple beam, one bay and one span plane frame and truss system tests. Time-dependent behavior of plane frame and truss systems are calculated for 100 days using the predefined stress – strain – time relationship and compared with the 100 day test data. The results of experimental and analytical study are evaluated

using tables and graphics comparably. Finally, results are discussed and recommendations are presented.

Keywords: Viscoelastic Behavior, Time-Dependent Behavior, Creep, Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Profiles, Bar Systems.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Çalışmanın Amacı	3
1.3 Çalışmanın Kapsamı.....	4
1.4 Çalışmanın Yöntemi.....	5
1.5 Literatürde Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar ve Konun Tarihsel Gelişimi ..	7
1.5.1 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkilerinin İncelenmesi ile İlgili Çalışmalar	12
1.5.1.1 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Olmayan Davranışlarının Deney Numuneleri ile İncelendiği Çalışmalar	12
1.5.1.2 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının Deney Numuneleri ile İncelendiği Çalışmalar	14
1.5.1.3 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının Tam Ölçekli Deneyler ile İncelendiği Çalışmalar..	17
BÖLÜM İKİ – GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİNDE KULLANILAN MALZEME MODELLERİ VE UYGULAMALARI	20
2.1 Giriş	20
2.2 Viskoelastik Davranış.....	21

2.2.1 Sünme Davranışı.....	22
2.2.2 Geri Dönüş.....	23
2.2.3 Yumuşama	24
2.3 Temel Sünme Modelleri.....	24
2.3.1 Gerilme Fonksiyon	25
2.3.2 Zaman Fonksiyonu	26
2.3.3 Gerilme – Zaman Fonksiyonu	27
2.4 Doğrusal Viskoelastik Davranış.....	27
2.5 Doğrusal Olmayan Viskoelastik Davranış	28
2.5.1 Geçici Sünmenin İhmal Edilebilecek Kadar Kısa Olması Durumu	29
2.5.2 Geçici Sünmenin İhmal Edilemeyecek Kadar Uzun Olması Durumu	30
2.6 Viskoelastik Davranışın İncelenmesi için Kullanılan Reolojik Modeller.....	32
2.7 Viskoelastik Davranışın Matematiksel Yöntemlerle İncelenmesi	32
2.7.1 Diferansiyel Denklemlerle Viskoelastik Davranışın İncelenmesi.....	32
2.7.2 Heredite İntegralleri ile Viskoelastik Davranışın İncelenmesi.....	34
2.7.3 Viskoelastik Davranışın Sayısal Örnekler ile İncelenmesi.....	34
2.8 Viskoelastik Malzemeli Çubuk Sistemlerin Elastik – Viskoelastik Analojiden Faydalanılarak İncelenmesi.....	36
2.8.1 Viskoelastik Malzemeli Çubuk Sistemlerin Elastik – Viskoelastik Analojiden Faydalanılarak Sayısal Örnekler ile İncelenmesi.....	37
2.9 Viskoelastik Malzemeli Çubuk Sistemlerin Matris – Deplasman Yöntemi ile İncelenmesi.....	42
2.9.1 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisinin Sayısal Örnek ile İncelenmesi ...	43
2.9.2 Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisinin Sayısal Örnek ile İncelenmesi	45

**BÖLÜM ÜÇ – BETON VE ÇELİK KULLANILAN KOMPOZİT
ÇUBUK SİSTEMLERİN VİSKOELASTİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ..... 48**

3.1 Giriş.....	48
3.2 Betonun Şekil Değiştirme Davranışı.....	49

3.2.1 Sünme Bileşeni Etkisi.....	51
3.2.2 Büzülme Bileşeni Etkisi	53
3.3 Betonun Zamana Bağlı Davranışının İncelendiği Yönetmelikler	53
3.3.1 ACI 209R–92 (1997) Yönetmeliğine göre Sünme Davranışı	54
3.4.2 ACI 209R–92 (1997) Yönetmeliğine göre Büzülme Davranışı	54
3.4 Beton ve Çelik Kullanılan Kompozit Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının İncelenmesi için Çeşitli Yöntemler	55
3.4.1 Etkin Modül Yöntemi	55
3.4.2 Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi.....	56
3.4.3 Sünme Oranı Yöntemi	58
3.4.4 Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi.....	60
3.5 Beton ve Çelik Kullanılan Kompozit Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının İncelenmesi için Sayısal Uygulamalar	62
3.5.1 Tek Açıklıklı Kompozit Kirişli Çerçevenin Sünme Davranışının Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile İncelenmesi.....	62
3.5.1.1 Beton ve Çelik Kullanılan Kompozit Kesit için Gerilme, Şekil Değiştirme ve Eğrilik Kavramları.....	62
3.5.1.2 Gerilme ve Şekil Değiştirmenin Zamana Bağlı Değişimi	65
3.5.1.3 Kompozit Eleman Uç Kuvvetlerinin Zamana Bağlı Değişimi	67
3.5.1.4 Kompozit Kirişli Çerçevenin Sayısal İncelemesi	67
3.5.2 İçerisi Beton ile Doldurulmuş Çelik Kutu Kesitli Kolonların Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkilerinin İncelenmesi	75
3.4.2.1 Kompozit Kolon Elemanın Sayısal İncelemesi	75

BÖLÜM DÖRT – VİSKOELASTİK MALZEMELİ ÇUBUK SİSTEMLERİN GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ 81

4.1 Giriş.....	81
4.2 Matematiksel Model için Reolojik Model Geliştirilmesi.....	82
4.3 Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisinin İncelenmesi	84

4.4 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisinin Değişken Gerilme Durumunda Uygulanması.....	85
4.5 Çeşitli Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi.....	88
4.6 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi ile Kafes Sistemlerin İncelenmesi	91
4.7 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi ile Basit Eğilme Davranışının İncelenmesi.....	94
4.8 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi ile Çerçeve Sistemlerin İncelenmesi	101

BÖLÜM BEŞ – CTP PROFİL KULLANILAN ÇUBUK SİSTEMLERİN VİSKOELASTİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ..... 106

5.1 Giriş.....	106
5.2 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması.....	107
5.3 Deneş Düzeni	108
5.3.1 Yükleme Düzeni	108
5.3.2 Ölçüm Düzeni.....	109
5.4 Zamana Bağlı Olmayan Deneyler	110
5.4.1 Zamana Bağlı Olmayan Eksenel Çekme Numune Deneyleri.....	111
5.4.1.1 Zamana Bağlı Olmayan Eksenel Çekme Numune Deneyleri Sonuçları	115
5.4.2 Zamana Bağlı Olmayan Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri.....	118
5.4.2.1 Zamana Bağlı Olmayan Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri Sonuçları	120
5.5 Zamana Bağlı Deneyler.....	124
5.5.1 Kısa Süre ile Zamana Bağlı Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri.....	125
5.5.2.1 Kısa Süre ile Zamana Bağlı Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri Sonuçları	126
5.5.2 Uzun Süre ile Zamana Bağlı Eksenel Çekme Numune Deneyleri	129

5.5.2.1 Uzun Süre ile Zamana Bağlı Eksenel Çekme Numune Deneyleri	
Sonuçları	137
5.5.3 Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Kiriş Sünme Deneyi	139
5.5.3.1 Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Kiriş Sünme Deneyi	
Sonuçları	140
5.5.4 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçeve	
Sünme Deneyi.....	143
5.5.4.1 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçeve	
Sünme Deneyi Sonuçları.....	147
5.5.5 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistem Sünme Deneyi.....	150
5.5.5.1 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistem Sünme Deneyi	
Sonuçları	154

**BÖLÜM ALTI – CTP PROFİL KULLANILAN ÇUBUK SİSTEMLERİN
VİSKOELASTİK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK
VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ..... 159**

6.1 Giriş	159
6.2 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçevenin	
Sünme Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi	159
6.2.1 Analitik Çözüm için Kullanılacak Fonksiyon Katsayılarının Tek Açıklıklı	
Kiriş Deneyi Verileri Kullanılarak Hesaplanması.....	161
6.2.2 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçevenin	
Analitik Çözüm ve Deneysel Çalışma Sonuçlarının İncelenmesi	163
6.3 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistemin Sünme Davranışının Analitik	
ve Deneysel Olarak İncelenmesi	168
6.3.1 Analitik Çözüm için Kullanılacak Fonksiyon Katsayılarının Eksenel	
Çekme Numune Deneyi Verileri Kullanılarak Hesaplanması.....	169
6.3.2 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistemin Analitik Çözüm ve	
Deneysel Çalışma Sonuçlarının İncelenmesi	170

BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR 179

KAYNAKLAR 186

EKLER..... 202

Ek-1: Şekil Listesi 202

Ek-2: Tablo Listesi 206

Ek-3: Sembol Listesi 207

Ek-4: Kısaltma Listesi 211

Ek-5: Bilgisayar Programlarının Değişken Listesi..... 212

Ek-6: Bilgisayar Programlarının Akış Diyagramları..... 215

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Son yıllarda, teknolojideki ilerlemelerle birlikte kompozit malzemelerin çeşitli özellikleri geliştirilmiş ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilir hale gelmiştir (Baker, Dutton ve Kell, 2004). Günümüzde; cam, karbon, aramid gibi farklı elyaf türleri kullanılarak kompozit malzemelerden otomobil parçaları, uçak aksamaları ve inşaat sektöründe dekoratif amaçlı elemanlar üretilebilmektedir (Bedford, 1993). Yapı sistemlerinde, bu tür kompozitlerin taşıyıcı eleman olarak kullanılabilmesi için mukavemet özelliklerinin yeterli olması gerekir. Bu koşulu sağlamak amacı ile yeni bir kompozit üretim yöntemi olan pultrüzyon geliştirilmiştir (Quinn, 1989; Wood, 1983). Pultrüzyon; takviye malzemesi ile bir reçine matrisinin birleştirilip, sıcak bir kalıp boyunca çekilerek kompozit malzeme üretilmesi işlemidir (Barbero, 1999). Pultrüzyon yöntemi ile çelik profil kesitlerine benzer şekillerde ve istenilen boylarda Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) profiller üretilebilmektedir (Bakis ve diğer., 2002). CTP profiller, Avrupa ve Amerika'da olduğu gibi ülkemizde de çeşitli kesit ve boyutlarda imal edilebilmektedir (Pul-tech FRP, 2009).

CTP malzemenin yüksek mekanik dayanımının yanı sıra; hafifliği, korozyona dayanımı, düşük taşıma maliyeti, montaj kolaylığı, elektrik yalıtımı, düşük ısı iletkenliğinin olması, uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymaması, kendinden renklendirilebilme olanağı ve istenildiğinde ışık geçirgenliği sağlanabilir olması gibi özellikleri nedeniyle, CTP profiller inşaat sektöründe birçok malzemenin alternatifi olma yönünde hızla ilerlemektedir. Ayrıca, CTP malzeme; kimyasallara karşı yüksek direnç göstermesi, üretiminin düşük iş gücüyle yapılabilir olması, tasarım esnekliği sağlaması, elektromanyetik alan oluşturmamasından dolayı radyo ve mikro dalga frekanslarını etkilememesi gibi avantajları nedeniyle öne çıkmaktadır (Bakis ve diğer., 2002; Strongwell, 2009). CTP profillerin bu tür özelliklerinden dolayı, inşaat sektöründe taşıyıcı eleman olarak kullanılmasının yolları araştırılmaktadır (Starr, 1983; Qiao, Zou ve Davalos, 2003).

CTP profillerin avantajlarının yanında birtakım dezavantajları da vardır. Pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş CTP profiller viskoelastik özellik taşımaları nedeniyle zamana bağlı davranış gösterirler (Bank ve Mosallam, 1992). Bu davranış sonucu, CTP profillerden yapılmış çubuk sistemler malzeme olarak yüksek mukavemete sahip olmalarına rağmen büyük şekil değiştirmeler yapmaktadır. Günümüzde, çubuk sistemlerin hesap ve boyutlandırılma aşamalarında; birçok malzemenin mükemmel elastik davrandığı, gerilme – şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olduğu ve Hooke kanununa uyduğu varsayılmaktadır. Hesap adımlarını kolaylaştırmak ve yapı mekaniği problemlerinin kolay irdelenmesini sağlamak amacıyla yapılan bu varsayım, kısa süreli yük durumları ile düşük gerilme seviyeleri gibi belirli kabuller altında kullanılmakta ve mühendislik açısından oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak; yüksek sıcaklık altında metaller, ahşap ve beton gibi bazı yapı malzemelerine benzer şekilde, CTP kompozitler zamana bağlı davranış gösterir (Bank, 2006). Bu tür malzemelerde; sabit gerilme altında zamana bağlı olarak şekil değiştirme değerlerinde değişim (sünme), sabit şekil değiştirme altında zamana bağlı olarak gerilme değerlerinde değişim (rölaksasyon) gözlenir (Lakes, 1999). CTP malzemelerin zamana bağlı davranışlarının hesaplarda dikkate alınabilmesi Hooke kanunu ile mümkün olmamaktadır. Bu nedenle; viskoelastik malzemeli CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışlarının incelenmesi için bünye denkleminde, gerilme ve şekil değiştirme ifadelerinin yanı sıra zaman değişkeninin de dikkate alınması önem taşır.

Henüz tüm yapı malzemelerinin viskoelastik davranışını yansıtmak için standart bir teori bulunmamasına rağmen, gerilme – şekil değiştirme – zaman ile ilgili birçok matematiksel ilişki kurulmuştur. Doğrusal ve doğrusal olmayan modeller ile viskoelastik davranış temsil edilmeye çalışılmıştır. Doğrusal davranış belirli kabuller altında incelenmiş, doğrusal olmayan davranışın incelenmesinde ise; daha çok stasyoner sünme problemleri ele alınmış, stasyoner olmayan veya gerilme dağılımının zaman içerisinde değiştiği durumlar detaylı olarak incelenmemiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Son yılların popüler malzemesi olan kompozitler inşaat mühendisliğinde kullanım alanı bulmaktadır. Bu tür malzemelerden yapılan taşıyıcı sistemler dünyada yeni gelişim göstermekte ve tüm yönleri ile araştırılmaktadır. Çelik ve diğer zamana bağlı davranış göstermeyen yapı malzemelerine benzemeksizin CTP profiller viskoelastik olup zamana bağlı davranış gösterirler (Bank 2006). Bu tür viskoelastik malzemelerde dış yükün uygulanması ile birlikte şekil değiştirme değerlerinde; zamanla hızı azalan yavaş bir artış gözlenir. Dış yükün kaldırılması ile birlikte şekil değiştirmede ani elastik geri dönüş ve ardından hızı zamanla azalan bir geri dönüş davranışı ortaya çıkar.

Bu çalışmada; inşaat sektöründe özellikle hızlı, hafif yapı üretimi ve kimyasallara karşı dayanımın gerektiği durumlar için kullanılabilirliği olan cam elyaf takviyeli plastik profillerden yapılmış çubuk sistemlerin uzun süreli sabit yükler altındaki viskoelastik davranışlarının deneysel ve analitik olarak araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada, cam elyaf takviyeli plastik profillerden yapılmış tipik taşıyıcı çubuk sistemler laboratuarda uzun süreli yükler altında test edilmiş ve deformasyonları ölçülmüştür. Bu deformasyonların hesaplanabilmesi için bir hesap yöntemi sunulmuştur.

Detaylı literatür araştırmasından, CTP profilleri ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin viskoelastik davranışlarının deneysel ve analitik olarak incelenmesi hakkında ülkemizde herhangi bir çalışmaya rastlanmamış, yurt dışında ise oldukça sınırlı miktarda çalışmanın mevcut olduğu görülmüştür (Bank, 2006; Mosallam, 1991). Yapılan çalışmalar; daha çok numune deneyleri ve basit kiriş deneyleri şeklinde olup CTP profiller ile oluşturulmuş tam ölçekli çubuk sistemlerin viskoelastik davranışı detaylı bir biçimde araştırılmamıştır. Bu nedenle; çalışmada kullanılan numune deneyleri ve tam ölçekli çubuk sistemler ile yapılan deneylerin literatüre ve ülkemiz bilgi birikimine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

1.3 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma ile viskoelastik malzemeli CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışlarının analitik ve deneysel yöntemler ile incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma, toplam yedi bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; çalışmanın amacı, kapsamı ve çalışmanın yöntemi sunulmuştur. Literatürde konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan bir kısmı verilmiş ve konunun tarihsel gelişimi özetlenmiştir. CTP profillerin zamana bağlı olmayan mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve zamana bağlı viskoelastik davranışın incelenmesi üzerine yapılmış çalışmalar sunulmuştur.

İkinci bölümde; gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerinin incelenmesinde kullanılan yaklaşımlar verilmiştir. Viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin incelenmesi için kullanılan; diferansiyel denklem, integral ve elastik – viskoelastik analogi yöntemleri sayısal örnekler ile irdelenmiştir. Gerilme – şekil değiştirme, gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkileri için uygulamalar yapılmıştır.

Üçüncü bölümde; beton ve çelik kullanılan kompozit çubuk sistemlerin viskoelastik davranışlarının incelenmesinde kullanılan yöntemler araştırılmıştır. Beton ve çelik malzemenin birlikte kullanıldığı kompozit çubuk elemanların sünme ve büzülme davranışları günümüz yönetmelikleri kullanılarak sayısal örnekler ile incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi için çalışmada kullanılan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi ortaya konmuş ve bu ilişki sabit, değişken gerilme durumları için araştırılmıştır. Çalışmada sunulan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi ile zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımları literatürde yer alan bir örnek üzerinde incelenmiştir. Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılarak çerçeve ve kafes sistemler için hesap yöntemleri sunulmuştur.

Beşinci bölümde; CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin viskoelastik davranışları deneysel olarak incelemiştir. Deney elemanlarının özellikleri, deney sistemleri ve deney yöntemleri detaylı bir biçimde sunulmuştur. Çalışmada; CTP profillerin mukavemet özelliklerinin belirlemek için ilk olarak zamana bağlı olmayan aksenal çekme ve üç nokta eğilme numune deneyleri yapılmıştır. Zamana bağlı davranış ise; numune deneyleri ve tam ölçekli deneyler ile araştırılmıştır. Numune deneyleri; kısa süreli üç nokta eğilme ve uzun süreli aksenal çekme deneyleridir. Tam ölçekli uzun süreli deneyler ise; tek açıklıklı kiriş, tek açıklıklı düzlem çerçeve ve kafes sistem deneyleridir.

Altıncı bölümde; viskoelastik malzemeler için geçerli bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınmış ve CTP profiller ile oluşturulmuş tek açıklıklı düzlem çerçeve ve kafes sistem incelenmiştir. Deneysel çalışma ve analitik yöntem sonuçları birlikte yorumlanmış, çubuk sistemlerin viskoelastik davranışı incelenmiştir.

Yedinci bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlar verilmiş ve öneriler sunulmuştur.

1.4 Çalışmanın Yöntemi

Bu çalışmada, viskoelastik malzemeli CTP profiller ile hazırlanmış taşıyıcı çubuk sistemler analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Deney çalışması ve analitik çalışma birbirleri ile ilişkili bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre; malzeme katsayıları elde edilmiş ve analitik bölümde bu katsayılar kullanılmıştır. Çalışmanın yöntemi, aşağıdaki altı kısımda özetlenmiştir.

Deney numuneleri hazırlanması; her deney için ilgili standartlara uygun şekilde CTP numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan CTP profiller Pul-Tech FRP firması tarafından temin edilmiştir. CTP profillerin tümü ülkemizde faaliyet gösteren Pul-Tech FRP firması tarafından imal edilmiştir (Pul-Tech, 2009).

Zamana bağı olmayan numune deneyleri; uzun süreli davranışı araştırılan CTP profillerin maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Zamana bağı olmayan numune deneyleri; aksenal çekme ve üç nokta eğilmedir. CTP numuneler için aksenal çekme deneyi ASTM D3039 – 08 (2008) ve üç nokta eğilme deneyi ASTM D790 – 07 (2007) dikkate alınarak uygulanmıştır.

Zamana bağı numune deneyleri; viskoelastik davranışı deney numuneleri kullanarak incelemek ve gerilme seviyelerinin sünme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla ASTM D2990 – 01 (2001) ilkelerinden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağı numune deneyleri; kısa süreli üç nokta eğilme ve uzun süreli aksenal çekmedir. Kısa süreli üç nokta eğilme numune deneyleri 24 saat, uzun süreli aksenal çekme numune deneyleri ise 100 gün süresince viskoelastik davranışı incelemek amacıyla farklı gerilme seviyeleri altında yapılmıştır.

Zamana bağı tam ölçekli deneyler; viskoelastik davranışı tam ölçekli çubuk sistemler ile incelemek amacıyla yapılmıştır. Zamana bağı tam ölçekli deneyler; tek açıklıklı kiriş, tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve, kafes sistem deneyleridir. Tek açıklıklı kiriş sünme deneyi, kiriş elemanın orta noktasından yüklenmesine şeklinde yapılmıştır. Benzer olarak, tek açıklıklı çerçeve sünme deneyi de çerçeve kirişinin orta noktasından 100 gün süresince yüklenmesi şeklindedir. Kafes sistem sünme deneyi ise; hiperstatik düzlem kafes sistemin 100 gün süresince seçilen bir düğüm noktasından yüklenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Tam ölçekli deneyler için deney ve veri alma süreleri Bank ve Mossallam (1992), Findley (1987), Scott ve Zureick (1998) çalışmaları göz önüne alınarak seçilmiştir.

Analitik bölümde; Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi CTP profiller ile hazırlanmış taşıyıcı çubuk sistemlerin incelenmesi için dikkate alınmıştır. Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisinin geçerliliği Finnie ve Heler (1959) ile Boyle ve Spence (1983) tarafından verilen deney sonuçları, zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımları ile karşılaştırılarak araştırılmıştır. Gerilme – şekil değiştirme – zaman

ilişkisi kullanılarak kafes ve çerçeve sistemler için iteratif hesap yöntemleri sunulmuştur.

Çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında; zamana bağlı numune ve tam ölçekli deneylerden sünme verileri elde edilmiştir. Şekil değiştirme – zaman, yer değiştirme – zaman eğrileri çizilmiştir. Analitik bölümde incelenen, Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi için sünme fonksiyonlarının katsayıları; basit kiriş ve uzun süreli aksenal çekme numune deneylerinden elde edilmiştir. Çerçeve ve kafes sistem, analitik bölümde sunulan çözüm yöntemleri dikkate alınarak, Matlab (2005) ile hazırlanmış ve akış şemaları Ek-5 ile Ek-6’da verilmiş olan programlar kullanılarak hesaplanmıştır. Tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistem için deney verileri ile analitik sonuçlar birbirleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

1.5 Literatürde Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar ve Konunun Tarihsel Gelişimi

Bu bölümde; tez çalışmasında faydalanılan ve çalışma açısından önem arz eden literatür, viskoelastik davranışın incelenmesi ve konunun tarihsel gelişimini yansıtacak şekilde sunulmuştur.

Sünme davranışını ilk olarak Fransız mühendis Vicat (1834) tarafından tespit edilmiştir. Yük altındaki ipek iplikçiklerde de sünme gözlenmiş ve konu ilgi uyandırmıştır. Thurston (1895), sünme davranışının üç safhada incelenebileceğini göstermiştir. Andrade (1910), sünme ile ilgili ilk sistematik araştırmaları gerçekleştirmiştir. Metaller ile bazı alaşımlar üzerinde yaptığı deney sonuçlarına göre çekme etkisindeki bir çubuğun sünme özelliklerini incelemiş ve malzeme katsayılarını belirlemiştir. Norton (1929) ve Bailey (1935) düşük gerilme seviyeleri altında deneyler yapmış ve sünme şekil değiştirmeleri için denklem önermiştir.

1950’li yıllardan itibaren zamana bağlı problemleri çözebilmek için birçok araştırmacı tarafından çeşitli yöntemler sunulmuştur. Bunlara ilk örnek olarak; beton,

plastik, ahşap ve metaller gibi mühendislik malzemelerinin yüksek sıcaklık altındaki zamana bağlı davranışı Freundenthal (1950) tarafından incelenmiştir. Çalışmada incelenen malzeme davranışları doğrusal viskoelastik modeller ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Haddad (1955), doğrusal viskoelastik teoriye önem vermiş ve kompozitlerin viskoelastik hesabı hakkında çeşitli örnekler sunmuştur. Finnie ve Heler (1959), sünme davranışına etki eden faktörleri, sünme ölçüm ve deney yöntemlerini, metallerde sünme mekanizması ve sünme problemlerinin karşılaşıldığı özel durumları araştırmıştır. Lee, Radok ve Woodward (1959), doğrusal viskoelastik malzemeli sistemlerde gerilme dağılımının elde edilebilmesi için kullanılan çeşitli yaklaşımları incelemiştir. Çalışmada, iç basınca maruz viskoelastik malzemeli uzun bir silindir elemanda Laplace dönüşümleri yapılarak Maxwell ve Kelvin modelleri için ayrı ayrı incelenmiştir.

Doğrusal viskoelastik davranışın incelendiği temel çalışmalardan biri de Bland (1960) tarafından hazırlanmıştır. Bland (1960), yay ile sönüm kutusu kullanılarak çeşitli modeller oluşturmuş ve bu modellerin doğrusal viskoelastik davranışlarını incelemiştir. Ünsaç (1960), sünme problemlerinin incelenmesinde kullanılan yöntemleri özetlemiştir. Flügge (1967), doğrusal viskoelastik davranışın temel bağıntılarını açıklamış, diferansiyel denklem ve integral yöntemler ile uygulamalar yapmıştır. Çalışmasında; kolonların burkulması, serbest ve zorlanmış titreşim gibi konuları ele almıştır. Findley ve Lai (1968), sisteme uygulanan uzun süreli gerilmenin kaldırılması ile ortaya çıkan şekil değiştirmedeki doğrusal olmayan geri dönüş davranışını araştırmıştır. Onaran (1969), viskoelastik problemlerin incelenmesi ile ilgili temel kavramları ortaya koymuştur. Rabotnov (1969), diferansiyel denklem ve integral çözüm yöntemlerini sunmuş, deformasyon sertleşmesini incelenmiştir.

Neville ve Dilger (1970); betonun sünme davranışını etkileyen; çimento, agrega, su/çimento oranı, bağıl nem, sıcaklık, kür süresi gibi faktörlerin yanında, betonun yaşı, gerilme seviyesi gibi etkenleri de incelemiştir. Sünme mekanizmasını, sünme davranışını modellemede kullanılan hipotezleri ve deney yöntemlerini açıklamıştır. Sünme etkisi altındaki yapı elemanları için hesap yöntemlerini sunmuştur. Yagh ve Tschögl (1970), doğrusal viskoelastik malzemeli sistemlerin; üçgen, basamak ile

piramit formunda olan ve sürekli parçalar halinde uygulanan yükler altındaki davranışlarını Laplace dönüşümleri kullanılarak araştırmıştır. Penny ve Marriott (1971), viskoelastik davranışın bileşenlerini ayrı ayrı incelemiş ve zaman sertleşmesi, deformasyon sertleşmesi, Marain, Graham – Wallis, Rabotnov ile Besseling yöntemlerini sunmuştur. Sünme ile ilgili boyutlandırma problemlerini kartezyen ve polar koordinatlarda incelemiştir. Lockett (1972), doğrusal viskoelastik davranış ile ilgili temel bilgileri sunmuş, deneysel çalışmaları tanıtmış ve doğrusal olmayan viskoelastik davranış ile ilgili kavramları incelemiştir. Kaya (1973), viskoelastik malzemeler için geçerli bir gerilme – deformasyon – zaman ilişkisi geliştirmiş, ilişkinin geçerliliğini ve uygulamalarını araştırmıştır. Kural (1977), viskoelastik malzemeler için geçerli bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisini iki boyutlu elemanlar için genelleştirmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile plaklara uygulamıştır.

Bazant ve Chern (1982), çeşitli yönetmeliklerde beton için verilen sünme ve büzülme formüllerinin geçerlilik sınırlarını araştırmıştır. Christensen (1982), viskoelastik ile ilgili gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerini sunmuş, sünme ve rölaksasyon için geliştirilmiş modelleri incelemiştir. Chen ve Lin (1982), viskoelastik malzeme modellenmesinde zaman sertleşmesi yaklaşımını kullanmış ve bir kiriş elemanın dinamik davranışını incelemiştir. Boyle ve Spence (1983), sünme problemlerinin karşılaşıldığı mühendislik yapılarını incelemiş ve sünmenin gelişim safhalarını kapsayan sayısal örnekler sunmuştur. Bazant ve Chern (1984), beton kullanılan yapı sistemleri için bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi geliştirmiştir. Çalışmada sunulan bu ilişkide; betonun yaşı ve yükün etkime süresi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Creus (1986), betonun sünme davranışını matematiksel açıdan ele almış ve Trost – Bazant, Dischinger, geliştirilmiş Dischinger yöntemlerini açıklamıştır. Findley (1987), sünme davranışını uzun süreli deneyler ile incelemiştir. Bazant (1988), betonun sünme ve büzülme davranışını modellemek için yapılan analitik ve deneysel çalışmalarla ilgili detaylı bilgi sunmuştur. Findley, Lai ve Onaran (1989), tarafından hazırlanan kitapta sünmenin adımları sunulmuş, viskoelastik davranış incelenmiştir. Çalışmada, doğrusal olmayan viskoelastik davranış için tek ve çok katlı integral yöntemleri ile sünme, rölaksasyon araştırılmıştır. Doğrusal olmayan viskoelastik problemlerin çözüm zorluğu nedeni ile

yapılan kabuller açıklanmış ve çalışmanın son kısmında konu hakkında ek literatür verilmiştir. Othman ve Hayhurst (1989), sünme şekil değiştirmesi için iki parametrelili sünme modeli geliştirmiş ve çeşitli metallerin davranışını incelemiştir.

Chienna, Dezi ve Tarantino (1992), farklı viskoelastik özelliklere sahip elemanlardan oluşan sistemlerin incelenmesinde kullanılan Volterra integrallerinin matematiksel hesap zorluğunu azaltacak bir çözüm yöntemi sunmuştur. Uy ve Das (1997), içerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitlerin zaman bağlı büzülme ve sünme davranışlarını Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile incelemiştir. Sünme ve büzülme modelleri için ACI 209R-92 (1997), beton yaş katsayısı için ise CEB – FIP (1990) kullanmıştır. Sünme ve büzülme nedeni ile şekil değiştirme ve gerilmenin zamana bağlı değişimini araştırmıştır. Dezi, Leoni ve Tarantino (1998), çelik ve betonun birlikte kullanıldığı kompozit kirişlerin uzun süreli yük etkisi altındaki davranışlarını Etkin Modül Yöntemi ile Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemini kullanarak araştırmıştır. Echigo, Tachibana ve Kitajima (1998), sünme ve büzülme etkilerini dikkate alarak çelik ile betonun birlikte kullanıldığı yapı sistemlerinin zamana bağlı davranışlarının incelenmesi için Dischinger Yöntemine benzer bir hesap yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada sunulan yöntemle, köprü tipi kompozit yapılar incelenmiştir. Drozdov (1998a, 1998b) çalışmalarında; sünme, rölaksasyon, Boltzman süperpozisyon prensibi, doğrusal ve doğrusal olmayan viskoelastik davranışını araştırmıştır. Lakes (1998); viskoelastik malzeme ile ilgili temel denklem ve kavramları, gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerini, birçok farklı malzemenin viskoelastik özelliklerini ve kompozit malzeme davranışını incelemiştir. Çalışmada, viskoelastik malzemeler için deney sistem ve yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Jurkiewicz, Destrebecq ve Vergne (1999), kompozit yapıların zamana bağlı doğrusal viskoelastik davranışlarını incelenmek amacıyla bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntemi öngerilmeli basit kiriş, betonarme bir soğutma kulesi yapısına uygulamıştır.

Skrzypek ve Hetnarski (2000); sünme mekanizması, Boltzman süperpozisyon prensibi, zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi gibi yaklaşımları incelenmiştir. Schapery (2000), 1960'lı yıllarda geliştirmiş olduğu viskoelastik

malzemelerin doğrusal olmayan viskoelastik davranışını modelleyen integral ifadesini ve bu tarihten sonra çeşitli malzemeler için yapılan literatürdeki mevcut çalışmaları özetlemiştir. Nakai, Kurita ve Ichinose (2001), içerisi beton ile doldurulmuş çelik boru kesitli kompozit elemanların sünme davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Yük uygulanan elemanlardan elde edilen değerler ile yük uygulanmayan elemanlardan elde edilen büzülme değerlerini dikkate alınarak sünme şekil değiştirmelerini hesaplamıştır. Viskoelastik davranış için Kelvin modelini kullanmıştır. Analitik yöntem ve deneysel yöntem sonuçları ile Japon yönetmeliğinde verilen katsayıları karşılaştırmıştır. Ghali, Favre ve Elbardy (2002), beton kullanılan yapı sistemlerinde sünme ve büzülme, öngerilme çeliğindeki rölaksasyon davranışlarını incelemiştir. Oliveira ve Creus (2003), kompozit malzemelerin viskoelastik davranışlarını çeşitli yük durumları altında ortaya koymuştur. Virtuoso ve Vieira (2004), çelik ve beton malzemeli kompozit kirişlerin sünme ve büzülme davranışlarını incelemiştir. İki açıklıklı bir kirişin uzun süreli davranışını araştırmış ve zaman içerisinde betondaki gerilmelerin azaldığını, çelikteki gerilmelerin ise arttığını sayısal olarak ortaya koymuştur.

Ranzi ve Bradford (2006), beton ve çelik kullanılan kompozit yapı sistemlerinde zamana bağlı sünme ve büzülme davranışlarını Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile incelemiştir. Çalışmada; iki ucu basit mesnetli, iki ucu ankastre ve bir ucu ankastre diğer ucu hareketli mesnetli olan tek açıklıklı kiriş sistemleri sabit yayılı yük etkisi altında araştırılmıştır. Bank (2006), elyaf takviyeli plastik malzemelerin özelliklerini ve davranışlarını açıklamış, uzun süreli yükler etkisi altındaki viskoelastik malzemeli kirişlerin yer değiştirmesini incelemiştir. Bottoni, Mazzotti ve Savoia (2008), doğrusal viskoelastik malzemeli kirişlerin uzun süreli yükler altındaki davranışını genelleştirilmiş doğrusal Maxwell modeli ile araştırmıştır. Çalışmada, U ve kutu kesitli kiriş örneği çeşitli parametreler dikkate alınarak incelenmiş ve zamana bağlı davranışları verilmiştir. Au, Liu ve Lee (2009), beton malzeme kullanılarak imal edilen çerçevelerin zamana bağlı davranışlarının daha detaylı bir şekilde hesaplanması amacıyla Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemini temel alan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sayısal örnek kısmında; konsol kiriş, iki açıklıklı kiriş, tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve, tek katlı ve üç

açıklıklı çerçeve sistemleri çalışmada sunulan zamana bağlı hesap yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

1.5.1 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkilerinin İncelenmesi ile İlgili Çalışmalar

CTP profillerin kullanıldığı çubuk sistemlerin gerilme – şekil değişirme – zaman ilişkilerinin incelendiği çalışmalar bu bölümde özet şeklinde sunulmuştur. Tezin deney kısmına ışık tutması açısından; CTP profillerin incelendiği literatür üç grupta verilmiştir.

1.5.1.1 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Olmayan Davranışlarının Deney Numuneleri ile İncelendiği Çalışmalar

Bank (1989), çalışmasında polyester ve vinil ester ile üretilmiş 914 mm uzunluğunda I kesitli kiriş elemanları deneysel olarak incelemiştir. Dört ayrı CTP profil kullanılarak oluşturulmuş kiriş elemanlar farklı açıklık oranları kullanılarak üç nokta eğilme deneyi ile araştırılmıştır. Çalışmada, her kesit tipi için polyester ve vinil ester bağlayıcılar ayrı ayrı kullanılmıştır. Bank (1989), profil elemanların eğilme davranışı incelenirken kesme tesirinin ihmal edilebilmesi için; profil elemanların boyları ile atalet yarıçapları arasındaki oranın dikkate alınarak karar verilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Stoddard (1997), çalışmasında on sekiz adet çekme ve basınç deney numunesi incelemiştir. Stoddard (1997), ASTM D638 – 08 (2008) standardına göre kemik şeklinde deney numunelerinin daha çok çeneler ile tutulduğu kısımlardan göçtüğünü ve bundan dolayı mümkün olduğu durumlarda dikdörtgen kesitli deney numunelerinin dikkate alındığı ASTM D3039 – 08 (2008)'in kullanılmasını önermektedir. Benzer olarak, Yoon (1993) çalışmasında prizmatik deney numunelerinin nihai yükü tespit etmekte daha başarılı olduğunu görmüştür. Stoddard (1997), deneyleri sonucu maksimum çekme gerilmesini 318 MPa, bu değere karşılık gelen birim deformasyonu %1,50 ve poisson oranını 0,30 olarak elde etmiştir.

Ali ve Kılıç (2002), çalışmasında CTP levhalardan çıkarılmış deney numuneleri ile çeşitli yükleme açıları altında incelenen malzemenin elastik özelliklerini ve gerilme – şekil değiştirme davranışını elde etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, çekme ve basınç için kullanılan numune boyutları birbirinden farklıdır. Çekme deneyi numuneleri daha uzun olup 304,8 mm x 31,8 mm boyutlarındadır. Basınç deneyi numuneleri ise burkulmayı engellemek amacıyla daha kısa olup 165,1 mm x 31,8 mm ile 190,5 mm x 31,8 mm boyutlarındadır. Numuneler; 6,35 mm ve 12,7 mm kalınlıklarda için hazırlanmıştır. Her deney beş kez tekrarlanmış, tüm deney numunelerinin her iki ucunda 63,5 mm'lik başlık bölgesinden çenelere tutturulmuş ve deney yer değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Özellikle basınç deneylerinde bir hata olmaması amacıyla şekil değiştirme ölçerler deney numunelerinin ön ve arkasında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan 6,35 mm ve 12,7 mm kalınlığındaki deney numuneleri için yaklaşık aynı basınç ve çekme dayanımları elde edilmiş, basınç deneyi altında elde edilen elastisite modülü çekme deneyi altında elde edilen elastisite modülünden çok az da olsa yüksek olduğu görülmüştür. Ali ve Kılıç (2002), aksenal çekme etkisi altında çekme dayanımını 300 MPa civarında, elastisite modülünü ise 18 – 20 GPa arasında değişen değerler aldığını belirtmiştir. Ayrıca, deneyler sonucu elde edilen şekil değiştirme değerleri %1,0 – 2,2 arasında olduğundan CTP malzemeler için kritik şekil değiştirme sınırı olarak %1 değerini önermiştir.

Neto ve Rovere (2007), CTP profillerin kullanıldığı sistemlerde elastisite modülünün belirlenmesi için kullanılan yöntemleri araştırmıştır. CTP profiller ile oluşturulmuş sistemler yük etkisi altında önemli deformasyonlar gösterdiğinden elastisite modülünün belirlenmesi ve deformasyon sınırlarının kontrol edilmesi gerekir. Bu nedenle, CTP malzemeli profil ve deney numuneleri için üç nokta eğilme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar analitik denklem çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Neto ve Rovere (2007), ilk olarak 101,6 mm x 101,6 mm x 9,5 mm boyutlarında geniş başlıklı CTP malzemeli I kesit seçmiş ve dört farklı açıklık için üç kez olmak üzere toplam 24 adet üç nokta eğilme deneyi yapmıştır. Ayrıca, üç nokta eğilme numune deneyi için de beş numune geniş başlıklı I profilden çıkarılmış ve

ASTM D790 – 07 (2007)'ye uygun şekilde incelenmiştir. Aynı çalışmada, beş dikdörtgen deney numunesi de yine aynı elemandan çıkarılmış ve ASTM D3039 – 08 (2008)'e uygun olarak aksenal çekme deneyine tabi tutulmuştur. Neto ve Rovere (2007), profil ve deney numuneleri için yapılan üç nokta eğilme deneyleri ile birbirlerine oldukça yakın elastisite modülü değerleri elde etmiştir. Aksenal çekme numune deneylerinden belirlenen elastisite modülü değerleri ise üç nokta eğilme deneylerinden elde edilen değerlerden bir miktar farklıdır.

Na (2008), çalışmasında kullandığı I ve kutu elemanların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla aksenal çekme ve basınç deneyleri için numuneler hazırlamıştır. Çekme numuneleri ile yapılan deneyler sonucunda çekme dayanımının 380 – 420 MPa arasında değişen değerler aldığı ve bu duruma karşılık gelen birim deformasyon değerlerinin ise %1,2 – %1,4 arasında olduğunu tespit edilmiştir. Na (2008), basınç numune deneyleri sonuçları ile çekme numune deneyleri sonuçlarının benzer şekilde olduğunu belirtmiştir.

1.5.1.2 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının Numune Deneyleri ile İncelendiği Çalışmalar

Zamana bağlı olmayan numune deneyleri malzemenin mekanik özellikleri ve kalite kontrolü için önemli olduğu kadar zamana bağlı numune deneyleri de uzun süreli viskoelastik davranışın tespit edilmesi açısından CTP profillerin kullanıldığı yapılarda önem taşır.

Mohammadi (1993) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; sabit yük etkisi altında zamana bağlı davranışı incelemek amacıyla üç deney numunesi ve üç çift korniyer eleman kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deney numunesi ve çift L profiller aynı CTP profil malzeme kullanılarak hazırlanmıştır. CTP profiller L kesitli olup kesit boyutları; 50 mm x 50 mm x 6 mm ve çift L şeklinde kullanılan profillerin boyları 152 mm.'dir. Mohammadi (1993), ilk olarak deney numunelerinin mukavemet özelliklerini belirlemek için aksenal basınç ve çekme deneyleri yapmıştır. Bu deneylerde kullanılan kemik şeklindeki deney numuneleri küçük farklar dışında

ASTM D638 – 08 (2008) ile tarif edilen deney numunelerine benzemektedir. Mohammadi (1993), basınç gerilmesi altında L kesitli profillerden ve deney numunelerinden elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmada, zamana bağlı kısa süreli davranış üç farklı uzunlukta deney elemanı kullanılarak araştırılmıştır. Mohammadi (1993), kısa süreli sünme davranışı için 350 saat ve geri dönüş davranışı için 150 saat dikkate almıştır. Aynı zamanda, bu deney uzun süreli deney için bir ön deney durumu teşkil etmiştir. McClure ve Mohammadi (1995), çalışmalarında 2500 saat (104 gün) uzun süreli sabit basınç gerilmesi altında laboratuvar koşullarında numune deneyleri yapmış ve yük kaldırıldıktan sonra 250 saat için geri dönüş davranışını ölçmüştür. McClure ve Mohammadi (1995), uzun süreli deney sonuçlarına göre hem deney numunelerinde hem de çift korniyer elemanlarda sünme şekil değiştirmesi artışını yaklaşık %15 olarak elde etmiştir.

Mottram (1993), CTP profillerden yapılmış alt ve üstten iki levha ile birleştirilmiş iki kirişin sünme davranışını incelemiştir. Çalışmada, sünme davranışı zamana bağlı üç nokta eğilme deneyi ile araştırılmıştır. Mottram (1993), deney sonuçlarından model katsayıları elde etmiş ve numune deneyleri ile tam ölçekli deneylerin sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğunu görmüştür. Ayrıca, Mottram (1993) CTP levha malzemenin basınç dayanımını numune deneyleri ile ölçmüştür. Çalışmada, üretici firmanın verdiği değerlerden %25 yüksek değerler elde etmiştir.

Sridharan (1997), CTP profillerden hazırlanmış deney numunelerini eğilme etkisi altında incelemiştir. Çalışmada, elemanların maksimum gerilmelerinin sırasıyla; %30, %50 ve %70'ine karşılık gelen gerilmeler uygulanmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklık da bir değişken olarak çalışmada kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ile malzemelerin kullanım ömürlerinin tahmin edilmesi için yöntemler sunulmuştur.

Haris ve Barbero (1998), kompozitlerin doğrusal viskoelastik davranışını Laplace tanım kümesinde modellemiştir. Sünme davranışını incelemek için bir reolojik model kullanılmıştır. Polimer kökenli kompozitlerde sünme deneyleri gerçekleştirmiştir.

Scott ve Zureick (1998), CTP profillerin zamana bağılı sünme davranışını eksenel basınç etkisi altında incelemiştir. Scott ve Zureick (1998), maksimum basınç gerilmesinin %20, %40 ve %60'ı olan basınç gerilmelerini CTP profillerden boyuna doğrultuda kesilmiş deney numunelerine 10000 saat (416,6 gün) süresince uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan I kesitli profiller 102 mm x 102 mm x 6,4 mm boyutlarında cam elyafli vinil ester bağlayıcılı olup bu profillerden çıkarılan deney numuneleri boyutları; 127 mm x 38 mm x 6,4 mm'dir. Sünme deneyi veri okumaları; ilk 24 saatin sonuna kadar saatte bir, ilk ayın sonuna kadar günde bir, ikinci ayın sonuna kadar haftada bir ve deney sonu olan 416,6 gün dolana kadar da her iki haftada bir olacak şekilde yapılmıştır. Scott ve Zureick (1998), 1000 saat (41,6 gün) sünme deneylerinden elde edilen katsayılar ile bir model oluşturmuş ve 416,6 gün için elde edilen deney sonuçları ile iyi bir uyum sağladığını belirtmiştir.

Jahic (2000), uzun süreli sünme deneyleri için CTP malzemeli I profillerden 305 mm x 25 mm x 9,53 mm boyutlarında deney numuneleri hazırlamıştır. Yük uygulamak amacıyla 6,4 mm çapında bir delik deney numunesinin kenarından 13 mm içeride açılmıştır. Birim deformasyon ölçerleri çekme ve basınç örneklerinin her iki tarafına yerleştirilmiştir. Deney numunelerine maksimum gerilmenin sırasıyla; %25, %50, %75 ve %85'i oranlarında gerilmeler uygulanmış ve şekil değiştirme değerlerini laboratuarda ölçülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sünmenin önemli bir kısmının ilk saatlerde meydana geldiği ve sünme hızının yüksek gerilme seviyeleri için arttığı gözlenmiştir.

Kang (2001) çalışmasında; kısa süre içerisinde malzemenin uzun süreli sünme davranışını tespit etmek için kullanılacak katsayılar geliştirmeye çalışmıştır. Çalışmada, kısa süreli sünme numune deneyleri eksenel çekme ve basınç için ayrı ayrı uygulanmıştır. Sünme deneylerinde, kısa süre olarak 2 saat seçilmiş ve elde edilen parametreler uzun süreli deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çalışmada; maksimum gerilmenin %10 (38 MPa), %20 (76 MPa) ve %30 (114 MPa) mertebesinde çeşitli gerilmeler uygulanmış ve deney numunelerinin orta noktalarında sünme şekil değiştirmeleri 2 saat süre için kaydedilmiştir. Deney numuneleri CTP kutu kesitler kullanılarak hazırlanmıştır. Çekme için kullanılan deney numunelerinin

boyutları; 304,8 mm x 25,4 mm x 6,35 mm olup çeneler arasındaki net inceleme uzunluğu 152,4 mm'dir. Basınç için hazırlanan deney numunelerinin boyutları ise; 38,1 mm x 177,8 mm x 6,35 mm olup çeneler arasındaki net inceleme uzunluğu 31,75 mm'dir. Sünme deneyleri, hidrolik deney makinesinde yükün 2 saat süresince sabit tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kang (2001), şekil değiştirmeleri her 10 saniyede 1 veri toplama sistemi ile kaydetmiş ve tüm deneyleri laboratuvar koşulları altında gerçekleştirmiştir. Kang (2001), CTP profillerin eksantrik yük etkisi altındaki sünme davranışını çeşitli eksenel kuvvet değeri ve eksantrisite kombinasyonları için 2000 saat (83 gün) süresini dikkate alarak deneysel olarak incelemiştir. Yükün uygulandığı andan itibaren ilk gün için 30 dakikada bir veri almıştır. İkinci günden itibaren ilk yirmi gün için günde bir ve kalan deney süresince haftada iki kez veri almıştır. Çalışmada; 2 saat süre ile yapılan sünme deneylerinden sonuç olarak elde edilen sünme parametrelerinin 2000 saat (83,3 gün) sünme deneyinden elde edilen sünme parametrelerinden farklı olduğu görülmüştür. Kang (2001)'e göre, kısa süreli (2 saat) sünme deney numuneleri uzun süreli yük tesiri altındaki sünme şekil değiştirmesini iyi temsil edememiştir.

1.5.1.3 CTP Profillerin Kullanıldığı Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının Tam Ölçekli Deneyler ile İncelendiği Çalışmalar

Yapı mühendisi, numune deneyleri sonuçlarını kullanarak yapı tasarımı yapacağı zaman geometri, homojenlik gibi birçok konuda belirli kabuller yapmak zorundadır (Bank, Yin, ve Nadipelli, 1995). Yapılar hakkında doğru bilgiler elde edilebilmesi için tam ölçekli deneyler yapılmalıdır. Literatürde, CTP profillerin kullanıldığı çubuk sistemlerin zamana bağlı uzun süreli davranışı hakkında tam ölçekli deneyler ile ilgili bir kaç çalışma dışında deneysel çalışmaya rastlanmamıştır (Bank, 2006; Mosallam, 1991).

Soliman (1969); gerime seviyesinin sünme davranışı üzerine olan etkilerini dört noktadan eğilme ve eksenel çekme deneyleri ile incelemiştir. Deney elemanları maksimum gerilmenin %64 ile %95'i arasındaki çeşitli gerilme seviyeleri için 3000 saat (125 gün) süre için araştırmıştır. McCormick (1975) ile Alper, Barton ve

McCormick (1997), kompozit malzemeli otoyol köprü kirişinin sünme ve yorulma davranışlarını incelemiştir. Oplinger, Plumer ve Gandhi (1983), pultrüzyon ile üretilmiş kompozit profillerden yapılmış tente taşıyıcı sisteminin kısa ve uzun süreli davranışlarını araştırmıştır.

Holmes ve Rahman (1980), el ile üretilmiş dikdörtgen kutu kesitli kompozit profiller kullanarak, zamana bağlı davranışı laboratuvar koşullarında dört noktadan eğilme deneyi ile araştırmıştır. Deneylerde, 6 m açıklığa sahip kutu kesitli üç adet kiriş eleman kullanmıştır. Birinci deney elemanı maksimum yükün üçte birine göre, ikinci deney elemanı aynı yük için birçok kez yükleme-boşaltma tesirine göre, üçüncü deney elemanı ise sadece zati ağırlığının etkisi altında incelenmiştir. İkinci kiriş eleman, birinci kiriş elemandan bir miktar daha fazla sünme şekil değiştirmesi yapmıştır. Deney sonuçlarına göre; sünme hızı ilk zaman adımlarında maksimum olup zaman içerisinde azalan bir davranış göstermiştir. Üçüncü kiriş elemanın kiriş orta noktası yer değiştirmesi sünme nedeni ile zaman içerisinde oldukça yavaş bir şekilde artmıştır. El ile üretilmiş kompozit profillerin deney sonuçlarına göre sünme nedeni ile oluşan kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerleri; 15000 saat (625 gün) sonunda ani yer değiştirme değerine göre %110 artmış ve 1000 saat (41,6 gün) yüklemesinde dahi ani yer değiştirme değerinde %80 civarında bir artış olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre; sünme hızı uygulanan yük miktarına bağlı olup yüksek yük seviyeleri için arttığı belirtilmiştir.

Mosallam (1991), CTP profilden yapılmış tek açıklıklı ve tek katlı bir düzlem çerçevenin viskoelastik davranışını incelemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çerçeve boyutları 1,83 m x 2,74 m olarak seçilmiştir. Deneyde kullanılan tüm profil ve bulonlar, cam elyaf takviyeli vinil ester bağlayıcılı şekilde üretilmiştir. Zamana bağlı viskoelastik davranışı araştırılan çerçeve sistem geniş başlıklı I kesitler kullanılarak yapılmıştır. Mosallam (1991), çerçeve kirişi açıklığının dörtte bir noktalarına iki adet beton blok asarak sabit yük oluşturmuştur. Sabit yük, CTP profillerden yapılmış çerçeve sisteme 10000 saat (416,6 gün) süresince uygulanmış ve yer değiştirme ile şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir (Bank ve Mosallam, 1992). Ayrıca, viskoelastik davranışın numune deneyleri ile

incelenebilmesi amacıyla deney numuneleri hazırlanmıştır. Eksenel çekme ve kesme numune deneyleri için; tek açıklıklı çerçeve deneyinde kullanılmış geniş başlıklı I profiller ile aynı stoktan gelen elemanlardan deney numuneleri elde edilmiştir. Eksenel çekme ve kesme deney numuneleri sabit gerilme etkisi altında 2000 saat (83,3 gün) süresince incelenmiştir. Mosallam (1991), 2000 saat sonunda kirişteki yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin %10 arttığını görmüştür. Çalışmada, 10000 saat sonunda kirişteki yer değiştirme ile şekil değiştirme değerlerindeki artışın %22'ye ulaştığı ve şekil değiştirme artışının önemli bir kısmının ilk 2000 saat içerisinde gerçekleştiği belirtilmiştir.

Lee, Hollaway, Thorne ve Head (1994), CTP kutu kesitlerin sünme davranışını incelemiştir. Çalışmada, dörtte bir noktalarından mesnetlenmiş 8 m'lik basit kirişin sünme davranışı konsol kısımların uçlarına iki adet sabit yük asılarak 16 ay boyunca gözlenmiştir. Kiriş orta noktası ile yüklerin asıldığı serbest uç kısımları için düşey yer değiştirme değerlerinin sırasıyla; %13 ve %40 civarında artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Bradley, Puckett, Bradley ve Sue (1997), vinil ester ve polyester reçine kullanılan kompozit profillerin zamana bağlı davranışları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; vinil ester reçineli profiller polyester reçineli profillere göre daha düşük sünme şekil değiştirmesi göstermiştir.

BÖLÜM İKİ

GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİNDE KULLANILAN MALZEME MODELLERİ VE UYGULAMALARI

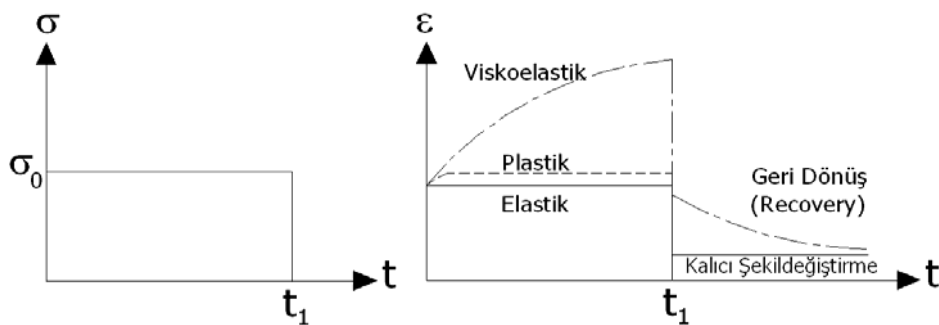
2.1 Giriş

Herhangi bir malzeme sabit gerilme etkisi altında zamanla artan bir şekil değiştirme davranışı gösterirse, bu davranışa sünme (krip) adı verilir. Bu şekilde gerilme – şekil değiştirme ilişkisi de zamanın bir fonksiyonu olur. Sabit gerilme altında zamana bağlı şekil değiştirme davranışı gösteren malzemeye viskoelastik malzeme denir. Viskoelastik davranış sadece sabit gerilme ile sınırlandırılmış olmayıp değişken zorlama halleri için de incelenmektedir (Drozdov, 1998). Polimerler, polimerli kompozitler, ahşap, yüksek ısı altında metaller ve beton gibi birçok malzeme zamana bağlı davranış gösterir (Dorn, 1955; Garofalo, 1965). Ayrıca, makine veya yapı elemanlarının davranışının belirlenmesinde malzemenin sünme davranışı önem taşır (Penny ve Marriott, 1971). Uzun zaman değişmeye devam eden şekil değiştirmeler sonuç olarak eleman boyutlarında kabul edilemeyecek değişikliklere yol açarak kırılmaya neden olabilir. Yüksek hızlarda seyreden bir uçakta meydana gelen sünme olayı proje mühendisini yakından ilgilendiren bir konudur (Boyle ve Spence, 1983).

Bu bölümde; viskoelastik davranış ana hatlarıyla tanıtılmış, çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalar gözden geçirilmiş ve geliştirilmiş temel sünme modelleri sunulmuştur. Doğrusal ve doğrusal olamayan viskoelastik davranış kavramları irdelenerek konu ile ilgili bilgiler verilmiştir. Viskoelastik davranışın matematiksel incelenmesinde kullanılan diferansiyel denklem ve integral yöntemler sayısal örneklerle sunulmuştur. Çubuk sistemlerin viskoelastik davranışı elastik – viskoelastik analogiden yararlanılarak araştırılmıştır. Bölümün son kısmında, çubuk sistemlerin viskoelastik davranışlarının sayısal olarak incelendiği gerilme – şekil değiştirme ve gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerini dikkate alan sayısal örnekler sunulmuştur.

2.2 Viskoelastik Davranış

Zorlanmaya maruz cisimlerin davranışı, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, üç ana başlık altında incelenebilir. En basit davranış elastiktir, karakteristik tarafı ise tersinir oluşudur. Şekil değiştirme – zaman eğrisi, gerilme – zaman eğrisinin belirli bir ölçükle ötelenmesi şeklindedir. Şekil değiştirme yük sabit olduğu sürece mevcut olduğu ve yük kaldırıldığı an kaybolduğu kabul edilir. Birçok malzeme düşük gerilme değerleri altında elastik davranış gösterir.



Şekil 2.1 Sabit gerilme etkisi altında şekil değiştirme davranışı.

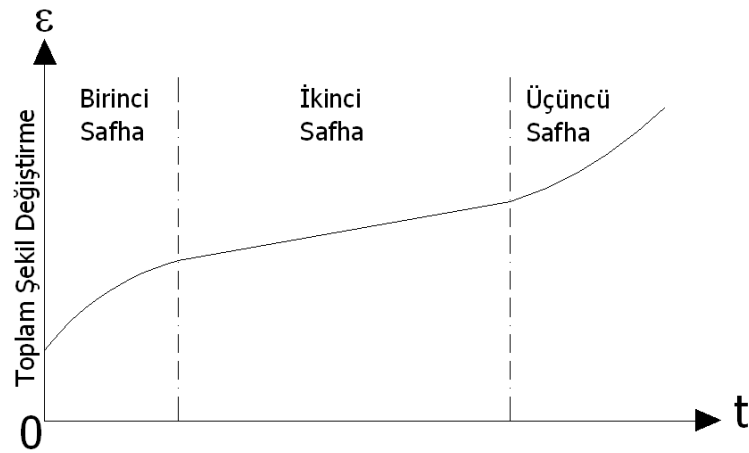
Gerilmeler çok yüksek değerlerde ise davranış elastik değildir. Elastikliğin sınırındaki gerilme değerine elastik limit denir. Bu limitin üzerindeki gerilmeler altındaki davranış plastik davranış olup ikinci tip olarak tanımlanır. Gerilmenin kaldırılmasıyla kaybolmayan şekil değiştirmelere ise plastik şekil değiştirme adı verilir. Bazı malzemelerde gerilmenin tam uygulanmasından sonra bile şekil değiştirmeler kısa bir süre için daha artış gösterir ve sabit gerilme etkisi altında sabit kalır. Yük kaldırılınca ise geriye dönüş tam olmaz, bir miktar kalıcı şekil değiştirme kalır. Bu davranış plastik davranış olarak adlandırılır. Üçüncü tip davranışta ise Şekil 2.1’de görülen yükleme uygulandığında önce ani uzama sonra hızı zamanla azalan devamlı bir uzama görülür. Yük kaldırılınca ani bir geri dönüşü zamanla hızı azalan bir geri dönüş takip eder. Bu tip davranışa viskoelastik davranış denir (Findley, Lai ve Onaran, 1989).

Elastik ve plastik davranışta, herhangi bir andaki şekil değiştirme yükleme hızına bağlı değildir. Viskoelastik davranışta ise gerilmenin son değerine ne kadar hızlı varılırsa şekil değiştirme o kadar fazla olur (Bazant, 1988). Bu durumdan dolayı

viskoelastik cisimlerin davranışı matematiksel olarak ifade ederken gerilme ve şekil değiştirme terimlerinin yanında zaman terimini de ilave etmek gerekir. Zaman teriminin varlığı gerek teorik gerekse deneysel zorluklar arz eder (Finnie ve Heller, 1959). Zaman sabit tutulmadığı gibi tersinir de değildir, deney sırasında yok edilemez, devamlı ölçmeyi gerektiren bir akış halindedir. Şekil 2.1’de görülen viskoelastik malzeme için şekil değiştirme – zaman eğrisini tam bir matematik ifade ile vermek mümkün değildir. Boltzmann (1876) ve Volterra (1909); süperpozisyon, bellekli integral prensiplerini ortaya atarak şekil değiştirmenin geçmişteki büyüklüklere bağlılığını matematiksel olarak ifade etmişlerdir. Teknolojideki son gelişmeler doğrultusunda çeşitli yapı malzemeleri geliştirilmiş ve bu malzemelerin viskoelastik davranışlarının araştırılması önem kazanmıştır (Lakes, 1999). Cisimlerin zamana bağlı davranışı; sünme, geri dönüş ve yumuşama ile incelenebilir (Findley, Lai ve Onaran, 1989).

2.2.1 Sünme Davranışı

Sünme, sabit gerilme altında malzemenin yavaş ve devamlı şekilde şekil değiştirmesidir. Sünme genel olarak Şekil 2.2’de gösterildiği gibi üç evrede incelenir.



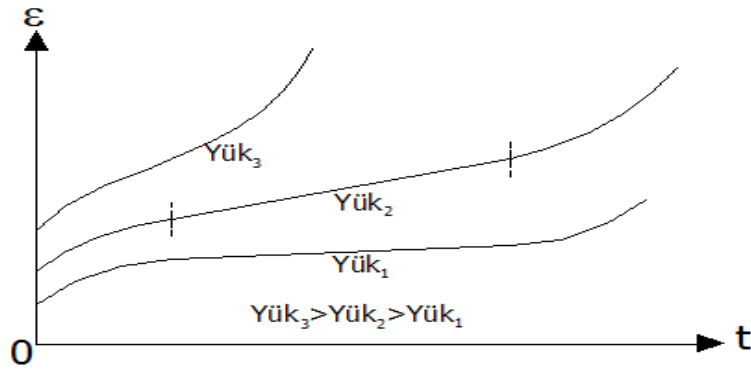
Şekil 2.2 Sünme etkisi altında şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Sünme şekil değiştirme hızının azaldığı ilk kısma geçici sünme, birinci safha veya primer sünme denir. Eğrinin ikinci kısmı ise neredeyse sabit artış hızıyla oluşur ve ikinci safhaya sabit sünme denir. Sabit sünme safhası bazı malzemeler için çok uzun

sürebilir. Üçüncü ve son kısımda hızla artan sünme davranışı ve daha sonra da kırılma gözlenir (Boyle ve Spence, 1983). Viskoelastik bir malzemenin herhangi bir t anı için toplam şekil değiştirmesi denklem (2.1) ile gösterilebilir (Bazant, 1988).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon^c \quad (2.1)$$

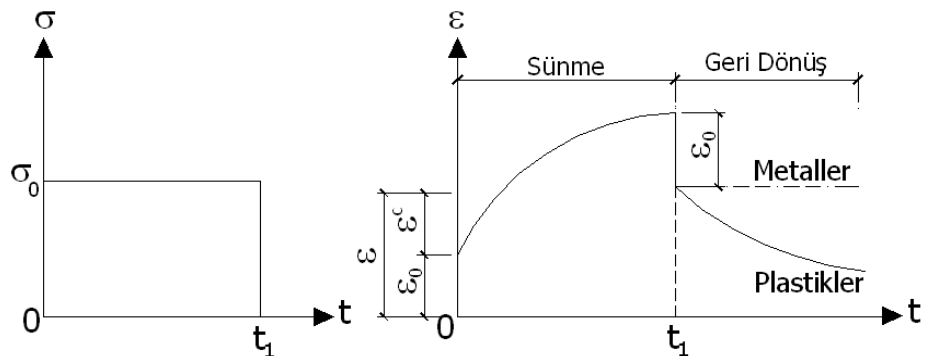
Burada; ε_t toplam şekil değiştirme, ε_0 başlangıç (anı) elastik şekil değiştirme ve ε^c sünme şekil değiştirmesidir. Farklı gerilme seviyeleri için sünme davranışı Şekil 2.3 gibi olur (Lakes, 1999). Gerilme seviyesi değiştikçe eğrilerin formları da değişir.



Şekil 2.3 Farklı yük seviyeleri için şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

2.2.2 Geri Dönüş

Geri dönüş davranışı yük boşaltıldıktan sonra şekil değiştirmenin zamanla yavaş ve devamlı azalmasıdır. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi geri dönüş tam olarak meydana gelemez bir miktar kalıcı şekil değiştirme eleman üzerinde kalabilir.

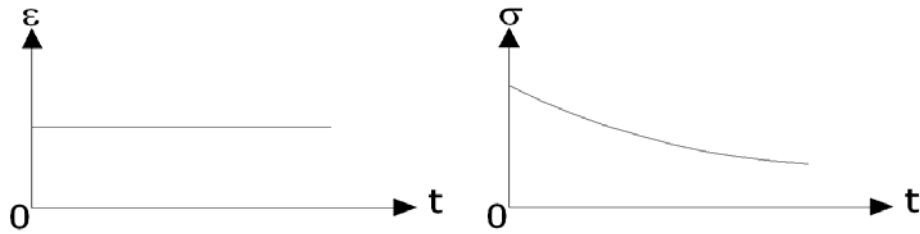


Şekil 2.4 Sabit gerilme altında metal ve plastiklerin sünme ve geri dönüş davranışları.

Metaller için zamana bağlı olan şekil değiştirmenin geri dönüş esnasında çok küçük bir kısmı geri dönerken bazı plastik malzeme çeşitleri için yeterli zaman sağlanırsa geri dönüş işlemi tamamen gerçekleştirilebilir (Finnie ve Heller, 1959). Geri dönüş işlemi gecikmeli elastiklik olarak da adlandırılır (Lakes, 1999).

2.2.3 Yumuşama

Yumuşama (rölaksasyon), Şekil 2.5 ile görüldüğü gibi sabit şekil değiştirme etkisi altında gerilmenin zamanla azalması olarak tanımlanır (Christensen, 1982).



Şekil 2.5 Sabit şekil değiştirme altında yumuşama davranışı.

Yapı malzemelerin zamana bağlı olarak yukarıda belirtilen davranışların veya bu davranışların çeşitli kombinasyonlarının etkisi altında kalabilir. Gerilme etkisi altında, malzemenin davranışı gerilme şiddetine ve şekil değiştirme ile olan ilişkisine bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde olabilir (Lockett , 1972).

2.3 Temel Sünme Modelleri

Standart sünme denklemlerini tanımlamak amacıyla birçok eğri ve eğri denklemleri deneyler sonucunda çeşitli bilim insanlarınca önerilmiştir (Christensen, 1982). Bu denklemler genel olarak birinci (geçici sünme) ve ikinci sünme (sabit sünme) evrelerini kapsayacak şekilde hazırlanmış, üçüncü evre davranışı dikkate alınmamıştır (Hoff, 1962). Andrade (1910), McVetty (1934), Penny ve Marriott (1971) çalışmalarında gerilme (σ), zaman (t) ve sıcaklık tesirlerini (T) denklem ayırarak araştırmıştır. Eğer sıcaklık sabit olarak düşünülürse, sünme şekil değiştirmesi denklem (2.2) şeklinde yazılır (Penny ve Marriott, 1971).

$$\varepsilon^c = f_1^c(\sigma) f_2^c(t) \quad (2.2)$$

Burada; ε^c sünme şekil değiştirmesi, $f_1^c(\sigma)$ sünmenin gerilme bileşeni fonksiyonunu, $f_2^c(t)$ sünmenin zaman bileşeni fonksiyonudur. Sünme davranışının matematik modelleri kurulurken genellikle kuvvet, üstel, hiperbolik, logaritmik fonksiyonlar tercih edilmiş ve deney sonuçları kullanılarak çeşitli ilişkiler elde edilmiştir (Christensen, 1982).

2.3.1 Gerilme Fonksiyonu

Sünme şekil değiştirmesi için denklem (2.2)'de yer alan $f_1^c(\sigma)$ ifadesi Tablo 2.1 ile sunulan fonksiyonlardan herhangi biri kullanılarak yazılabilir. Prandtl (1928), Penny ve Marriott (1971), Rabotnov (1966), Freundenthal (1950), Thien (2002) şekil değiştirme – gerilme ilişkilerinden bazılarını çalışmalarında sunmuştur.

Tablo 2.1 Gerilme fonksiyonu

Literatür	Denklem
Prandtl (1928), Nadai (1938), McVetty (1943)	$\dot{\varepsilon}^c = C_1 \text{sh}(\sigma/C_2)$
Norton (1929)	$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}/E + C_3 \sigma^{C_4}$
Bailey (1935)	$\varepsilon^c = C_5 \sigma^{C_6}$
Soderberg (1936)	$\dot{\varepsilon}^c = C_7 [e^{\sigma/C_8} - 1]$
Dorn (1955)	$\dot{\varepsilon}^c = C_9 e^{C_{10}\sigma}$
Johnson, Henderson ve Khan (1963)	$\dot{\varepsilon} = C_{11}\sigma^{C_{12}} + C_{13}\sigma^{C_{14}}$
Garofalo (1965)	$\dot{\varepsilon}^c = C_{15} [\text{sh}(\sigma/C_{16})]^{C_{17}}$
Odqvist (1966)	$\varepsilon = (\sigma/C_{18})^{C_{19}} + (\sigma/C_{20})^{C_{21}}$
Lemaitre ve Chaboche (1985)	$\dot{\varepsilon}^c = (\sigma/C_{22})^{C_{23}} e^{(C_{24} \sigma^{C_{25}+1})}$

Tablo 2.1'de; σ gerilme, E elastisite modülü, ε şekil değiştirme, ε^c sünme şekil değiştirmesi, $\dot{\sigma}$, $\dot{\varepsilon}$ ile $\dot{\varepsilon}^c$ gerilmenin, şekil değiştirmenin ve sünme şekil değiştirmesinin zamana göre birinci türevi, C_i ($i=1,2,\dots,25$) gerilme fonksiyonu için malzeme sabitleridir.

2.3.2 Zaman Fonksiyonu

Denklemleri (2.2)'de yer alan $f_2^c(t)$ zaman fonksiyonu için Tablo 2.2 kullanılabilir.

Tablo 2.2 Zaman fonksiyonu

Literatür	Denklem
Philips (1905)	$\varepsilon = \varepsilon_0 + a_1 \log t$
Andrade (1910)	$\varepsilon^c = a_2 t^{1/3} + a_3 t$
McVetty (1934)	$\varepsilon^c = a_4 (1 - e^{-a_5 t}) + a_6 t$
Bailey (1935)	$\varepsilon^c = a_7 t^{a_8}$
Leaderman (1943)	$\varepsilon = \varepsilon_0 + a_9 \log t + a_{10} t$
Findley (1944)	$\varepsilon = \varepsilon_0 + a_{11} t^{a_{12}}$
Pugh (1975)	$\varepsilon^c = \frac{a_{13} t}{1 + a_{14} t} + a_{15} t$

Tablo 2.2'de; t zaman, ε şekil değiştirme, ε^c sünme şekil değiştirmesi, ε_0 ani elastik şekil değiştirme, a_i ($i=1,2,\dots,15$) zaman fonksiyonu için malzeme sabitleridir.

2.3.3 Gerilme – Zaman Fonksiyonu

Sünme şekil değiştirme ilişkileri için; gerilme ve zaman etkileri Tablo 2.3 ile sunulduğu gibi hesaplanabilir (Flügge, 1967; Lakes, 1999). Tablo 2.3 ile verilen denklemlerin birçoğunda ilk terimler ilk sünme aşamasındaki azalan gerilme hızını, ikinci terimler ise ikinci sünme aşamasındaki davranışı temsil etmektedir. Tablo 2.3'de yer alan Nutting (1921) ve Findley, Adams, Worley (1948) denklemleri birinci ve ikinci sünme evrelerini modellemek için kullanılır. Tablo 2.3'de bulunan dört terimli Graham ve Wallis (1955) ifadesi ise birinci, ikinci ve üçüncü sünme aşamalarını dikkate almak amacıyla tasarlanmıştır. Ancak, sünmenin üçüncü aşamasını temsil etmekte mevcut modeller genelde yetersiz kalmakta ve bu aşama Tablo 2.3 ile verilen modellerin dışında ayrı olarak incelenmektedir (Lakes, 1999).

Tablo 2.3 Gerilme – zaman fonksiyonu

Literatür	Denklem
Nutting (1921), Scott ve Veinglou (1944)	$\varepsilon^c = D_1 \sigma^{z_1} t^{l_1} \quad (1 < l_1, 1 < z_1)$
Findley, Adams ve Worley (1948)	$\varepsilon^c = D_2 \text{sh}(\sigma/D_3) + D_4 t^{l_2} \text{sh}(\sigma/D_5)$
Graham ve Walles (1955)	$\varepsilon^c = D_6 \sigma^{z_2} t^{l_3} + D_7 \sigma^{z_3} t + (D_8 \sigma^{z_4} + D_9 \sigma^{z_5}) t^3$
Oding (1959)	$\varepsilon^c = \frac{D_{10} \sigma^2 t}{1 + D_{11} \sigma t} + \Psi_1(\sigma) t$
Rabotnov (1966)	$\varepsilon^c = \Psi_2(\sigma) t^{l_3} + \Psi_3(\sigma) t \quad (1/3 < l_3 < 1/2)$
Malinin (1975)	$\varepsilon^c = \Psi_4(\sigma) T_1(t)$
Malinin ve Rzyzsko (1981)	$\varepsilon^c = \Psi_5(\sigma) T_2(t) + \Psi_6(\sigma) t$
Kraus (1980)	$\varepsilon^c = \Psi_7(\sigma) [1 - e^{-D_{12}t}] + \Psi_8(\sigma) [1 - e^{-D_{13}t}] + D_{14}t$
Findley (1987)	$\varepsilon^c = D_{15} \sigma^{z_6} (1 - e^{-D_{16}t}) + D_{17} \sigma^{z_7} t$

Burada; σ gerilme, t zaman, ε^c sünme şekil değıştirmesi, $\Psi_i(\sigma)$ ($i=1,2,\dots,8$) gerilme fonksiyonu, $T_i(t)$ ($i=1,2$) zaman fonksiyonları, D_i ($i=1,2,\dots,17$) gerilme – zaman fonksiyonu için malzeme katsayılarıdır. Ayrıca gerilme – zaman fonksiyonu için; z_i ($i=1,2,\dots,7$) gerilme terimi ve l_i ($i=1,2,3$) zaman terimi malzeme sabitleridir.

2.4 Doğrusal Viskoelastik Davranış

Malzeme doğrusal viskoelastik davranış gösteriyor ise herhangi bir zaman için gerilme şekil değıştirme ile orantılı olur ve süperpozisyon prensibi geçerliliğini korur (Flügge, 1967). Doğrusal viskoelastik davranış durumu matematiksel olarak denklem (2.3) ve denklem (2.4) ile ifade edilebilir (Findley, Lai ve Onaran, 1989).

$$\varepsilon[c\sigma(t)] = c \varepsilon[\sigma(t)] \quad (2.3)$$

$$\varepsilon[\sigma_1(t) + \sigma_2(t - t_p)] = \varepsilon[\sigma_1(t)] + \varepsilon[\sigma_2(t - t_p)] \quad (2.4)$$

Burada; ε şekil değiştirme, $\sigma(t)$ gerilme fonksiyonu, t zaman, t_p yükleme anı, c de bir sabiti gösterir. İlk denklem tek bir gerilme durumu için yazılırken ikinci denklem iki ardışık ancak farklı gerilmenin farklı zamanlarda etkimesi için yazılmıştır. İkinci denklem genel olarak Boltzmann süperpozisyon prensibi olarak adlandırılır (Boltzmann, 1876). Viskoelastik malzemelerin doğrusal teori ile incelenmesi ve matematiksel çözümlerin yapılabilmesi ile davranışın günümüz mühendislik hesaplarında dikkate alınabilmesini sağlamıştır (Lakes, 1999). Bir malzemenin kabul edilebilir sınırlar içerisinde doğrusal olarak analiz edilebilmesi gerilme dağılımına, uygulama türüne ve geçmiş bilgisine dayanır (Lockett, 1972). Doğrusal viskoelastik teori üzerine birçok çalışma yapılmış ve konu ile ilgili önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Bland, 1960; Christensen, 1982; Flügge, 1967).

2.5 Doğrusal Olmayan Viskoelastik Davranış

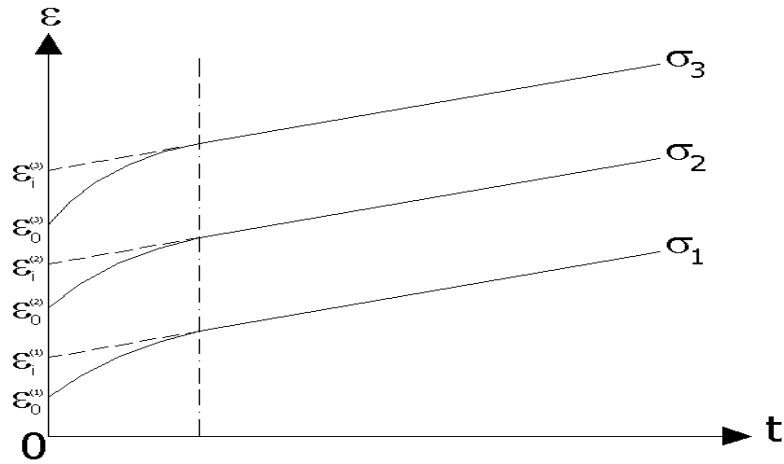
Doğrusal davranış üzerinde geniş ölçüde çalışmalar yapılarak önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen doğrusal olmayan davranış araştırmaları gelişme safhasındadır (Lakes, 1999). Birçok malzeme düşük gerilme seviyeleri altında doğrusal davranırken yüksek gerilme etkisi altında doğrusal olmayan şekilde davranmaktadır (Gilbert, 1988). Diğer taraftan teoriyi destekleyecek dikkatle yapılmış hassas deneysel çalışmaların sayısı oldukça azdır (Lockett, 1972). Gerilme büyüklüğünün kırılma mukavemetinin yaklaşık üçte birini aşması halinde, gerilme ile sünme şekil değiştirmeleri arasında doğrusal olmayan bağıntıların kullanılması gerekir (Hansen, 1962). Bu durumda, sabit gerilme hali için geçerli olan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerini, süperpozisyon işlemi kullanılmadan, değişken gerilme hali için de geçerli olması önem taşır.

Doğrusal olmayan viskoelastik malzemeler genel olarak iki bölümde incelenir. Yarı doğrusal olarak adlandırılan malzeme gurubunda, ani şekil değiştirmenin gerilmeye doğrusal olarak bağlı olduğu kabul edilir. İkinci grupta toplanan malzemeler için ise gerek ani gerekse onu takip eden zamanlardaki gerilme – şekil değiştirme ilişkilerinin doğrusal olmadığı kabul edilir (Kaya, 1968; Lockett, 1972).

2.5.1 Geçici Sünmenin İhmal Edilebilecek Kadar Kısa Olması Durumu

Geçici sünme Şekil 2.6 gibi ihmal edilebilecek kadar kısa bir süreyi kapsıyorsa, sabit sünme için bazı kabuller yapılabilir. Örneğin; sabit sünme yaklaşık olarak bir doğru olduğuna göre, bu safha $t=0$ 'a uzatarak, sabit gerilme hali için denklem (2.1) ifadesi denklem (2.5) gibi yazılır. Denklem (2.5)'de; ε şekil değiştirme, t zaman, $F(\sigma)$ başlangıç şekil değiştirmesi fonksiyonu ve $G(\sigma)$ sünme şekil değiştirme hızı fonksiyonudur.

$$\varepsilon = F(\sigma) + t G(\sigma) \quad (2.5)$$



Şekil 2.6 Çeşitli gerilme seviyeleri için şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Denklem (2.5)'e benzer olarak denklem (2.6) ve denklem (2.7) yazılabilir (Findley, 1987).

$$\varepsilon = F(\sigma) + \int_0^t G(\sigma) dt' \quad (2.6)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} F(\sigma) + G(\sigma) \quad (2.7)$$

Burada; ε şekil değiştirme, t zaman, $F(\sigma)$ başlangıç şekil değiştirme ve $G(\sigma)$ sünme şekil değiştirme hızı fonksiyonlarıdır. Denklem (2.5) tüm deformasyon teorisi, denklem (2.6) ve denklem (2.7) ise kısmi artış deformasyon teorisi olarak bilinir ve sabit gerilme hali için eşdeğer olan bu iki yaklaşım değişken gerilme hali için birbirinden farklı sonuçlar verir (Penny ve Marriott, 1971). Bazı durumlarda denklem (2.5) kolay olduğu için tercih edilmiş olmasına rağmen, denklem (2.6) ve denklem (2.7) yaklaşımının gerçek sistem davranışına daha uygundur (Penny ve Marriott, 1971). Sünme hızı fonksiyonu $G(\sigma)$ için farklı formüller önerilmiştir. Bu formüllerden bazıları; Norton (1929), Prandtl (1928) ve Bailey (1935), formülleri olup Tablo 2.1’de düşük gerilmeler altında sabit sünme bölgesi için tanımlanmıştır.

2.5.2 Geçici Sünmenin İhmal Edilemeyecek Kadar Uzun Olması Durumu

Geçici sünme safhasının ihmal edilemeyeceği durumlarda, denklem (2.1) ile gösterilen şekil değiştirmeler denklem (2.8) şeklinde ifade edilebilir.

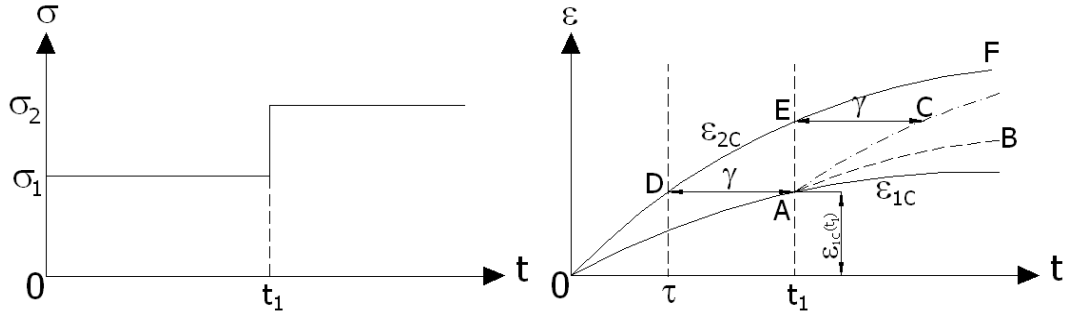
$$\varepsilon = F(\sigma) + G(\sigma, t) \quad (2.8)$$

Burada; ε şekil değiştirme, $F(\sigma)$ başlangıç şekil değiştirme ve $G(\sigma, t)$ sünme şekil değiştirme fonksiyonudur. Sünme şekil değiştirmesinin zaman göre türevi alınırsa sünme hızı denklem (2.9) gibi elde edilir. Sünme şekil değiştirme ile denklem (2.9) arasında zaman terimi elemine edilirse, sünme hızı için denklem (2.10) elde edilir.

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = \frac{dG(\sigma, t)}{dt} = g(\sigma, t) \quad (2.9)$$

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = h(\sigma, \varepsilon^c) \quad (2.10)$$

Burada; ε^c sünme şekil değiştirme, $g(\sigma, t)$ zaman sertleşmesi, $h(\sigma, \varepsilon^c)$ deformasyon sertleşmesidir. Sabit gerilme hali için tamamen eş değer olan denklem (2.9) ve denklem (2.10) değişken gerilme hali için değişik sonuçlar verir.



Şekil 2.7 Zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımları.

Şekil 2.7’de verilen gerilmelerin t_1 anında; σ_1 ’den σ_2 ’ye yükseltildiğini kabul edilmiştir. Şekil değiştirmeler, t_1 anına kadar gerek denklem (2.9) gerekse denklem (2.10) ile hesaplandığında OA eğrisini takip eder ve aynı değer elde edilir. t_1 anından sonraki zaman için; denklem (2.9) AB eğrisini verir. Bu eğri EF eğrisinin AE kadar aşağı kaydırılmış şeklidir. Bunun nedeni; denklem (2.9) ifadesinin gerilme ve zamana bağlı olmasıdır. Sünme hızının, t_1 anından sonra sadece σ_2 değerine ve yüklemekten itibaren geçen süreye bağlı olduğu düşünülür. t_1 anından sonraki zaman için; denklem (2.10) AC eğrisini verir. Bu da DEF eğrisinin AD kadar sağa kaydırılmış şeklidir. Bunun nedeni de denklem (2.10) ifadesinin gerilme ve sünme şekil değiştirmesi değerlerine bağlı olmasıdır. Sünme hızının, t_1 anından sonra yalnız σ_2 gerilmesine ve o andaki sünme miktarına bağlı olduğu düşünülür. Geçici sünme safhasında sünme hızının azalması sertleşme olarak adlandırılır. Denklem (2.9)’da $d\epsilon^c/dt = g(\sigma, t)$ olduğundan sertleşmenin sebebi olarak zaman faktörü kabul edilir ve literatürde zaman sertleşmesi olarak bilinir (Lakes, 1999). Denklem (2.10) ifadesinde $d\epsilon^c/dt = h(\sigma, \epsilon^c)$ olduğundan sertleşmenin nedeni olarak sünme şekil değiştirmeleri kabul edilir ve deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılır (Lakes, 1999). Sisteme σ_1 ve σ_2 ayrı ayrı uygulanır ve değerlerde herhangi bir değişim olmadığı varsayılırsa Şekil 2.7’de görülen ϵ_1^c ve ϵ_2^c sünme şekil değiştirme eğrileri elde edilir. t_1 anındaki gerilme artışı ile elde edilen zaman ve deformasyon sertleşmesi eğrileri bu iki uç değer arasında. Zaman sertleşmesi yaklaşımı daha yaygın olarak kullanılmış ancak büyük gerilme değişimleri söz konusu olan problemlerde deformasyon sertleşmesi yaklaşımına göre hatalı sonuçlar vermiştir (Lakes, 1999). Metal ve plastiklerde deformasyon sertleşmesi ile gerçek davranışa yakın sonuçlar elde edilmiştir (Penny ve Marriott, 1971). Literatürde; doğrusal olmayan viskoelastik

davranışı incelemek için çeşitli analitik çalışmalar yapılmıştır (Finnie ve Heller, 1959; Lockett, 1972; Schapery, 2000).

2.6 Viskoelastik Davranışın İncelenmesi için Kullanılan Reolojik Modeller

Gerçek cisimlerin davranışları, temel reolojik modellerin birleştirilmesinden elde edilen mekanik modellerin davranışlarına benzetilebilir. Temel reolojik modellerin çeşitli şekillerde birleştirilmesi ile meydana gelen Maxwell, Kelvin, Üç Parametrelili Katı Modeli gibi modellerle viskoelastik davranış incelenebilir (Inan, 1996).

2.7 Viskoelastik Davranışın Matematiksel Yöntemlerle İncelenmesi

Literatürde sunulan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkileri genel olarak ampirik formüllerdir. Birçoğu deney sonuçlarından eğri geçirilmesi ile elde edilmiştir (Penny ve Marriott, 1971). Malzemelerin gerçek davranışı düşünülürse; malzemenin şekil değiştirmesi yük geçmişine de bağlı olup sadece son yük durumuna bağlı değildir (Bazant, 1988; Gilbert, 1986). Bundan dolayı malzemelerin sünme davranışı gerilmenin veya şekil değiştirmenin büyüklüğünden ve sırasından etkilenir. Bu düşünce ile birçok matematiksel yöntem viskoelastik davranışı açıklayabilmek için geliştirilmeye çalışılmıştır (Lakes, 1999). Viskoelastik malzemelerde gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerini ifade etmek için diferansiyel denklemler veya integral yöntemler kullanılır (Onaran, 1969).

2.7.1 Diferansiyel Denklemlerle Viskoelastik Davranışın İncelenmesi

Viskoelastik malzemeler; ani elastiklik, gecikmeli elastiklik ve viskoz akışı da içeren zamana bağlı davranış gösterirler (Bazant, 1988). Doğrusal viskoelastik cisimlerin bünye denklemi; denklem (2.11) veya denklem (2.12) şeklinde yazılır (Flügge, 1967).

$$p_0\sigma + p_1\sigma' + p_2\sigma'' + \dots + p_a \frac{\partial^a \sigma}{\partial t^a} = q_0\varepsilon + q_1\varepsilon' + q_2\varepsilon'' + \dots + q_a \frac{\partial^b \varepsilon}{\partial t^b} \quad (2.11)$$

$$\sum_{r=0}^m p_r \frac{\partial^r \sigma}{\partial t^r} = \sum_{r=0}^n q_r \frac{\partial^r \varepsilon}{\partial t^r} \quad (2.12)$$

Burada; p_0, p_1, p_2, \dots ve q_0, q_1, q_2, \dots gerilme ile şekil değiştirme için malzeme sabitleri, σ gerilme, ε şekil değiştirme, noktalı indisler ise değişkenlerin zamana göre türevleridir (Onaran, 1969). Denklem (2.11)'in Laplace dönüşümü ile denklem (2.13), denklem (2.14) veya denklem (2.15) elde edilir (Bland, 1960; Fabrizio ve Angelo, 1992).

$$\hat{P}(s)\hat{\sigma}(s) = (p_0 + p_1s + p_2s^2 + \dots + p_a s^a)\hat{\sigma}(s) \quad (2.13)$$

$$\hat{Q}(s)\hat{\varepsilon}(s) = (q_0 + q_1s + q_2s^2 + \dots + q_b s^b)\hat{\varepsilon}(s) \quad (2.14)$$

$$\sum_0^a p_r s^r \hat{\sigma} = \sum_0^b q_r s^r \hat{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Burada; s Laplace dönüşüm değişkenini, $p_1, p_2, \dots, p_r, \dots$, $q_0, q_1, q_2, \dots, q_r, \dots$ gerilme ile şekil değiştirme için malzeme sabitlerini, $\hat{P}(s)$, $\hat{Q}(s)$ ise gerilme ile şekil değiştirme için Laplace operatörlerini gösterir. Denklem (2.11) ifadesinin çeşitli kombinasyonları viskoelastik davranışı temsil etmek amacıyla oluşturulan modellerin hesaplarında kullanılır. Doğrusal elastik yaylar ile sönüm kutularının çeşitli şekillerde birleştirilmesi ile elde edilen sistemler diferansiyel operatörler kullanılarak incelenebilir. Özellikle serinin belirli bir sayıda terimi seçildiğinde, doğrusal viskoelastik malzemenin özel bir tipinin mekanik davranışa ait bünye denklemini karakterize eder. Laplace operatörlerin derecesi düşük olursa en temel doğrusal viskoelastik kanunlar elde edilir (Haddad, 1955). Malzeme davranışını daha iyi temsil edebilmek amacıyla fazla sayıda terimin hesaplarda dikkate alınması diferansiyel denklem yöntemi pratik olmaktan uzaklaştırır ve her terimin katsayısının tespiti zorlaşır (Bland, 1960).

2.7.2 Heredite İntegralleri ile Viskoelastik Davranışın İncelenmesi

Çubuk sistemlerin viskoelastik davranışı integral operatörleri ile incelenebilir. Herhangi bir gerilme – zaman eğrisi, adım fonksiyonlarının seri toplamı olarak ifade edilebilir (Haddad, 1955). Boltzmann'ın süperpozisyon prensibi dikkate alınır; $t' < t$ için t anındaki şekil değiştirmeler denklem (2.16) ile gösterilebilir ve bu ifade Heredite integrali olarak adlandırılır (Onaran, 1969). Heredite integrali, denklem (2.17) şeklinde de yazılabilir (Flügge, 1967).

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) + \int_0^t J(t-t') \frac{d\sigma'}{dt'} dt' \quad (2.16)$$

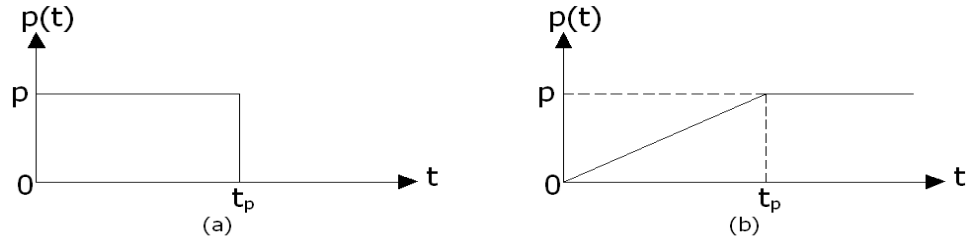
$$\varepsilon(t) = \sigma(t) J(0) + \int_0^t \sigma(t') \frac{dJ(t-t')}{d(t-t')} dt' \quad (2.17)$$

Burada; σ_0 başlangıç anındaki gerilmeyi, $\sigma(t)$ gerilme fonksiyonunu, $J(t)$ sünme uyum fonksiyonunu, t zamanı, t' ise t 'den önceki bir zamanı gösterir. Heredite integrali, herhangi bir andaki şekil değiştirmenin kendisinden önceki tüm gerilme geçmişine bağlı olduğunu gösterir (Onaran, 1969). İntegralin sünme uyum fonksiyonu olarak adlandırılan $J(t)$ kısmı bir hafıza fonksiyonudur ve şekil değiştirme için gerilme geçmişini temsil eder (Christensen, 1982).

2.7.3 Viskoelastik Davranışın Sayısal Örnekler ile İncelenmesi

Sayısal örnekler kısmında; mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan düzgün yayılı yük etkisi altındaki basit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi çeşitli yük tipleri ve viskoelastik malzeme modeli kabullerine göre incelenmiştir.

Basit kiriş üzerindeki düzgün yayılı $p(t)$ yükü – zaman ilişkisi; birinci örnek için Şekil 2.8(a), ikinci örnek için ise Şekil 2.8(b) gibi dikkate alınmış ve her iki örnek için viskoelastik davranış Kelvin modeli ile incelenmiştir. Kelvin modeli için sünme uyum fonksiyonu $J(t)$ denklem (2.18) şeklinde yazılabilir (Flügge, 1967).



Şekil 2.8 Düzgün yayılı $p(t)$ yükü – zaman ilişkisi: (a) Birinci yükleme (b) İkinci yükleme.

Sünme uyum fonksiyonu denklem (2.16)'da yerine yazılmış ve ara işlemler sonucu Şekil 2.8(a) ile verilen birinci yükleme durumunda basit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi $0 < t < t_p$ için denklem (2.19), $t_p < t$ için denklem (2.20) olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 2.8(b) ile verilen ikinci yükleme durumunda basit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi ise; $0 < t < t_p$ için denklem (2.21), $t_p < t$ için denklem (2.22) olarak hesaplanmıştır.

$$J(t) = \frac{1}{q_0} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.18)$$

$$w(L/2, t) = \frac{5 p L^4}{384 I t_p q_0} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (0 < t < t_p) \quad (2.19)$$

$$w(L/2, t) = \frac{5 p L^4}{384 I t_p} [J(t) - J(t - t_p)] \quad (t_p < t) \quad (2.20)$$

$$w(L/2, t) = \frac{5 p L^4}{384 I q_0 t_p} \left[t - \frac{q_1}{q_0} (1 - e^{-\lambda t}) \right] \quad (0 < t < t_p) \quad (2.21)$$

$$w(L/2, t) = \frac{5 p L^4}{384 I q_0 t_p} \left[t_p - \frac{q_1}{q_0} e^{-\lambda t} (e^{-\lambda t_p} - 1) \right] \quad (t_p < t) \quad (2.22)$$

Bu denklemlerde; $J(t)$ sünme uyum fonksiyonu, t zaman, q_0 ve q_1 malzeme sabitleri, $\lambda = q_0/q_1$, $p(t)$ yük – zaman fonksiyonu, p düzgün yayılı yük, L kiriş açıklığı, t_p Şekil 2.8 ile verilen yükün uygulanma süresi, I atalet momenti değeridir.

Üçüncü sayısal örnek için basit kiriş üzerindeki düzgün yayılı $p(t)$ yükü – zaman ilişkisi Şekil 2.8(a)'da verildiği gibi dikkate alınmış ve Kelvin modeline seri bir yay bağlanması ile elde edilen Üç Parametrelili Katı Model için çözüm yapılmıştır. Üç Parametrelili Katı Model için sünme uyum fonksiyonu $J(t)$ denklem (2.23) şeklindedir (Flügge, 1967). Sünme uyum fonksiyonu denklem (2.16)'da yerine yazılmış ve ara işlemler sonucu Şekil 2.8(a)'da verilen yükleme durumunda basit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi $0 < t < t_p$ için denklem (2.24), $t_p < t$ için denklem (2.25) olarak hesaplanmıştır.

$$J(t) = \frac{p_1}{q_1} e^{-\lambda t} + \frac{1}{q_0} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.23)$$

$$w(L/2, t) = \frac{5 p L^4}{384 I} \left[\left(-\frac{p_1}{q_1} + \frac{1}{q_0} \right) (1 - e^{-\lambda t}) \right] \quad (0 < t < t_p) \quad (2.24)$$

$$w(L/2, t) = \frac{5 p L^4}{384 I} \left[\left(-\frac{p_1}{q_1} + \frac{1}{q_0} \right) (e^{-\lambda t_p} - 1) e^{-\lambda t} \right] \quad (t_p < t) \quad (2.25)$$

Bu denklemlerde; $J(t)$ sünme uyum fonksiyonu, t zaman, q_0 , q_1 , p_1 malzeme sabitleri, $\lambda = q_0/q_1$, p düzgün yayılı yük, L kiriş açıklığı, t_p Şekil 2.8(a) ile verilen yükün uygulanma süresi, I atalet momenti değeridir.

2.8. Viskoelastik Malzemeli Çubuk Sistemlerin Elastik – Viskoelastik Analojiden Faydalanılarak İncelenmesi

Viskoelastik malzemelerde, elastisite ve plastisite konularında dikkate alınmayan zaman faktörü dikkate alınmaktadır. Viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin gerilme analizlerinde zamanın değişken olarak hesaplarda dikkate alınması gerektiğinden hesap aşamaları elastisite problemlerinden daha karmaşıktır. Birçok viskoelastik problemde sınır koşullarının zaman içerisinde sabit olduğu kabulü ile zaman değişkeni Laplace dönüşümü uygulanarak eşdeğer elastik probleme

çevrilebilir (Christensen, 1982). Eşdeğer elastik problem için gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra ters Laplace dönüşümü uygulanır ve zamana bağlı viskoelastik çözüm elde edilmiş olur. Bu yöntem elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibi olarak adlandırılmış ve işlem adımları aşağıda özetlenmiştir (Betten, 2005; Flügge, 1967):

- a- Eşdeğer doğrusal elastik sistem istenilen değerler için hesaplanır.
- b- Elastik çözümün Laplace dönüşümü yapılır, t değişkenleri s değişkeni halini alır.
- c- İntegral veya diferansiyel operatör gösterimde Laplace dönüşümü yapılırken elastisite modülü ifadesi yerine eşdeğer olan $s \hat{E}(s)$ veya $\hat{Q}(s)/\hat{P}(s)$ yazılır.
- d- Aranılan değerler için Laplace değişkenleri ile hesap yapılır.
- e- Ters Laplace dönüşümü uygulanarak zamanın fonksiyonu olarak viskoelastik çubuk elemanın çözümü elde edilmiş olur.

2.8.1 Viskoelastik Malzemeli Çubuk Sistemlerin Elastik – Viskoelastik Analojiden Faydalanılarak Sayısal Örnekler ile İncelenmesi

Viskoelastik malzemeli çubuk sistemler için elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibi kullanılarak tek açıklıklı bir kirişin orta noktasının düşey yer değiştirmesi çeşitli yük ve viskoelastik malzeme modeli kabullerine göre hesaplanmıştır.

Elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibi ile düzgün yayılı $p(t)$ yükü etkisi altındaki basit kirişin orta noktasının düşey yer değiştirmesi incelenmiştir. Düzgün yayılı yük – zaman ilişkisi; birinci örnek için $p(t)=p$ şeklinde dikkate alınmış ve viskoelastik davranış Kelvin modeli ile incelenmiştir. Kelvin modelinin diferansiyel denklemi denklem (2.26) şeklindedir.

$$\sigma = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} \quad (2.26)$$

Burada; q_0 , q_1 malzeme katsayıları, σ gerilme, ε şekil değiştirme, $\dot{\varepsilon}$ şekil değiştirmenin zamana göre türevidir. Elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibinden faydalanarak Laplace dönüşümü $\hat{P}(s)=1$ ve $\hat{Q}(s)=q_0 + q_1s$ dikkate alınarak uygulanmış ve kirişin düşey yer değiştirmesi denklem (2.27) ile yazılmıştır. Ters

Laplace dönüşümü ile denklem (2.27)'den zaman değişkenine bağlı denklem (2.28) elde edilmiştir. Kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi denklem (2.29) şeklinde hesaplanmıştır.

$$\hat{w}(x,s) = \frac{p}{24I} \frac{1}{q_0s + q_1s^2} (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) \quad (2.27)$$

$$w(x,t) = \frac{p}{24Iq_0} (1 - e^{-\lambda t}) (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) \quad (2.28)$$

$$w(L/2,t) = \frac{5pL^4}{384Iq_0} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.29)$$

Burada; q_0 , q_1 malzeme katsayıları, $\lambda = q_0/q_1$, s Laplace değişkeni, L kiriş açıklığı, t zaman değişkeni, x konum değişkeni, p yük değeri, I atalet momentidir.

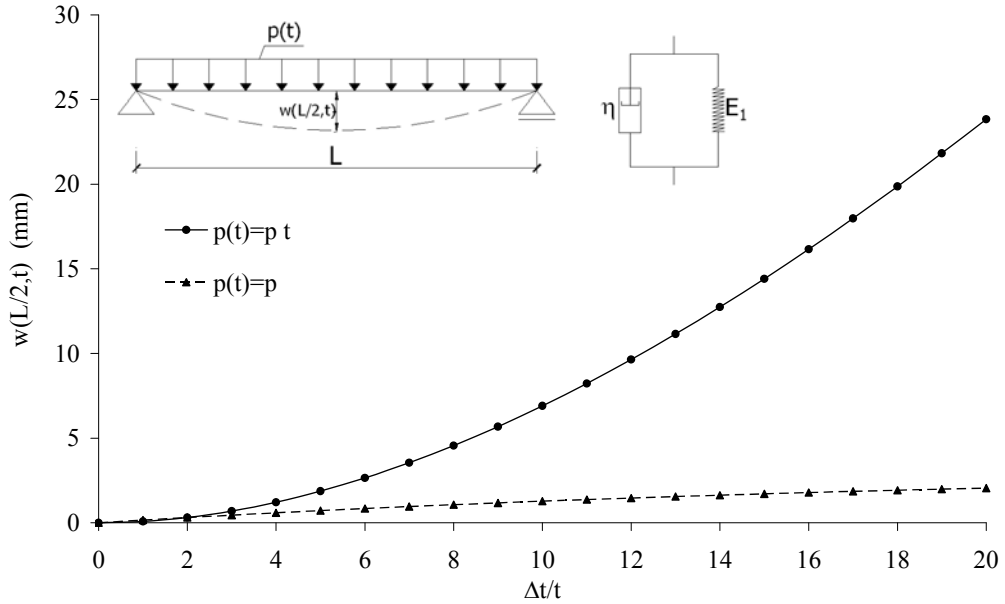
İkinci sayısal örnek için ise; düzgün yayılı yük – zaman ilişkisi $p(t)=pt$ olarak dikkate alınmış ve viskoelastik malzemeden yapılmış basit kiriş Kelvin Modeli ile modellenmiştir. Kelvin modeli diferansiyel denklemi denklem (2.26) ile gösterilmiş olup elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibinden faydalanarak Laplace dönüşümü ile kirişin yer değiştirmesi denklem (2.30) olarak elde edilmiştir. Ters Laplace dönüşümü ile denklem (2.30) ile zamana bağlı denklem (2.31) elde edilmiştir. Kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi denklem (2.32) şeklinde hesaplanmıştır.

$$\hat{w}(x,s) = \frac{p}{24I} \frac{1}{q_0s^2 + q_1s^3} (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) \quad (2.30)$$

$$w(x,t) = \frac{p}{24I} \frac{1}{q_1} \left(\frac{t}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} (1 - e^{-\lambda t}) \right) (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) \quad (2.31)$$

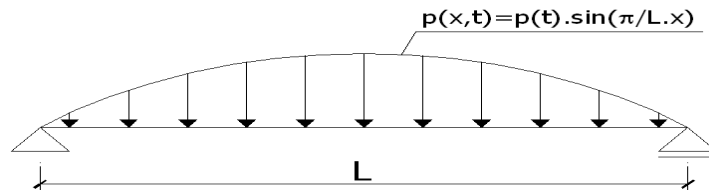
$$w(L/2,t) = \frac{5pL^4}{384Iq_0} \left(t - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \right) \quad (2.32)$$

Burada; q_0 , q_1 malzeme katsayıları, $\lambda = q_0/q_1$, s Laplace değişkeni, L kiriş açıklığı, t zaman değişkeni, x konum değişkeni, p yük değeri, I atalet momentidir. Birinci ve ikinci sayısal örnek ile elde edilen sonuçları grafik olarak sunmak amacıyla; $E_1=10^4$ MPa, $\eta=2 \cdot 10^5$ MPa sn, $L=6000$ mm, $p=5$ kN/m, dikdörtgen kiriş boyutları 250 mm x 500 mm olarak kabul edilmiş ve Şekil 2.9 elde edilmiştir.



Şekil 2.9 Düzgün yayılı yüklü basit kirişin orta noktası yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

Üçüncü sayısal örnek için; Şekil 2.10'da verilen ve sinüs eğrisi formundaki yayılı yük etkisindeki basit kiriş incelenmiştir. Viskoelastik malzemeden yapılmış basit kiriş $p(t)=p \cdot t$ yükü ve Üç Parametrelili Katı Model kullanılarak modellenmiştir. Üç Parametrelili Katı Modelin diferansiyel denklemi denklem (2.33) ile verilmiştir.



Şekil 2.10 Sinüs eğrisi formunda yayılı yüklü basit kiriş.

Elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibinden faydalanarak Laplace dönüşümü, $\hat{P}(s) = 1 + p_1 s$ ve $\hat{Q}(s) = q_0 + q_1 s$ ifadeleri dikkate alınarak uygulanmış ve kirişin yer değiştirmesi denklem (2.34) olarak hesaplanmıştır. Ters Laplace dönüşümüyle

denklem (2.34) kullanılarak denklem (2.35) elde edilmiştir. Kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi ise denklem (2.36) şeklinde hesaplanmıştır.

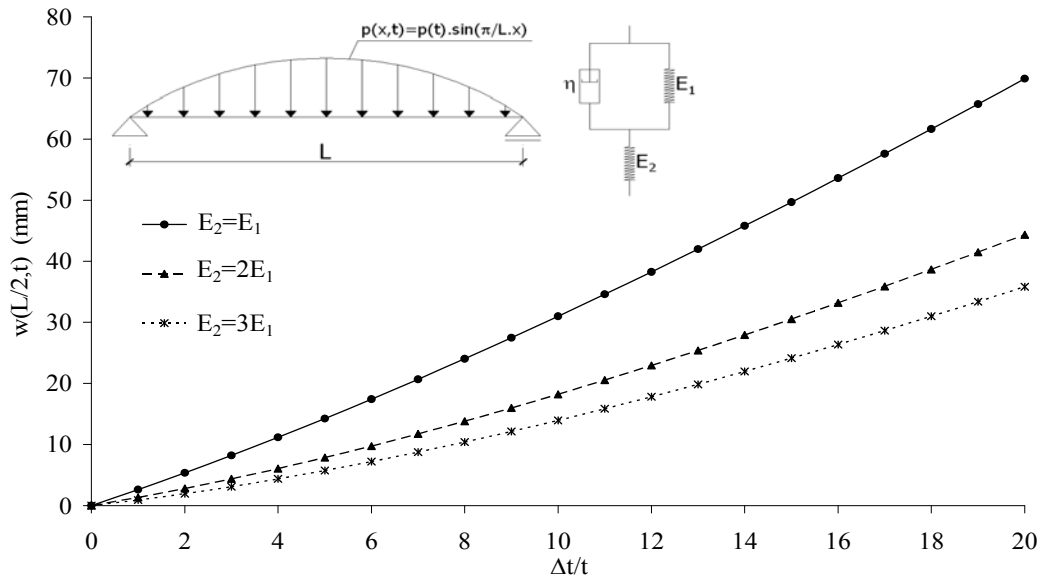
$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} \quad (2.33)$$

$$\hat{w}(x, s) = \frac{p}{I} \left(\frac{1}{(q_0 + q_1 s)s^2} + \frac{p_1}{(q_0 + q_1 s)s} \right) \frac{L^4}{\pi^4} \sin\left(\frac{\pi}{L} x\right) \quad (2.34)$$

$$w(x, t) = \frac{p}{I} \left(\frac{1}{q_0} \left(t - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \right) + \frac{1}{q_0} p_1 (1 - e^{-\lambda t}) \right) \frac{L^4}{\pi^4} \sin\left(\frac{\pi}{L} x\right) \quad (2.35)$$

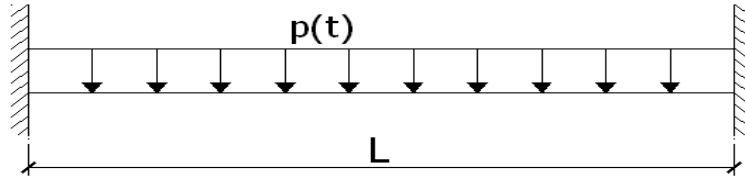
$$w(L/2, t) = \frac{p}{I} \left(\frac{1}{q_0} \left(t - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \right) + \frac{1}{q_0} p_1 (1 - e^{-\lambda t}) \right) \frac{L^4}{\pi^4} \quad (2.36)$$

Burada; q_0 , q_1 , p_1 malzeme katsayıları, $\dot{\varepsilon}$ ile $\dot{\sigma}$ şekil değiştirmenin ve gerilmenin zamana göre birinci türevi, $\lambda = q_0/q_1$, s Laplace değişkeni, t zaman değişkeni, L kiriş açıklığı, x konum değişkeni, p yük değeri, I atalet momentidir. Denklem (2.36)'da birinci örnek için kullanılan sayı değerleri yerine yazılırsa Şekil 2.11 elde edilir.



Şekil 2.11 Sinüs eğrisi formunda yüklü basit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

Dördüncü sayısal örnek için Şekil 2.12’de verilen iki ucu ankastre viskoelastik malzemeli kiriş incelenmiştir. Kirişe etkiyen düzgün yayılı yük $p(t) = p e^{-0,2t}$ olup viskoelastik malzeme modeli olarak Kelvin modeli seçilmiştir.



Şekil 2.12 $p(t)$ yükü etkisindeki iki ucu ankastre kiriş.

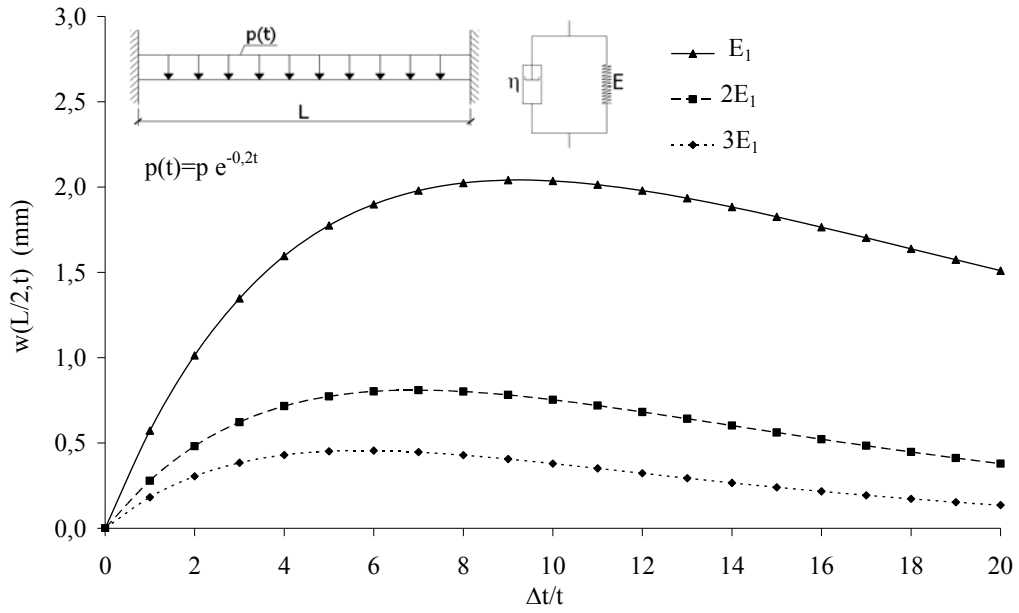
Kelvin modeli için diferansiyel denklem (2.26) dikkate alınmıştır. Elastik – viskoelastik eşdeğerlik prensibinden faydalanarak Laplace dönüşümü uygulanmış ve kirişin yer değiştirmesi denklem (2.37) olarak elde edilmiştir. Ters Laplace dönüşümü ile denklem (2.37)’den zamana bağlı denklem (2.38) hesaplanmıştır. Kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi denklem (2.39) şeklinde elde edilmiştir.

$$\hat{w}(x,s) = \frac{1}{I} \frac{1}{q_0 + q_1 s} \frac{p}{s + 0,2} \left(\frac{x^4}{24} - \frac{L}{12} x^3 + \frac{L^2}{24} x^2 \right) \quad (2.37)$$

$$w(x,t) = \frac{p}{I q_1} \frac{1}{\lambda - 0,2} (e^{-0,2t} - e^{-\lambda t}) \left(\frac{x^4}{24} - \frac{L}{12} x^3 + \frac{L^2}{24} x^2 \right) \quad (2.38)$$

$$w(L/2,t) = \frac{pL^4}{384I q_1} \frac{1}{\lambda - 0,2} (e^{-0,2t} - e^{-\lambda t}) \quad (2.39)$$

Burada; q_0 , q_1 , p_1 malzeme katsayıları, $\lambda = q_0/q_1$, s Laplace değişkeni, t zaman değişkeni, L kiriş açıklığı, x konum değişkeni, p yük değeri, I atalet momentidir. Denklem (2.39)’da birinci örnek için kullanılan sayı değerleri yerine yazılmış ve Şekil 2.13 elde edilmiştir.



Şekil 2.13 İki ucu ankastre kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

2.9 Viskoelastik Malzemeli Çubuk Sistemlerin Matris – Deplasman Yöntemi ile İncelenmesi

Viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin incelenmesinde kullanılan diferansiyel denklem veya integral yöntemin tüm serbestlik dereceleri için her incelenen zaman aralığında uygulanması gerektiğinden bu yöntemlerin büyük ve nispeten karmaşık sistemlerde kullanılması zahmetli olmaktadır. Matris – deplasman yöntemi bu tür durumlarda oldukça avantajlıdır. Ancak, matris – deplasman yöntemi ile çalışıldığında; çok sayıda serbestlik derecesi ve büyük denklem sistemleri ile karşılaşılır. İşlem adımlarını kısaltmak ve hesap hızını arttırmak amacıyla matris yöntemlere uygun özel yaklaşımlar ve ara iterasyon işlemleri kullanılmalıdır.

Burada; viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin davranışı matris – deplasman yöntemi ile araştırılmıştır. İlk sayısal örnekte; gerilme – şekil değiştirme ilişkisi literatürde sık kullanılan Power Modeli ile modellenmiş ve bir kafes sistem incelenmiştir. İkinci sayısal örnek için ise; gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi katı cisimleri modellemede kullanılan Kelvin modeli kullanılarak modellenmiş ve bir kafes sistem incelenmiştir. Kafes sistemin çubuk gerilmelerindeki zamana bağlı değişim, düğüm noktaları için zamana bağlı yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,280 \\ 0,688 \\ 0,228 \end{Bmatrix} \frac{P_t}{A} \quad (2.41)$$

Burada; çubuk için A enkesit alanı, σ_i i. elemanın gerilme değeri ve P_t sisteme etkiyen dış yüküdür. Sünme probleminin çözümü için Norton (1929) ve Bailey (1935) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme bağıntısı kullanılmıştır. Buna göre; sünme şekil değiştirmesi denklem (2.42) şeklindedir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1^c \\ \varepsilon_2^c \\ \varepsilon_3^c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,0218 \\ 0,3261 \\ 0,0118 \end{Bmatrix} K_p \left(\frac{P_t}{A} \right)^3 \quad (2.42)$$

Burada; ε_i^c i. çubuk için sünme şekil değiştirmesi, K_p Power Modeli için bir malzeme sabiti, P_t sisteme etkiyen dış yük ve A enkesit alanıdır. Denklem (2.42) dikkate alınarak gerekli işlemler yapılmış ve denklem (2.43) ile denklem (2.44) elde edilmiştir. Denklem (2.44) ile elde edilen yer değiştirme değerleri kullanılarak yeni gerilme hesaplanmış ve denklem (2.45) ile sunulmuştur.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = [k_s] \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} - EA \begin{Bmatrix} 0,707 \varepsilon_1^c - 0,866 \varepsilon_3^c \\ -0,707 \varepsilon_1^c - 1,000 \varepsilon_2^c - 0,500 \varepsilon_3^c \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0,038 \\ -0,239 \end{Bmatrix} K_p H \left(\frac{P_t}{A} \right)^3 \quad (2.44)$$

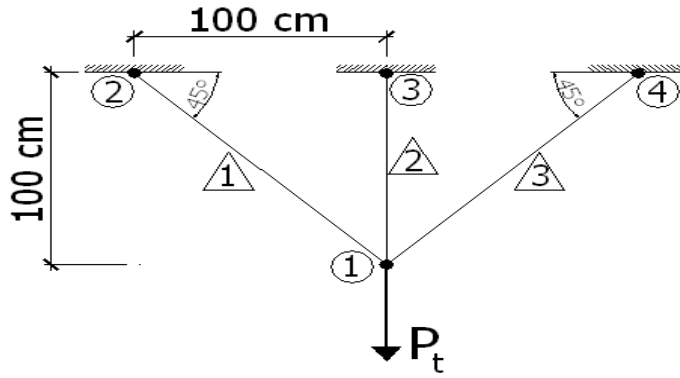
$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,0785 \\ 0,0876 \\ 0,0641 \end{Bmatrix} K_p E \left(\frac{P_t}{A} \right)^3 \quad (2.45)$$

Bu denklemlerde; $[k_s]$ sistem global rijitlik matrisi, E elastisite modülü, A enkesit alanı, ε_i^c i. çubuk için sünme şekil değiştirmesi, δ_1 ile δ_2 ise sırası ile P_t kuvvetinin

etkidiği düğüm noktasına ait yatay ve düşey yer değiştirme bileşenleri, P_t sisteme etkileyen dış yük, H Şekil 2.14 ile gösterilen düşey mesafe, K_p Power Modeli sabiti, σ_i i. elemanın gerilme değeridir.

2.9.2 Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisinin Sayısal Örnek ile İncelenmesi

Şekil 2.15’de sabit bir P_t yükü etkisi altında bulunan kafes sisteminin sünme davranışı incelenmiştir. Sayısal örnek için; P_t yükü 10 kN ve gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi Kelvin modeli ile dikkate alınmıştır.



Şekil 2.15 Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi ile sünme davranışı incelenen kafes sistem.

Şekil değiştirme ifadesi adım adım hesap için denklem (2.46) şeklinde yazılmıştır. Kelvin modeli için her Δt adımındaki $\Delta \epsilon(t)$ şekil değiştirme değer artışını denklem (2.47) ile sunulmuştur (Creus, 1986).

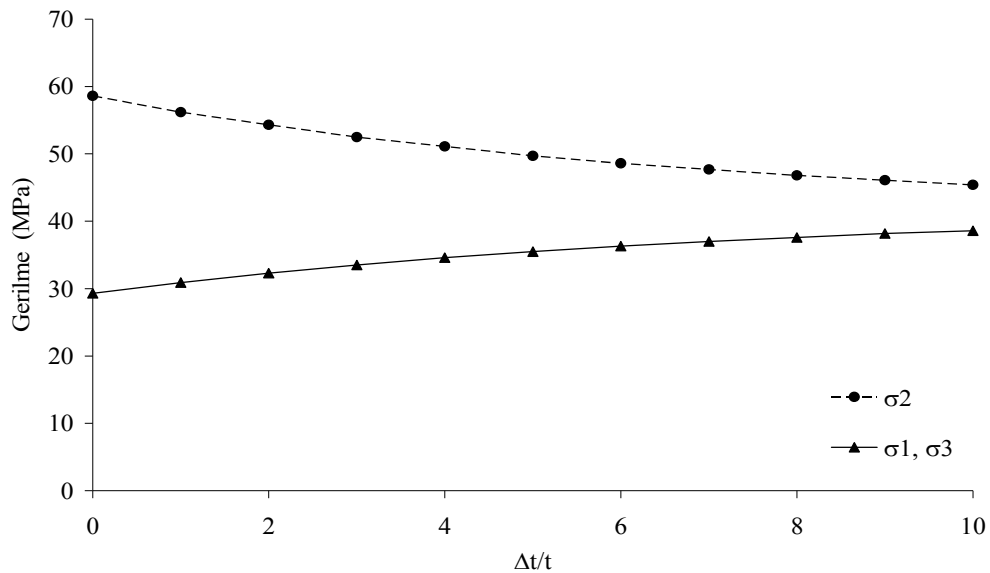
$$\epsilon(t + \Delta t) = \epsilon(t) + \Delta \epsilon(t) \quad (2.46)$$

$$\epsilon(t + \Delta t) = \epsilon(t) e^{-\frac{E \Delta t}{\eta}} + \frac{\sigma(t)}{E} \left(1 - e^{-\frac{E \Delta t}{\eta}} \right) \quad (2.47)$$

Burada; E elastisite modülü, $\epsilon(t)$ zamana bağlı şekil değiştirme, $\sigma(t)$ zamana bağlı gerilme değer, Δt zaman adımı, η viskozite katsayısını göstermektedir. Şekil 2.19’da

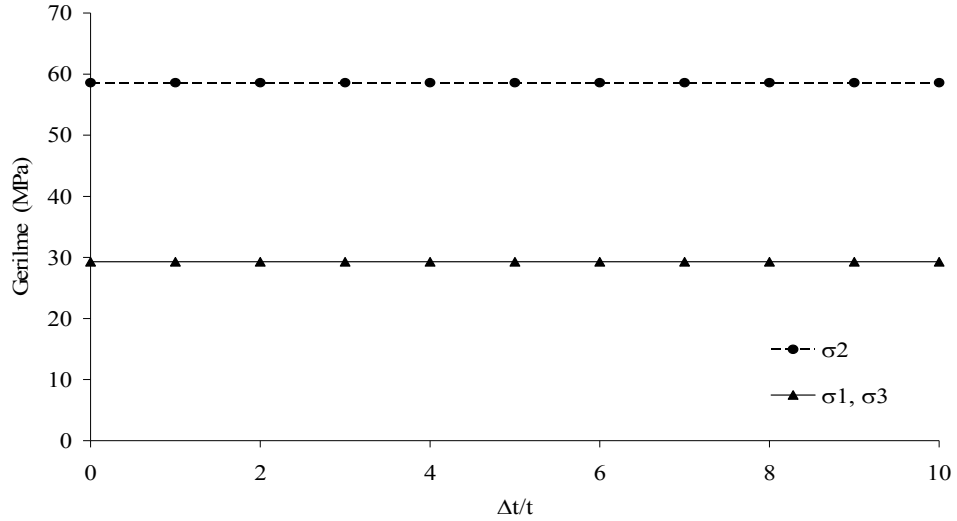
sunulan üç çubuk elemanından oluşan kafes sistem iki malzeme durumu için incelenmiştir. İlk olarak; kafes sistemin 1 ile 3 numaralı çubuklar doğrusal elastik ve 2 numaralı çubuk Kelvin modeline uyan viskoelastik bir malzemeden yapıldığı kabul edilmiştir. İkinci durum için ise; tüm çubukların Kelvin modeline uyan viskoelastik bir malzemeden yapıldığı varsayılmıştır. Kafes sistem için tüm çubukların A enkesit alanı 1000 mm^2 , E elastisite modülü 10 GPa, η viskozite katsayısı 100 GPa sn olarak hesaplarda dikkate alınmıştır. İteratif işlem adımları uygulanarak her t zamanı için şekil değiştirme değerleri ile birlikte elemanların düğüm noktası yer değiştirmeleri, uç kuvvetleri ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

Denklem (2.57) kullanılarak her adım için şekil değiştirme değerleri hesaplanmış, iteratif işlem adımları uzun olarak gösterilmemiştir. Kafes sistemde 1 ile 3 numaralı çubuklar lineer elastik ve 2 numaralı çubuk Kelvin modeline uyan viskoelastik bir malzemeden yapıldığı kabulüne göre gerilme değerleri ilk on zaman adımı için hesaplanmış ve Şekil 2.16 ile sunulmuştur. Benzer olarak; tüm çubukların viskoelastik olduğu kafes sistem için çubuk gerilmeleri Şekil 2.17 ile verilmiştir.

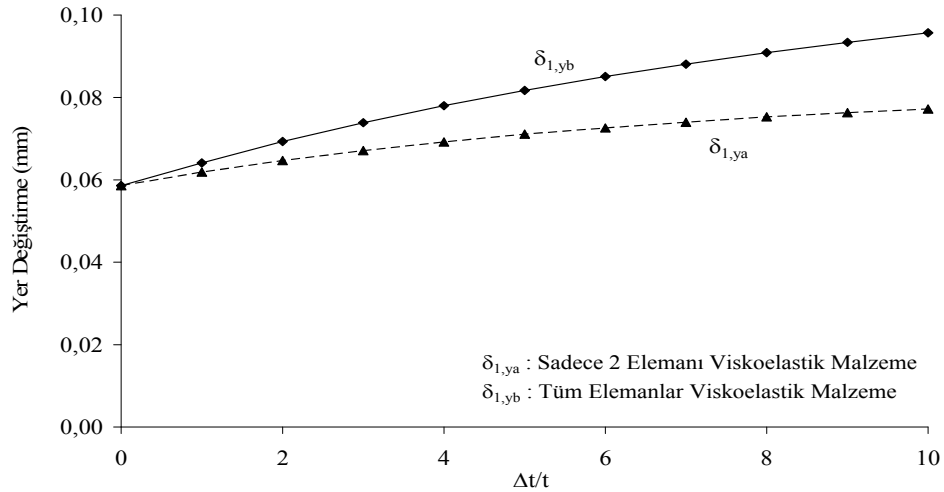


Şekil 2.16 1. ve 3. çubukları lineer elastik ve 2. çubuk viskoelastik olan kafes sistem için gerilme – zaman ilişkisi.

Bir numaralı düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesi her iki örnek için karşılaştırmalı olarak Şekil 2.18’de sunulmuştur.



Şekil 2.17 Tüm çubukları viskoelastik olan kafes sistem için gerilme – zaman ilişkisi.



Şekil 2.18 Bir numaralı düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

Gerilme bakımından her iki örnek sonuçları incelendiğinde; sadece 2. elemanın viskoelastik, diğer elemanların doğrusal elastik olarak kabul edildiği birinci örnek için çubuk elemanlardaki gerilmelerin zaman içerisinde değiştiği görülmüştür. İkinci elemanın gerilmesi zaman ilerledikçe azalırken birinci ve üçüncü elemanların gerilme değerleri zaman ilerledikçe artmıştır. Tüm elemanların viskoelastik malzemeden olduğu kabul edilen ikinci örnek için ise; çubuk gerilme değerlerinin zaman içerisinde değişmemiş, sabit kalmıştır. Bir numaralı düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesi her iki örnek için de zamana bağlı olarak artış göstermiştir. Ayrıca, bir numaralı düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesi artış miktarı birinci örnek sisteme göre ikinci örnek sistem için daha fazladır.

BÖLÜM ÜÇ

BETON VE ÇELİK KULLANILAN KOMPOZİT ÇUBUK SİSTEMLERİN VİSKOELASTİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

3.1 Giriş

Beton bir deney elemanının, yük etkisi altındaki şekil değiştirme davranışı, hem ani hem de zamana bağlı olacak şekilde görülür. Uygulanan yük ile zamana bağlı artış gösteren deformasyon, ani deformasyon değerinden birkaç kat büyük olur (Lakes, 1999). Sabit sıcaklık ve gerilme altındaki bir beton eleman için zamana bağlı şekil değiştirmeler sünme ve büzülme nedeni ile oluşur. Sünme şekil değiştirmesi uygulanan gerilmeye bağlı, büzülme şekil değiştirmesi ise gerilmeden bağımsızdır. Zamana bağlı oluşan şekil değiştirmeler; deformasyon ve eğrilik değerlerinde artışa, gerilme ile iç kuvvet tesirlerinde ise yeniden dağılıma neden olurlar. Betonun sünme ve büzülme etkisi altındaki davranışı, boyutlandırma açısından oldukça önemlidir (Penny ve Marriott, 1971). Sünme ve büzülme nedeniyle, kullanım yükleri altında dahi büyük deformasyonlar oluşabilir. Sünme, eğriliğin aşırı artmasına, büzülme ise genelde istenmeyen çatlakların oluşmasına ve dolayısıyla kullanım ile durabilite sorunlarına neden olur (Neville, Dilger ve Brooks, 1983). Bu tür etkileri gerçeğe uygun şekilde öngörebilmek için; güvenilir verilerin bulunması, betonun sünme ve büzülme karakterlerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi, yapı sistemlerinin zamana bağlı olan bu etkilere göre incelenebilmesini sağlayacak analitik yöntemlerin bilinmesi gerekir.

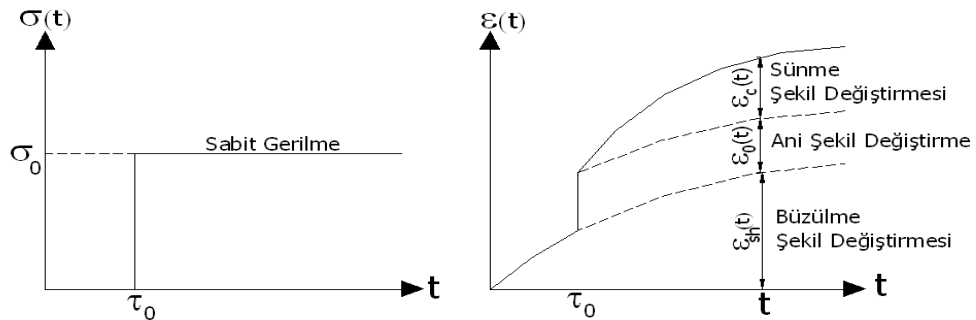
Betonun sünme ve büzülme nedeni ile zamana bağlı davranışını incelemek için geliştirilmiş çeşitli analitik yöntemler bulunmaktadır. Her yöntem kendi içerisinde çeşitli kabullere, avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Çalışmanın bu kısmında, sünme ile büzülme etkileri altında beton ve çelik kullanılan kompozit çubuk elemanların viskoelastik davranışları incelenmiş, zamana bağlı davranışı modellemek için geliştirilmiş olan analitik yöntemler sayısal örneklerle sunulmuştur. Yapı mühendisi, zamana bağlı etkileri inceleyerek, boyutlandığı sistemin davranışını ve güvenliğini yapının ömrü süresince farklı açılardan takip etme imkanı bulmaktadır.

3.2 Betonun Şekil Değişirme Davranışı

Yük etkisi altındaki bir beton eleman için toplam şekil değişirme birçok bileşenin birlikte ele alınması ile oluşur. Toplam şekil değişirmenin her bir bileşeni birbirinden bağımsız olup sabit sıcaklık için beton bir elemanda toplam şekil değişirme denklem (3.1) ile ifade edilir (Bazant, 1988).

$$\varepsilon(t, \tau_i) = \varepsilon_0(t) + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.1)$$

Burada; $\varepsilon_0(t)$ betonun ani şekil değişirmesi, $\varepsilon_c(t)$ betonun sünme şekil değişirmesi, $\varepsilon_{sh}(t)$ betonun büzülme şekil değişirmesi, $\varepsilon(t, \tau_i)$ betonun τ_i anında uygulanan yük etkisi altında t anındaki şekil değişirme bileşenlerinin toplamı, t zamandır. Şekil 3.1'de τ_0 anında sabit basınç gerilmesi uygulanmış bir beton eleman için şekil değişirme ile zaman arasındaki ilişki verilmiştir (Bazant, 1983). Beton prizini aldıktan hemen sonra veya buhar kürünün bitiminde büzülme şekil değişirmesi oluşmaya başlar ve azalan bir artış hızıyla artmaya devam eder (Neville ve Dilger, 1970). Elemana herhangi bir gerilmenin uygulanması durumunda ise şekil değişirme diyagramında sıçrama şeklinde ani bir artış görülür. Bu gerilmeyle birlikte sünme nedeniyle şekil değişirmede artış olur (Neville, Dilger ve Brooks, 1983).



Şekil 3.1 Sabit gerilme altında beton için şekil değişirme bileşenleri.

Şekil değişirme bileşenlerinin her birinin önem derecesi, her bileşenin hesap yöntemi ve büyüklüğünün bilinmesi zamana bağlı davranış açısından oldukça önem taşır. Zamana bağlı davranış genel bir yaklaşım olarak aşağıdaki örnek ışığında incelenebilir. Sabit bir basınç yükü etkisi altında beton bir örnek incelenmiş ve

karakteristik basınç dayanımının %40'ı kadar gerilme etkisi altında olduğu varsayılmıştır. Betonun t anı için elastisite modülü $E_c(t)$ 'de yaklaşık olarak karakteristik basınç dayanımının 1000 katı olarak alınmıştır. Buna göre elastik şekil değiştirme denklem (3.2) ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_0(t) = \frac{\sigma_0}{E_c(t)} = 400 \mu\varepsilon \quad (3.2)$$

Burada; $\varepsilon_0(t)$ betonun ani şekil değiştirmesi, $E_c(t)$ betonun t anı için elastisite modülü, σ_0 başlangıç anı gerilme değeridir. Normal koşullar altında, sabit gerilme etkisi altında betonun nihai sünme şekil değiştirmesi $\varepsilon_c(\infty)$ genelde $\varepsilon_0(t)$ ani şekil değiştirmesinin 1,5 – 4,0 katı olur (Bazant, 1988). Bu aralığın üst sınırı; erken yaşta ve oldukça düşük bağıl nem altında düşük dayanımlı betonlar içindir. Sabit gerilme etkisi altındaki beton eleman için sünme şekil değiştirmesi $2,5\varepsilon_0(t)$ olarak kabul edilirse denklem (3.3) elde edilir.

$$\varepsilon_c(\infty) = 2,5\varepsilon_0(t) \approx 1000 \mu\varepsilon \quad (3.3)$$

Betonun nihai büzülme şekil değiştirmesi $\varepsilon_{sh}(\infty)$; betonun bileşenlerine, çevresel etkilere, elemanın boyut ve şekline bağlıdır. Bina türü yapılarda betonun büzülme şekil değiştirmesi ortalama olarak denklem (3.4) gibidir (Smerda ve Vladimir, 1988).

$$\varepsilon_{sh}(\infty) \approx 600 \mu\varepsilon \quad (3.4)$$

İncelenen beton örnek için yükleme yapıldıktan çok uzun bir süre sonra toplam nihai beton şekil değiştirmesi $\varepsilon(\infty)$ denklem (3.5) ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon(\infty) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c(\infty) + \varepsilon_{sh}(\infty) \approx 400 + 1000 + 600 \approx 2000 \mu\varepsilon \quad (3.5)$$

İncelenen bu örnek için; nihai şekil değiştirme ani elastik şekil değiştirmenin yaklaşık beş katıdır. Burada dikkate alınan sünme ve büzülme değerlerinin üst sınır değerler olmayıp makul ara değerler olduğu düşünülürse, beton kullanılan çubuk

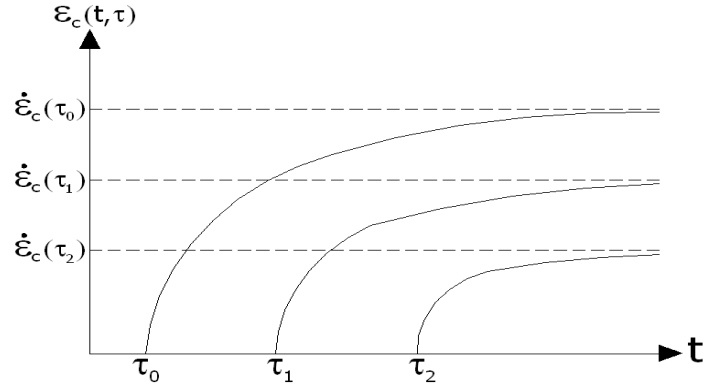
sistemlerde şekil değiştirmeler için zamana bağlı etkilerin rasyonel biçimde dikkate alınmasının önemi ortaya konmuştur. Sadece ani şekil değiştirmenin dikkate alındığı elastik bir hesap ile beton kullanılan çubuk sistemlerin davranışlarının incelenmesi önemli hatalara neden olur. Zamana bağlı sünme ve büzülme etkilerini ihmal ederek yapılan elastik hesap ile elde edilecek nihai deformasyonların gerçek değerlerinden oldukça düşük olarak hesaplanacağı bu şekilde görülmüştür.

3.2.1 Sünme Bileşeni Etkisi

Betonun sünme kapasitesi birçok durumda sünme katsayısı cinsinden tanımlanır. Sabit gerilme etkisi altında sünme katsayısı; sünme şekil değiştirmesinin ani elastik şekil değiştirmeye oranı olup denklem (3.6) ile yazılır (Neville, Dilger ve Brooks, 1983).

$$\varphi(t, \tau_i) = \frac{\varepsilon_c(t, \tau_i)}{\varepsilon_0(t)} \quad (3.6)$$

Burada; $\varepsilon_0(t)$ betonun ani şekil değiştirmesi, $\varepsilon_c(t, \tau_i)$ ile $\varphi(t, \tau_i)$ ise τ_i anında yük uygulanmış beton bir eleman için t anındaki sünme şekil değiştirmesi ve sünme katsayısıdır. Şekil 3.2’de farklı zamanlarda yüklenmiş benzer özelliklere sahip beton örnekler için sünme şekil değiştirmesi ile zaman arasındaki ilişki sunulmuş ve betonun yaşının sünme eğrileri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Sünmenin büyüklüğü, yüklemenin uygulandığı andaki betonun yaşına ve ilk yüklemenin yapıldığı andaki hidrasyon derecesine bağlıdır (Neville ve Dilger, 1970). Eğer ilk yüklemenin yapıldığı andaki beton eski ise sünme daha az etkili olur. Bundan dolayı beton zamanla sertleşen malzeme olarak tanımlanır (Branson, 1977). İlk yüklemenin yapıldığı andan itibaren sünme şekil değiştirmesi hızlı, aylar sonra aynı yük etkisi altındaki sünme şekil değiştirmesindeki artış ise belirgin olarak yavaş şekilde gerçekleşir (Branson, 1977). Yük altında yıllar boyu bekletilen elemanlarda sünme şekil değiştirmesindeki artış çok küçük olup sünmenin limit değere ulaşması ancak çok uzun zaman sonra olduğu varsayılır (Bazant, 1988).



Şekil 3.2 Beton elemanın sünme şekil değiştirmesi.

Şekil 3.2 ile verilen farklı yüklenme zamanına sahip beton örnekler için sünme şekil değiştirmeleri arasındaki ilişki denklem (3.7) ile sunulmuştur.

$$\varepsilon_c(\infty, \tau_1) < \varepsilon_c(\infty, \tau_0) \quad (\tau_0 < \tau_1) \quad (3.7)$$

Burada; τ_i yüklenme anı, $\varepsilon_c(t, \tau_i)$; τ_i anında yük uygulanmış beton bir eleman için t anındaki sünme şekil değiştirmesini ifade eder. Çok uzun süre sonra $\varepsilon_c(t, \tau_i)$ 'nin sınır değerine ulaşacağı varsayılır. Sünmenin büyüklüğü ve hızı; iç faktörlere, çevresel faktörlere, yüklenme durumuna bağlıdır (Neville, 1997). Eğer uygulanan gerilme betonun basınç dayanımının yarısından az ise sünme şekil değiştirmesinin yaklaşık olarak gerilme ile orantılı olduğu kabul edilir (Smerda ve Vladimir, 1988). Yüksek gerilme seviyelerinde, sünme daha hızlı bir şekilde gerçekleşir ve doğusal olmayan bir davranış gösterir. Beton kullanılan yapılarda kullanım yükleri altında karakteristik basınç dayanımının yarısı nadiren aşıldığından dolayı, genel olarak sünmenin gerilme ile orantılı olduğu kabul edilir (Smerda ve Vladimir, 1988).

Beton bir eleman, çelik veya herhangi bir mesnet koşulu ile kısıtlanmamış ise, sünme nedeniyle önemli miktarda deformasyon oluşur (Gilbert, 2001). Sabit gerilme etkisi altında, sünme deformasyonlarında zamanla azalan bir artış gözlenir. Sünme, beton kullanılan bir yapıdaki gerilme dağılımını etkili bir biçimde değiştirir. Örneğin aksenal basınç yükü etkisi altındaki bir betonarme kolon elemanda, zaman içerisinde beton üzerindeki gerilme azalırken donatı üzerindeki gerilme artmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Bu tip kolonlarda kullanım yükleri etkisi altında betonun sünme ve

büzülmesi nedeniyle boyuna donatıda gerilme akma gerilmesine yaklaşır veya nadiren ulaşır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

3.2.2 Büzülme Bileşeni Etkisi

Büzülme, üzerinde herhangi bir yük veya mesnet kısıtı bulunmayan beton elemanın kuruma esnasında su kaybı nedeni ile hacim azalması olarak tanımlanır (Neville, Dilger ve Brooks, 1983). Betonda karbonatlaşma gibi kimyasal etkilerden dolayı da büzülme oluşabilir. Kuruma ve kimyasal büzülme davranışları birbirinden farklıdır (Neville, 1997). Ancak bu fark büzülmenin yapı mühendisliği açısından incelenmesinde bir ayrıma neden olmamaktadır.

Beton kullanılan elemanlarda, donatı beton içerisine yerleştirildiğinden serbest büzülme engeller. Eğer donatı kesite simetrik yerleştirilmez ise, büzülmeden kaynaklanan eğrilik zaman içerisinde ortaya çıkar. Buna ek olarak, elemanın yapıdaki diğer elemanlar ile birleşim noktaları ve yapının temel kısmı da birer kısıt oluşturur. Bütün bu kısıtlar hiperstatik sistemlerde iç gerilme ve deformasyon oluşmasını sağlar. Büzülme nedeni ile mesnet reaksiyonları ve moment dağılımları değişir. Büzülme ile oluşan çekme gerilmeleri beton bulunan yapılarda oluşan çatlakların en sık rastlanan nedenidir (Neville, 1997). Kısıt altındaki elemanlarda büzülme nedeni ile oluşan çekme çatlakları birbirlerine paralel şekilde olup elemanın iç kısımlarına kadar ilerleyebilir. Büzülme; aksel deformasyon, eğrilik ile birlikte önemli yer değiştirmelere neden olur. Eğer büzülme için yeterli önlem alınmaz ise kullanılabilirlik ve durabilite sorunları ile karşılaşılır (Neville, 1997).

3.3 Betonun Zamana Bağlı Davranışın İncelendiği Yönetmelikler

Sünme ve büzülme davranışlarının zamana bağlı olarak modellenmesi için çeşitli yönetmelikler geliştirilmiştir (ACI 209R–92, 1997; CEB–FIP, 1990; TS–500, 2000). Bu çalışmada, beton ve çelik kullanılan kompozit çubuk elemanların viskoelastik davranışlarının incelenmesinde ACI 209R–92 (1997) kullanılmıştır.

3.3.1 ACI 209R–92 (1997) Yönetmeliğine göre Sünme Davranışı

ACI 209R–92 (1997), betonun sünme davranışı için denklem (3.8) ile verilen ifade kullanılmakta olup nihai sünme katsayısı ise denklem (3.9) gibidir.

$$\varphi(t, \tau_i) = \frac{(t - \tau_i)^{0.6}}{10 + (t - \tau_i)^{0.6}} \varphi(\infty, \tau_i) \quad (3.8)$$

$$\varphi(\infty, \tau_i) = 2,35 \gamma_c \quad (3.9)$$

Burada; τ_i betonun gün cinsinden ilk yüklendiği anı, $(t - \tau_i)$ ise gün cinsinden yükün etkiye süresini, $\varphi(\infty, \tau_i)$ betonun nihai sünme katsayısını, γ_c betonun sünme düzeltme katsayısını gösterir. Yüklemenin yapıldığı andaki betonun yükleme yaşı, hacim ile yüzey alanı oranı, bağıl nem değeri, betonun çökme miktarı, ince agrega ağırlığının toplam agrega ağırlığına oranı, hava içeriği gibi faktörler sünme düzeltme katsayısı hesabında dikkate alınır (ACI 209R–92, 1997).

3.3.2 ACI 209R–92 (1997) Yönetmeliğine göre Büzülme Davranışı

Betonun kurummasının başlamasından sonraki herhangi bir t anı için büzülme şekil değiştirmesi nemli ortamda kürlenmiş beton için denklem (3.10), nihai büzülme şekil değiştirmesi ise denklem (3.11) ile belirtilmiştir (ACI 209R–92, 1997).

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{35 + t} \varepsilon_{sh}(\infty) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{sh}(\infty) = 780 \cdot 10^{-6} \gamma'_{sh} \quad (3.11)$$

Burada; $\varepsilon_{sh}(t)$ betonun büzülme şekil değiştirmesini, $\varepsilon_{sh}(\infty)$ betonun nihai büzülme şekil değiştirmesini, t zamanı, γ'_{sh} betonun büzülme düzeltme katsayısını gösterir. Büzülme düzeltme katsayısı, sünme düzeltme katsayısının hesabında kullanılan faktörlere benzer faktörler dikkate alınarak hesaplanır (ACI 209R–92, 1997).

3.4 Beton ve Çelik Kullanılan Kompozit Çubuk Sistemlerinin Zamana Bağlı Davranışlarının İncelenmesi için Çeşitli Yöntemler

Beton ve çelik kullanılan kompozit çubuk sistemlerin zamana bağlı hesaplarında; şekil değiştirme, gerilme, eğrilik ve bazı noktalar için yer değiştirme değerlerinin yapının kullanım ömrü içerisindeki kritik zamanlar için belirlenmesi önem taşır. Bu bölümde, zamana bağlı davranışın modellenmesi için geliştirilmiş yöntemler incelenmiştir. Matematiksel tanım yapıldıktan sonra, yöntemin avantajları ve kusurları tartışılmıştır.

3.4.1 Etkin Modül Yöntemi

Etkin Modül Yöntemi, en pratik ve en eski sünme hesap yöntemi olup Faber (1927) tarafından geliştirilmiştir. Ani, sünme ve büzülme bileşenlerinden oluşan toplam şekil değiştirme denklem (3.12) ile gösterilir. Denklem (3.12), denklem (3.13) ile sunulan azaltılmış veya etkin modül $E_e(t, \tau)$ kullanılarak denklem (3.14) gibi yazılır (Bazant, 1988).

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma}{E_c(\tau_0)} + \frac{\sigma}{E_c(\tau_0)} \varphi(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.12)$$

$$E_e(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \varphi(t, \tau_0)} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma}{E_e(t, \tau_0)} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.14)$$

Burada; $\varepsilon(t, \tau_0)$ ile $\varphi(t, \tau_0)$ beton elemandaki τ_0 anında yapılan yükleme nedeni ile t anındaki toplam şekil değiştirme ve sünme katsayısı, $\varepsilon_{sh}(t)$ betonun büzülme şekil değiştirmesi, σ gerilme, $E_c(\tau_0)$ betonun yükleme yapıldığı τ_0 anındaki elastisite modülü, $E_e(t, \tau_0)$ ise betonun etkin modülüdür. Sünme, elastik şekil değiştirmede

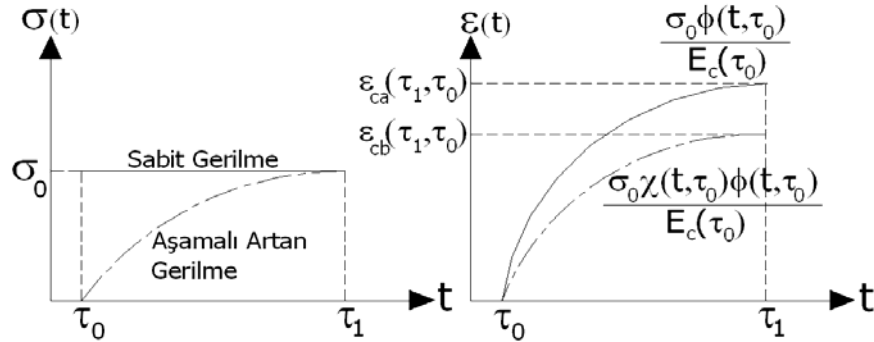
gecikme şeklinde düşünülmüş ve betonun elastisite modülü azaltılarak hesaplara dahil edilmiştir. Büzülme de zamana bağlı elastik analiz ile elastik bir sitemdeki ani sıcaklık değişimi gibi modellenmiştir.

Etkin Modül Yöntemi, sünme şekil değiştirmesinin gerilme geçmişinden bağımsız olduğunu, sadece o andaki mevcut gerilmeye bağlı olduğunu varsayar. Etkin Modül Yöntemi ile artış halindeki bir gerilme geçmişine sahip sistem için sünme miktarı yüksek, azalan bir gerilme geçmişi için ise sünme miktarı düşük olarak hesaplanır (Bazant, 1988). Eğer gerilme aniden ortadan kalkarsa bu yönteme göre sünme de aniden kaybolmaktadır. Bundan dolayı, Etkin Modül Yöntemi tamamen mükemmel bir sünme geri dönüşü gösterir ki bu durum da gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Betondaki gerilmenin sabit olduğu ve eski betonların incelendiği durumlar için bu yöntem hassas sonuçlar verir. Ayrıca, Etkin Modül Yöntemi zamana bağlı hesap yöntemleri arasında en pratik olanıdır. Ancak, erken yaşlardaki yüklemeler ve ani gerilme değişimlerinin yaşandığı durumlar için zamana bağlı davranışı daha iyi modelleyen yöntemlerin kullanılması gerekir.

3.4.2 Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi

Betonun eski veya yeni olmasını zaman bağlı hesaplarda dikkate almak amacıyla, Trost (1967) ve Bazant, (1972) tarafından çeşitli çalışmalar yapılmış, Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi geliştirilmiştir (Bazant, 1988). Şekil 3.3’de iki beton örnek için gerilme geçmişi ve buna karşılık elde edilen şekil değiştirme – zaman eğrileri verilmiştir (Bazant, 1988). İlk durumda; τ_0 anında ani uygulanan σ_0 gerilmesi sabit tutulmuştur. İkinci durumda ise; τ_0 anında $\sigma(t)$ aşamalı olarak uygulanmaya başlanmış ve τ_1 anında σ_0 büyüklüğüne ulaşmıştır. Herhangi bir andaki $\tau_0 < t$ artan gerilme ile oluşan sünme şekil değiştirmesi değeri $\varepsilon_{cb}(\tau_1, \tau_0)$ gerilmenin ani uygulandığı durumda elde edilen $\varepsilon_{ca}(\tau_1, \tau_0)$ değerinden küçüktür. Bu durum, betonun yaş etkisi olarak ifade edilir. Beton ne kadar erken yüklenirse son şekil değiştirme o kadar büyük olur. Bundan dolayı; gerilme değişimi olduğu durumlarda $\chi(t, \tau_0) \cdot \varphi(t, \tau_0)$ ile ifade edilen azaltılmış bir sünme katsayısı sünme şekil değiştirmesini hesaplamak için kullanılır. Burada; $\chi(t, \tau_0)$ beton yaş katsayısı olarak adlandırılır ve genel olarak

0,6 – 0,9 arasında değerler alır (Bazant, 1988). Betonun sünme katsayısı $\varphi(t, \tau_0)$ gibi beton yaş katsayısı $\chi(t, \tau_0)$ 'da betonun yaşına, yükün süresine, büyüklüğüne ve elemanın şekli gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Neville, Dilger ve Brooks, 1983). İlk yükleme yapıldığında betonun yaşı 5 günden fazla ise; beton yaş katsayısı $\chi(\infty, \tau_0)$ 0,80 ve nihai sünme katsayısı ise $1,50 < \varphi(t, \tau_0) < 3,50$ civarında olur (Bazant, 1988).



Şekil 3.3 Sabit ve değişken gerilme durumları için sünme davranışı.

$t - \tau_0$ arasında aşamalı olarak arttırılan, t anındaki $\sigma(t)$ gerilmesinden dolayı oluşan sünme şekil değiştirme denklem (3.15) ile yazılır. Herhangi bir t anındaki toplam şekil değiştirme denklem (3.16) gibi olur. Denklem (3.16)'da; denklem (3.17) ile sunulan betonun yaş etkisini dikkate alan etkin modül yazılırsa, denklem (3.18) elde edilir (Bazant, 1988).

$$\varepsilon_c(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \chi(t, \tau_0) \varphi(t, \tau_0) \quad (3.15)$$

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} [1 + \varphi(t, \tau_0)] + \frac{\Delta\sigma}{E_c(\tau_0)} [1 + \chi(t, \tau_0) \varphi(t, \tau_0)] + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.16)$$

$$\bar{E}_e(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0) \varphi(t, \tau_0)} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_e(t, \tau_0)} + \frac{\Delta\sigma}{\bar{E}_e(t, \tau_0)} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.18)$$

Bu denklemlerde; $\varepsilon(t, \tau_0)$ beton elemandaki τ_0 anında yapılan yükleme nedeni ile t anındaki toplam şekil değişikliği, $\varepsilon_c(t, \tau_0)$ betonun sünme şekil değişikliği, $\varphi(t, \tau_0)$ betonun sünme katsayısı, $\varepsilon_{sh}(t)$ büzülme şekil değişikliği, σ_0 ani gerilme değeri, $\Delta\sigma$ betondaki gerilme artış değeri, $E_c(\tau_0)$ betonun yükleme yapıldığı andaki elastisite modülü değeri, $E_c(t, \tau_0)$ betonun etkin modül değeri, $\chi(t, \tau_0)$ betonun yaş katsayısı, $\bar{E}_c(t, \tau_0)$ betonun yaş etkisini dikkate alan etkin modül değeridir. Birçok sayısal uygulama için, bu bölümde sunulan yaş katsayısı yaklaşımının yeterli hassasiyete sonuçlar verdiği görülmüştür (Au, Liu ve Lee, 2007; Bazant, 1972; Bazant, 1988; Ranzi ve Bradford, 2006; Seçer ve Kural, 2009; Sharma ve Nagpal, 2007).

3.4.3 Sünme Oranı Yöntemi

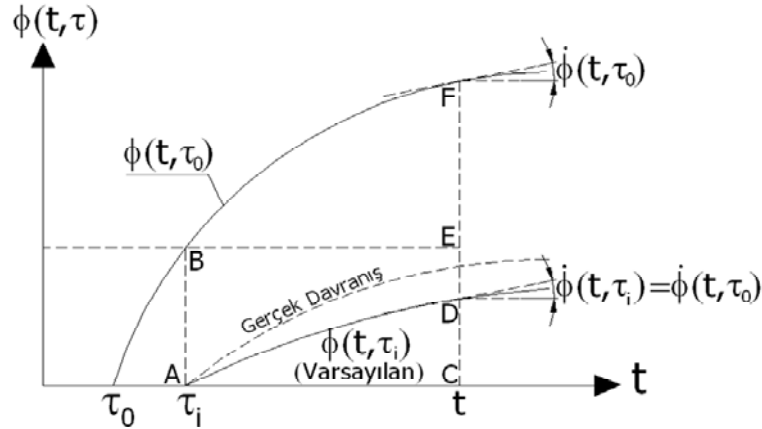
Sünme oranı yöntemi; beton kullanılan sistemlerin zamana bağlı davranışını incelemek amacıyla Whitney (1932) ve Dischinger (1937) tarafından geliştirilmiştir. Sünme Oranı Yöntemi; sünme katsayısının zamana bağlı değişiminin yükleme yaşından τ_i bağımsız olduğu kabulünü yapar. Bu yaklaşım gerçek davranışı yansıtmamasına rağmen, herhangi bir yükleme geçmişi için sadece tek bir sünme eğrisi yardımıyla sünme şekil değiştirmelerinin hesaplanmasını sağlar (Bazant, 1988). Bu şekilde, farklı zamanlarda yüklenmiş elemanlar için sünme eğrileri birbirlerine paralel olur. Şekil 3.4’de verilen sünme eğrileri dikkate alınır; EF ile CD ordinatları yaklaşık eşit kabul edilir ve $|CD|=|CF|-|AB|$ veya denklem (3.19) şeklinde yazılır. Herhangi bir τ_i anında gerilme etkisi ile oluşan sünme – zaman eğrisi tek bir eğri $\varphi(t, \tau_0)$ ile tanımlanmıştır. Sabit σ_i gerilmesi τ_i anında uygulanırsa; sünme şekil değişikliği denklem (3.20) gibi yazılır (Smerda ve Vladimir, 1988).

$$\varphi(t, \tau_i) = \varphi(t, \tau_0) - \varphi(\tau_i, \tau_0) \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_c(t, \tau_i) = \frac{\sigma}{E_c(\tau_0)} [\varphi(t, \tau_0) - \varphi(\tau_i, \tau_0)] \quad (3.20)$$

Burada; $\varepsilon_c(t, \tau_i)$ betonun sünme şekil değişikliğini, $\varphi(t, \tau_0)$ τ_0 yükleme anı olmak üzere t anı için betonun sünme katsayısını, $\varphi(\tau_i, \tau_0)$ τ_0 yükleme anı olmak üzere τ_i anı

için betonun sünme katsayısını, σ gerilme değerini, $E_c(\tau_0)$ elastisite modülünü gösterir. Ani ve büzülme şekil değiştirme bileşenleri için de sünme şekil değiştirmesine benzer bir yaklaşım yapılırsa, toplam şekil değiştirmedeki değişim denklem (3.21) ile yazılır (Smerda ve Vladimir, 1988).



Şekil 3.4 Sünme oranı yöntemi sünme eğrileri.

$$\dot{\epsilon}(t, \tau) = \frac{\dot{\sigma}}{E_c(\tau_0)} + \dot{\phi}(t, \tau_0) \left[\frac{\sigma}{E_c(\tau_0)} + \frac{\dot{\epsilon}_{sh}}{\dot{\phi}(t, \tau_0)} \right] \quad (3.21)$$

Burada; $\dot{\epsilon}(t, \tau_0)$ τ_i anında uygulanan yük etkisi altında t anındaki toplam şekil değiştirmenin, $\dot{\sigma}$ gerilmenin, $\dot{\phi}(t, \tau_0)$ τ_0 yüklenme anı olmak üzere t anı için beton sünme katsayısının ve $\dot{\epsilon}_{sh}$ büzülme şekil değiştirmesinin birinci türevidir. σ gerilme değeri, $E_c(\tau_0)$ betonun yüklenme yapıldığı andaki elastisite modülüdür. Sünme Oranı Yöntemi, matematiksel olarak cazip olsa da eksik yönleri vardır. Sünme eğrilerinin paralel olarak kabul edilmesi eski betonlarda sünme etkisinin düşük hesaplanmasına neden olur. Zaman ilerledikçe $\dot{\phi}(t, \tau_0)$ sifira yakınsar ve bu yönteme göre $\dot{\epsilon}_c(t, \tau_0)$ de sifir olur. Bu gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Eski betonlarda sünme, yeni betonlara oranla düşük miktarda da olsa vardır. Sünme Oranı Yöntemi, artan gerilme geçmişi için sünme değerlerini olduğundan düşük bulur. Bu hata, uzun zaman içinde önemli gerilme artışları olduğu durumlar için daha da belirgin hale gelir. Denklem (3.20)'ye göre gerilmenin kaldırıldığı durumda sünme değişim oranı sifir olur. Sünme geri dönüşü burada dikkate alınmamıştır. Sünme şekil değiştirmeleri azalan gerilme geçmişi durumunda ise gerçek değerlerinden büyük olur. Erken yaşta

yüklenmiş beton kullanılan ve gerilmenin büyük değişimler göstermediği birçok durumda Sünme Oranı Yöntemi kullanılmaktadır (Bazant, 1988).

3.4.4 Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi

Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi, Sünme Oranı Yönteminin bir miktar geliştirilmiş hali olup bu yöntem ile yük uygulandıktan uzun süre sonra gerçek davranışa yakın sonuçlar elde edilmiştir (Bazant, 1988). Sünme şekil değiştirme; geri dönen elastik şekil değiştirme (ε_d) ve geri dönüşü olmayan diğer bileşen (ε_f)'nin toplamıdır (Neville, 1997). Sünme Oranı Yöntemindeki geri dönüş esnasında meydana gelen eksikliğin giderilmesi amacıyla Nielsen (1970), (ε_d) ifadesinin ani elastik şekil değiştirme olarak kabul edilmesini ve (ε_f)'nin ise Sünme Oranı Yöntemindeki toplam sünme şekil değiştirmesine benzer şekilde hesaplanmasını önermiştir (Naguib ve Mirmiran, 2003). Bu durumda toplam şekil değiştirme; denklem (3.22) ve denklem (3.23) ile yazılır. Denklem (3.23); denklem (3.24) ve denklem (3.25) dikkate alınarak düzenlenirse denklem (3.26) elde edilir.

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \varepsilon'_0(t) + \varepsilon_f(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.22)$$

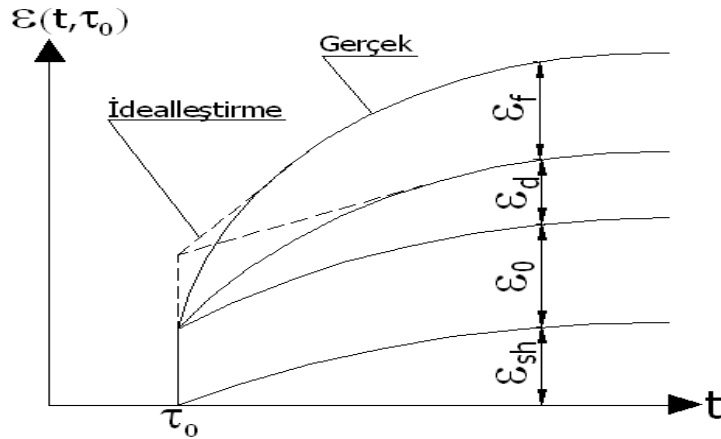
$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)}(1 + \varphi_d) + \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \varphi_f(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.23)$$

$$E'_c(\tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \varphi_d} \quad (3.24)$$

$$\varphi'(t, \tau_0) = \frac{\varphi_f(t, \tau_0)}{1 + \varphi_d} = \frac{\varphi(t, \tau_0) - \varphi_d}{1 + \varphi_d} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E'_c(\tau_0)} + \frac{\sigma_0}{E'_c(\tau_0)} \varphi'(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (3.26)$$

Burada; $\varepsilon'_0(t)$ betonun fiktif ani şekil değıştirmesi, $\varepsilon_f(t, \tau)$ betonun geri dönüşü olmayan sünme şekil değıştirme bileşeni, $\varepsilon_{sh}(t)$ betonun büzülme şekil değıştirmesi, $\varepsilon(t, \tau_0)$ betonun toplam şekil değıştirmesi, φ_d gecikmiş elastik sünme katsayısı, $\varphi_f(t, \tau_0)$ geri dönüşü olmayan sünme katsayısı, $E'_c(\tau_0)$ betonun yükleme yapıldığı τ_0 anındaki fiktif elastisite modülü, $\varphi'(t, \tau)$ ise betonun azaltılmış sünme katsayısıdır. Nielsen (1970), gecikmiş elastik sünme katsayısını φ_d 0,33 olarak kabul etmiştir (Naguib ve Mirmiran, 2003). Rüşch, Jungwirth ve Hilsdorf (1983) ise; φ_d için 0,40 değerini önermiş ve bu sayı CEB–FIP (1990) tarafından sünme hesapları için uygun bulunmuştur. Şekil 3.5’de şekil değıştirme ve zaman ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.5 Gerçek ve ideal şekil değıştirme – zaman ilişkisi.

Artan veya azalan gerilme geçmişleri bulunan sistemlerin incelenmesini içeren birçok problemde Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi kullanılmıştır (Bazant, 1988). Ancak, Sünme Oranı yöntemine benzer olarak yapılan sünme akışı eğrilerinin birbirlerine paralel olduğu varsayımı eski betonların sünme şekil değıştirmelerinin olduğundan küçük hesaplanmasına neden olur. Ayrıca, Şekil 3.5’de görüldüğü gibi, yüklemmeden hemen sonraki sünme değerleri ise olduğundan büyük hesaplanır. Bu durum, yeni betonda büzülmenin olduğundan küçük hesaplanmasına yol açar. Bu nedenlerden dolayı; yüklemmeden sonraki ilk dönemlerde bu yöntem ile elde edilen sonuçlar, diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlardan bir miktar farklıdır. Ancak, uzun süreli davranışın incelendiği durumlar için bu yöntem başarılıdır (Naguib ve Mirmiran, 2003).

3.5 Beton ve Çelik Kullanılan Kompozit Çubuk Sistemlerin Zamana Bağlı Davranışlarının İncelenmesi için Sayısal Uygulamalar

Beton kullanılan çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışlarının incelenmesi iki sayısal uygulama ile sunulmuştur. Birinci uygulamada; tek katlı ve tek açıklıklı, beton ve çelik kullanılan kompozit kiriş ile çelik kolonlara sahip bir çerçeve sistemin zamana bağlı davranışı incelenmiştir (Seçer, 2008). Kompozit kirişteki sünme davranışı Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile modellenmiş ve sünme katsayıları için ACI209–R92 (1997) parametrelerinden yararlanılmıştır. İkinci uygulamada ise; içerisi beton doldurulmuş çelik kutu kesitli bir kolonun sünme ve büzülme etkileri altındaki zamana bağlı davranışı Etkin Modül Yöntemi, Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi, Sünme Oranı Yöntemi ve Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi kullanılarak incelenmiştir (Seçer ve Kural, 2010). Beton ve çelik elemandaki gerilmelerin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. Ani, büzülme ve sünme şekil değiştirmeleri çalışmada kullanılan dört yöntem ile hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

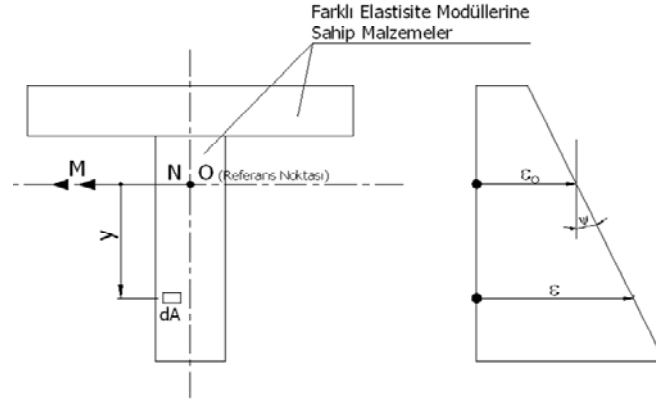
3.5.1 Tek Açıklıklı Kompozit Kirişli Çerçevenin Sünme Davranışının Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile İncelenmesi

Zamana bağlı gerilme ve şekil değiştirme hesaplarının yapılabilmesi için malzemenin zamana bağlı gerilme veya şekil değiştirme fonksiyonlarının önceden bilinmesi gerekir. Bu nedenle; ilk olarak düzlem çerçevenin viskoelastik davranışının incelenmesi için gerekli olan bir takım denklemler öncelikli olarak sunulmuş ve daha sonra hesap aşamaları sayısal uygulama üzerinde verilmiştir.

3.5.1.1 Beton ve Çelik Kullanılan Kompozit Kesit için Gerilme, Şekil Değiştirme ve Eğrilik Kavramları

Farklı malzemeler kullanılarak oluşturulmuş ve bir simetri eksenine sahip olan bir kesit Şekil 3.6 ile verilmiştir. Normal kuvvet ve moment nedeniyle oluşan gerilmelerin incelenmesi amacıyla gerçek kesit yerine dönüştürülmüş kesit

kullanılmıştır. Dönüştürülmüş kesitte E_{ref} ile gösterilen önceden seçilmiş olan malzemenin elastisite modülü dikkate alınmış ve diğer k. malzemenin alanı $(E_k/E_{ref})A_k$ işlemi ile dönüştürülmüş bir eşdeğer alan değeriyle yer değiştirmiştir.



Şekil 3.6 Kompozit kesit.

Sünme etkisi incelerken dikkate alınan kesit için birçok işlem farklı elastisite modülleri için yapılacağından ve süperpozisyon prensibine göre elde edilen gerilme diyagramlarının toplanması gerektiğinden hesapların tek bir kesit üzerinden yapılması işlem miktarı açısından avantaj sağlar. Betonun elastisite modülünün zaman içerisinde değişmesi, dönüştürülmüş kesitin merkezinin değişmesi anlamına da gelir. Hesap kolaylığı olması açısından, O noktası simetri ekseninde olan ve keyfi seçilmiş bir referans noktasıdır. Kesit içerisinde şekil değiştirme değişiminin doğrusal olduğu, şekil değiştirmeden önce düzlem olan kesitlerin şekil değiştirmeden sonra yine düzlem kaldığı kabulü yapılmıştır. Herhangi bir lifin referans noktası olan O noktasına olan mesafesi y biliniyor ise o lif için şekil değiştirme denklem (3.27) ve gerilme denklem (3.28) ile gösterilmiştir. Benzer şekilde, aksenal kuvvet ve moment için de denklem (3.29) ve denklem (3.30) yazılır.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Omega y \quad (3.27)$$

$$\sigma = E_k (\varepsilon_0 + \Omega y) \quad (3.28)$$

$$N = \varepsilon_0 \sum_{k=1}^{m_k} E_k \int dA + \Omega \sum_{k=1}^{m_k} E_k \int y dA \quad (3.29)$$

$$M = \varepsilon_0 \sum_{k=1}^{m_k} E_k \int y \, dA + \Omega \sum_{k=1}^{m_k} E_k \int y^2 \, dA \quad (3.30)$$

Bu denklemlerde; ε_0 referans noktasındaki şekil değiştirme, Ω eğrilik, E_k k. parçanın elastisite modülü, m_k kesitteki parça sayısı, N aksenal kuvvet, M eğilme momenti, y mesafesi de incelenen lif ile referans noktası arasındaki mesafedir. Denklem (3.29) ve denklem(3.30)'da $k=1$ 'den m_k ifadesine kadar olan parçalar toplanır ise; denklem (3.31) ve denklem (3.32) yazılır. Kompozit bir kesit için; A_k , B_k ve I_k ifadeleri, farklı kısımların katkıları toplanarak elde edilir. Bu denklemler, matris düzeninde denklem (3.33) gibi yazılır. Denklem (3.33)'de ε_0 ile Ω bilindiği zaman N ve M ifadeleri hesaplanır. Benzer şekilde; N ve M ifadeleri biliniyor ise ε_0 ile Ω değerleri de denklem (3.34) kullanılarak elde edilir.

$$N = E_{\text{ref}} (A_k \varepsilon_0 + B_k \Omega) \quad (3.31)$$

$$M = E_{\text{ref}} (B_k \varepsilon_0 + I_k \Omega) \quad (3.32)$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = E_{\text{ref}} \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ B_k & I_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \Omega \end{Bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \Omega \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_{\text{ref}} (A_k I_k - B_k^2)} \begin{bmatrix} I_k & -B_k \\ -B_k & A_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (3.34)$$

Burada; A_k dönüştürülmüş kesit için alan, B_k ve I_k dönüştürülmüş kesit için referans noktasından geçen tarafsız eksene göre sırasıyla; statik moment ve atalet momenti ifadeleridir. E_{ref} referans malzemenin elastisite modülü, ε_0 referans noktasındaki şekil değiştirme, Ω eğrilik, N aksenal kuvvet ve M eğilme momentidir. Eğer kesit birden daha fazla malzemedan oluşuyor ise denklemlerde verilen E_{ref} ifadesi gerilmenin hesaplandığı malzemeye ait elastisite modülüdür. Dönüştürülmüş kesite ait A_k , B_k ve I_k ifadeleri her bir malzemenin kendi elastisite modüllerinin referans elastisite modülüne bölünmesi ile elde edilen oran ile çarpılarak hesaplanır.

Başlangıç veya t_0 anı için şekil değiştirme ve eğrilik ifadeleri denklem (3.34) ile hesaplanır. Başlangıç anı için; E_{ref} referans elastisite modülünü gösterir ve genelde betonun t_0 anındaki elastisite modülü olan $E_c(t_0)$ 'a eşit olarak alınır. Herhangi bir beton lifteki ani şekil değiştirme ile gerilme; denklem (3.27) ve denklem (3.28)'de betonun elastisite modülünün $E_c(t_0)$ kullanılmasıyla elde edilir. Benzer olarak çelik elemandaki gerilme, denklem (3.28)'de çelik malzemenin elastisite modülünün kullanılması ile hesaplanır.

3.5.1.2 Gerilme ve Şekil Değiştirmenin Zamana Bağlı Değişimi

Yükün uygulandığı başlangıç anı için hesaplanan gerilme ve şekil değiştirme değerleri, sünme ve büzülme gibi çeşitli faktörler nedeniyle zaman içerisinde değişim gösterir. Bu kısımda, seçilen bir zaman aralığı için kesitte bulunan farklı malzemeler için gerilme dağılımının hesaplanması sunulmuştur. Şekil değiştirmenin t_0 ile t anı arasındaki değişimi, $\Delta\varepsilon$ şekil değiştirme ve $\Delta\Omega$ eğrilik değerlerindeki değişim ile hesaplanır. Sünme ile büzülme, ilk olarak O noktasına ΔN aksenal kuvveti ve ΔM eğilme momenti etkimesiyle fiktif mesnet oluşturulur. Bu işlemin hemen ardından mesnet kuvvetleri kompozit kesite ters yönlü ve eşit büyüklükte uygulanır. Denklem (3.35) ile $\Delta\varepsilon_0$ şekil değiştirme ve $\Delta\Omega$ eğrilik değişimleri hesaplanır.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_0 \\ \Delta\Omega \end{Bmatrix} = \frac{1}{\bar{E}_c(\bar{A}\bar{I} - \bar{B}^2)} \begin{bmatrix} \bar{I} & -\bar{B} \\ -\bar{B} & \bar{A} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix} \quad (3.35)$$

Burada; \bar{A} , \bar{B} ve \bar{I} sırasıyla betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin alanı, statik momenti ve atalet momenti ifadeleridir. Denklem (3.17) ile $\bar{E}_c = E_{ref} = \bar{E}_c(t, t_0)$ yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş etkin modül elde edilir. Fiktif kuvvetler ise denklem (3.36) ile verilmiş olan iki terimin toplamı şeklindedir. Eğer sünme serbest olarak oluşur ise, şekil değiştirme ve eğrilik için t_0 anından t anına kadar olan artışı $\varphi(t, t_0)\varepsilon(t_0)$ ve $\varphi(t, t_0)\Omega(t_0)$ ile hesaplanır. Sünme deformasyonlarını engellemek için gerekli kuvvetler denklem (3.37), büzülme deformasyonlarını engellemek için gerekli kuvvetler denklem (3.38) ile hesaplanır.

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{\text{sünme}} + \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{\text{büzülme}} \quad (3.36)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{\text{sünme}} = - \sum_{k=1}^{m_k} \left\{ \bar{E}_c \varphi(t, t_0) \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ B_c & I_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_O(t_0) \\ \Omega(t_0) \end{Bmatrix} \right\}_k \quad (3.37)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{\text{büzülme}} = - \sum_{k=1}^{m_k} \left\{ \bar{E}_c \varepsilon_{sh}(t, t_0) \begin{Bmatrix} A_c \\ B_c \end{Bmatrix} \right\}_k \quad (3.38)$$

Bu denklemlerde; k alt indisi beton kesitteki m_k adet kısımdan k . kesit kısmını gösterir. A_c , B_c ve I_c , sırasıyla beton kısma ait alan, statik moment ve atalet momentidir. $\varphi(t, t_0)$ k . beton kısım için sünme katsayısı, $\varepsilon_O(t_0)$ ile $\Omega(t_0)$ t_0 anında referans noktasındaki şekil değiştirme ve eğrilik, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ ise t_0 ile t anı arasında oluşan serbest büzülme, ΔN aksenal kuvvet ve ΔM eğilme moment değişimi, $\bar{E}_c = \bar{E}_c(t, t_0)$ yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş etkin modüldür. Gerilme değeri, denklem (3.39) ile hesaplanır. t_0 ile t anı arasında oluşan gerilme değişimi ise beton için denklem (3.40), çelik eleman için ise denklem (3.41) gibidir.

$$\sigma_r = -\bar{E}_c(t, t_0) [\varphi(t, t_0) \varepsilon_O(t_0) + \varepsilon_{sh}(t, t_0)] \quad (3.39)$$

$$\Delta \sigma_c = \sigma_r + \bar{E}_c(t, t_0) (\Delta \varepsilon_O + \Delta \Omega y) \quad (3.40)$$

$$\Delta \sigma_{ns} = E_{ns} (\Delta \varepsilon_O + \Delta \Omega y_{ns}) \quad (3.41)$$

Burada; $\varepsilon_O(t_0)$ t_0 anında referans noktasındaki şekil değiştirme, $\varphi(t, t_0)$ k . beton kısım için sünme katsayısını, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ t_0 ile t anı arasında oluşan serbest büzülme, $\bar{E}_c(t, t_0)$ yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş etkin modülü, $\Delta \varepsilon$ şekil değiştirme ve $\Delta \Omega$ eğrilik değerlerindeki değişimi, y incelenen beton lifi ile referans noktası

arasındaki mesafeyi, y_{ns} incelenen çelik lifi ile referans noktası arasındaki mesafeyi, $\Delta\sigma_c$ betonda gerilme değişimini, $\Delta\sigma_{ns}$ çelikte gerilme değişimini gösterir.

3.5.1.3 Kompozit Eleman Uç Kuvvetlerinin Zamana Bağlı Değişimi

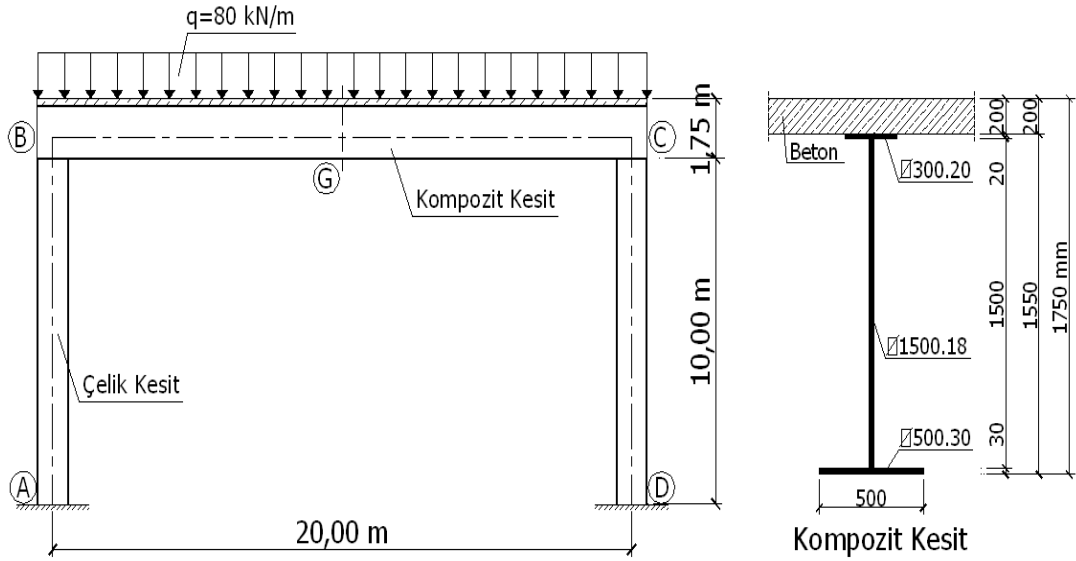
İncelenen yapı elemanındaki tüm kesitler için t_0 başlangıç anında aksenal kuvvet ve eğilme momenti değerleri bilinir. Yüklerin sisteme uygulanmasından çok kısa bir süre sonra, kompozit kesitli çubuk uçlarındaki düğüm noktalarının tamamen tutulduğu kabul edilirse, betonun zamana bağlı olan sünme ve büzülme davranışları nedeniyle tutulmuş çubuk elemanın uç kuvvetlerindeki değişim hesaplanır. Burada; kiriş için üç serbestlik derecesi seçilmiş ve denklem (3.42) ile çözüm yapılmıştır. İlk olarak, yer değiştirmelerdeki değişimler $\{D\}$ nümerik intergrasyon veya virtüel iş ile hesaplanmış ve daha sonra t_0 ile t arasında kuvvetlerdeki değişimler denklem (3.42) ile elde edilmiştir.

$$\{\Delta F\} = \frac{\bar{E}_c(t, t_0)}{L} \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 & 0 \\ 0 & 4\bar{I} & 2\bar{I} \\ 0 & 2\bar{I} & 4\bar{I} \end{bmatrix} \{-\Delta D\} \quad (3.42)$$

Burada; $\{\Delta F\}$ t_0 ile t arasında değişen kuvvet vektörünü, $\{\Delta D\}$ aynı zaman aralığındaki yer değiştirmelerdeki değişim vektörünü, L eleman uzunluğunu, $\bar{E}_c(t, t_0)$ yaş etkisini dikkate alan etkin ve dönüştürülmüş modülü, \bar{A} betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin alanını, \bar{I} betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin merkezinden geçen eksene göre atalet momentini, gösterir.

3.5.1.4 Kompozit Kirişli Çerçevenin Sayısal İncelemesi

Şekil 3.7 ile verilen tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sisteminde BC kiriş eleman beton ve çelikten oluşan kompozit, AB ile CD kolon elemanlar ise çelik malzeme kullanılmıştır (Seçer, 2008).

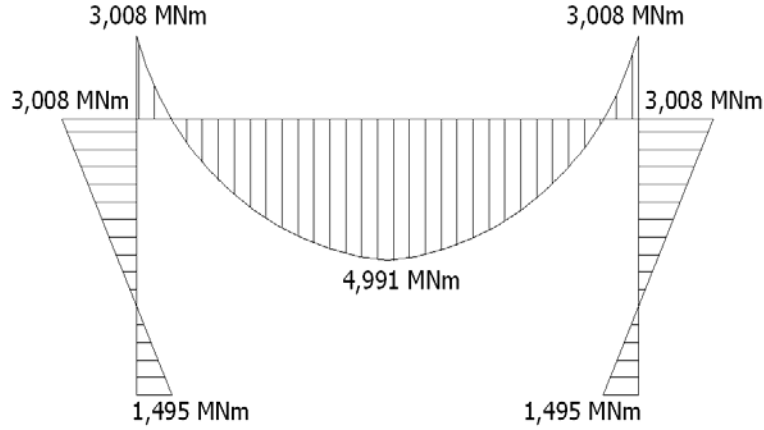


Şekil 3.7 Tek açıklıklı çerçeve ve kompozit kiriş kesiti.

Çelik kolon kesiti; alt ve üst başlık $2 \square 600.40$, gövde ise $\square 1000.20$ seçilerek levhaların sürekli olarak kaynaklanması ile elde edilmiştir. Kompozit BC kirişine ait G noktası kesiti ve ölçüleri Şekil 3.7 ile verilmiştir. Betonun elastisite modülü $E_c(t_0)=30$ GPa, çelik malzemenin elastisite modülü $E_s=200$ GPa olarak kabul edilmiştir. Sünme katsayısı 1000 gün için ACI 209R-92 (1997) ile $\phi(t_1, t_0)=2,4$ ve yaş katsayısı $\chi=0,80$ olarak dikkate alınmıştır. t_0 anında üniform düşey yayılı yük $q=80$ kN/m sisteme uygulanmış ve t_1 anına kadar sistem üzerinde sabit olarak tutulmuştur. Bu kısımda; t_0 ve t_1 zamanları arasında sünmeden dolayı oluşan eğilme momenti ve kirişin orta noktasındaki düşey yer değiştirme değerlerindeki değişim araştırılmıştır.

Tek açıklıklı ve tek katlı çerçeve sisteme doğrusal elastik analiz uygulanmış ve t_0 anında, yayılı yük etkisi altında sistemde oluşan eğilme momenti diyagramı Şekil 3.8 olarak elde edilmiştir. Referans elastisite modülü $E_{ref}=E_c(t_0)=30$ GPa olarak dikkate alınmış ve tüm elemanların merkezlerine göre hesaplanmış atalet momentleri kullanılmıştır. Doğrusal elastik hesapta kullanılan dönüştürülmüş kesite ait atalet momenti kompozit BC kiriş için $0,3614 \text{ m}^4$ ve çelik kolon kesitler için $0,1342 \text{ m}^4$ dir. t_0 anı BC elemanı için dönüştürülmüş kesitin merkezi alt liften 1404 mm yukarıdadır. Bundan dolayı statik hesapta kolon boyu olarak 11,404 m dikkate alınmıştır. Bu duruma göre; t_0 anında aksenal yük BC elemanında $-394,91$ kN ve kolon

elemanlarda 1600 kN'dur. Tek katlı ve tek açıklıklı çerçevenin maksimum kiriş yer değiştirmesi 16,87 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.8 Tek açıklıklı çerçevenin t_0 anı moment diyagramı.

BC kompozit kirişin dönüştürülmüş kesitinin t_0 anı için kesit özellikleri Tablo 3.1 gibidir. Tablo 3.1'de; A_k dönüştürülmüş kesit için alan, B_k ve I_k dönüştürülmüş kesit için O'dan geçen tarafsız eksene göre statik moment ve atalet momenti ifadeleridir.

Tablo 3.1 Kompozit BC kirişinin t_0 anı için kesit özellikleri

		Dönüştürülmüş kesit özellikleri		
Eleman	Kesit	A_k (m ²)	B_k (m ³)	I_k (m ⁴)
BC	B	1,320	0,3221	0,43998
	G	1,320	0,3221	0,43998
	C	1,320	0,3221	0,43998

Tablo 3.2 için referans noktası; şekil değiştirmenin hesaplandığı O noktası olup dönüştürülmüş kesitin merkez noktası olarak kabul edilmiştir. Kompozit elemandaki aksenal kuvvet ve eğilme momenti değerleri statik eşdeğerlerine çevrilmiş ve Tablo 3.2'de verilmiştir. Merkezi gösteren eksen, kesitin alt kısmına doğru 0,244 m kaymış ve $0,244 \text{ m} \times -394,91 \text{ kN} = -96,363 \text{ kNm}$ eğilme momenti elde edilmiştir. BC elemanının eğilme momenti hesaplanırken bu durum Tablo 3.2 ile dikkate alınmıştır.

Tablo 3.2 Kompozit BC kirişinin t_0 anı için şekil değiştirme ve eğrilik hesabı

Kesit	İç kuvvetler (t_0 anı için)		Şekil değiştirme, eğrilik (t_0 anı için)		Beton bölgesinin özellikleri			δ_G (mm)
	N ($\times 10^6$ N)	M ($\times 10^6$ Nm)	$\varepsilon_0(t_0)$ ($\times 10^{-5}$)	$\Omega(t_0)$ ($\times 10^{-4}$ m $^{-1}$)	A_c (m 2)	B_c (m 3)	I_c (m 4)	
B	-0,39491	-2,912217	-7,77	-2,78	1,00	0,4899	0,2433	16,87
G	-0,39491	5,087783	10,24	4,60	1,00	0,4899	0,2433	
C	-0,39491	-2,912217	-7,77	-2,78	1,00	0,4899	0,2433	

Burada; N aksel kuvvet, M eğilme momenti, $\varepsilon_0(t_0)$ şekil değiştirme, $\Omega(t_0)$ eğrilik, A_c , B_c ve I_c sırasıyla; beton kısmın alanı, statik momenti, atalet momenti, δ_G G noktası düşey yer değiştirmesidir. Sünme nedeni ile oluşan ΔN ve ΔM , denklem (3.37) ve Tablo 3.2 ile verilen değerler kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 3.3 ile sunulmuştur. Betonun yaş etkisi dikkate alınarak dönüştürülmüş kesitin özellikleri Tablo 3.3 ile verilmiş ve $\Delta\varepsilon_0$ ile $\Delta\Omega$ değişimi denklem (3.35) ile elde edilmiştir.

Tablo 3.3 Kompozit BC kirişinin şekil değiştirme ve eğrilik değerleri değişimi hesabı

Kesit	Sünme nedeniyle oluşan iç kuvvetler		Yaş etkisi dikkate alınmış dönüştürülmüş kesitin özellikleri $\bar{E}_c(t_1, t_0)$			Şekil değiştirme ve eğrilik	
	ΔN ($\times 10^6$ N)	ΔM ($\times 10^6$ Nm)	\bar{A} (m 2)	\bar{B} (m 3)	\bar{I} (m 4)	$\Delta\varepsilon_0$ ($\times 10^{-5}$)	$\Delta\Omega$ ($\times 10^{-4}$ m $^{-1}$)
B	-1,43629	0,726384	1,934	0	0,8176	7,23	-0,86
G	3,03675	-1,525410	1,934	0	0,8176	-15,28	1,82
C	-1,43629	0,726384	1,934	0	0,8176	7,23	-0,86

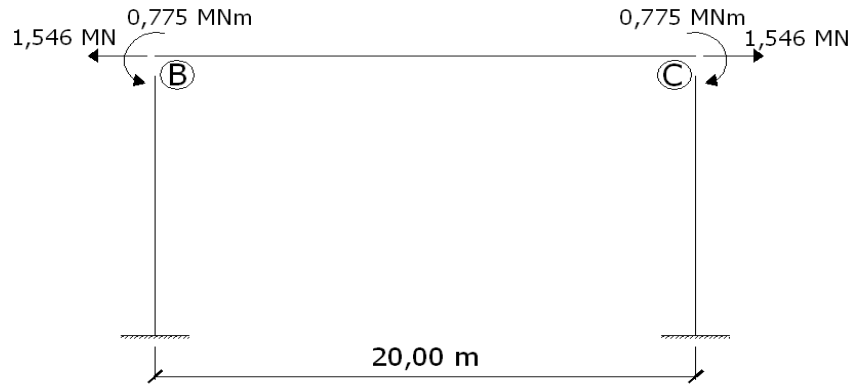
Burada; $\bar{E}_c(t_1, t_0)$ yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş etkin modül, \bar{A} , \bar{B} ve \bar{I} sırasıyla betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin alanı, statik momenti ve atalet momenti ifadeleridir. ΔN , ΔM , $\Delta\varepsilon_0$ ve $\Delta\Omega$ sırasıyla aksel kuvvet, eğilme momenti, şekil değiştirme ve eğrilik değerlerindeki değişimdir. Yer değiştirmeleri vektörünün $\{D\}$ hesaplanmasında; $\Delta\varepsilon_0$ ve $\Delta\Omega$ 'nin BC uzunluğu boyunca parabolik değişim gösterdiği varsayılmış ve hesaplar bu doğrultuda ACI

435–R95 (2003) kullanılarak yapılmıştır. ACI 435–R95 (2003) ile eleman boyundaki değişim, $-1,56 \times 10^{-3}$ m, çubuk uç dönmeleri ise sol ve sağ uç için sırasıyla; $-9,22 \times 10^{-4}$ ile $9,22 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Ayrıca, benzer şekilde çubuk orta noktası yer değiştirme değerindeki değişim 6,8 mm'dir. Elde edilen yer değiştirmeleri önlemek için gerekli olan ankastrelik kuvvetleri de hesaplanmıştır. Denklem (3.42)'de yer alan betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin merkezinden geçen eksene göre alan $\bar{A} = 1,934 \text{ m}^2$ ve atalet momenti $\bar{I} = 0,81763 \text{ m}^4$ olup çubuk uç kuvvetleri Tablo 3.4 ile sunulmuştur.

Tablo 3.4 Kompozit BC kirişindeki uç kuvvet ve momentleri değişimi

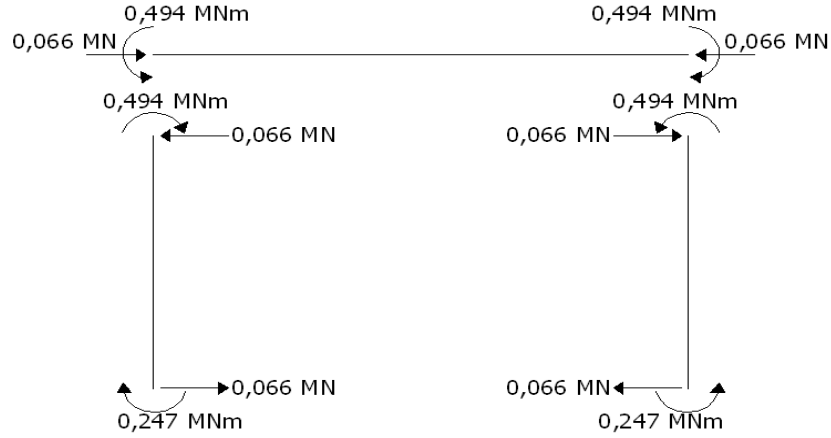
Eleman	Deplasmanlar			Çubuk Uç Kuvvet ve Momentleri		
	ΔD_1 ($\times 10^{-3}$ m)	ΔD_2 ($\times 10^{-4}$)	ΔD_3 ($\times 10^{-4}$)	ΔF_1 ($\times 10^6$ N)	ΔF_2 ($\times 10^5$ Nm)	ΔF_3 (10^5 Nm)
BC	-1,56	-9,22	9,22	1,55	7,75	-7,75

Tablo 3.4 ile elde edilen $\{\Delta F\}$ çubuk uç kuvvetleri Şekil 3.9 ile eleman uçlarında gösterilmiş ve bu kuvvetler ters yönde çerçeveye uygulanmıştır. Bu kuvvetlere göre çerçeve çözülmüş ve eleman uç kuvvetleri elde edilmiştir.



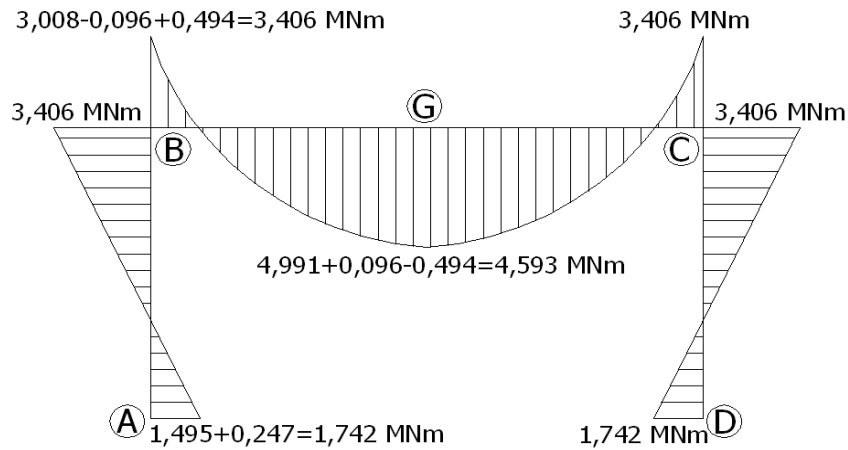
Şekil 3.9 BC kompozit kirişinde sünme nedeni ile oluşan kuvvet ve momentler.

Çözümde kullanılan BC eleman kesit değerleri betonun yaş etkisi dikkate alınmış ve dönüştürülmüş kesit değerleridir. Elde edilen kuvvetlerin süperpozisyon prensibi ile toplanması ile sünmeden dolayı oluşacak eleman toplam uç kuvvet ve momentleri Şekil 3.10 gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.10 Sünme ile oluşan toplam kuvvet ve momentler.

Elde edilen moment diyagramını başlangıç anı için verilen t_0 diyagramına eklenerek t_1 anı için son moment değerleri elde edilmiş ve Şekil 3.11 ile sunulmuştur. Çerçeve kirişinin orta noktasının yer değiştirmesinin hesabı için de süperpozisyon uygulanmıştır. Çerçeve kirişinin orta noktasının yer değiştirmesi başlangıç anı t_0 için 16,87 mm, sünme nedeni ile çerçeve kirişinin orta noktasının yer değiştirmesi 6,85 mm ve sünme nedeni ile hiperstatik kuvvetlerden oluşan yer değiştirme $-2,94$ mm'dir. BC kompozit kirişi orta noktasının düşey yer değiştirmesi t_1 anı için 20,7 mm ($=16,8+6,8-2,9$) olarak elde edilmiştir.



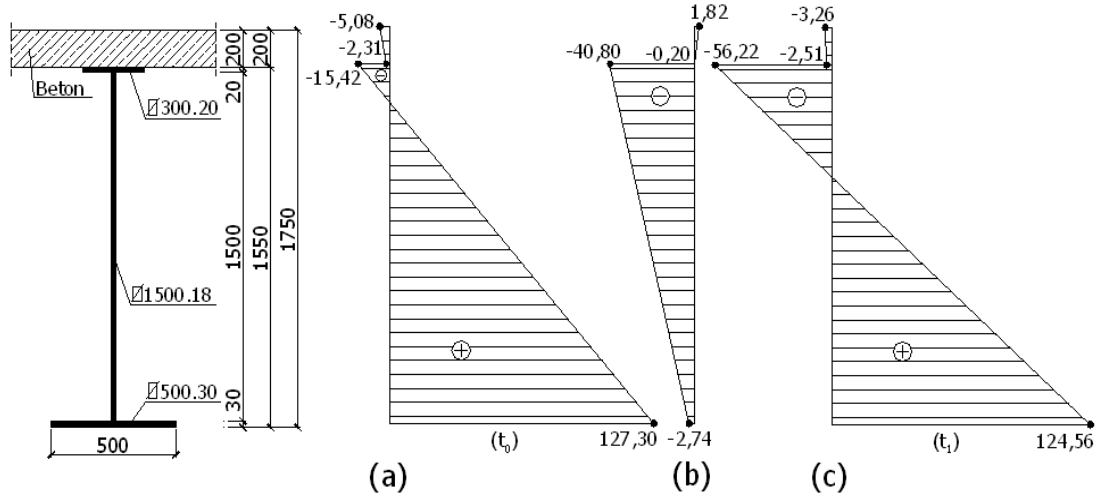
Şekil 3.11 Tek açıklıklı çerçevenin t_1 anı moment diyagramı.

BC kompozit kirişinin orta noktasında yer alan G noktası için kesit alınmış ve kesit üzerinde oluşan gerilme değerleri süperpozisyon prensibine göre Tablo 3.5 ile incelenmiştir. G noktası için kesitteki gerilme dağılımı ise Şekil 3.12 ile sunulmuştur.

Tablo 3.5 Kompozit BC kirişindeki G kesiti için gerilme dağılımı hesabı

	Gerilme Adımları (MPa)				Toplam Gerilme (MPa)	
	(t ₀ anı)		Sünme Etkisi		$\Sigma\sigma_{\text{Sünme}}$	(t ₁ anı)
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
	$\sigma(t_0)$	Sünme kısıtı için gerilme	ΔN & ΔM için gerilme dağılımı	Sünme nedeni ile ek kuvvetlerden oluşan gerilme	Sünme bileşenleri toplamı	$\sigma(t_1)$
Beton üst kotu	-5,08	4,17	-2,67	0,32	1,82	-3,26
Beton alt kotu	-2,31	1,90	-2,30	0,20	-0,20	-2,51
Çelik üst kotu	-15,42	-	-44,72	3,92	-40,80	-56,22
Çelik alt kotu	127,30	-	11,57	-14,31	-2,74	124,56

Tablo 3.5’de, (i) sütununda; t₀ anındaki $\sigma(t_0)$ gerilmesi, dönüştürülmüş kesit için hesaplanmış ve bu kesit tesirlerine ait şekil değiştirme, eğrilik ifadeleri $\epsilon_0(t_0)=10,24 \times 10^{-5}$ ve $\Omega(t_0)=4,60 \times 10^{-4}$ (m⁻¹) olarak elde edilmiştir. (ii) sütununda ise; sünme kısıtı için gerekli gerilme hesaplanmıştır. (iii) sütununda yer alan eksenel kuvvet $\Delta N=3,037$ MN ve moment $\Delta M=-1,525$ MNm değişimleri için yaş etkileri dikkate alınmış dönüştürülmüş kesit için gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu duruma ait şekil değiştirme ve eğrilik ifadeleri $\Delta\epsilon_0(t_0)=-1,53 \times 10^{-4}$ ile $\Omega(t_0)=1,82 \times 10^{-4}$ (m⁻¹) şeklindedir. (iv) sütununda sünme nedeni ile hiperstatik kuvvetlerden oluşan gerilmeler için eksenel kuvvet $-0,066$ MN, eğilme momenti $-0,494$ MNm olup yaş etkileri dikkate alınmış dönüştürülmüş kesite uygulanmıştır. (v) sütununda sünme nedeni ile oluşan gerilme değerlerinin toplamı elde edilmiştir. (vi) t₁ anı için hesaplanan gerilme değerleri $\sigma(t_1)$ sunulmuştur.



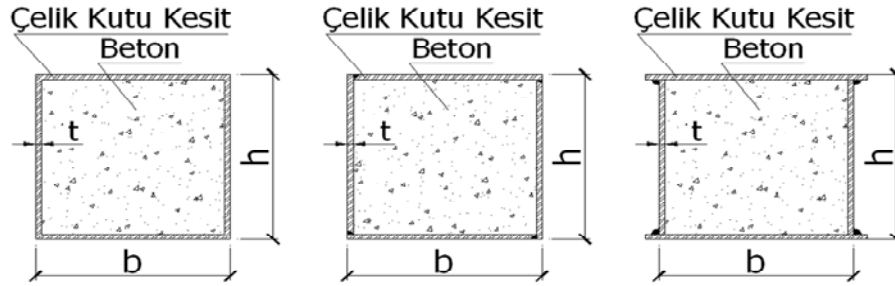
Şekil 3.12 BC kompozit kirişinin G noktası için çelik ve beton bileşenlerdeki gerilme dağılımları: (a) t_0 anı, (b) sünme etkisi, (c) t_1 anı.

Tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistemin kirişi kompozit, kolonları çeliktir. Kompozit kesitli sistemler için zamana bağlı sünme davranışı nedeniyle iç kuvvetlerdeki değişimlerin incelenmesi iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada, yüklerin uygulanmasının ardından t_0 anı için düğüm noktası yer değiştirmeleri ve çubuk uç kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu işlemin ardından, düğüm noktaları fiktif olarak sabitlenmiş ve zamana bağlı uç kuvvetleri t zamanı için bulunmuştur. Son aşamada ise, fiktif kuvvetler kaldırılmış ve oluşan düğüm noktası yer değiştirmeleri ile çubuk uç kuvvetleri hesaplanmıştır.

Sünme nedeniyle kiriş elemanın orta noktası; t_1 anı düşey yer değiştirme değeri t_0 anı düşey yer değiştirme değerine göre %22'lik bir artış göstermiştir. Çerçeve kirişinin sehim değeri t_0 anında emniyetli sınırın altında gözükürken, t_1 anında emniyetli görülen bu sehim sınırını aşabileceği göz önüne alınmalıdır. Sünme dikkate alınarak boyutlandırma yapılırsa, istenemeyen yapısal hasarların ve dolayısı ile sonradan ortaya çıkacak onarım maliyetlerinin önüne geçilmiş olunur. Eğilme momenti diyagramları karşılaştırıldığında, sünmenin kolonlardaki eğilme momenti değerlerini arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni; sünme ile betonun elastisite modülü ve dolayısı ile kompozit BC kirişinin eğilme rijitliği zamana bağlı olarak azalırken çelik kolonların eğilme rijitliğinde herhangi bir değişim olmamasıdır. Çerçevedeki bu bağlı değişimden dolayı çelik kolonlardaki eğilme momentleri artış göstermiştir.

3.5.2 İçerisi Beton ile Doldurulmuş Çelik Kutu Kesitli Kolonların Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkilerinin İncelenmesi

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlar son yıllarda yüksek katlı binalarda yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmuştur (Uy, 1998). Şekil 3.13 ile gösterilen bu tip elemanların yapılarda kullanılmasının amacı; malzeme, işçilik bakımından ekonomi sağlanması ve dolayısıyla yüksek yapı inşasında verimin artmasıdır. Ayrıca, betonun yanıl deformasyonunun içinde bulunduğu çelik kutu tarafından sınırlandırılması ile betonun taşıma gücünün artması, betonun çelik kutu kesit içerisinde bulunması ile çelik kutu kesitin yerel burkulma yükünün artması gibi malzemeler arası oluşmuş olan karşılıklı yapısal avantajlar da dikkat çekicidir (Susantha, Ge ve Usami, 2001). Dayanım ile ağırlık arasındaki oranının yüksek olması ve çelik kutu kesit içerisindeki betonun fazla bakım gerektirmemesi ayrı bir önem taşır. Mimari açıdan incelendiğinde ise, bu tip kolonların kullanılması ile daha büyük kullanım alanları elde edilebilir. Benzer olarak; inşaat maliyeti ve süresini etkileyen önemli faktörlerden biri olan kalıp gereksinimi, iskele kurma maliyeti ile süresi ve bu esnada oluşabilecek imalat hataları da azalır (Uy ve Patil, 1996).



Şekil 3.13 İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitler.

3.5.2.1 Kompozit Kolon Elemanın Sayısal İncelemesi

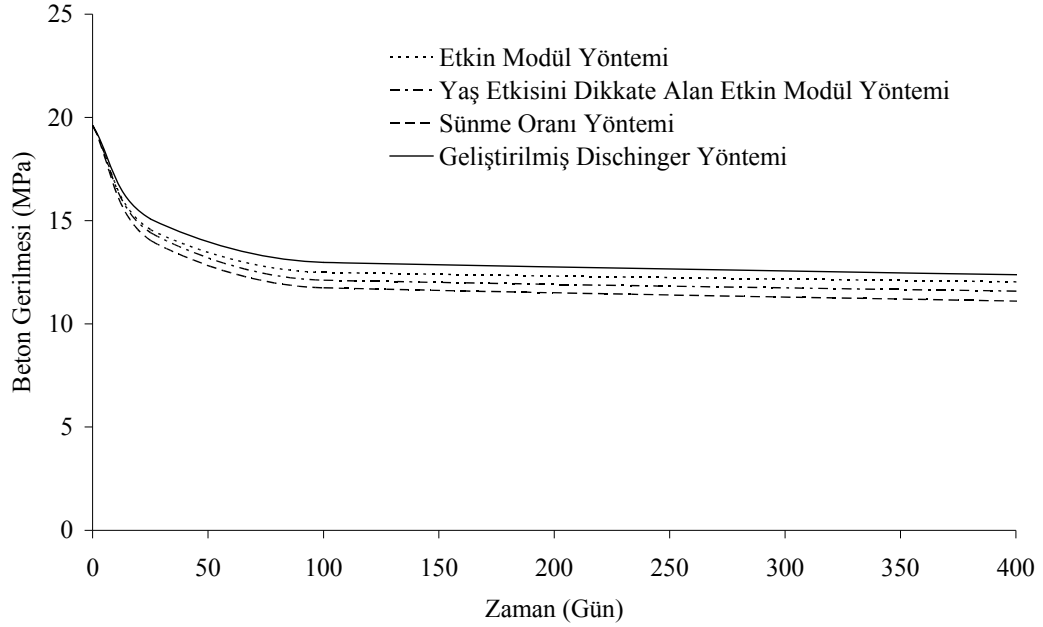
Çalışmada, sayısal örnek olarak merkezinde betonarme bir çekirdek bulunan yirmi katlı bir binanın zemin katından seçilen içerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolon elemanın zamana bağlı davranışı incelenmiştir. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolon elemanın viskoelastik davranışı; Etkin Modül Yöntemi, Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi, Sünme Oranı Yöntemi

ve Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi kullanılarak araştırılmıştır (Seçer ve Kural, 2010). Sünme ve büzülme şekil değiştirmeleri ACI 209R-92 (1997) kullanılarak modellenmiştir. Gerilme – zaman, şekil değiştirme – zaman, şekil değiştirme bileşenleri – zaman grafikleri sunulmuş ve yöntemlerin zamana bağlı davranışı modellemedeki avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır. Çelik kutu kesitin boyutları; 800 mm x 800 mm olup kesit kalınlığı 18 mm'dir. Çelik kutu kesitin elastisite modülü 200 GPa, beton malzemenin ise 28 günlük basınç dayanımı 45 MPa, elastisite modülü 36 GPa olacak şekilde seçilmiş ve beton ile çelik arasında herhangi bir aderans problemi olmadığı kabul edilmiştir. Bina için hareketli yük ve öz ağırlık yükleri ile birlikte toplam hesap yükü 15 kN/m^2 olarak dikkate alınmıştır. Çelik kolonun yerel burkulma hesabı gibi bu sayısal uygulama ile ilgili diğer bilgiler; Seçer ve Kural (2010) tarafından yapılan çalışmada verilmiştir. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlardan oluşturulacak sistemin inşasının hızlı bir şekilde yapıldığı ve binanın zamana bağlı davranışının incelendiği sürenin yanında ihmal edilebilecek kadar kısa sürede gerçekleştiği kabul edilmiştir. Zamana bağlı davranış, imalat safhasının tamamlanmasından sonraki 400 gün süresince, analitik yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

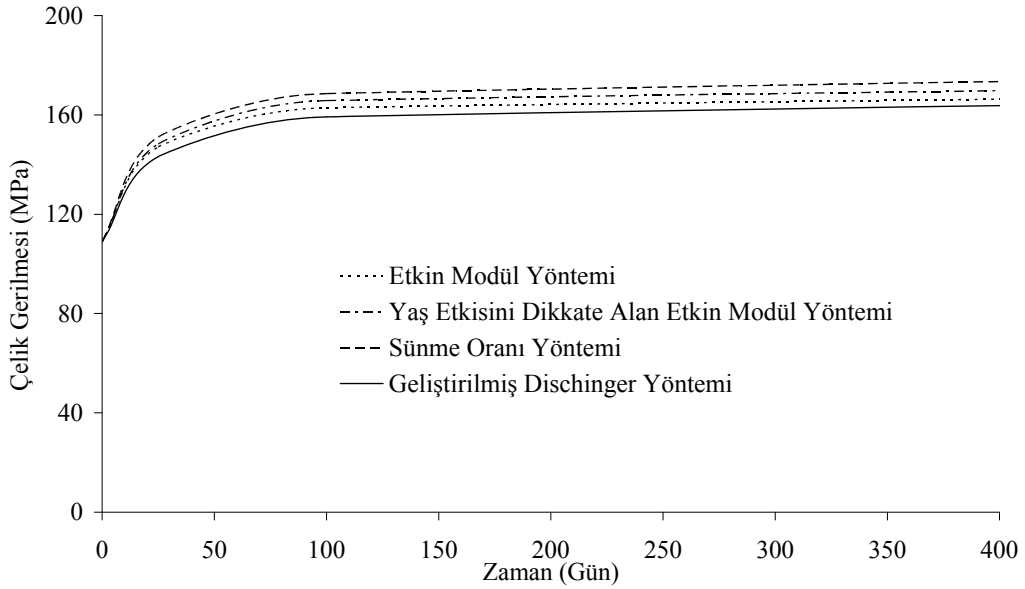
İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların sünme ve büzülme şekil değiştirmeleri çelik kutu kesitin betonunun içinde bulunan nemin dış atmosfer ortamına çıkışına engel olması nedeniyle betonarme kolonlara göre bir miktar düşük olur (Uy, 1998). Yapılan çeşitli deneysel çalışmalar sonucu; nihai sünme katsayıları 0,50 ile 1,50 ve nihai büzülme şekil değiştirme değerleri $50 \mu\epsilon$ ile $200 \mu\epsilon$ arasında değişen değerler alır (Morino, Kawaguchi ve Cao, 1996; Nakai, Kurita ve Ichinose, 1991; Terry, Bradford ve Gilbert, 1994). Bu çalışmada, nihai sünme katsayısı ve nihai büzülme şekil değiştirmesi için Terry, Bradford ve Gilbert (1994) tarafından elde edilmiş olan 1,50 ve $200 \mu\epsilon$ değerleri kullanılmıştır.

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların, beton ve çelik bileşenleri için gerilme – zaman ilişkisi Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 ile sunulmuştur. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlarda sünme ve büzülme nedeniyle incelenen tüm yöntemler için beton bileşen üzerindeki gerilmenin zamana

bağlı olarak azaldığı, çelik kutu kesit bileşen üzerindeki gerilmenin ise zamana bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür.

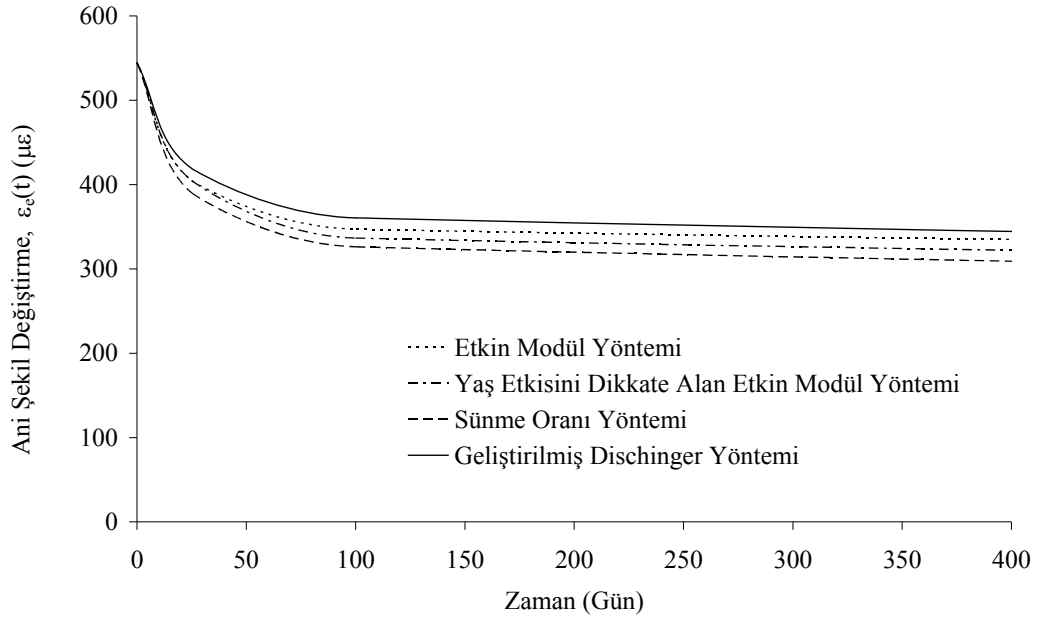


Şekil 3.14 Kolon eleman için beton gerilmesi – zaman ilişkisi.

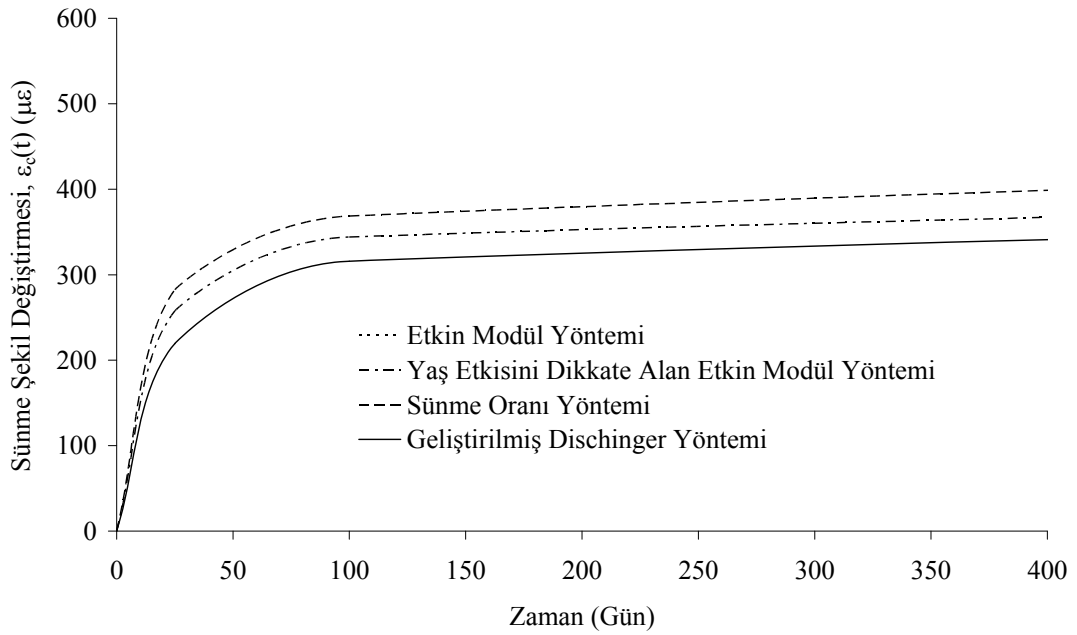


Şekil 3.15 Kolon eleman için çelik gerilmesi – zaman ilişkisi.

Ani şekil değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 3.16, sünme şekil değiştirmesi – zaman ilişkisi Şekil 3.17 ve toplam şekil değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 3.18 ile sunulmuştur.

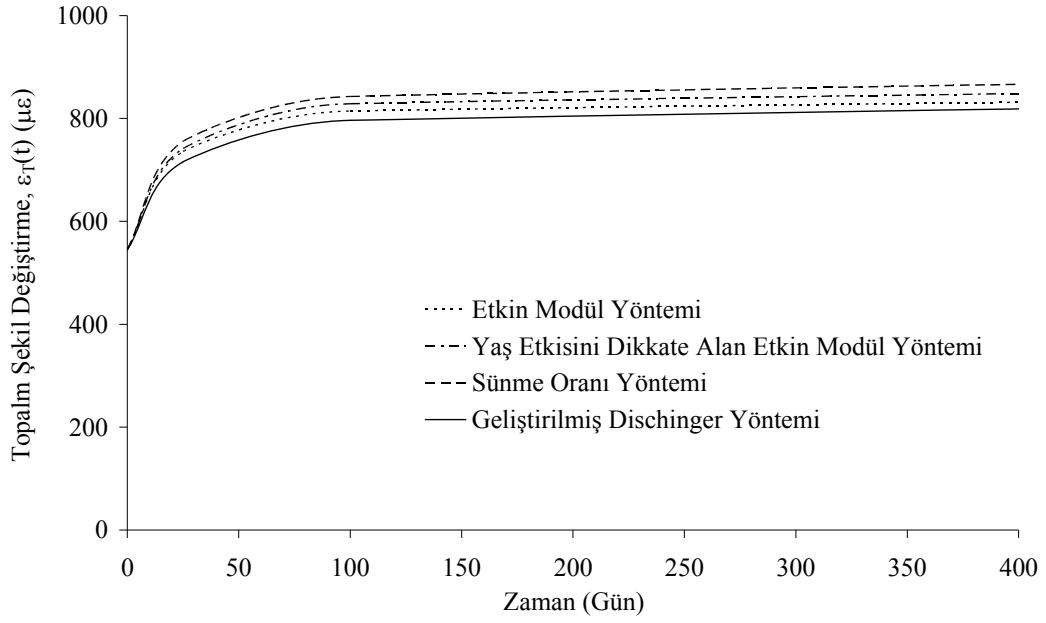


Şekil 3.16 Kolon eleman için ani şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

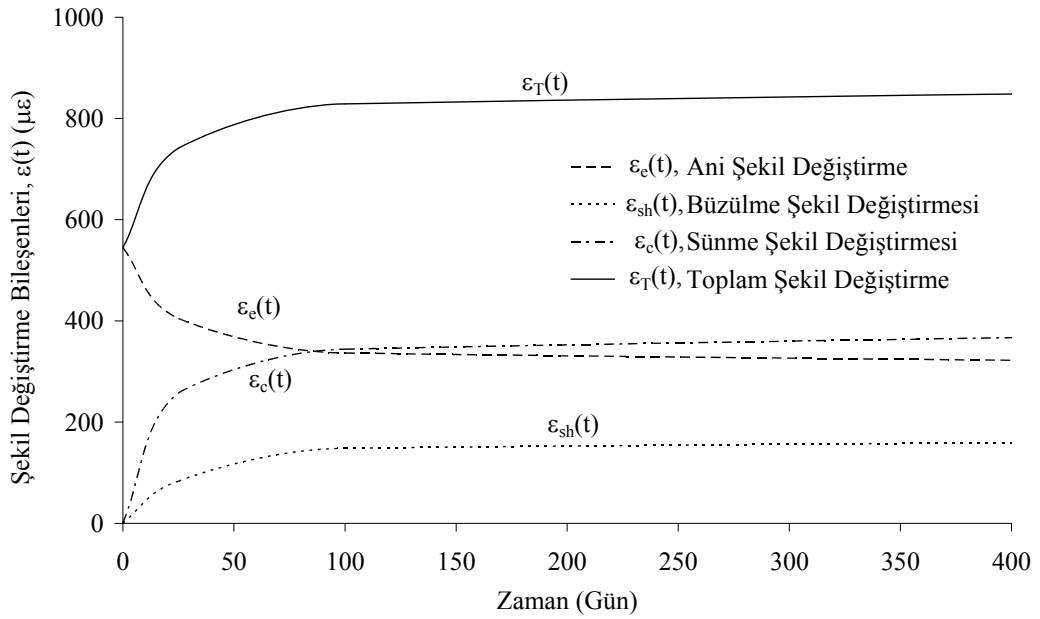


Şekil 3.17 Kolon eleman için sünme şekil değişirmesi – zaman ilişkisi.

Şekil değiştirme bileşenlerinin zamana bağlı davranışlarını bir arada görmek amacıyla Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile elde edilmiş şekil değiştirme bileşenleri – zaman grafiği Şekil 3.19’da sunulmuştur.



Şekil 3.18 Kolon elemanı için toplam şekil değiştirme – zaman ilişkisi.



Şekil 3.19 Kolon elemanın şekil değiştirme bileşenleri – zaman ilişkisi.

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolon elemandaki zamana bağlı aksenal yük değişimi gibi diğer bazı hesap sonuçları da incelenmiştir. Örneğin; inşaatın tamamlandığı anda kesitteki beton ve çelik bileşenlerde bulunan gerilme değerleri kullanılarak aksenal yük dağılımı hesaplanmış ve aksenal yükün %58'i beton, % 42'lik kısmı çelik tarafından karşılandığı görülmüştür. Uzun bir süre sonra

($t=10000$ gün) elemandaki eksenel yük dağılımı Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile kesit bileşenlerindeki gerilme dağılımı dikkate alınarak hesaplandığında, eksenel yük %28 beton ve %72 çelik tarafından karşılanır duruma gelmiştir.

Bu çalışma ile içerisi beton dolu çelik kutu kesitlerdeki sünme ve büzülme davranışlarının yapı üzerindeki etkileri seçilmiş bir kolon eleman üzerinde incelenmiş ve hesaplanan gerilme, şekil değiştirme dağılımlarının önemli ölçüde etkilediği sayısal olarak ortaya konmuştur. Çalışmada kullanılan; Etkin Modül Yöntemi ve Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Sünme Oranı Yöntemi ise, ilk iki yöntemle göre betondaki gerilmeleri nispeten düşük, çelikteki gerilmeleri ise yüksek bulmuştur. Bunun nedeni, yöntem kısmında belirtildiği gibi yöntem geliştirilirken sünme geri dönüşünün dikkate alınmamasıdır. Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi ise; başlangıçta ilk iki yöntemden bir miktar farklı sonuçlar vermiş, ancak zaman ilerledikçe elde edilen sonuçların diğer yöntem sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlarda; zamana bağlı olarak betondaki gerilmenin zamanla azaldığı ve çelikteki gerilmelerin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ani, sünme ve büzülme şekil değiştirmelerindeki değişimler de hesaplanmıştır.

Sünme ve büzülme davranışları gerçeğe ne kadar yakın modeller ile temsil edilebilirler ise yapıların zamana bağlı davranışları da gerçek davranışa o oranda yakın olur. Betonun zamana bağlı davranışını mükemmel olarak yansıtabilen bir sayısal tahmin yapılabilmesi mümkün değildir. Ancak, çalışmada kullanılan yöntemler ile üst ve alt sınır değerler elde edilebilir ve zamana bağlı etkilerin gelecekteki herhangi bir durumda kritik olup olmayacağı tahmin edilebilir. Bu sayede, boyutlandırma esnasında birtakım önlemler alınarak uzun süreli davranış etkilerinin yapıya vereceği beklenmedik hasarlar azaltılabilir.

BÖLÜM DÖRT

VİSKOELASTİK MALZEMELİ ÇUBUK SİSTEMLERİNİN GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME – ZAMAN İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ

4.1 Giriş

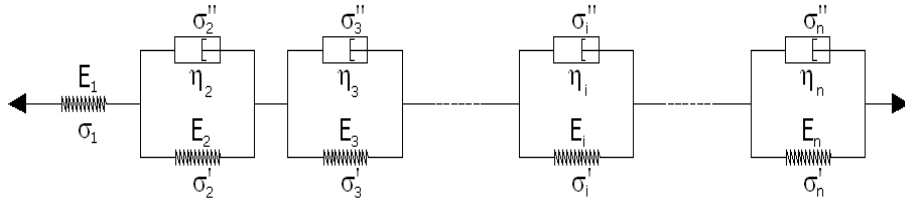
Zamana bağlı olmayan elastik veya plastik malzeme davranışlarından farklı olarak viskoelastik malzeme elastik ve viskoz özelliği bir arada taşır ve zamana bağlı davranış gösterir. Düşük gerilme seviyeleri altında birçok malzeme doğrusal veya doğrusala çok yakın şekilde elastik davranır (Arutyunyan ve Zevin, 1997). Bu nedenle, doğrusal viskoelastik malzeme davranışının incelenmesi oldukça önemlidir. Ancak, şekil değiştirmelerin yüksek olduğu durumlarda, davranış doğrusal olmaktan uzaklaşır. Yüksek performanslı makine ve yapıların hesaplarında gerçek davranışa daha yakın sonuçlar elde etmek için doğrusal olmayan viskoelastik davranışın hesaplarda dikkate alınması gerekir (Boyle ve Spence, 1983).

Doğrusal olmayan viskoelastik malzeme davranışını modellemek için kullanılan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi; matematik olarak büyük güçlüklerle neden olmayacak kadar basit ve aynı zamanda deney sonuçlarına yakın değerler verecek kadar hassas olmalıdır. Viskoelastik davranış yük geçmişine ve yük seviyesine bağlı olduğundan viskoelastik malzemeler modellenirken bu duruma dikkat edilmelidir (Lakes, 1999). Doğrusal olmayan viskoelastik malzeme davranışının incelenmesi birçok zorluk içerdiğinden konu hakkında çok fazla ilerleme kaydedilememiştir (Lockett, 1972). Bazı çalışmalarda; büyük miktarda ve yüksek mertebeden gerilme terimi içeren fonksiyonlar kullanılarak doğrusal olmayan viskoelastik davranış tarif edilmeye çalışılmıştır (Findley, Lai ve Onaran, 1989).

Çalışmanın bu kısımda amaç; kabul edilen gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisinin çubuk sistem problemlerine uygulanması ve ilişkinin geçerliliğinin saptanmasıdır. Çalışmada, gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınarak düzlem kafes ve çerçeve sistemlerin viskoelastik hesabı sunulmuştur.

4.2 Matematiksel Model için Reolojik Model Geliştirilmesi

Ani elastik şekil değiştirmeyi simgeleyen Hooke elemanına, gecikmeli şekil değiştirmeyi simgeleyen n adet Kelvin modelinin seri bağlanması ile gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 4.1’de gösterilen bileşik model ile tanımlamak mümkün olur.



Şekil 4.1 Matematiksel model için hazırlanan reolojik model.

Burada; E_i , i. yayın elastisite modülü, η_i , i. sönüm kutusunun viskozite katsayısı, σ gerilme, ε şekil değiştirmedir. Hooke elemanının bünye denklemi $\sigma = E\varepsilon$ olup viskoz elemanın bünye denklemi $\sigma = \eta\dot{\varepsilon}$ şeklindedir. Şekil 4.1 için sistemin dengesi dikkate alınmış ve denklem (4.1) yazılmıştır.

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2' + \sigma_2'' = \sigma_3' + \sigma_3'' = \dots = \sigma_i' + \sigma_i'' = \dots = \sigma_n' + \sigma_n'' \quad (4.1)$$

Burada; σ_i' i. yay elemanı için gerilme, σ_i'' i. sönüm kutusu için gerilme terimidir. Şekil 4.1 için toplam şekil değiştirme, her elemanın şekil değiştirme değerlerinin toplamı olarak denklem (4.2) ile sunulmuştur.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_i + \dots + \varepsilon_n \quad (4.2)$$

Burada; ε_i i. elemanın şekil değiştirmesidir. Kelvin modeli için i. elemana ait şekil değiştirme, sabit gerilme durumu için denklem (4.3) ile yazılmıştır.

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i + \eta_i \dot{\varepsilon}_i \quad (4.3)$$

Burada; σ_i i. Kelvin elemanı için gerilme, E_i i. yayın elastisite modülü, η_i i. sönüm kutusunun viskozite katsayısı, $\dot{\epsilon}_i$ i. elemanın şekil değiştirmesinin zamana göre türevidir. Denklem (4.3) sabit katsayılı bir diferansiyel denklem olup çözümü denklem (4.4) şeklinde yazılmıştır. Başlangıç anı şekil değiştirmesi sıfır olduğundan integrasyon için sabit değer $c = \sigma_0/E_i$ ile denklem (4.5) elde edilmiştir.

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_0}{E_i} + c e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}} \quad (4.4)$$

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_0}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}} \right) \quad (4.5)$$

Burada; ; ϵ_i i. elemanın şekil değiştirmesi, σ_0 başlangıç anındaki gerilme, E_i i. yayın elastisite modülü, η_i i. sönüm kutusunun viskozite katsayısı, c sabit, t zamandır. Bu işlem Şekil 4.1 ile sunulan sistemdeki diğer elemanlar için de uygulanmış ve sistem için şekil değiştirme denklem (4.6) ile elde edilmiştir.

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \sum_{i=2}^n \frac{\sigma_0}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}} \right) \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'da $A_0 = 1/E_1$, $A_i = 1/E_i$ ve $q_i = E_i/\eta_i$ olarak düzenlenmiş ve denklem (4.7) elde edilmiştir.

$$\epsilon = \sigma_0 \left(A_0 + \sum_{i=1}^n A_i (1 - e^{-q_i t}) \right) \quad (4.7)$$

Bu işlemler sonucu A_i katsayılarının reolojik model açısından negatif olması olanaksızdır. Bu nedenle matematiksel modele anlam kazandırabilmek için, q_i katsayılarını negatif A_i çözüm takımı vermeyen değerlerini seçmek gerekir. Ayrıca, sünme hızının sabit kaldığı evreyi dikkate almak amacıyla reolojik modele n . Kelvin

modelinden sonra bir viskoz eleman eklenmiştir. Bu durum $f_n(t) = t$ fonksiyonunun gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisine dahil edilmesi ile sağlanmıştır.

4.3 Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisinin İncelenmesi

Bu kısımda, sabit gerilme hali için gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi denklem (4.8) şeklinde kabul edilmiştir (Kaya, 1973; Kural, 1977).

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ A_0(\sigma_0) + \sum_{i=1}^n A_i(\sigma_0) f_i(t) \right\} \quad (4.8)$$

Burada; σ_0 sabit gerilme değerini, $\varepsilon(t)$ zamana bağlı değişen şekil değiştirme değerini, A_i malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özelliklerini, $f_i(t)$ sünme fonksiyonlarını tanımlamaktadır. Denklem (4.8)'de özel durum olarak; $n=0$, $f_0(t)=1$, $A_0(\sigma_0)=1/E$ dikkate alınır Hooke Kanunu elde edilir. Denklem (4.8)'de $1 < n$, $A_i(\sigma_0)=\alpha_i$ sabit olarak alındığında doğrusal viskoelastik malzeme için şekil değiştirme ifadesi denklem (4.9) elde edilir.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(t) \right\} = \sigma_0 \varphi(t) \quad (4.9)$$

Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi denklem (4.8) ile tanımlanan bir malzeme için $f_i(t)$ fonksiyonları zaman bağlı davranışı iyi derecede yansıtmak şekilde seçilmelidir (Kaya, 1973; Kural, 1977). Matematiksel modelde $f_0(t)=1$ olarak dikkate alınmış ve diğer $f_i(t)$ fonksiyonları denklem (4.10) gibi tanımlanmıştır. Denklem (4.10) ile tanımlanan fonksiyon t değişkeninin büyük değerleri için 1'e yaklaşacağından, sünme hızının sabit olduğu ikinci safhayı da kapsamak için $f_n(t) = t$ fonksiyonu da son terim olarak ifadeye dahil edilmiştir.

$$f_i(t) = 1 - e^{-q_i t} \quad (4.10)$$

Burada; $f_i(t)$ i. eleman için sünme fonksiyonu, t zaman, q_i i. eleman için sünme fonksiyonuna ait malzeme katsayısıdır.

4.4 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisinin Değişken Gerilme Durumunda Uygulanması

Denklem (4.8) ile sunulan gerilme – şekil değişirme – zaman ilişkisi değişken gerilme hali için incelenmiştir. Herhangi bir değişken gerilme durumu için σ_1 gerilmesi denklem (4.11) şeklinde yazılmıştır.

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad (4.11)$$

Burada; σ_0 ilk gerilme değerini, $\Delta\sigma$ gerilme artışını, σ_1 artış sonrası gerilme değerini ifade eder. σ_1 gerilmesi için şekil değişirme denklem (4.8) dikkate alınarak denklem (4.12) ile yazılmıştır. σ_1 gerilmesinden dolayı oluşan $\Delta\sigma$ gerilme artışı nedeniyle, σ_0 anı için elde edilen şekil değişirme denklem (4.13) kadar artmıştır.

$$\varepsilon(t) = \sigma_1 \left\{ A_0(\sigma_1) + \sum_{i=1}^n A_i(\sigma_1) f_i(t) \right\} \quad (4.12)$$

$$\left\{ \sigma_1 A_0(\sigma_1) - \sigma_0 A_0(\sigma_0) \right\} + \sum_{i=1}^n \left\{ \sigma_1 A_i(\sigma_1) - \sigma_0 A_i(\sigma_0) \right\} f_i(t) \quad (4.13)$$

Burada; σ_0 ilk gerilme değeri, σ_1 artış sonrası gerilme değeri, $\varepsilon(t)$ zamana bağlı şekil değişirme değeri, A_0 ile A_i malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özellikleri ve $f_i(t)$ sünme fonksiyonlarıdır. Denklem (4.12) ile gösterilen σ_1 gerilmesinden dolayı oluşan şekil değişirme benzer olarak denklem (4.14) şeklinde de gösterilmiştir.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ A_0(\sigma_0) + \sum_{i=1}^n A_i(\sigma_0) f_i(t) \right\} + \left\{ \sigma_1 A_0(\sigma_1) - \sigma_0 A_0(\sigma_0) \right\} + \sum_{i=1}^n \left\{ \sigma_1 A_i(\sigma_1) - \sigma_0 A_i(\sigma_0) \right\} f_i(t) \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)'de; ilk terim σ_0 değerine bağlı şekil değiştirme miktarını, iki ve üçüncü terimler ise $\Delta\sigma$ gerilme artışından dolayı şekil değiştirmedeki artışı ifade etmektedir. Gerilme artışının herhangi bir $t=\Delta t=\tau_1$ anında uygulandığı varsayılır ve $\sigma_0=\sigma(0)$, $\sigma_1=\sigma(\tau_1)$ değerleri dikkate alınırsa şekil değiştirme denklem (4.14)'e benzer olarak denklem (4.15) ile yazılır.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \sigma(0) \left\{ A_0(\sigma(0)) + \sum_{i=1}^n A_i(\sigma(0)) f_i(t) \right\} H(t) + \left\{ [\sigma(\tau_1)A_0(\sigma(\tau_1)) - \sigma(0)A_0(\sigma(0))] + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^n [\sigma(\tau_1)A_i(\sigma(\tau_1)) - \sigma(0)A_i(\sigma(0))] f_i(t - \tau_1) \right\} H(t - \tau_1) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Burada; $\sigma(0)$ ilk gerilme değeri, $\sigma(\tau_1)$ τ_1 anındaki gerilme değeri, $\varepsilon(t)$ zamana bağlı şekil değiştirme fonksiyonu, A_0 ile A_i malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özellikleri, $f_i(t)$ sünme fonksiyonları, $H(t)$ birim adım fonksiyonudur. Δt zaman artışı için $\Delta\sigma$ gerilmesi eklenmesi durumunda, şekil değiştirme ifadesine denklem (4.13)'e benzer olarak denklem (4.16) gibi terimlerin eklenmesi gerekir. Denklem (4.16) ve denklem (4.17) dikkate alınarak şekil değiştirme denklem (4.18) ile yazılmıştır.

$$\begin{aligned} & \left\{ [\sigma(\tau_k)A_0(\sigma(\tau_k)) - \sigma(\tau_{k-1})A_0(\sigma(\tau_{k-1}))] + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^n [\sigma(\tau_k)A_i(\sigma(\tau_k)) - \sigma(\tau_{k-1})A_i(\sigma(\tau_{k-1}))] f_i(t - \tau_k) \right\} H(t - \tau_k) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$P_i(\sigma(\tau_k)) = \sigma(\tau_k)A_i(\sigma(\tau_k)) \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \left\{ P_0(\sigma(0)) + \sum_{i=1}^n P_i(\sigma(0)) f_i(t) \right\} H(t) + \dots + \\ & \left\{ \Delta P_0(\sigma(\tau_k)) + \sum_{i=1}^n \Delta P_i(\sigma(\tau_k)) f_i(t - \tau_k) \right\} H(t - \tau_k) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Burada; $\sigma(0)$ ilk gerilme değeri, $\sigma(\tau_k)$ τ_k anındaki gerilme değeri, $\varepsilon(t)$ zamana bağlı şekil değiştirme değeri, A_0 ile A_i malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özellikleri, $f_i(t)$ sünme fonksiyonları, P_0 ile P_i malzemenin gerilme ve mekanik

özelliklerine bağlı fonksiyonları, $H(t)$ birim adım fonksiyonlarıdır. Bu ifadelerde; Δt 'nin sıfıra yaklaşması halinde, sürekli bir gerilme $\sigma(t)$ fonksiyonu için denklem (4.19) kabul edilmiş ve denklem (4.18) kullanılarak denklem (4.20) yazılmıştır. Denklem (4.20) ifadesinde yer alan son iki integral terimi kısmi integrasyonla hesaplanmış ve denklem (4.21) ile denklem (4.22) elde edilmiştir.

$$\Delta P_i(\sigma(\tau)) = \frac{\partial P_i(\sigma(\tau))}{\partial \tau} d\tau \quad (4.19)$$

$$\varepsilon(t) = \left\{ P_0(\sigma(0)) + \sum_{i=1}^n P_i(\sigma(0))f_i(t) \right\} + \int_{0^+}^t \frac{\partial}{\partial \tau} P_0(\sigma(\tau))d\tau + \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t \frac{\partial}{\partial \tau} \{P_i(\sigma(\tau))\} f_i(t-\tau)d\tau \quad (4.20)$$

$$\varepsilon(t) = \left\{ P_0(\sigma(0)) + \sum_{i=1}^n P_i(\sigma(0))f_i(t) \right\} + P_0(\sigma(\tau))\Big|_{0^+}^t + \sum_{i=1}^n P_i(\sigma(\tau))f_i(t-\tau)\Big|_{0^+}^t - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t P_i(\sigma(\tau)) \frac{\partial f_i(t-\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (4.21)$$

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) \left\{ A_0(\sigma(t)) + \sum_{i=1}^n A_i(\sigma(t))f_i(0) \right\} - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t \sigma(\tau) A_i(\sigma(\tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(t-\tau)d\tau \quad (4.22)$$

Bu denklemlerde; $\sigma(0)$ ilk gerilme değeri, $\sigma(\tau)$ τ anındaki gerilme değeri, $\varepsilon(t)$ zamana bağlı şekil değiştirme fonksiyonu, A_0 ile A_i malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özellikleri, $f_i(t)$ sünme fonksiyonları, P_0 ile P_i gerilme ve malzemenin mekanik özelliklerine bağlı fonksiyonları, $H(t)$ birim adım fonksiyonlarıdır. Denklem (4.22)'de $f_i(0)=0$ olduğundan denklem (4.23) yazılmıştır. Değişken gerilmeye maruz malzemelerde zamana bağlı şekil değiştirme denklem (4.23) ile elde edilmiştir.

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) A_0(\sigma(t)) - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t \sigma(\tau) A_i(\sigma(\tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(t-\tau)d\tau \quad (4.23)$$

Burada; $n=0$ ve $A_0(\sigma)=1/E$ olarak alındığında denklem (4.23) ile Hooke kanunu bulunur. Eğer; $1 < n$ ile $A_i(\sigma) = \alpha_i$ ($\alpha_i = \text{sabit}$) için $\alpha_0 = \varphi_c(0)$ ve denklem (4.24)

dikkate alınırsa denklem (4.23) kullanılarak denklem (4.25) yazılır. Denklem (4.25) düzenlenir ve denklem (4.26) ile Boltzmann Süperpozisyon prensibi elde edilir.

$$\varphi_c(t) = \varphi_c(0) + \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(t) \quad (4.24)$$

$$\varepsilon(t) = \varphi_c(0)\sigma(t) - \int_{0^+}^t \sigma(\tau) \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(t-\tau) d\tau \quad (4.25)$$

$$\varepsilon(t) = \varphi_c(0)\sigma(t) - \int_{0^+}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \varphi_c(t-\tau) d\tau \quad (4.26)$$

Burada; $\varepsilon(t)$ ile $\sigma(t)$ zamana bağlı şekil değiştirme ve gerilme fonksiyonları, α_i doğrusal viskoelastik malzemenin mekanik özellikleri, $\varphi_c(t)$ çekirdek fonksiyonudur.

4.5 Çeşitli Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Doğrusal olmayan bir viskoelastik malzeme için denklem (4.27) ile tanımlanan ve literatürde Nutting (1921), Scott ve Veinglou (1944) tarafından kullanılan bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınarak sayısal inceleme yapılmıştır. Denklem (4.27)'nin zamana göre türevi denklem (4.28)'dir. Denklem (4.27) ile denklem (4.28) arasında zaman terimi elimine edilerek denklem (4.29) yazılmıştır.

$$\varepsilon_c(t) = K\sigma^p t^\zeta \quad (4.27)$$

$$\frac{d\varepsilon_c(t)}{dt} = K\sigma^p \zeta t^{\zeta-1} \quad (4.28)$$

$$\frac{d\varepsilon_c(t)}{dt} = K^{1/\zeta} \zeta \sigma^{p/\zeta} (\varepsilon_c(t))^{(1-\zeta)/\zeta} \quad (4.29)$$

Burada; $\varepsilon_c(t)$ sünme şekil değiştirmesi fonksiyonu, K malzemenin mekanik özelliklerini dikkate alan sabit, σ gerilme, t zaman, ρ ile ζ gerilme ve zaman için malzeme katsayılarıdır. Sünme şekil değiştirmelerinin incelenmesinde; denklem (2.9) ve denklem (2.10)'a benzer olarak denklem (4.28) zaman sertleşme yaklaşımını, denklem (4.29) ise deformasyon sertleşme yaklaşımını ifade eder. Herhangi bir gerilme artışı için ilk olarak; denklem (4.28) ile sunulan birinci yaklaşım dikkate alınmış ve herhangi bir t anında $\varepsilon_c(t)$ değerini hesaplamak için denklem (4.30) ile denklem (4.31) elde edilmiştir.

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_1) + \int_{t_1}^t \frac{\partial \varepsilon_c(t)}{\partial t'} dt' = \varepsilon_c(t_1) + \int_{t_1}^t K \sigma_1^\rho \zeta t'^{(\zeta-1)} dt' \quad (4.30)$$

$$\varepsilon_c(t) = K \sigma_1^\rho \left\{ t^\zeta - t_1^\zeta \left[1 - (\sigma_0/\sigma_1)^\zeta \right] \right\} \quad (4.31)$$

Burada; ε_c sünme şekil değiştirmesi, σ_0 ilk gerilme değeri, σ_1 gerilme artışı sonrası gerilme değeri, K malzemenin mekanik özelliklerini dikkate alan sabit değer, t zaman, t_1 gerilme artışının olduğu an, ρ ile ζ malzeme katsayılarıdır. İkinci yaklaşım için ise; denklem (4.29) ile sunulan sünme şekil değiştirmesi $\varepsilon_c(t)$ dikkate alınmış ve herhangi bir t zamanı için $\varepsilon_c(t)$ denklem (4.32) ile gösterilmiştir. Denklem (4.32)'de yer alan γ değerinin hesabı için gerilme artışının olduğu anda $K \sigma_1^\rho \tau^\zeta = K \sigma_0^\rho t_1^\zeta$ yazılmıştır. $\tau = t_1 - \gamma$ olduğundan γ değeri denklem (4.33) şeklinde elde edilmiştir. Denklem (4.32); denklem (4.29) ve denklem (4.33) dikkate alınarak düzenlenmiş ve denklem (4.34) hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_1) + \int_{t_1-\gamma}^{t-\gamma} K^{1/\zeta} \zeta \sigma_1^\rho (\varepsilon_c(t))^{-(1-\zeta)/\zeta} dt' \quad (4.32)$$

$$\gamma = \left\{ 1 - (\sigma_0/\sigma_1)^{\rho/\zeta} \right\} t_1 \quad (4.33)$$

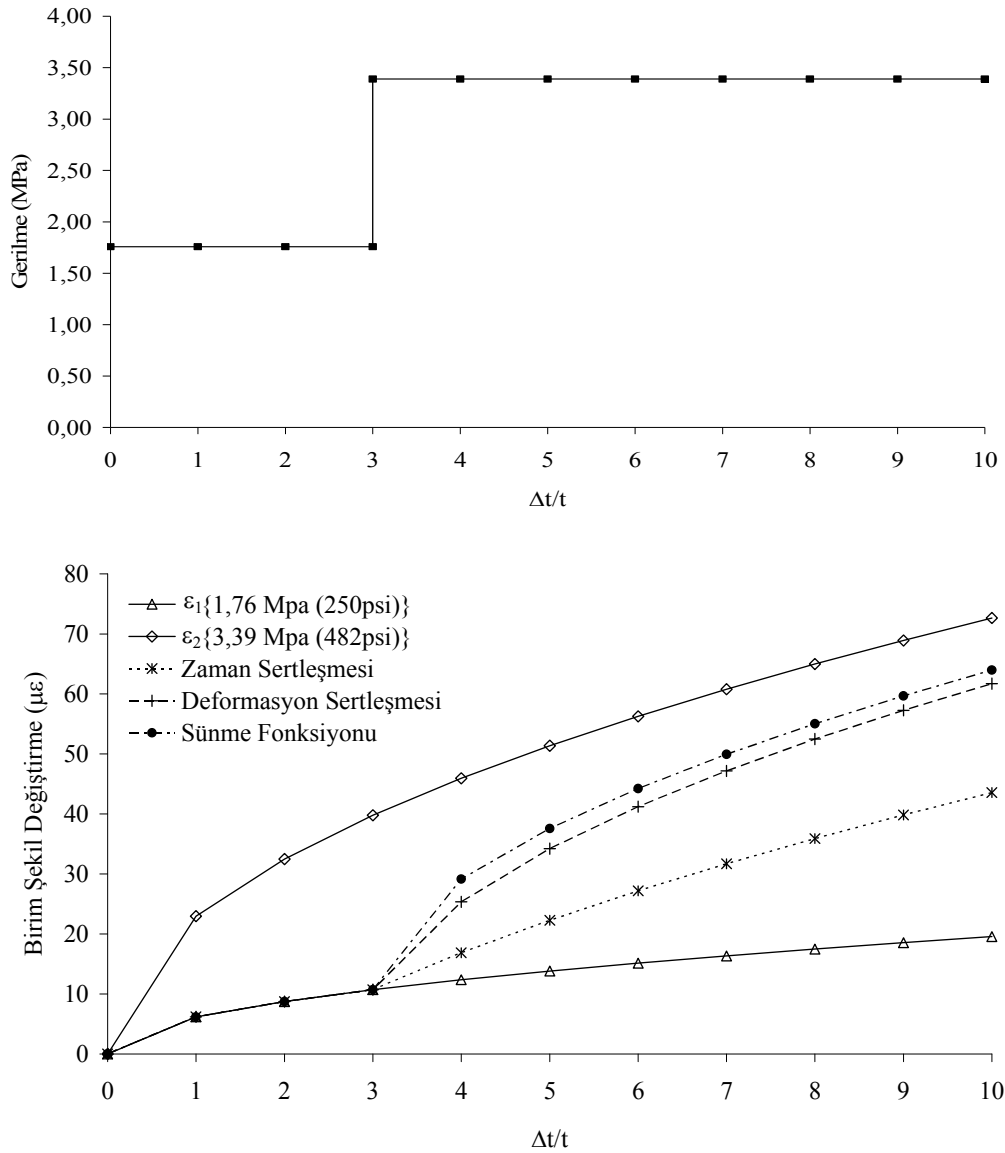
$$\varepsilon_c(t) = K \sigma_1^\rho \left\{ (\sigma_0/\sigma_1)^\rho t_1^\zeta + (t-\gamma)^\zeta - (t_1-\gamma)^\zeta \right\} \quad (4.34)$$

Burada; $\varepsilon_c(t)$ sünme şekil değiştirmesi, K malzemenin mekanik özelliklerini dikkate alan sabit, σ_0 ilk gerilme değeri, t_1 gerilme artışının olduğu an, σ_1 gerilme artışı sonrası gerilme değeri, t zaman, ρ ile ζ gerilme ile zaman için malzeme katsayılarıdır.

Bu çalışmada kullanılan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi de aynı tip yükleme için incelenmiştir. Toplam şekil değiştirme değerinden ani şekil değiştirme çıkartılmış, $n=1$, $A_1(\sigma)=K\sigma^{\rho-1}$, $f_1(t)=t^\zeta$ dikkate alınarak gerekli düzenlemeler yapılmış ve sünme şekil değiştirmesi $\varepsilon^c(t)$ denklem (4.35) şeklinde elde edilmiştir.

$$\varepsilon_c(t) = K\sigma_1^\rho \left\{ (\sigma_0/\sigma_1)^\rho t^\zeta + [1 - (\sigma_0/\sigma_1)^\rho] (t - t_1)^\zeta \right\} \quad (4.35)$$

Burada; $\varepsilon_c(t)$ sünme şekil değiştirmesi, K malzemenin mekanik özelliklerini dikkate alan sabit, σ_0 ilk gerilme değeri, t_1 gerilme artışının olduğu an, σ_1 gerilme artışı sonrası gerilme değeri, t zaman, ρ ile ζ malzeme katsayılarıdır. Gerilme değişimi durumunun sayısal olarak incelenmesi amacıyla; Finnie ve Heler (1959) ile Boyle ve Spence (1983) tarafından verilen deney sonuçları ile zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımlarının karşılaştırıldığı çalışma dikkate alınmıştır. Tez çalışmasında kullanılan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisiyle zaman sertleşmesi, deformasyon sertleşmesi Finnie ve Heler (1959) ile Boyle ve Spence (1983) tarafından verilen deney sonuçları kıyaslanarak incelenmiştir. Finnie ve Heler (1959) ile Boyle ve Spence (1983), bir gerilme artışı durumu için şekil değiştirme değerlerindeki değişimi araştırmıştır. Çalışmada, ilk gerilme seviyesi 1,76 MPa (250 psi) ve gerilme artışı ile beraber son gerilme seviyesini 3,39 MPa (482 psi) olarak verilmiştir. Denklemlerde yer alan; K, ρ ve ζ malzeme katsayıları hesaplarda $K=2 \cdot 10^6$, $\rho=2$ ve $\zeta=0,5$ kabul edilmiş ve Şekil 4.2 bu doğrultuda elde edilmiştir. Finnie ve Heler (1959) ile Boyle ve Spence (1983), deney sonuçlarına göre gerilme artışı olduktan sonra şekil değiştirme değerlerinin deformasyon sertleşmesi yaklaşımından bir miktar daha büyük değerler verecek şekilde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada verilen gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımlarına göre deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.2 Zaman ve deformasyon sertleşmeleri sayısal örnek sonuçları.

4.6 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi ile Kafes Sistemlerin İncelenmesi

Kafes sistemlerin doğrusal olmayan viskoelastik davranışlarının incelenmesinde, kafes sistemlerin doğrusal elastik hesaplarında kullanılan Hooke kanunu yetersiz kalmakta ve gerilme – şekil değişirme ilişkisinin zaman terimini de içerecek şekilde genişletilmesi gerekir. Çalışmanın bu kısmında denklem (4.23) ile özetlenen gerilme – şekil değişirme – zaman ilişkisinin kafes sistemlere uygulanarak viskoelastik davranışının bu yaklaşım ile incelenmesi amaçlanmıştır.

Viskoelastik malzemeli bir hiperstatik sistemde dış yükler zamana bağlı bir değişim göstermese bile çubuk kuvvetleri zamana bağlı olarak değişir. Fazla yüklü çubuklar yüklerinin bir kısmını daha az yüklü çubuklara aktarır. Bu durum, stasyoner olmayan viskoelastik davranışı temsil eder. Gerilmenin zaman içerisinde sabit olmadığı durumda redör katsayısı zamana bağlı olarak değişir. Denklem (4.23) incelendiğinde $t=t_1$ anında redör katsayısı, zamana ve çubuk gerilmelerinin $t=0$ ile $t=t_1$ arasında geçirdiği değişikliklerin tümüne bağlıdır. Viskoelastik malzemeli kafes sistemler için bir redör katsayısının tanımlanmasındaki amaç, herhangi bir yapı sisteminde meydana gelebilecek zamana bağlı şekil değiştirmeleri ve gerilme dağılımındaki değişiklikleri hızlı bir şekilde hesaplanabilmesinin sağlamaktır.

Doğrusal olmayan viskoelastik bir malzeme için, hiperstatik bir kafes sisteminde çubuk kuvvetlerinin bir an için $t=0$ da bilindiği varsayılırsa denklem (4.23) ile her çubuk için redör değerlerini hesaplanıp sistemin çözülmesi sonucunda elde edilecek çubuk kuvvetleri, bilindiğini kabul ettiğimiz değerlere eşit olur. Başlangıç anı $t=0$ için kafes sistemdeki çubuk kuvvetleri bilinmediğinden çubuk kuvvetlerini hesaplanması için iterasyon işlemleri gerekmektedir.

Herhangi bir kafes sistem için j . kafes çubuk elemandaki gerilme $t=0$ anında $\sigma_j^1(0)$ olarak kabul edilirse bu değer iteratif hesaplar için ilk deneme değerleri olarak dikkate alınır. Başlangıç anı için malzemenin doğrusal elastik olması kabulüne göre çubuk gerilme değerleri hesaplanır ve ilk deneme değeri olarak dikkate alınır $t=0$ anı için şekil değiştirme denklem (4.36) gibi yazılır. Kafes sistemdeki bütün çubuklar için bu şekilde hesap yapılırsa; rijitlik matrisi ve bu deneme matrisine karşılık gelen çubuk kuvvetleri elde edilir.

$$\varepsilon(t) = \sigma_j^1(0)A_0(\sigma_j^1(0)) \quad (4.36)$$

Burada; $\varepsilon(t)$ zamana bağlı şekil değiştirmeyi, $\sigma_j^1(0)$ ilk gerilme deneme değerlerini, $A_0(\sigma_j^1(0))$ malzemenin ilk gerilme deneme değerleri için mekanik

özelliklerini gösterir. İterasyonun sonunda hesaplanan çubuk gerilmeleri $\sigma_j^*(0)$ olursa, elde edilen bu yeni gerilmeler ihmal edilebilecek küçük bir hata içerisinde $\sigma_j^1(0)$ 'a eşit olmadığı taktirde, $\sigma_j^*(0)$ değerleri $\sigma_j^2(0)$ olarak kullanılır ve bu yeni değere göre işlem tekrarlanır. İhmal edilebilecek kadar küçük bir hata içinde $\sigma_j^m(0)$ değerleri $\sigma_j^*(0)$ değerlerine eşit oluncaya kadar iterasyon tekrarlanır ve eşitlik bütün çubuklar için sağlandığı anda sistemin $t=0$ zamanındaki gerçek çubuk gerilmeleri elde edilmiş olur.

Herhangi bir $t=\Delta t$ anı için şekil değiştirme ifadesi denklem (4.23)'e benzer olarak denklem (4.37) ile yazılmıştır. Yeni bir gerilme $\sigma_j(\Delta t)$ değeri için yeni deneme değerleri kabul edilir. Gerçek $\sigma_j(0)$ değerleri, $\sigma_j^r(\Delta t)$ j. çubuk eleman için r. deneme değerleri alınır ve iterasyona başlangıç yapılır. Burada; şekil değiştirme değerinin nümerik olarak hesaplanması için, denklem (4.37)'de bulunan integral ifadesi trapez kuralına göre açılmış ve şekil değiştirme ifadesi denklem (4.38) ile yazılmıştır.

$$\varepsilon(\Delta t) = \sigma_j(\Delta t) A_0(\sigma_j(\Delta t)) - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^{\Delta t} \sigma_j(\tau) A_i(\sigma_j(\tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(\Delta t - \tau) d\tau \quad (4.37)$$

$$\varepsilon(\Delta t) = \left\{ \sigma_j^r(\Delta t) A_0(\sigma_j^r(\Delta t)) - \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sigma_j(0) A_i(\sigma_j(0)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(\Delta t - \tau) \right]_{\tau=0} + \sigma_j^r(\Delta t) A_i(\sigma_j^r(\Delta t)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(\Delta t - \tau) \right\}_{\tau=\Delta t} \quad (4.38)$$

Bu denklemlerde; Δt herhangi bir zaman adımını, $\varepsilon(\Delta t)$ şekil değiştirme fonksiyonunu, $\sigma_j(0)$ ilk gerilme değerlerini, $\sigma_j^r(\Delta t)$ Δt zaman adımı için r. gerilme deneme değerlerini, A_0 ile A_i malzemenin incelenen gerilme durumu için mekanik özelliklerini, f_i incelenen zaman adımı için sünme fonksiyonunu gösterir.

Denklem (4.38)'de Δt anında bilinmeyen çubuk gerilmesi $\sigma_j^r(\Delta t)$ 'dir. $\sigma_j(0)$ değerleri daha önce hesaplanmış olup denklem (4.38) ifadesine yerleştirilen $\sigma_j(0)$

değerleri çubuk gerilmelerinin $t=0$ anındaki gerçek değerleridir ve bundan sonraki iterasyonlarda bu değerler değişmemektedir. Denklem (4.38) kullanılarak rijitlik matrisi kurulup, ara işlemler uygulandığında $\sigma_j^*(t)$ deneme değerleri elde edilir. $\sigma_j^*(t)$ deneme değerleri teorik olarak $\sigma_j^m(\Delta t)$ gerçek gerilme değerlerine eşit olmadığı sürece iterasyon devam eder ve eşitlik sağlandığı anda da gerçek $\sigma_j(\Delta t)$ değerleri hesaplanmış olur. İfade genel şekilde $t=r\Delta t$ için denklem (4.39) ile yazılır.

$$\begin{aligned} \varepsilon(r\Delta t) = & \sigma_j^r(r\Delta t)A_0(\sigma_j^r(r\Delta t)) - \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sigma_j(0)A_i(\sigma_j(0)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(r\Delta t - \tau) \right]_{\tau=0} + \\ & 2 \sum_{g=1}^{r-1} \sigma_j(g\Delta t)A_i(\sigma_j(g\Delta t)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(r\Delta t - \tau) \Big|_{\tau=g\Delta t} + \sigma_j^r(r\Delta t)A_i(\sigma_j^r(r\Delta t)) \frac{\partial}{\partial \tau} f_i(r\Delta t - \tau) \Big|_{\tau=r\Delta t} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Burada; deneme değerleri sadece $\sigma_j^r(r\Delta t)$ değerleri olup, $\sigma_j(g\Delta t)$ ($g=0,1,2, \dots, r-1$) değerleri daha önce hesaplanmış olan gerilme değerleridir. $r\Delta t$ anındaki iterasyon sırasında bu değerler değişmez. A_0 ile A_i malzemenin incelenen gerilme durumu için mekanik özelliklerini, f_i incelenen zaman adımı için sünme fonksiyonunu, $\varepsilon(r\Delta t)$ ise $r\Delta t$ anı için şekil değiştirme fonksiyonunu gösterir. Bu şekilde hiperstatik bir kafes sistemdeki çubuk kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi ve aynı zamanda düğüm noktalarının zamana bağlı yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır.

4.7 Gerilme – Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisi ile Basit Eğilme Davranışının İncelenmesi

Bu bölümde; doğrusal olmayan viskoelastik malzemeli çubuk sistemler için basit eğilmeye davranışı incelenmiştir. Sabit şekil değiştirme durumu için gerilmenin zamana bağlı değişimi yumuşama olarak tanımlanır. Yumuşama davranışı denklem (4.8)'e benzer olarak denklem (4.45) ile tanımlanmıştır (Kaya, 1973; Kural, 1977).

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left\{ B_0(\varepsilon_0) + \sum_{i=1}^n B_i(\varepsilon_0) g_i(t) \right\} \quad (4.45)$$

Burada; $\sigma(t)$ zamana bağlı gerilme fonksiyonunu, $B_i(\varepsilon)$ fonksiyonları malzemenin deformasyonunun mertebesine bağlı mekanik özelliklerini, $g_i(t)$ ise yumuşama davranışı için seçilen zaman bağlı fonksiyonları gösterir. Malzemenin deformasyonunun mertebesine bağlı olarak mekanik özelliklerini gösteren $B_i(\varepsilon)$ fonksiyonları denklem (4.46), yumuşama davranışını için seçilen zamana bağlı $g_i(t)$ fonksiyonları ise $g_0(t)=1$ olmak üzere denklem (4.46) ile tanımlanmıştır (Kaya, 1973; Kural, 1977).

$$B_i(\varepsilon) = k_i |\varepsilon|^{p_i-1} \quad (4.46)$$

$$g_i(t) = e^{-t/\lambda_i} \quad (4.47)$$

Burada; t zaman, k_i , p_i ile λ_i malzeme katsayısı, ε şekil değiştirmedir. Değişken şekil değiştirme durumu için ise denklem (4.23)'e benzer olarak denklem (4.48) yazılır (Kaya, 1973; Kural, 1977).

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \left\{ B_0(\varepsilon(t)) + \sum_{i=1}^n B_i(\varepsilon(t)) \right\} - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t \varepsilon(\tau) B_i(\varepsilon(\tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t-\tau) d\tau \quad (4.48)$$

Denklem (4.48) için özel durum olarak $g_i(t)=1$ ve $B_i(\varepsilon)=\beta_i$ =sabit olarak ifadeye yerleştirilirse Hooke kanunu denklem (4.49) ile elde edilir. Denklem (4.48)'de β_i doğrusal viskoelastik malzemenin deformasyonunun mertebesine bağlı mekanik özellikleri olarak $B_i(\varepsilon)=\beta_i$ =sabit, $\psi(0)=\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i$ ve $\psi(t)=\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i g_i(t)$ dikkate alınırsa denklem (4.50) ile Boltzmann süperpozisyon prensibi elde edilir.

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \left\{ B_0 + \sum_{i=1}^n B_i \right\} = E \varepsilon(t) \quad (4.49)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \psi(0) - \int_{0^+}^t \varepsilon(\tau) \sum_{i=1}^n \beta_i \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t-\tau) d\tau \quad (4.50)$$

Herhangi bir kesitteki moment değeri sabit olması durumunda dahi doğrusal olmayan viskoelastik malzemede gerilme dağılımı zamana bağlı değişir. Bu durumu incelemek için denklem (4.48) ile sunulmuş yaklaşım uygulanır. Doğrusal elastik problemlerde basit eğilmenin incelenmesi için tanımlanan şartlardan Bernoulli – Navier hipotezi viskoelastik problemler için de geçerli olup şekil değiştirme ile eğrilik arasında denklem (4.51) ve denge şartından denklem (4.52) yazılmıştır.

$$\varepsilon(t) = -z \frac{\partial^2 \Omega(t)}{\partial x^2} = -z \Omega_x(t) \quad (4.51)$$

$$M = \int_A \sigma(t) z \, dA \quad (4.52)$$

Burada; $\varepsilon(t)$ zamana bağlı şekil değiştirme, $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik, z incelenen lifin tarafsız eksene mesafesi, M eğilme momenti, $\sigma(t)$ zamana bağlı gerilmedir. Denklem (4.51), denklem (4.48)'de yazılır ise denklem (4.53) elde edilir. Denklem (4.53) ifadesi denklem (4.52)'de yerine konursa moment – eğrilik için denklem (4.54) elde edilir.

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & (-z \Omega_x(t)) \left\{ B_0(-z \Omega_x(t)) + \sum_{i=1}^n B_i(-z \Omega_x(t)) \right\} \\ & - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t (-z \Omega_x(\tau)) B_i(-z \Omega_x(t)) \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} M = & \int_A \left[(-z \Omega_x(t)) \left\{ B_0(-z \Omega_x(t)) + \sum_{i=1}^n B_i(-z \Omega_x(t)) \right\} \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t (-z \Omega_x(\tau)) B_i(-z \Omega_x(t)) \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t - \tau) d\tau \right] z \, dA \end{aligned} \quad (4.54)$$

Bu denklemlerde; $\sigma(t)$ zamana bağlı gerilme fonksiyonunu, B_i fonksiyonları malzemenin deformasyonunun mertebesine bağlı mekanik özelliklerini, $g_i(t)$ yumuşama davranışı için seçilen zaman bağlı fonksiyonları, $\Omega_x(t)$ zamana bağlı

eğrilik değerini, z incelenen lifin tarafsız eksene mesafesini göstermektedir. Denklem (4.54)'de denklem (4.46) ile verilen fonksiyonlar yazılırsa denklem (4.55) elde edilir. Buradan; denklem (4.55) düzenlenirse denklem (4.56) elde edilir.

$$M = \int_A \left[(-z\Omega_x(t)) \left\{ E - k_0 | -z\Omega_x(t) |^{p_0-1} + \sum_{i=1}^n k_i | -z\Omega_x(t) |^{p_i-1} \right\} - \sum_{i=1}^n \frac{k_i e^{-t/\lambda_i}}{\lambda_i} \int_{0^+}^t (-z\Omega_x(\tau)) | -z\Omega_x(\tau) |^{p_i-1} e^{\tau/\lambda_i} \right] z dA \quad (4.55)$$

$$M = -E \Omega_x(t) \int_A z^2 dA - k_0 \int_A | -z\Omega_x(t) |^{p_0-1} z dA + \sum_{i=1}^n k_i \int_A | -z\Omega_x(t) |^{p_i-1} z dA - \sum_{i=1}^n \frac{k_i e^{-t/\lambda_i}}{\lambda_i} \int_{0^+}^t \left[\int_A | -z\Omega_x(\tau) |^{p_i-1} z dA \right] e^{\tau/\lambda_i} d\tau \quad (4.56)$$

Burada; t zaman, k_i , p_i ile λ_i malzeme katsayılarını, M eğilme momenti, $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik değerini, E elastisite modülünü, z incelenen lifin tarafsız eksene mesafesini gösterir. Denklem (4.56) ifadesindeki integraller dikdörtgen bir kesit için denklem (4.57) ve denklem (4.58) ile hesaplanmıştır.

$$\int_A z^2 dA = b \int_{-d/2}^{d/2} z^2 dz = \frac{b d^3}{12} = I_0 \quad (4.57)$$

$$\int_A | -z\Omega_x(t) |^{p_i-1} z dA \quad (4.58)$$

Bu ifadelerde; $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik değeri, b dikdörtgen kesitin genişliği, d dikdörtgen kesitin yüksekliği, p_i malzeme katsayısı, I_0 dikdörtgen kesitin atalet momentidir. Denklem (4.58) için ara işlemler ile değişken dönüşümü için $-z\Omega_{xx}(t)=X$ ve $-\Omega_{xx}(t)dz=dX$ dikkate alınarak denklem (4.59) yazılmıştır. Denklem (4.59)'da değişkenler yerlerine yazılmış ve denklem (4.60) elde edilmiştir.

$$\frac{-b}{\Omega_x^2(t)} \int_{-d/2}^{d/2} (X)^2 |X|^{p_i-1} dX = \frac{-b}{\Omega_x^2(t)} \frac{|X|^{p_i+2}}{p_i+2} \operatorname{sgn}(X) \quad (4.59)$$

$$\frac{-b}{\Omega_x^2(t)} \frac{|-z \Omega_x(t)|^{p_i+2}}{p_i+2} \operatorname{sgn}(-z \Omega_x(t)) \Big|_{-d/2}^{d/2} \quad (4.60)$$

Denklem (4.60) pozitif ve negatif Ω_x değerleri için hesaplanmış ve her iki durum için denklem (4.61) elde edilmiştir. Denklem (4.61) için $I_{p_i} = \frac{2b}{p_i+2} \left(\frac{d}{2}\right)^{p_i+2}$ olarak tanımlanmış ve denklem (4.58) dikkate alınarak denklem (4.62) bulunmuştur.

$$- \Omega_x(t) \frac{2b}{p_i+2} \left(\frac{d}{2}\right)^{p_i+2} |\Omega_x(t)|^{p_i-1} \quad (4.61)$$

$$\int_A -z \Omega_x(t) |-z \Omega_x(t)|^{p_i-1} z dA = -\Omega_x(t) |-z \Omega_x(t)|^{p_i-1} I_{p_i} \quad (4.62)$$

Burada; $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik değerini, b dikdörtgen kesitin genişliğini, d dikdörtgen kesitin yüksekliğini, p_i malzeme katsayısını gösterir. Denklem (4.62) denklem (4.56) ifadesinde yerine yazılmış ve denklem (4.63) elde edilmiştir. Denklem (4.63), eğrilik hesabı için denklem (4.64) formunda yazılmıştır.

$$M = -EI_0 \Omega_x(t) + k_0 \Omega_x(t) |\Omega_x(t)|^{p_0-1} I_{p_0} - \Omega_x(t) \sum_{i=1}^n k_i |\Omega_x(t)|^{p_i-1} I_{p_i} + \sum_{i=1}^n \frac{k_i e^{-t/\lambda_i}}{\lambda_i} I_{p_i} \int_{0^+}^t \Omega_x(\tau) |\Omega_x(\tau)|^{p_i-1} e^{\tau/\lambda_i} d\tau \quad (4.63)$$

$$\Omega_x(t) = -M \Big/ \left[EI_0 - k_0 |\Omega_x(t)|^{p_0-1} I_{p_0} + \sum_{i=1}^n k_i |\Omega_x(t)|^{p_i-1} I_{p_i} - \frac{1}{\Omega_x(t)} \sum_{i=1}^n \frac{k_i e^{-t/\lambda_i}}{\lambda_i} I_{p_i} \int_{0^+}^t \Omega_x(\tau) |\Omega_x(\tau)|^{p_i-1} e^{\tau/\lambda_i} d\tau \right] \quad (4.64)$$

Burada; $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik değeri, M eğilme momenti, t zaman, k_i , p_i ile λ_i malzeme katsayıları, E elastisite modülü, I_0 dikdörtgen kesitin atalet momenti, I_{p_i} kesit özelliklerine bağlı sabit değerdir. Kesitteki moment değeri, kesit boyutları ve malzemenin karakteristik katsayıları biliniyor ise; denklem (4.64) kullanılarak ve kafes sistemler için verilmiş olan iterasyon yaklaşımından faydalanılarak $\Omega_x(t)$ değeri istenilen herhangi bir duyarlılık için hesaplanır. $\Omega_x(t)$ ifadesi denklem (4.51)'de yazılırsa kesitteki şekil değiştirme dağılımının zamana bağlı değişimi bulunur. Gerilme değerlerinin hesabı için ise denklem (4.53) kullanılarak denklem (4.65) hesaplanır ve şekil değiştirme değerleri için gerilme değerleri elde edilir.

$$\sigma(z, t) = -z\Omega_x(t) \left[EI_0 - k_0 \left| -z\Omega_x(t) \right|^{p_0-1} + \sum_{i=1}^n k_i \left| -z\Omega_x(t) \right|^{p_i-1} \right] - \sum_{i=1}^n \frac{k_i e^{-t/\lambda_i}}{\lambda_i} \int_{0^+}^t \left| -z\Omega_x(\tau) \right|^{p_i-1} e^{\tau/\lambda_i} d\tau \quad (4.65)$$

Bu şekilde; denklem (4.64), denklem (4.51) ve denklem (4.65) kullanılarak basit eğilme etkisindeki bir çubuk elemanın herhangi bir kesitindeki şekil değiştirme ve gerilme değerlerinin zamana bağlı değişimi hesaplanmıştır.

Stasyonör durum için basit eğilme tekrar incelenecek olursa; denklem (4.48) ile verilen şekil değiştirme için denklem (4.66)'nın dikkate alınmasıyla denklem (4.52) ifadesi denklem (4.67) şeklinde yazılır.

$$B_i(\varepsilon) = \beta_i |\varepsilon|^{u-1} \quad (4.66)$$

$$M = \int_A \left[-z\Omega_{xx}(t) \left| -z\Omega_{xx}(t) \right|^{u-1} \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \right) - \sum_{i=1}^n \beta_i \int_0^t \left| -z\Omega_{xx}(\tau) \right|^{u-1} \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t-\tau) d\tau \right] z dA \quad (4.67)$$

Burada; $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik değeri, M eğilme momenti, t zaman, u şekil değiştirme için malzeme katsayısı, β_i fonksiyonları doğrusal viskoelastik malzemenin

mekanik özellikleri, z incelenen lifin tarafsız eksene mesafesi, $g_i(t)$ yumuşama davranışı için seçilen zaman bağlı fonksiyondur. Denklem (4.58) kullanılarak denklem (4.68) yazılabilir. Denklem (4.68)'in her iki tarafı $-z|-z|^{u-1}$ ile çarpılır ve ara işlemler yapılırsa denklem (4.69) hesaplanır. Denklem (4.69)'un düzenlenmesi ile denklem (4.70) elde edilir.

$$M = -I_0 \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \right) \Omega_x(t) |\Omega_x(t)|^{u-1} + I_0 \sum_{i=1}^n \beta_i \int_0^t \Omega_x(\tau) |\Omega_x(\tau)|^{u-1} \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t-\tau) d\tau \quad (4.68)$$

$$\begin{aligned} M(-z) |-z|^{u-1} &= -I_0 \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \right) (-z \Omega_x(t)) |-z \Omega_x(t)|^{u-1} \\ &+ I_0 \sum_{i=1}^n \beta_i \int_0^t (-z \Omega_x(\tau)) |-z \Omega_x(\tau)|^{u-1} \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4.69)$$

$$M(-z) |-z|^{u-1} = -I_0 \left\{ \varepsilon(t) \left[B_0(\varepsilon(t)) + \sum_{i=1}^n B_i(\varepsilon(t)) \right] - \sum_{i=1}^n \int_{0^+}^t \varepsilon(\tau) B_i(\varepsilon(\tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} g_i(t-\tau) d\tau \right\} \quad (4.70)$$

Burada; $\Omega_x(t)$ zamana bağlı eğrilik değeri, M eğilme momenti, t zaman, u şekil değiştirme için malzeme katsayısı, β_i fonksiyonları doğrusal viskoelastik malzemenin mekanik özellikleri, I_0 dikdörtgen kesitin atalet momenti, z incelenen lifin tarafsız eksene mesafesini, $g_i(t)$ zaman bağlı yumuşama davranışı fonksiyonudur. Denklem (4.47) ile verilen gerilme denklem (4.70)'de yerine yazılırsa denklem (4.71) elde edilir. Stasyoner viskoelastik durum için gerilme denklem (4.72) ile elde edilmiştir.

$$M(-z) |-z|^{u-1} = -I_0 \sigma(z, t) \quad (4.71)$$

$$\sigma(z, t) = M(z) |z|^{u-1} / I_0 = \sigma(z) \quad (4.72)$$

Basit eğilme etkisi altındaki bir kirişin herhangi bir kesitindeki moment değeri sabit olduğu sürece stasyoner sünme durumunda kesitteki gerilme değerleri denklem (4.72) ile görüldüğü gibi zamana bağlı olarak değişmez ve sabit kalır.

4.8 Gerilme – Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi ile Çerçeve Sistemlerin İncelenmesi

Doğrusal olmayan viskoelastik çerçeve sistemlerin hesabında kafes sistemler için uygulanan çözüm yöntemine benzer olarak redör katsayıları hesaplanabilir. Çerçeve sistemler için zamana bağlı viskoelastik davranışın incelenmesinde ilk olarak moment eğrilik ilişkisi hesaplanmıştır.

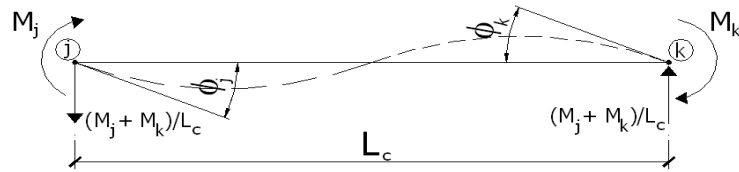
Viskoelastik malzemeli bir çubuğun uzunluğu L_c olup $0 \leq x \leq L_c$ aralığındaki herhangi bir kesitteki moment değeri bilindiği zaman eğrilik değeri denklem (4.64) ile hesaplanır. Buna göre; $t=0$ anı için herhangi bir kesitteki eğrilik değeri denklem (4.73) ile yazılmıştır.

$$\Omega_x(x,0) = -M / \left\{ EI_0 - k_0 |\Omega_x(t)|^{p_0-1} I_{p_0} + \sum_{i=1}^n k_i |\Omega_x(t)|^{p_i-1} I_{p_i} \right\} \quad (4.73)$$

Burada; t zaman, $\Omega_x(x,0)$ $t=0$ anı için eğrilik değeri, M eğilme momenti, k_i , malzeme katsayıları, E elastisite modülü, I_0 atalet momenti, I_{p_i} kesit özelliklerine bağlı değerdir. Denklem (4.73) ifadesini iterasyonla çözmek için denklemin sağ tarafına $\Omega_x^1(x,0)$ deneme değeri konur. Eğer bu deneme değeri ilk adımda sıfır olarak alınırsa $\Omega_x^x(x,0)$ ile doğrusal elastik çözüm elde edilmiş olur. $\Omega_x^2(x,0)$ olarak $\Omega_x^x(x,0)$ değerini ikinci deneme değeri olarak alınırsa yeni bir $\Omega_x^x(x,0)$ değeri hesaplanır. Bu işlem m defa tekrarlanıp verilen bir hassasiyet içerisinde $\Omega_x^m(x,0)$ ile $\Omega_x^x(x,0)$ değerinin eşit olması sağlanmalıdır. İşlemin sonucunda $\Omega_x^x(x,0)$ gerçek değeri elde edilmiş olur. Eğer bu işlem gerekli tüm kesitler $x=0, 1, 2, \dots, k\Delta x$ için tekrarlanırsa sonuç olarak bütün x değerleri için eğrilik $\Omega_x^x(x,0)$ hesaplanmış olur. Denklem (4.64) trapez kuralı ile açılmış ve eğrilik ifadesi en genel haliyle denklem (4.74) ile yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
\Omega_x^x(k\Delta x, r\Delta t) = & -M(x, t) / \left\{ EI_0 - k_0 \left| \Omega_x^m(k\Delta x, r\Delta t) \right|^{p_0-1} I_{p_0} + \right. \\
& \sum_{i=1}^n k_i \left| \Omega_x^m(k\Delta x, r\Delta t) \right|^{p_i-1} I_{p_i} - \\
& 1/\Omega_x^m(k\Delta x, r\Delta t) \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\lambda_i} e^{-r\Delta t/\lambda_i} I_{p_i} \frac{\Delta T}{2} \left[\Omega_x(k\Delta x, 0) \left| \Omega_x(k\Delta x, 0) \right|^{p_i-1} + \right. \\
& 2 \sum_{j=1}^{s-1} \Omega_x(k\Delta x, j\Delta t) \left| \Omega_x(k\Delta x, j\Delta t) \right|^{p_i-1} e^{j\Delta t/\lambda_i} + \\
& \left. \left. \Omega_x^m(k\Delta x, r\Delta t) \left| \Omega_x^m(k\Delta x, r\Delta t) \right|^{p_i-1} e^{r\Delta t/\lambda_i} \right] \right\} \quad (4.74)
\end{aligned}$$

Denklem (4.74)'de; m iterasyon sayısını, k kesit numarasını, r zaman aralığı sayısını, Δx ile Δt konum ve zaman değişkeni değişimini belirtir. Bir üst indeksi bulunmayan Ω_x değerleri daha önce hesaplanmış olan gerçek değerler olup, bunlar iterasyon boyunca değişmeyen değerlerdir. Bir üst indeksi bulunan Ω_x^m değerleri denemekte olan Ω_x değerlerini, Ω_x^x değerleri de bu denemenin sonunda elde edilen yeni eğrilik değerini verir. Bu işlem sonucunda, verilen moment değerlerine karşılık gelen eğrilik değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.3 ile verilen bir çubuk elemanın iki ucundaki dönme değerlerinin hesaplaması için çubuk elemanın herhangi bir kesitindeki $M(x, t)$ değeri denklem (4.75) ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Çubuk eleman.

$$M(x, t) = M_j(t) - \frac{M_j(t) + M_k(t)}{L_c} x \quad (4.75)$$

Burada; $M_j(t)$ ile $M_k(t)$ çubuğun j. ve k. ucundaki zamana bağlı moment, L_c çubuk eleman boyu, x konum değişkeni, $M(x, t)$ x konumu ve t zamanına bağlı moment değeridir. Sistemde yayılı bir p yükü bulunması durumunda ise; yalnız $M(x, t)$ değerinin denklem (4.76) şeklinde yazılarak dikkate alınması yeterlidir.

$$M(x, t) = M_j(t) - \frac{M_j(t) + M_k(t)}{L_c} x + \frac{pL_c}{2} x - \frac{px^2}{2} \quad (4.76)$$

Virtüel iş ifadesi denklem (4.77) ile yazılmıştır.

$$1 \times \phi_j(t) = \int_V \varepsilon \sigma_v dV \quad (4.77)$$

Burada; $\phi_j(t)$ çubuğun j ucundaki zamana bağlı dönme, ε şekil değiştirme, σ_v virtüel sistem için gerilme, V hacimdir. Şekil değiştirme ile eğrilik ilişkisi için denklem (4.51) kullanılmıştır. Denklem (4.51) ile denklem (4.65), denklem (4.77)'de yerine yazılmış ve denklem (4.78) elde edilmiştir.

$$1 \times \phi_j(t) = \int_{0^+}^{L_c} -\Omega_x(x, t) \left\{ \int_A z \left\{ -z \Omega_x(x, t) \left[E - k_0 \left| -z \Omega_x(x, t) \right|^{p_0-1} + \sum_{i=1}^n k_i \left| -z \Omega_x(x, t) \right|^{p_i-1} \right] - \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\lambda_i} e^{-t/\lambda_i} \int_{0^+}^t -z \Omega_x(x, \tau) \left| -z \Omega_x(x, \tau) \right|^{p_i-1} e^{\tau/\lambda_i} d\tau \right\} dA \right\} dx \quad (4.78)$$

Burada; $\Omega_x(x, t)$ konuma ve zamana bağlı eğrilik değeri, $\phi_j(t)$ çubuğun j. ucundaki zamana bağlı dönme, L_c çubuk elemanın boyu, x konum değişkeni, t zaman, z incelenen lifin tarafsız eksene mesafesi, k_i , p_i ile λ_i malzeme katsayıları, E elastisite modülüdür. Denklem (4.78) içerisinde yer alan integral ile denklem (4.55) ifadesi aynıdır. Bu durumda, denklemin bu kısmı $m_v(x)$ virtüel sistemin herhangi bir kesitindeki momenti olarak dikkate alınmış ve denklem (4.78) ifadesi denklem (4.79) şeklinde yazılmıştır.

$$1 \times \phi_j(t) = - \int_{0^+}^{L_c} \Omega_x(x, t) m_v(x) dx \quad (4.79)$$

Virtüel sistemde herhangi bir kesit için moment $m_v(x) = 1 - x/L_c$ olup denklem (4.79) yeniden denklem (4.80) olarak yazılmıştır. Çubuk elemanın j ile gösterilen sol

ucundaki dönmeye benzer olarak çubuk elemanın k ile gösterilen sağ ucu için de dönme ifadesi denklem (4.81) ile hesaplanmıştır.

$$\phi_j(t) = - \int_{0^+}^{L_c} \left(1 - \frac{x}{L_c}\right) \Omega_x(x, t) dx \quad (4.80)$$

$$\phi_k(t) = \int_{0^+}^{L_c} \frac{x}{L_c} \Omega_x(x, t) dx \quad (4.81)$$

Burada; $\Omega_x(x,t)$ konuma ve zamana bağlı eğrilik değeri, x konum değişkeni, L_c çubuk eleman boyu, $\phi_j(t)$ ile $\phi_k(t)$ çubuğun j. ve k. ucundaki zamana bağlı dönmelerdir. Eğer bir çubuğun uçlarındaki moment ve üzerindeki yük biliniyor ise denklem (4.74) ile verilen iterasyon kullanılarak $\Omega_x(x,t)$ elde edilir. Bu eğrilik ifadesi denklem (4.80) ve denklem (4.81)'de yazılırsa çubuk elemanın uç dönmeleri hesaplanır. Denklem (4.80) ve denklem (4.81)'e benzer olarak çubuk j ve k uç dönmeleri Δ kadar bir ötelemeyi de dikkate alarak denklem (4.82) ve denklem (4.83) gibi yazılmıştır.

$$\theta_j(t) - \frac{\Delta}{L_c} = - \int_{0^+}^{L_c} \left(1 - \frac{x}{L_c}\right) \Omega_x(x, t) dx \quad (4.82)$$

$$\theta_k(t) - \frac{\Delta}{L_c} = \int_{0^+}^{L_c} \frac{x}{L_c} \Omega_x(x, t) dx \quad (4.83)$$

Viskoelastik çubuk, eşdeğer doğrusal elastik çubuk şeklinde yazılmış ve eşdeğer çubuğun rijitlik katsayıları denklem (4.84) ve denklem (4.85) ile gösterilmiştir.

$$M_j = s_{11} \left(\theta_j(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) + s_{12} \left(\theta_k(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) \quad (4.84)$$

$$M_k = s_{21} \left(\theta_j(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) + s_{22} \left(\theta_k(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) \quad (4.85)$$

Gerçek sistemde çubuğun sabit kesitli olduğu kabul edilmiş ve M_j ile M_k yer değiştirildiğinde k. uçtaki dönme ϕ_k , j. uçtaki dönme ϕ_j elde edilmiştir. Bu durum eşdeğer elastik çubuğunda simetrik olmasını gerektirir. Buradan; $s_{11}=s_{22}=s_1$ ve $s_{12}=s_{21}=s_2$ alınarak denklem (4.84) ve denklem (4.85) ifadeleri denklem (4.86) ve denklem (4.87) şeklinde yazılmıştır.

$$M_j = s_1 \left(\theta_j(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) + s_2 \left(\theta_k(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) \quad (4.86)$$

$$M_k = s_2 \left(\theta_j(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) + s_1 \left(\theta_k(t) - \frac{\Delta}{L_c} \right) \quad (4.87)$$

Burada; M_j ile M_k çubuğun j. ve k. ucundaki moment, Δ çubuk uçları arasındaki ötelenme, L_c çubuk eleman boyu, $\theta_j(t)$ ile $\theta_k(t)$ lokal eksenlerde çubuğun j. ve k. ucundaki zamana bağlı dönmesi, s_1 ile s_2 eşdeğer çubuğun rijitlik katsayılarıdır. s_1 ve s_2 katsayıları çubuk uçlarındaki momentlere bağlı olur ve farklı uç momentleri için farklı değerler alır. Bu deformasyon yaklaşımı yeni sisteme uygulanacak olursa işlemin sonunda elde edilecek olan M_i değerinin başlangıçta bilindiği kabul edilen çubuk uç momentine eşit olması gerekir. Ancak, işlemin başında denklem (4.74) uygulanırken gerçek moment değeri bilinmediğinden işlemin başlatılabilmesi için M_i^1 deneme değerleri kabul edilmiştir. İşlemin sonunda elde edilen M_i^x değerlerinin M_i^1 deneme değerlerine eşit olmadığı görülür ise aynı işlem M_i^2 deneme değeri olarak M_i^x değeri alınarak tekrarlanır ve elde edilen moment değerleri verilen bir tolerans içerisinde M_i^m değerlerine eşit oluncaya kadar işleme devam edilir. Bu işlem sırası ile $t=0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, r\Delta t$ değerleri için tekrarlanır. Bu şekilde; viskoelastik malzemeli hiperstatik sistemdeki iç kuvvetlerin zamana bağlı değişimi ve düğüm noktalarının yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır.

BÖLÜM BEŞ

CTP PROFİL KULLANILAN ÇUBUK SİSTEMLERİN VİSKOELASTİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

5.1 Giriş

Son yıllarda taşıyıcı eleman olarak inşaat sektöründe uygulama alanı bulan CTP profillerin hesap ve boyutlandırma işlemleri için uluslar arası kabul görmüş bir yönetmelik bulunmamaktadır (Bank, 2006). Bu nedenle, CTP profillerden yapılmış taşıyıcı sistemler tüm yönleri ile araştırılmaktadır (Bai ve Keller, 2008; Braestrup, 1999). Bu bölümde; pultrüzyon teknolojisi ile üretilmiş CTP profillerden yapılmış tipik taşıyıcı çubuk sistemler laboratuarda sabit yükler altında deneysel olarak incelenmiş ve deformasyonları ölçülmüştür.

Ülkemizde, CTP profilleri ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin viskoelastik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi hakkında herhangi bir çalışmaya rastlanmamış, yurt dışında ise oldukça sınırlı miktarda çalışmanın mevcut olduğu görülmüştür (Bank, 2006; Mosallam, 1991). Yurt dışında yapılan çalışmalarda; McClure ve Mohammadi (1995), Scott ve Zureick (1998), Jahic (2000), Kang (2001) aksenal kuvvet, Sridharan (1997) ise eğilme etkisi altında zamana bağlı numune deneyleri gerçekleştirmiştir. Holmes ve Rahman (1980), Mottram (1993) üç nokta eğilme, Soliman (1969), Lee, Hollaway, Thorne ve Head (1994) dört nokta eğilme deneyleri ile tek açıklıklı kirişlerin viskoelastik davranışlarını araştırmıştır. CTP profillerin kullanıldığı tam ölçekli viskoelastik çubuk sistem deneyleri için ise; Oplinger, Plumer ve Gandhi (1983) tente taşıyıcı sistemini, Mosallam (1991) tek açıklıklı I kesitli bir düzlem çerçeve sistemi, Alper, Barton ve McCormick (1997) otoyol köprü kirişlerini incelemiştir. Tez çalışmasının literatür bölümünden görüldüğü üzere; mevcut çalışmalar daha çok numune ve tek açıklıklı kiriş deneyleri şeklinde olup CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin tam ölçekli viskoelastik davranışı detaylı bir biçimde araştırılmamıştır. Bu nedenle; çalışmada kullanılan numune deneyleri ve tam ölçekli çubuk sistemler ile yapılan deneylerin literatüre ve ülkemiz bilgi birikimine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Deneysel çalışma; zamana bağlı ve zamana bağlı olmayan davranışı incelemek amacıyla iki bölüme ayrılmıştır. İlk olarak; CTP profillerin mukavemet özelliklerini belirlemek için zamana bağlı olmayan deneyler yapılmıştır. Bu deneyler; eksenel çekme ve üç nokta eğilme deneyleridir. Zamana bağlı davranışın incelenmesi için ise; CTP profiller ile deney sistemleri oluşturulmuş ve viskoelastik davranış araştırılmıştır. Zamana bağlı deneyler; kısa süreli ve uzun süreli olarak incelenmiştir. Çalışmada; zamana bağlı davranışı kısa süreli deney numuneleri ile incelemek amacıyla üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Zamana bağlı davranışı uzun süre ile incelemek için ise; eksenel çekme numune ve tam ölçekli sistem deneyleri yapılmıştır. Tam ölçekli deneyler kısmında; çubuk sistemlerin zamana bağlı viskoelastik davranışlarını incelemek amacıyla CTP profiller kullanılarak; basit kiriş, tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistem modelleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

5.2 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

Deneylerde kullanılan modeller, cam elyaf takviyeli polyester reçineli üretilen CTP profiller kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan CTP profiller Pul-Tech FRP firması tarafından temin edilmiştir. CTP profillerin tümü ülkemizde faaliyet gösteren Pul-Tech FRP firması tarafından imal edilmiştir (Pul-Tech, 2009).

Deney sistemlerinde bulonlu birleşimler kullanılmıştır. Deneylerde, birleşimler uygun M12 bulonları ile yapılmış ve bulonların kalitesi 8.8 (nominal çekme mukavemeti 800 N/mm^2 , %0,2 kalıcı deformasyona karşılık gelen nominal gerilme sınırı 640 N/mm^2 ve kopma uzaması %12 olan malzeme)'dir (Deren, Uzgider ve Piroğlu, 2003). Deney elemanlarında kullanılan birleşim ve mesnet levhaları St-37 çelik malzeme kalitesinde olup 10 mm kalınlığında ve çeşitli boyutlarda imal edilmiştir.

5.3 Deney Düzeni

Çalışmanın deneysel kısmında; ilk olarak CTP profillerin mukavemet özelliklerinin belirlenmesi amacıyla zamana bağlı olmayan eksenel çekme, üç noktadan eğilme numune deneyleri yapılmıştır. CTP profillerin viskoelastik davranışlarının araştırılması amacıyla ise; zamana bağlı numune ve tam ölçekli çubuk sistem deneyleri yapılmıştır. Zamana bağlı numune deneyleri; eksenel çekme ve üç noktadan eğilme deneyleridir. Zamana bağlı tam ölçekli deneyler ise; basit kiriş, tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistem deneyleridir. CTP malzemenin mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla yapılan zamana bağlı olmayan deneyler Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında, CTP profiller kullanılarak oluşturulmuş çubuk sistemlerin viskoelastik davranışın incelenmesi amacıyla yapılan zamana bağlı deneyler ise Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında ekim 2009 ile ocak 2010 arasında gerçekleştirilmiştir.

5.3.1 Yükleme Düzeni

Zamana bağlı viskoelastik davranışın incelendiği deneyler, laboratuvarında yer alan rijit bir döşeme ve yükleme duvarından oluşan deney platformunda gerçekleştirilmiştir. Viskoelastik davranışın incelendiği numune deneyleri, basit kiriş ve tek açıklıklı çerçeve için rijit döşemeden, kafes sistem için ise yükleme duvarından yararlanılmıştır.

Sünme davranışının incelendiği deneylerde sistemdeki gerilme seviyesinin sabit tutulması önem taşır (ASTM D2990 – 01, 2001). Deneysel çalışmalarda, hidrolik yük sistemleri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, sünme deneyleri için gerekli olan sabit gerilme seviyelerinin uzun süreler için hidrolik yükleme sistemleri kullanılarak sağlanması pratik olarak mümkün değildir. Ayrıca, hidrolik yükleme sistemlerinin uzun süreli sünme deneylerinde kullanılması hatalara neden olabilir. Bu nedenle, deneylerde özel yükleme sistemleri geliştirilerek yükün sabit tutulabilmesi amacıyla çeşitli tiplerde özel ağırlıklar kullanılmıştır. Deney sistemleri için sabit yük sağlamak amacıyla kullanılan ağırlıklardan bazıları Şekil 5.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Deney çalışmalarında kullanılan ağırlıklar.

5.3.2 Ölçüm Düzeni

Deneyler sırasında yer değiştirme ölçümleri için elektronik yer değiştirme ölçüm aletleri olarak bilinen LVDT'ler (Linear Variable Differential Transformer) kullanılmıştır. Elektronik yer değiştirme ölçüm aletleri 0,0001 mm'lik yer değiştirme değişimlerini elektronik olarak ölçebilmektedir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında yer değiştirme ölçümlerini düzenli olarak alan, bilgisayarın sabit hafızasına kaydeden ve istenilen yer değiştirme ölçümünün yük değerine karşı grafiğini çizerek deneyin izlenmesini kolaylaştıran bir yazılım bulunmaktadır. Deneyler süresince, yer değiştirme – zaman değişimleri bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir. Her deney sistemi için LVDT ölçüm aletlerinin yerleşim düzeni değişiklik gösterdiğinden, ölçüm aletleri yerleşim düzeni her deney elemanının incelendiği bölüm içerisinde detaylı olarak sunulmuştur.

Deneyler sırasında CTP profillerden ve deney numunelerinden birim deformasyon ölçümleri alınmıştır. Deney programında 120 ohm'luk 10 mm uzunluğunda standart birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerler yerleştirildikleri doğrultudaki mekanik hareketleri elektronik sinyallere dönüştüren deneysel ölçüm aletleridir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Birim deformasyon ölçerler CTP profillerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirildikten sonra özel yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Birim deformasyon

ölçerler deney elemanlarına yapıştırıldıktan sonra ilk olarak dirençleri kontrol edilmiş ve daha sonra veri toplama sistemine bağlanmıştır. CTP profil ve numunelerde gerçekleşen şekil değiştirme değişiklikleri mili volt cinsinden ölçülmüş, denklem (5.1) ile verilen bağıntı kullanılarak birim deformasyona dönüştürülmüştür.

$$V_0 = \frac{-GFx\varepsilon}{4} \times \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{GF \times \varepsilon}{4} \right)} \right) \times V_i \times V_{\text{gain}} \quad (5.1)$$

Burada; V_0 okunan volt değerini, V_i uygulanan gerilimi, GF birim deformasyon faktörünü, V_{gain} kanal kazanç değerini, ε birim deformasyon değerini göstermektedir. Deneylerde, şekil değiştirmeleri tespit etmek amacıyla birim deformasyon ölçerler deney esaslarına göre çeşitli şekillerde uygulanmıştır. Deney elemanları için birim deformasyon ölçerlerin yerleşim düzenleri her deney elemanının incelendiği bölüm içerisinde sunulmuştur. Deneyler süresince, şekil değiştirme – zaman değişimleri bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir.

5.4 Zamana Bağlı Olmayan Deneyler

CTP profiller ile yapı boyutlandırılmadan önce yapı mühendisi malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmalıdır. Bu tür özellikler genellikle üretici firmalar tarafından sağlanır. Ancak, günümüzde CTP profillerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren ulusal ve uluslararası bir yönetmelik bulunmamaktadır (Bank, 2006). Bu nedenle, malzeme özellikleri hakkında tam bilgi sağlanamamakta ve birçok durumda sağlanan malzeme özelliklerinin deney verisi mi yoksa herhangi bir güvenlik katsayısı ile azaltılmış değerler mi olduğu veya firmaya ait olmayan genel bilgilerin mi verildiği bilinmediğinden çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. CTP profillerin özellikleri bağımsız analitik veya deneysel çalışmalarla incelenmeli ve üretici firmaların sunduğu değerler kontrol edilmelidir. Bu çalışmanın deneysel kısmında kullanılan CTP profiller ülkemizde faaliyet gösteren Pul-Tech FRP firmasından temin edilmiştir. Pul-Tech FRP firmasının hazırlamış olduğu katalogdan alınan değerler Tablo 5.1 ile sunulmuştur (Pul-Tech, 2009). Ayrıca,

Pultech FRP firması tarafından Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne yaptırılan çekme numune deneyleri raporuna göre; çekme dayanımı 445 MPa, elastisite modülü 23 GPa ve poisson oranı 0,33 bulunmuştur (Öner, 2009).

Tablo 5.1 CTP profillerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Pul-Tech FRP, 2009).

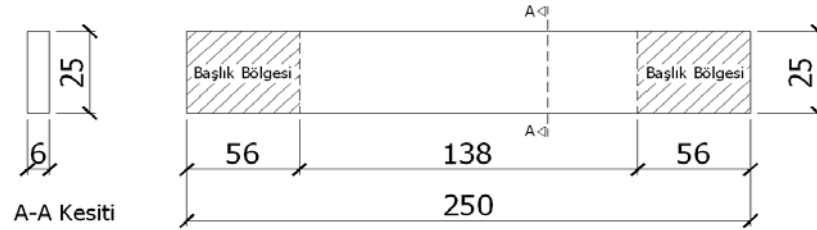
	Deney Yöntemi	Birim	CTP Profil
Yoğunluk	ASTM D792	g/cm ³	1,8
Çekme Dayanımı	EN ISO 527-4	MPa	400
Elastisite Modülü	DIN 53457-87	GPa	25
Yüzey Direnci	ASTM D257	Ω	10^{10} - 10^{15}
Termal Genleşme Katsayısı	ASTM D696	K ⁻¹	11×10^{-6}
Termal İletkenlik	ASTM C177	W/mK	0,28
Su Emilimi	ISO 62	-	% 0,45

Çalışmada, viskoelastik davranışı araştırılan sistemlerin oluşturulduğu CTP profillerle aynı stok ile imalat tarihi bulunan profillerden aksel çekme, üç nokta eğilme numune deneyleri için numuneler hazırlanmış ve malzemenin mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler yapılmıştır.

5.4.1 Zamana Bağlı Olmayan Aksel Çekme Numune Deneyleri

Çalışmada, CTP profillerin viskoelastik özelliklerinin belirlenmesi ve zamana bağlı davranışlarının araştırılmasından önce zamana bağlı olmayan mekanik özelliklerinin incelenmesi önem taşımaktadır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla zamana bağlı olmayan aksel çekme numune deneyleri yapılmıştır. Aksel çekme numune deneyleri ile CTP numunelerin çekme mukavemeti, elastisite modülü ve poisson oranı gibi temel mekanik özellikleri incelenmiştir. CTP profillerin gerilme – şekil değiştirme davranışını belirlemek için yapılan zamana bağlı olmayan deneyler birçok yapı malzemesinin temel özelliklerini belirlemek için kullanılan deney yöntemlerine benzer şekilde uygulanır (ASTM D3039 – 08, 2008).

Eksenel çekme numune deneyleri; ASTM D638 – 08 (2008) ve ASTM D3039 – 08 (2008) standartlarına göre yapılmaktadır. Yoon (1993), yaptığı deneyler sonucu kemik şeklinde deney numunelerinin nihai kapasitelerine ulaşmadan önce çene kısımlarından göçmesinden dolayı, ASTM D638 – 08 (2008) yerine dikdörtgen deney numunelerinin yer aldığı ASTM D3039 – 08 (2008)'in kullanılmasını önermektedir. ASTM D3039 – 08 (2008) standardı, yüksek elastisite modülüne sahip kompozit malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. ASTM D3039 – 08 (2008), sabit dikdörtgen kesitli deney numunesinin çekme makinesinin çeneleri arasına yerleştirildikten sonra yüklenmesi sonucu elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin kaydedilmesi prensibine dayanır. ASTM D3039 – 08 (2008) ile elde edilen veriler; malzeme özelliklerinin belirlenmesinde, araştırma ile geliştirme uygulamalarında ve kalite kontrollerinde kullanılabilir niteliktedir. ASTM D3039 – 08 (2008)'e uygun dikdörtgen şeklindeki numune eleman çizimi Şekil 5.2 ile verilmiştir. Çekme makinesinin çeneleri ile tutulan bölgeler Şekil 5.2'de başlık bölgesi olarak isimlendirilmiştir. Deney numunesinin kesit kalınlığı ise örnek alınan elemana bağlıdır.



Şekil 5.2 ASTM D3039 – 08 (2008) dikdörtgen kesitli deney numunesi.

Deneysel çalışmada; elastisite modülü, poisson oranı ve maksimum çekme gerilmesi gibi malzemenin zamandan bağımsız mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D3039 – 08 (2008) standardına uygun deney numuneleri hazırlanmıştır. Zamana bağlı viskoelastik davranış deneyleri için de bu numuneler ile aynı stok ve imalat tarihi bulunan L profillerden deney numuneleri elde edilmiştir. Wang ve Zureick (1994), çalışmalarında dikdörtgen kesitli numuneleri 13 mm ve 64 mm arasında farklı genişlikler için incelemiş ve ASTM D3039 – 08 (2008) ile verilen 25 mm genişliğin kullanıldığı deneylerden elde edilen sonuçların malzeme davranışını temsil etmekte daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Deneylerde,

ASTM D3039 – 08 (2008) standardına uygun şekilde; boyu 250 mm, genişliği 25 mm ve kalınlığı 6 mm olan deney numuneleri kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla 10 adet aksel çekme deneyi yapılmıştır. Deney numunelerinden bir kısmı şekil 5.3 ile gösterilmiştir.



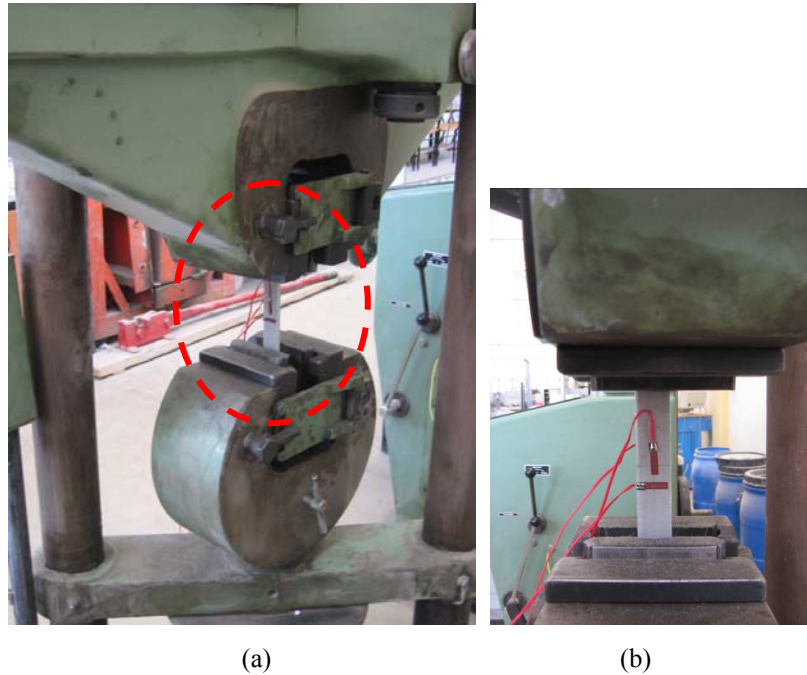
şekil 5.3 Aksel çekme deneyi numuneleri.

Aksel çekme deneyleri, şekil 5.4’de gösterilen 40 ton kapasiteli çekme makinesinde yapılmıştır.



şekil 5.4 Aksel çekme deney makinesi.

Çekme makinesinin bir tarafı sabit diğer tarafı ise hareketli kısımdan oluşmaktadır. Çekme makinesinde, çeneler arasında yerleştirilmiş deney numunelerine ASTM D3039 – 08 (2008) ile önerildiği gibi 2 mm/dak hızla aksel çekme kuvveti uygulanmıştır. Numunenin ön ve arka yüzlerine lif doğrultusuna paralel, ön yüzüne ise lif doğrultusuna dik olacak şekilde şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Şekil değiştirme ölçerler deney numunelerinin her iki yüzüne özel bir yapıştırıcı kullanılarak ayrı ayrı yapıştırılmıştır. ASTM D3039 – 08 (2008)'e göre hazırlanan deney numuneleri çeneler arasında yerleştirilirken herhangi bir eğilme tesirinin oluşmasını engellemek için düşey ve yatay hizalamaya dikkat edilmesi gerekmektedir. Çekme deneyi için düşey ve yatay hizalama öncesi çeneler arasında yerleştirilmiş bir deney numunesi Şekil 5.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Aksel çekme deneyi: (a) Ön görünüş (b) Yan görünüş.

Çekme makinesinin çenelerinin arasında deney numuneleri yerleştirilirken çeneler arasındaki net mesafenin 138 mm olmasına dikkat edilmiştir (ASTM D3039 – 08, 2008). Deneylerde tüm numunelerde herhangi bir akmanın olup olmadığı kontrol etmek için kopma anına kadar çekme yükü uygulanarak maksimum çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Bilgisayar sistemine bağlı elektronik veri kaydedici aracılığı ile saniyede bir okumaya karşılık gelen yük ve birim deformasyon değerleri

deney numunelerindeki şekil değiştirme ölçerlerinden elde edilmiştir. Deney numunelerindeki şekil değiştirme değerlerindeki değişimler şekil değiştirme ölçerler ile mili volt cinsinden ölçülmüş ve birim deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Çekme deneyleri ile elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi dikkate alınarak en küçük kareler yöntemi ile elastisite modülü, enine birim şekil değiştirme ile boyuna birim şekil değiştirme arasındaki oran kullanılarak poisson oranı ve malzemenin çekme gerilmesi de deney sonucundan bulunmuştur.

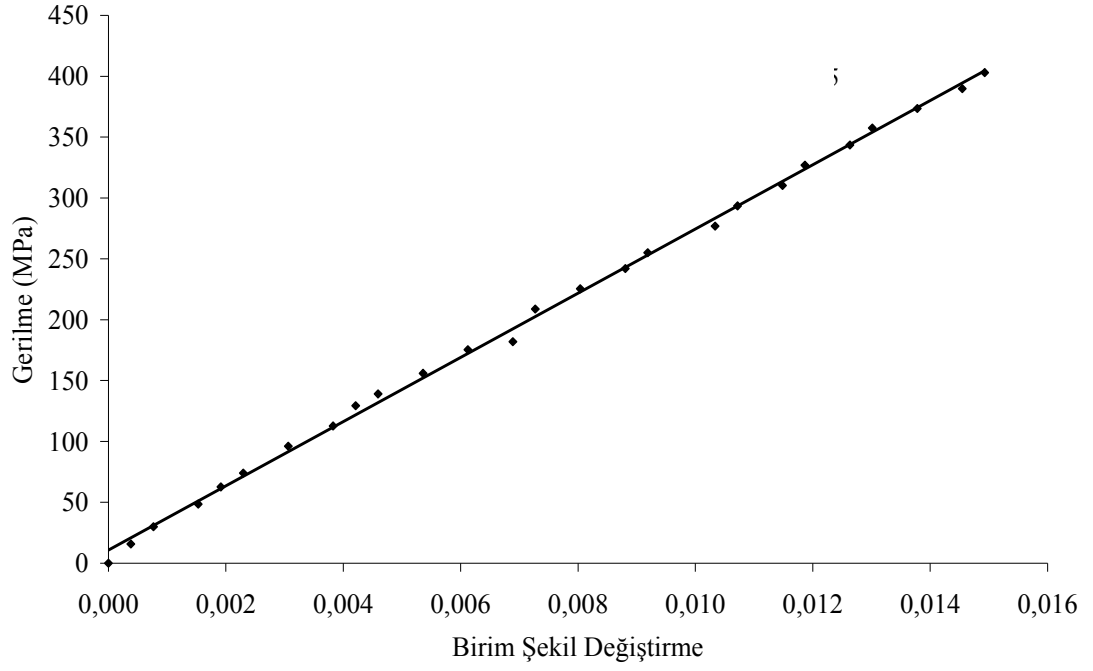
5.4.1.1 Zamana Bağlı Olmayan Eksenel Çekme Numune Deneyleri Sonuçları

Çekme deneyleri ile elde edilen veriler için en küçük kareler yöntemi kullanılarak denklem (5.2) ile elastisite modülü elde edilmiştir (Baradan, 1998). Eksenel çekme deneyi sonuçlarına göre; ortalama elastisite modülü 26369 MPa (26 GPa), ortalama çekme dayanımı 410 MPa ve ortalama poisson oranı 0,31 bulunmuştur.

$$E = \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_k \varepsilon_k - n \bar{\sigma} \bar{\varepsilon}}{\sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2 - n \bar{\varepsilon}^2} \quad (5.2)$$

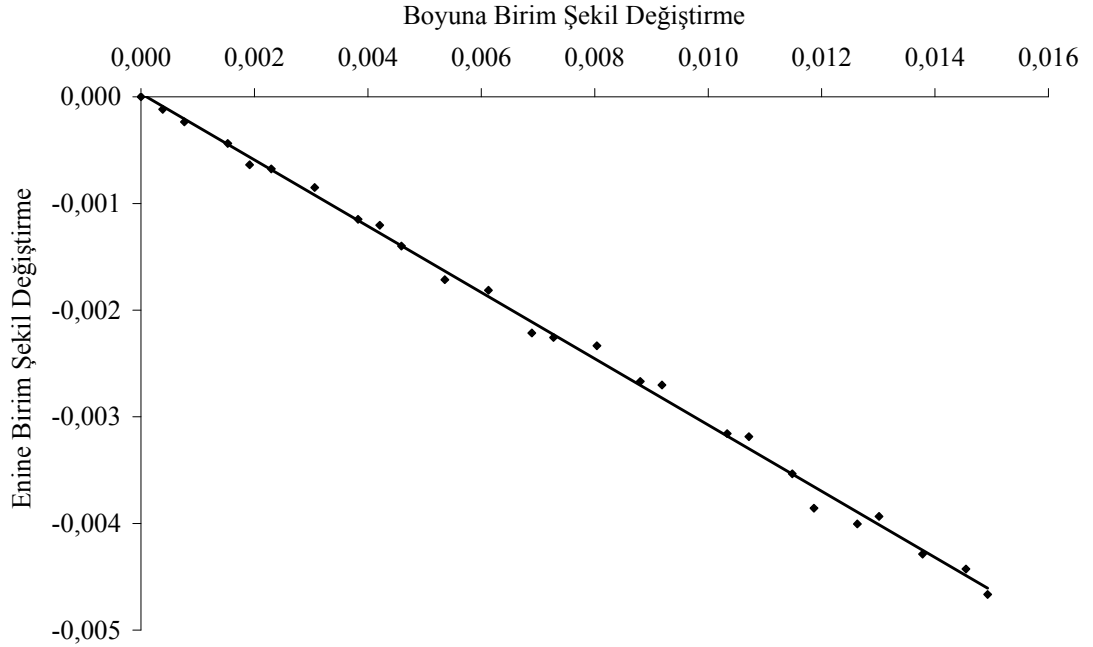
Burada; E elastisite modülünü, σ_k k. noktaya ait gerilme değerini, ε_k k. noktaya ait birim deformasyon değerini, $\bar{\varepsilon}$ ortalama birim deformasyon değerini, $\bar{\sigma}$ ortalama gerilme değerini, n ise incelenen nokta sayısını belirtmektedir.

Numuneler için yapılan eksenel çekme deneyleri sonucunda karakteristiği en iyi temsil eden ve ortalamaya en yakın olan tipik gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.6 ile sunulmuştur.



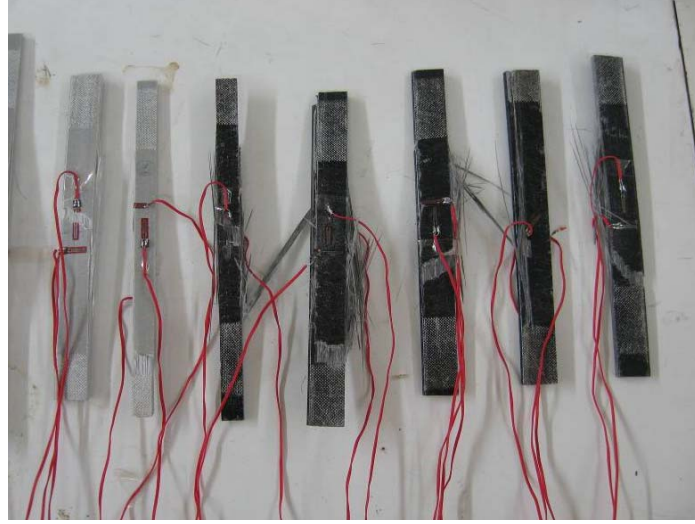
Şekil 5.6 Gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi.

Aynı numune deneyine ait boyuna birim şekil değiştirme ile enine birim şekil değiştirme arasındaki ilişki Şekil 5.7 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Boyuna birim şekil değiştirme – enine birim şekil değiştirme ilişkisi.

Gerilme – şekil değiştirme ilişkisi ASTM D3039 – 08 (2008) standardına uygun deney numuneleri kullanılarak incelenmiş ve deneyler sonrası CTP numunelerin bazıları Şekil 5.8 ile sunulmuştur.



Şekil 5.8 Deney sonrası CTP numuneler.

Çekme deneyleri sonrası deney numuneleri ve cam elyaflar Şekil 5.9 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Deney sonrası CTP numuneler ve cam elyaflar.

5.4.2 Zamana Bağlı Olmayan Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri

CTP profillerden hazırlanmış deney numunelerinin eğilme etkisi altındaki zamana bağlı olmayan davranışı, üç nokta eğilme deneyi kullanılarak incelenmiştir. Üç nokta eğilme deneyleri için Şekil 5.10 ile verilen yer değiştirme kontrollü deney makinesi kullanılmıştır.



Şekil 5.10 Üç nokta eğilme deneyi sistemi.

Deney sırasında ani enerji boşalmasının önlenmesi ve tüm kırılma süreci boyunca numune iki parçaya ayrılıncaya kadar, yük – sehim eğrilerinin kaydedilebilmesi için prese geri beslemeli olarak, numunelerin orta nokta sehimlerini ölçen Heidenhein marka 1 μm ölçüm hassasiyetinde optik encoder verileri kullanılmıştır. Deney bu şekilde kapalı çevrimli olarak iki parçaya ayrılıncaya veya orta nokta sehimi 3 mm değerine ulaşıncaya kadar 2 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan yük hücresi 5 kN kapasiteli ve $\pm \% 0,5$ hassasiyetindedir. Deneyler sonunda, 5 Hz frekansında çalışan veri toplama kartına alınan verilerden yük – sehim eğrileri elde edilmiştir.

Basit eğilme etkisi altındaki malzeme özelliklerinin belirlenmesinde üç nokta eğilme deneyi için ASTM D790 – 07 (2007)'den yararlanılmıştır. Eğilme dayanımı, farklı mesnet açıklıkları için 40 mm x 6 mm'lik dikdörtgen kesitli CTP numuneler üzerinde, yer değiştirme kontrollü olarak ve tek noktadan yükleme yapılarak Şekil 5.11 ile gösterildiği gibi belirlenmiştir. Çalışmada, beş adet üç nokta eğilme deneyi yapılmış ve deneylerde mesnet açıklığı olarak; 180 mm, 240 mm, 360 mm, 480 mm ve 600 mm değerleri kullanılmıştır.



Şekil 5.11 Üç nokta eğilme deney sistemi ve CTP numunesi.

ASTM D790 – 07 (2007) standardı eğilme deneylerinde kesme tesirini ihmal etmek için; mesnetler arasında kalan deney numunesi boyu ile kesit kalınlığı arasındaki oranın 60'dan büyük olmasını önermiştir. Çalışmada kullanılacak deneyler için; deney numunesi boyu ile kesit kalınlığı arasındaki oran 60'dan büyük ve kesme tesirini dikkate alarak kayma modülünü elde edebilmek için 60'dan küçük deney elemanları hazırlanmıştır. Çalışmada, üç nokta eğilme deneyleri mesnet açıklığı; 180 mm, 240 mm, 360 mm, 480 mm, 600 mm olan beş numune için

gerçekleştirilmiş ve Bank (1989) tarafından verilen yöntem kullanılarak elastisite modülü ve kayma modülü hesaplanmıştır.

5.4.2.1 Zamana Bağlı Olmayan Üç Nokta Eğilme Numune Denejleri Sonuçları

Üç nokta eğilme deneyi ile CTP profillerden çıkartılmış deney numunelerinin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üç nokta eğilme deneyi için, deney numunesi orta noktası düşey yer değıştirmesi denklem (5.3) ile yazılmıştır.

$$v = \frac{P L^3}{48 EI} + \frac{P L}{4 G(A/k'_y)} \quad (5.3)$$

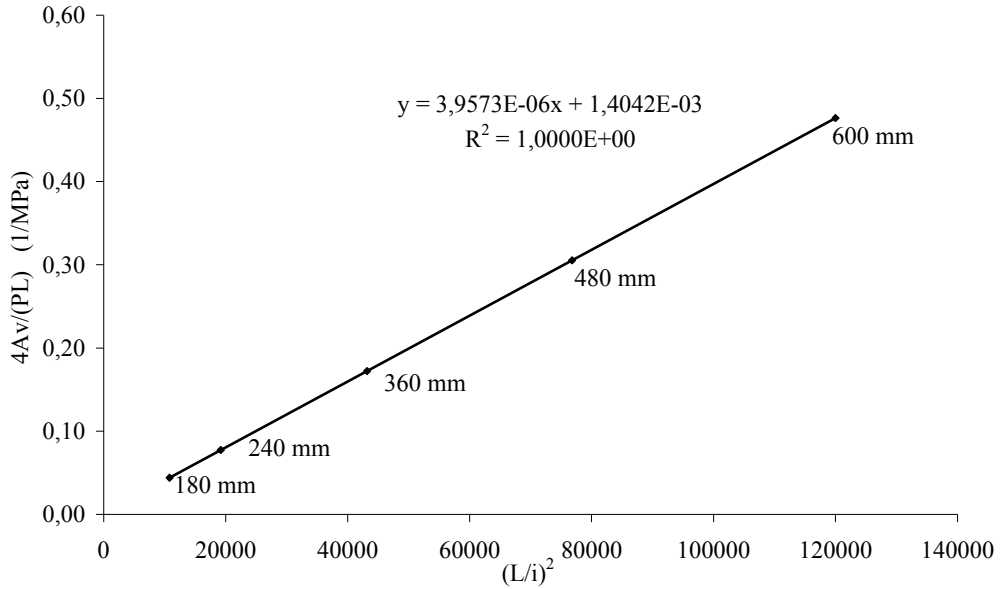
Burada; P kirişin açıklık ortasına uygulanan tekil yük değerini, L mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyunu, E elastisite modülünü, G kayma modülünü, A enkesit alanını, I atalet momentini, k'_y nümerik çarpanı, v deney numunesi orta noktası düşey yer değıştirme değerini gösterir.

CTP profillerin eğilme davranışlarının incelenmesi için ASTM D790 – 07 (2007) üç nokta eğilme deneyi ve ASTM D6272 – 02 (2008) dört nokta deneyi kullanılır. Bu çalışmada; üç nokta eğilme deneyi yapılmış ve deney numuneleri için elastisite modülü ASTM D790 – 07 (2007) ilkeleri dikkate alınarak elde edilmiştir. ASTM D790 – 07 (2007)'de sabit dikdörtgen kesitli eğilme deneyi numuneleri için L mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyu ve h deney numunesi kesiti kalınlığını olmak üzere L/h oranının en az 60 olması durumunda kayma şekil değıştirmelerinin ihmal edilebileceği verilmiştir. Aynı koşul, ASTM D6272 – 02 (2008) dört nokta deneyi ilkeleri arasında da yer almaktadır. Üç nokta eğilme deneyi için kiriş orta noktası düşey yer değıştirmesini veren denklem (5.3) düzenlenirse denklem (5.4) elde edilir (Bank, 1989).

$$\frac{4Av}{PL} = \frac{1}{12 E} \left(\frac{L}{i} \right)^2 + \frac{k'_y}{G} \quad (5.4)$$

Burada; A incelenen kiriş elemanın enkesit alanını, v deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirme değerini, P kirişin açıklık ortasına uygulanan tekil yük değerini, L mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyunu, i deney elemanın atalet yarıçapını, E elastisite modülünü, G kayma modülünü, k'_y ise nümerik çarpanı gösterir.

Çalışmada beş adet üç nokta eğilme deneyi yapılmış ve deneylerde mesnet açıklığı olarak; 180 mm, 240 mm, 360 mm, 480 mm ve 600 mm değerleri kullanılmıştır. Üç nokta eğilme deneyleri için denklem (5.4) dikkate alınarak Şekil 5.12 elde edilmiştir.



Şekil 5.12 Üç nokta eğilme deneyi için mesnet açıklıkları ile deney verileri.

Üç nokta eğilme deneylerinde kullanılan beş farklı mesnet açıklığı için Şekil 5.12 ile verilen doğrusal ilişki dikkate alınmış ve denklem (5.4)'den faydalanılarak; elastisite modülü 21058 MPa (21GPa), kayma modülü 855 MPa (0,85 GPa) olarak elde edilmiştir. Bank (1989), CTP malzemeler için üç nokta deneyleri ile elde ettiği E/G oranının 18 ile 30 arasında değiştiğini çalışmasında belirtmiştir. Bu çalışmada ise, kullanılan CTP malzeme için E/G oranı 24,6 olarak elde edilmiştir.

Kesme etkisi ihmal edilir ve E elastisite modülü, E_a kesme tesiri ihmal edilerek yapılan hesap sonucu elde edilen elastisite modülü olduğu dikkate alınır; denklem (5.4) ifadesi denklem (5.5) şeklinde yazılır (Bank, 1989). Kayma şekil değiştirmelerinin etkisinin incelenmesi amacıyla denklem (5.4) ile denklem (5.5) birlikte düzenlenirse denklem (5.6) elde edilir (Neto ve Rovere, 2007). Denklem (5.6)'ya göre kesme tesiri ihmal edilerek yapılan hesap sonucu elde edilen E_a modülü, E elastisite modülünden daha küçük olur.

$$\frac{4Av}{PL} = \frac{1}{12 E_a} \left(\frac{L}{i} \right)^2 \quad (5.5)$$

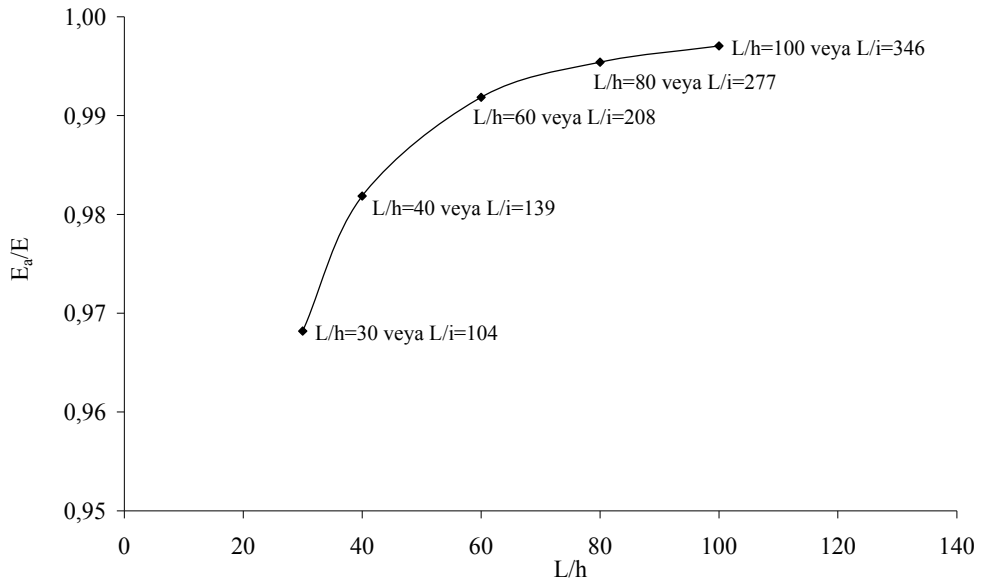
$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{12 E k'_y}{G (L/i)^2} \right) \quad (5.6)$$

Bu denklemlerde; A incelenen deney elemanının enkesit alanını, v deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirme değerini, P kirişin açıklık ortasına uygulanan tekil yük değerini, E_a kesme tesiri dikkate alınmadan yapılan hesap sonucu elde edilen elastisite modülünü, E elastisite modülünü, L mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyunu, i deney elemanın atalet yarıçapını, G kayma modülünü, k'_y ise nümerik çarpanı belirtmektedir.

Çalışmada, denklem (5.6) ile verilen ilişki üç nokta eğilme deney numuneleri için incelenmiş ve Şekil 5.13 elde edilmiştir. L mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyunu ve h numunenin kesit kalınlığını göstermek üzere; $L/h=60$ olduğunda kayma şekil değiştirmelerinin yer değiştirmeye olan etkisinin %1, $L/h>60$ olduğunda ise kayma şekil değiştirmelerinin yer değiştirmeye olan etkisinin %1'den daha az olduğu üç nokta eğilme deneylerinden görülmüştür. Buna göre, deneylerde kullanılan CTP numuneleri için $L/h>60$ olduğunda, kayma şekil değiştirmelerinin ihmal edilmesi %1'den daha küçük bir hata oluşturur.

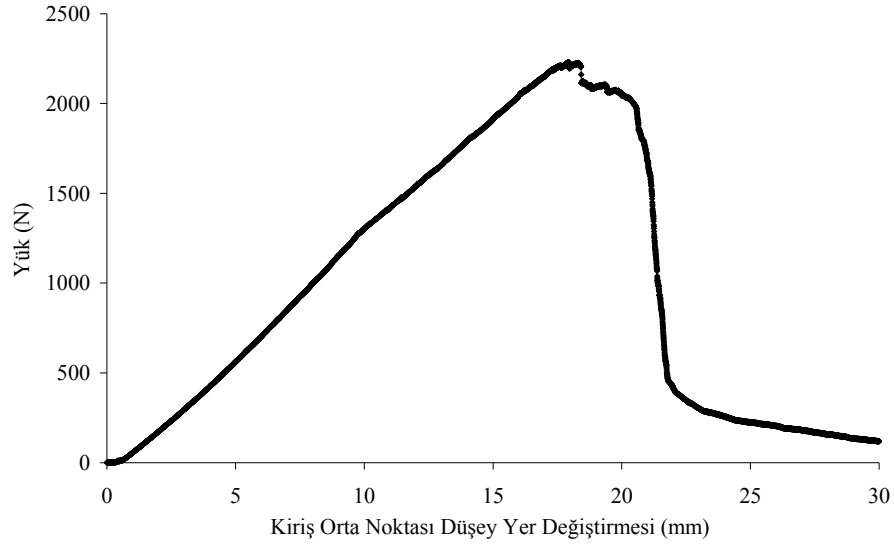
Bank (1989), Neto ve Rovere (2007) tarafından yapılan çalışmalarda; ASTM D790 – 07 (2007) ile dikdörtgen kesitli deney numuneleri için verilen mesnetler

arasındaki numune boyu ile kesit kalınlığı arasındaki oranının, yapısal profiller için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Bank (1989), Neto ve Rovere (2007) CTP profiller ile yapılan üç nokta eğilme deneyleri için mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyu L ile enkesitin atalet yarıçapı i arasındaki L/i oranının kullanılmasını önermiştir. Bu nedenle, üç nokta eğilme deneyleri sonuçları; hem ASTM D790 – 07 (2007) ile belirtilen oranı hem de Bank (1989), Neto ve Rovere (2007) tarafından yapılan çalışmalarda belirtilen oranı gösterecek şekilde Şekil 5.13 ile sunulmuştur.



Şekil 5.13 E_a/E ile L/h ilişkisi.

Çalışmada, beş adet üç nokta eğilme deneyi yer değiştirme kontrollü olarak yapılmış ve deneylerde mesnet açıklığı için; 180 mm, 240 mm, 360 mm, 480 mm ve 600 mm değerleri kullanılmıştır. Malzemenin kırılma noktasına kadar olan davranışını sunmak amacıyla, ilk deney numunesi olan 180 mm mesnet açıklığındaki deney numunesinin yük – kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi Şekil 5.14 ile verilmiştir. Burada, deney numunesi orta noktasının düşey yer değiştirmesi ölçülürken 1 μm ölçüm hassasiyetindeki optik encoder'in zarar görmemesi için deney sisteminden çıkarılmış ve deney numunesinin orta noktasının düşey yer değiştirmesi yük uygulayan sistemin hareketi dikkate alınarak ölçülmüştür.



Şekil 5.14 Üç nokta deneyi yük – kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi ilişkisi.

5.5 Zamana Bağlı Deneyler

CTP profillerin kullanıldığı sistemlerde, mekanik özelliklerin belirlenmesi ve malzemenin kalite kontrolü amacıyla yapılan zamana bağlı olmayan deneyler kadar uzun süreli davranışın incelendiği zamana bağlı deneyler de önem taşır. Viskoelastik malzemelerin zamana bağlı davranışını bünye denkleminde gerilme ve şekil değiştirme ifadelerinin yanı sıra zaman değişkeninin de yer alması ile ifade edilir.

Deneysel çalışmada, kısa ve uzun süreli deneyler ile viskoelastik davranış araştırılmıştır. Zamana bağlı kısa süreli davranış, üç nokta eğilme numune deneyleri ile incelenmiştir. Zamana bağlı uzun süreli davranış ise; aksenal çekme numune deneyleri ve tam ölçekli sistem deneyleri ile araştırılmıştır. Viskoelastik davranışın incelenmesinde kullanılan uzun süreli tam ölçekli deneyler; basit kiriş, tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistem deneyleridir. Her deney sistemi kendi içerisinde özel olarak tasarlanmıştır. Zamana bağlı olmayan deneylerde kullanılan numunelere benzer şekilde, viskoelastik davranışın incelendiği deneylerde kullanılan elemanlarda aynı stok ve imalat tarihi bulunmaktadır.

5.5.1 Kısa Süre ile Zamana Bağlı Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri

Numune deneyleri, tam ölçekli deneylere göre pratik olduğundan zamana bağlı viskoelastik davranışın incelenmesinde kullanılmaktadır. Yapı davranışının deney numuneleri ile temsil edilebildiği durumlarda, viskoelastik davranış numune deneyleri ile araştırılabilir (Bank, 2006). Deney numuneleri ile viskoelastik davranış incelenirken; numunelerin mümkün olduğunca sistemde kullanılan kalınlıklarda çıkarılması ve özenle hazırlanması önem taşır.

Kısa süre ile zamana bağlı üç nokta eğilme numune deneyleri için; CTP malzemeli numuneler özenle hazırlanmış ve viskoelastik davranış incelenmiştir. Kang (2001) kısa süreli sünme davranışını incelediği numune deneyleri çalışmasında, deney süresini 2 saat olarak seçmiş ve gerilme seviyesi değişiminin sünme şekil değiştirmeleri üzerine etkisini araştırmıştır. Kang (2001), kısa süreli sünme davranışının daha iyi yansıtılabilmesi için daha uzun süre ile incelenme yapılması gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle, zamana bağlı üç nokta eğilme numunesi deneyleri için çalışmada kısa süre olarak 24 saat seçilmiştir. Kısa süre ile zamana bağlı üç nokta eğilme deneyi öncesi deney sistemi Şekil 5.15 ile gösterilmiştir.

Kısa süre ile zamana bağlı üç nokta eğilme deneyleri için hazırlanan CTP numunelerin en kesiti boyutları; 42 mm x 4 mm'dir. Çalışmada mesnet açıklığı için 400 mm kullanılmıştır. Beş farklı gerilme seviyesi için üç nokta eğilme deneyi yapılmış ve farklı gerilme seviyelerinin sünme davranışı üzerine olan etkileri kısa süre için araştırılmıştır. Çalışmada, deney numuneleri orta noktası gerilme değerleri; 62,0 MPa, 80,0 MPa, 102,2 MPa, 120,0 MPa, 142,2 MPa olacak şekilde beş farklı yükleme yapılmıştır. Bu gerilme değerleri, maksimum gerilmenin sırasıyla; %15, %20, %25, %30, %35'i kadar olup gerilme seviyesi değişiminin sünme şekil değiştirmeleri üzerine olan etkisi araştırılmıştır.

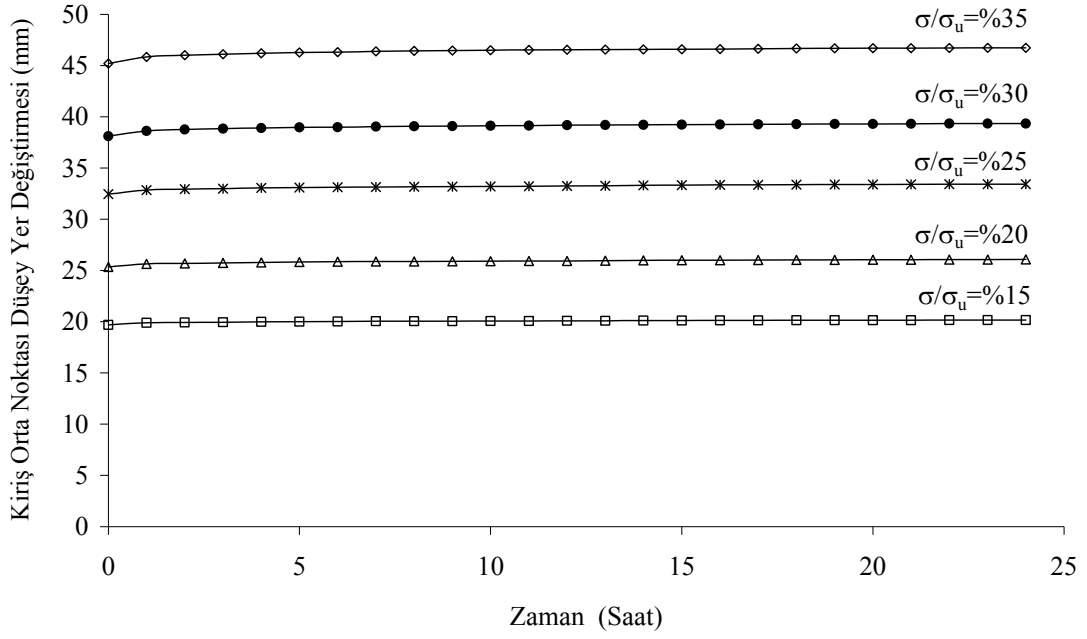


Şekil 5.15 Kısa süre ile zamana bağlı üç nokta eğilme deneyi numunesi.

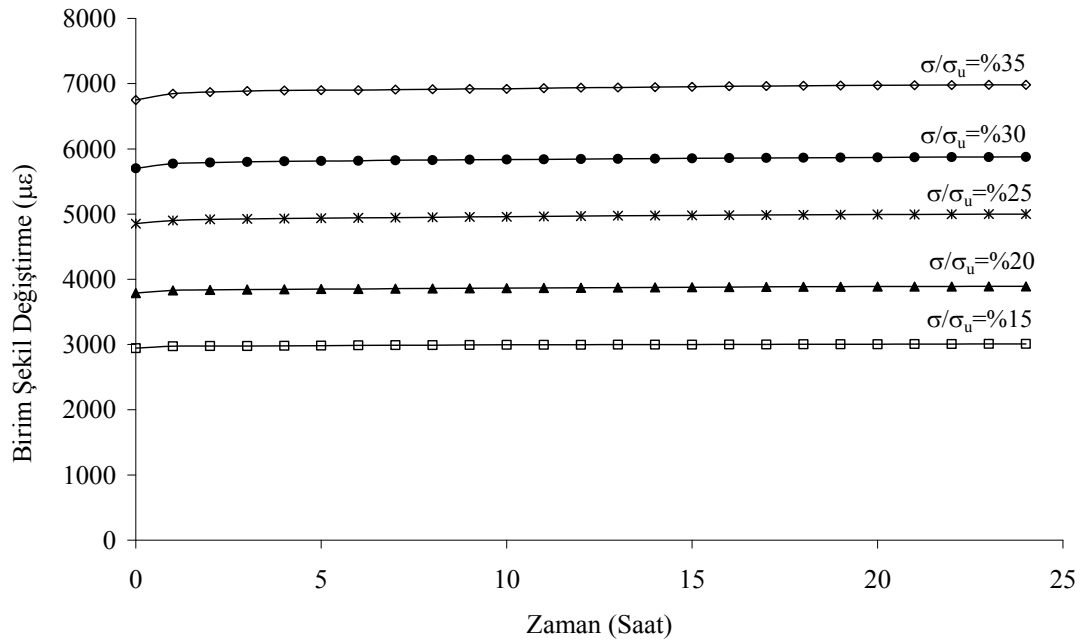
5.5.1.1 Kısa Süre ile Zamana Bağlı Üç Nokta Eğilme Numune Deneyleri Sonuçları

Kısa süre ile zamana bağlı üç nokta eğilme numune deneyleri için CTP numuneler hazırlanmış ve bu numuneler kullanılarak beş farklı gerilme seviyesi için viskoelastik davranış 24 saat süreyle araştırılmıştır.

Deney numunelerinin orta noktası gerilme değerleri sırasıyla; 62,0 MPa, 80,0 MPa, 102,2 MPa, 120,0 MPa ve 142,2 MPa'dır. Bu gerilmeler maksimum gerilmenin sırasıyla; %15, %20, %25, %30, %35'i kadar olup, eğilme numunelerinin orta noktasının düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi Şekil 5.16 ve birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 5.17 ile sunulmuştur.



Şekil 5.16 Farklı gerilme seviyeleri için kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkileri.



Şekil 5.17 Farklı gerilme seviyeleri için kiriş orta noktası birim şekil değiştirmesi – zaman ilişkileri.

Deney numunelerinin orta noktalarının düşey yer değiştirme ve birim şekil değiştirme değerlerindeki zamana bağlı değişim sırasıyla; Tablo 5.2, Tablo 5.3 ile sunulmuştur.

Tablo 5.2 Farklı gerilme seviyeleri için deney numunelerinin orta noktası düşey yer değıştirmesi değeri

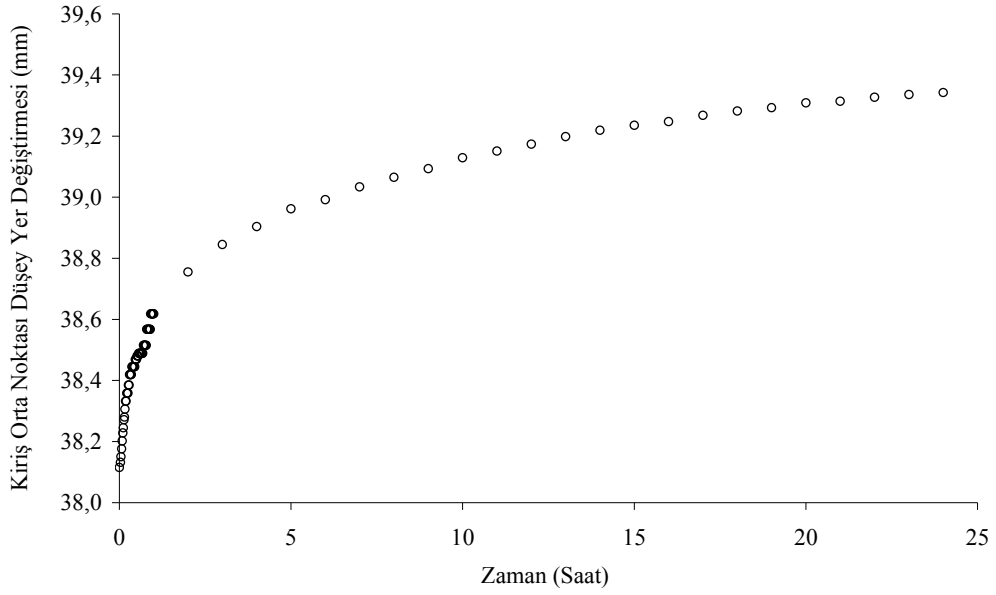
	$\sigma_1=62,0$ MPa	$\sigma_2=80,0$ MPa	$\sigma_3=102,2$ MPa	$\sigma_4=120,0$ MPa	$\sigma_5=142,4$ MPa
Başlangıç Anı	19,69 mm	25,36 mm	32,44 mm	38,12 mm	45,20 mm
1 saat	19,89 mm	25,64 mm	32,85 mm	38,62 mm	45,84 mm
4 saat	19,98 mm	25,79 mm	33,06 mm	38,91 mm	46,20 mm
10 saat	20,07 mm	25,91 mm	33,20 mm	39,13 mm	46,50 mm
24 saat	20,16 mm	26,08 mm	33,43 mm	39,35 mm	46,73 mm

Tablo 5.3 Farklı gerilme seviyeleri için deney numunelerinin orta noktası şekil değıştirme değeri

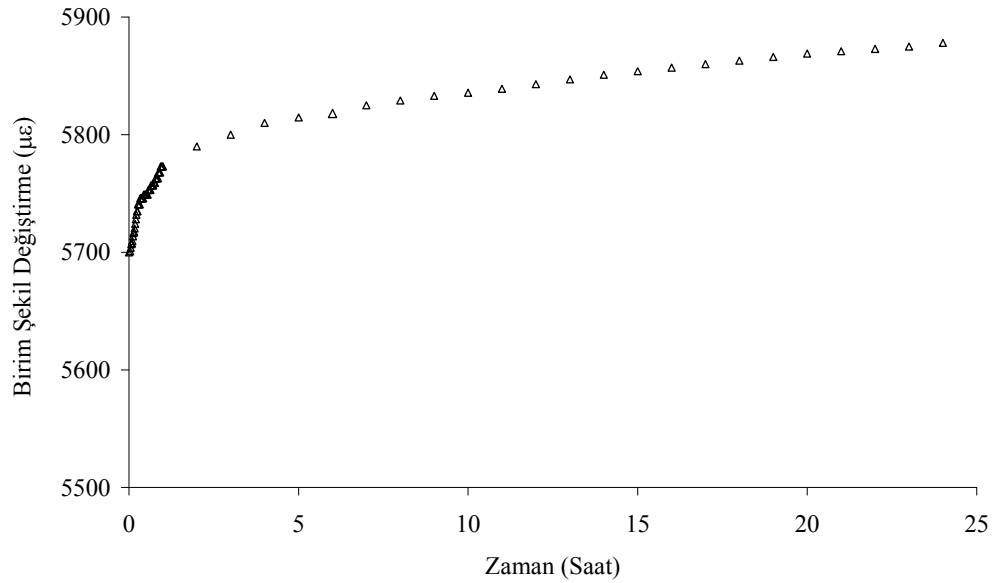
	$\sigma_1=62,0$ MPa	$\sigma_2=80,0$ MPa	$\sigma_3=102,2$ MPa	$\sigma_4=120,0$ MPa	$\sigma_5=142,4$ MPa
Başlangıç Anı	2944 $\mu\epsilon$	3790 $\mu\epsilon$	4852 $\mu\epsilon$	5700 $\mu\epsilon$	6750 $\mu\epsilon$
1 saat	2972 $\mu\epsilon$	3828 $\mu\epsilon$	4902 $\mu\epsilon$	5773 $\mu\epsilon$	6847 $\mu\epsilon$
4 saat	2980 $\mu\epsilon$	3846 $\mu\epsilon$	4931 $\mu\epsilon$	5810 $\mu\epsilon$	6895 $\mu\epsilon$
10 saat	2995 $\mu\epsilon$	3864 $\mu\epsilon$	4960 $\mu\epsilon$	5836 $\mu\epsilon$	6921 $\mu\epsilon$
24 saat	3008 $\mu\epsilon$	3892 $\mu\epsilon$	4999 $\mu\epsilon$	5878 $\mu\epsilon$	6983 $\mu\epsilon$

Deney numunelerinin orta noktası gerilme değeri; 62,0 MPa, 80,0 MPa, 102,2 MPa, 120,0 MPa, 142,2 MPa'dır. Bu gerilme değeri maksimum gerilmenin sırasıyla; %15, %20, %25, %30, %35'i kadardır. Kısa süreli eğilme deneyinde uygulanan bu gerilme değeri göre deney numunelerinin orta noktalarının düşey yer değıştirme değeriindeki artış 1 saat sonunda sırasıyla; %1,03, %1,12, %1,25, %1,32, %1,41 ve 24 saat sonunda sırasıyla; %2,39, %2,85, %3,05, %3,22, %3,39 olmuştur. Benzer şekilde, şekil değıştirme değeriindeki artışın 1 saat sonunda sırasıyla; %0,96, %1,01, %1,03, %1,28, %1,44 ve 24 saat sonunda sırasıyla; %2,18, %2,69, %3,03, %3,12, %3,45 olduğu görülmüştür. Gerilme seviyelerinin artması, sünme nedeniyle oluşan deney numunesi orta noktası düşey yer değıştirme ile şekil değıştirme değeriindeki artış miktarlarını etkilemiştir.

Çalışmada, kısa süreli viskoelastik davranış daha yakından inceleyebilmek amacıyla; ilk yapılan deney olan 120,0 MPa'lık gerilme etkisi altındaki deney numunesinin orta noktasının düşey yer değıştirmesi – zaman ilişkisi Şekil 5.18 ve birim şekil değıştirme – zaman ilişkisi Şekil 5.19 ile ayrıca sunulmuştur.



Şekil 5.18 120 MPa gerilme etkisi altındaki deney numunesinin orta noktası düşey yer değişirgesi – zaman ilişkisi.



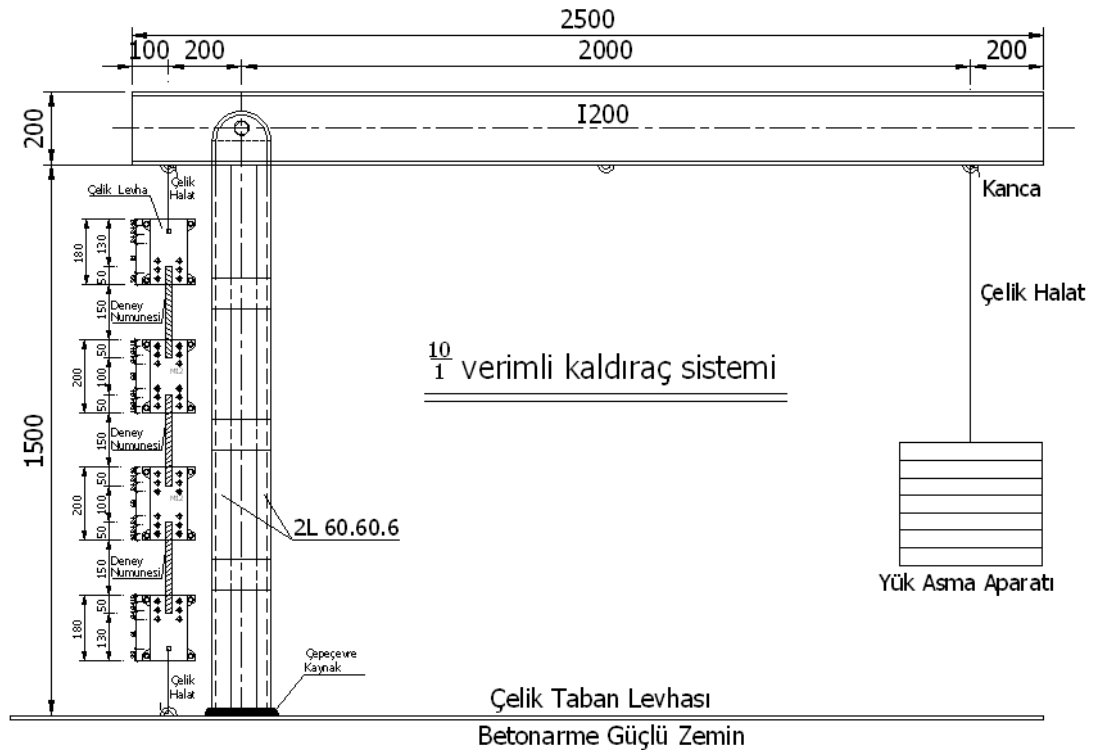
Şekil 5.19 120 MPa gerilme etkisi altında deney numunesinin orta noktası birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.

5.5.2 Uzun Süre ile Zamana Bağlı Eksenel Çekme Numune Deneyleri

Uzun süre ile zamana bağlı eksenel çekme numune deneyler için; ASTM D2990 – 01 (2001) dikkate alınarak deney numuneleri hazırlanmış ve viskoelastik davranış

araştırılmıştır. Bu deney numunelerinin hazırlandığı elemanlar ve tam ölçekli çubuk sistem deneylerinde kullanılan elemanlar aynı stok ile imalat tarihine sahiptir.

Viskoelastik davranışın incelendiği deneylerde, istenen gerilme seviyelerini oluşturmak ve sabit tutmak için deney numunelerine yükün değişmeden, sabit şekilde uygulanması gerekir. Genellikle, deney numunelerinde istenilen bu gerilme seviyelerini sağlamak için gerekli olan yükleri uygulamak oldukça zordur. Benzer şekilde, hidrolik yükleme sistemleri ile uzun süreli viskoelastik davranışın incelenmesi pratik olarak mümkün değildir. Bu nedenle, deney numuneleri kullanılarak viskoelastik davranışın incelenebilmesi amacıyla Şekil 5.20 ile sunulan ve sisteme uygulanan yükün sabit kalmasını sağlayan özel bir yükleme sistemi bu çalışma için geliştirilmiştir.



Şekil 5.20 Uzun süreli aksel çekme numune deneyleri için geliştirilmiş yükleme sistemi tasarımı.

ASTM D2990 – 01 (2001)'e göre, sünme deneyinde herhangi bir yükleme sistemi kullanılacak ise deney elemanına etkiyen yükün deney süresince sabit kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Çalışmada, kaldıraç prensibinden yararlanılarak bir yükleme sistemi geliştirilmiştir. Bu şekilde, küçük yükler

kullanılarak büyük yük seviyeleri elde edilmiştir. Çalışmada sunulan yükleme sistemi kullanılarak sisteme verilen sabit yüklerin on kat kadar arttırılarak deney numunelerine uygulanması hedeflenmiştir. Viskoelastik davranışın incelenbilmesi amacıyla geliştirilmiş ve çalışmada kullanılan yükleme sistemi Şekil 5.21 ile verilmiştir.



Şekil 5.21 Uzun süreli aksel çekme numune deneyleri için geliştirilmiş yükleme sistemi.

Şekil 5.21 ile sunulan sistemde, kaldıraç kolu için I 200 profili kullanılmış ve sürtünmesiz ara mafsal oluşturularak sisteme uygulanan sabit yüklerin verim kaybetmeden deney numunelerine aktarılabilmesi sağlanmıştır. Yükleme sistemi ekseninin zeminden yüksekliği 1500 mm olup deney sırasında üç adet deney numunesinin aynı anda incelenmesine imkan verebilecek nitelikte olması hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan yükleme sistemi ile birlikte, çeşitli tiplerde özel ağırlıklar da kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan numunelerin çelik levhalar arasından kaymasını engellemek amacıyla özel çelik levhalar hazırlanmış, Şekil 5.22 ile görüldüğü gibi pürüzlendirilmiş ve çeşitli yerlerinden çizilmiştir. Deney numuneleri, çelik elemanlar arasına yerleştirildikten sonra 8.8 kalitesinde uygun M12 bulonlar kullanılarak sıkılmıştır.



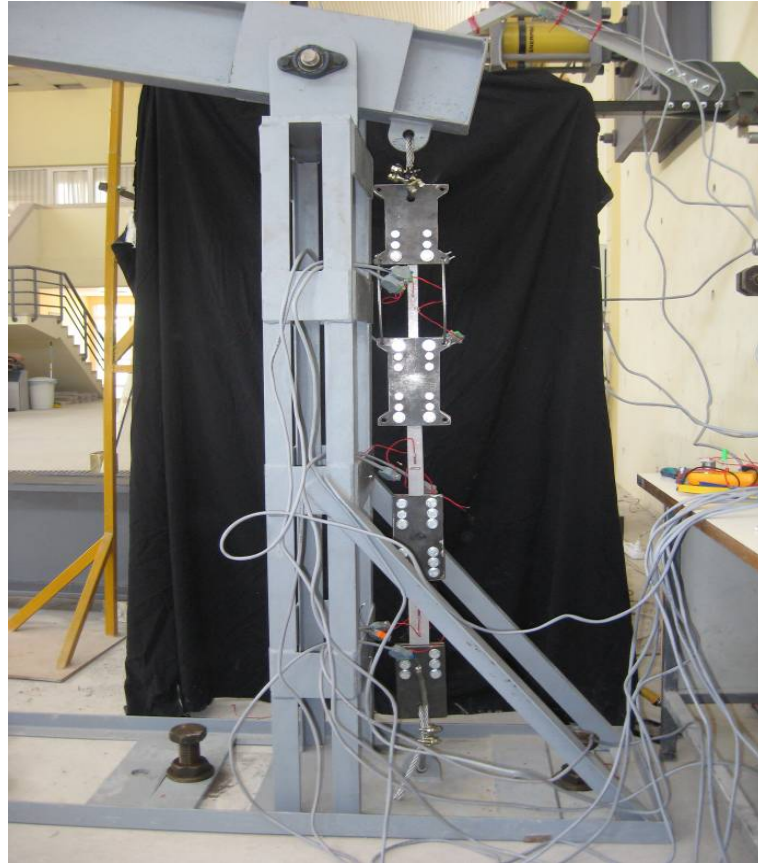
Şekil 5.22 Pürüzlendirilmiş ve çizilmiş çelik levhalar.

Deney sırasında, deney numunelerinden herhangi birinin kopma veya kayması nedeniyle devreden çıkması durumunda, Şekil 5.22 ile görüldüğü gibi çelik levhaların kenar kısımlarında bulunan deliklerden geçirilen çelik halatlar ile deney sisteminin güvenliğinin sağlanması düşünülmüştür. Bu şekilde, deney sisteminin bu durumdan zarar görmemesi ve diğer deney numunelerinin bu durumdan etkilenmemesi sağlanmış olacaktır.

Numunelerin çelik levhalar arasında kalan bölümlerinin alt ve üst kısımları deneylere başlamadan önce işaretlenmiştir. Bu işlemin ardından farklı yük seviyeleri için çeşitli denemeler yapılmış, deney numunelerinin çelik elemanlar arasından kaymadığı ve herhangi bir sıyrılmamanın söz konusu olmadığı görülmüştür. Deney sistemiyle yapılan bu yük denemelerinde, sistemin zarar görmesini önlemek amacıyla laboratuara ait vinç sistemi ve güvenlik halatı, kaldıraç kolu kısmında emniyeti sağlamak üzere bir süre bulundurulmuştur. Sistemde herhangi bir sıyrılmaya veya kaymanın olmadığı belirlendikten sonra birkaç gün beklenmiş ve zamana bağlı viskoelastik davranışın incelenmesi için sistem yüklenecek deney başlatılmıştır. Zamana bağlı deneylerde, işaretlenmiş olan deney numunelerinde herhangi bir kayma veya sıyrılmaya olup olmadığı her gün yapılan veri kaydı esnasında özenle kontrol edilmiştir.

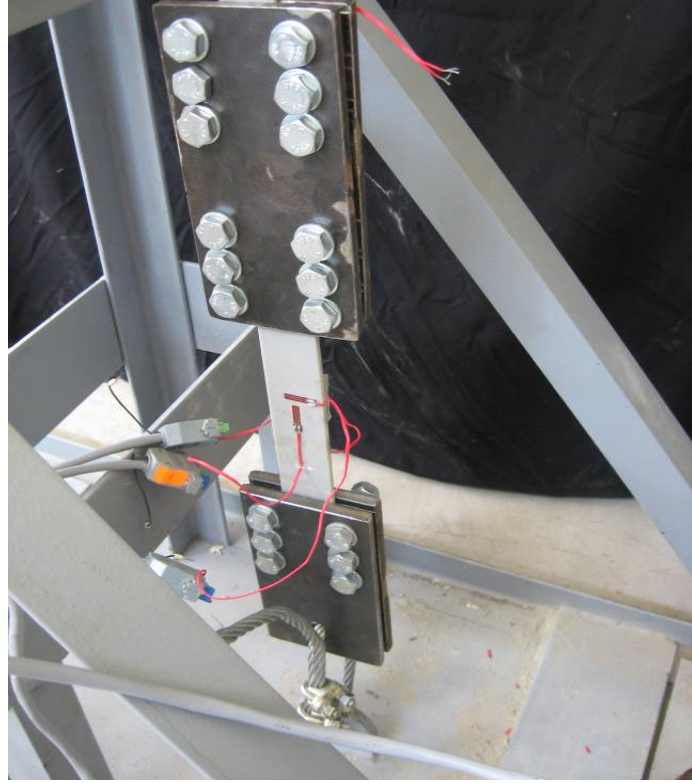
Deney sistemi ile üç adet deney numunesi farklı gerilme seviyeleri altında incelenmiştir. Birinci deney numunesi 250 mm x 40 mm x 6 mm, ikinci deney numunesi 250 mm x 30 mm x 6 mm ve üçüncü deney numunesi 250 mm x 20 mm x

6 mm ebatlarındadır. Tüm deney numuneleri aynı kalınlıkta olup farklı kesit genişliklerine sahiptir. Bu şekilde deney numunelerinin farklı kesit alanlarına sahip olması sağlanmış ve sisteme uygulanan tek bir yük ile her deney numunesi için farklı gerilme seviyesi elde edilmiştir. Şekil 5.23 ile sunulan yükleme sistemi kullanılarak deney numuneleri aynı anda istenilen sabit gerilme seviyesi etkisi altında incelenmiştir.

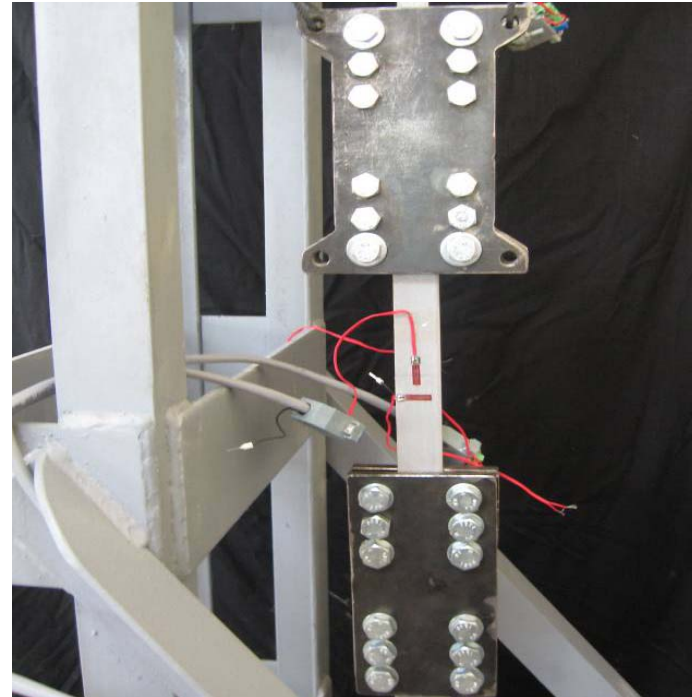


Şekil 5.23 Viskoelastik davranışı incelenen deney numuneleri.

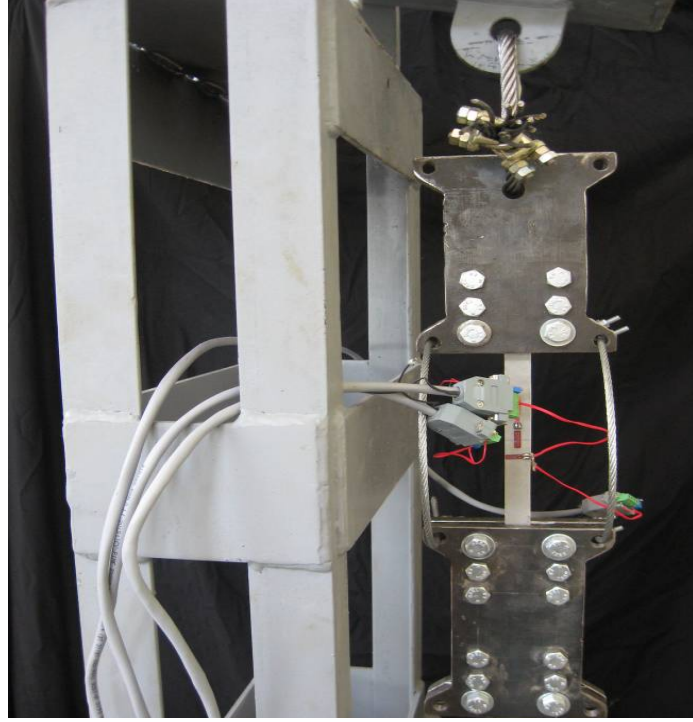
Viskoelastik davranışın incelendiği; birinci deney numunesi 250 mm x 40 mm x 6 mm, ikinci deney numunesi 250 mm x 30 mm x 6 mm ve üçüncü deney numunesi 250 mm x 20 mm x 6 mm ebatlarındadır. Bu deney numuneleri sırasıyla; Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 ile sunulmuştur. Burada; zamana bağlı olmayan mekanik özelliklerin incelendiği aksel çekme deneyine benzer olarak deney numuneleri yerleştirilirken çelik levhalar arasındaki net mesafenin 138 mm olmasına dikkat edilmiştir (ASTM D2990 – 01, 2001; ASTM D3039 – 08, 2008).



Şekil 5.24 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi.



Şekil 5.25 250 mm x 30 mm x 6 mm deney numunesi.



Şekil 5.26 250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunesi.

Viskoelastik davranışın belirlenmesi için birçok araştırmacı tarafından çeşitli deney süreleri dikkate alınmıştır (Bank, 2006). Bank ve Mossallam (1992), McClure ve Mohammadi (1995), Soliman (1969), Scott ve Zureick (1998), Findley (1987) çalışmalarında sırasıyla; 2000 saat, 2500 saat, 3000 saat, 10000 saat ve 230000 saat (yaklaşık 26 yıl) şeklinde deney süreleri dikkate almıştır. Scott ve Zureick (1998), 1000 saatlik süre ile alınan verilerin çalışmasında dikkate aldığı 10000 saat (416,6 gün) sünme davranışını iyi bir şekilde temsil ettiğini belirtmiştir. Benzer olarak, önce Findley (1987) ve daha sonra Bank ve Mossallam (1992), 2000 saat süre ile alınan verilerin çalışmalarında sırası ile dikkate alınan 230000 saat (yaklaşık 26 yıl) ve 10000 saat süren sünme deneylerinde elde edilen davranışı temsil etmek için yeterli olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Kang (2001) 2000 saatlik numune deneyleri ile yeterli hassasiyette sonuçlar elde etmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınarak, bu çalışmada uzun süreli numune deneyleri için deney süresi 100 gün (2400 saat) seçilmiştir.

Deney başlamadan önce tüm birim deformasyon ölçüm kanalları kontrol edilmiş ve deneyin başlaması ile birlikte veri alma başlatılmıştır. Deney numuneleri ile sünme deneyi Şekil 5.27 ile verilen düzenek kullanılarak yapılmıştır.



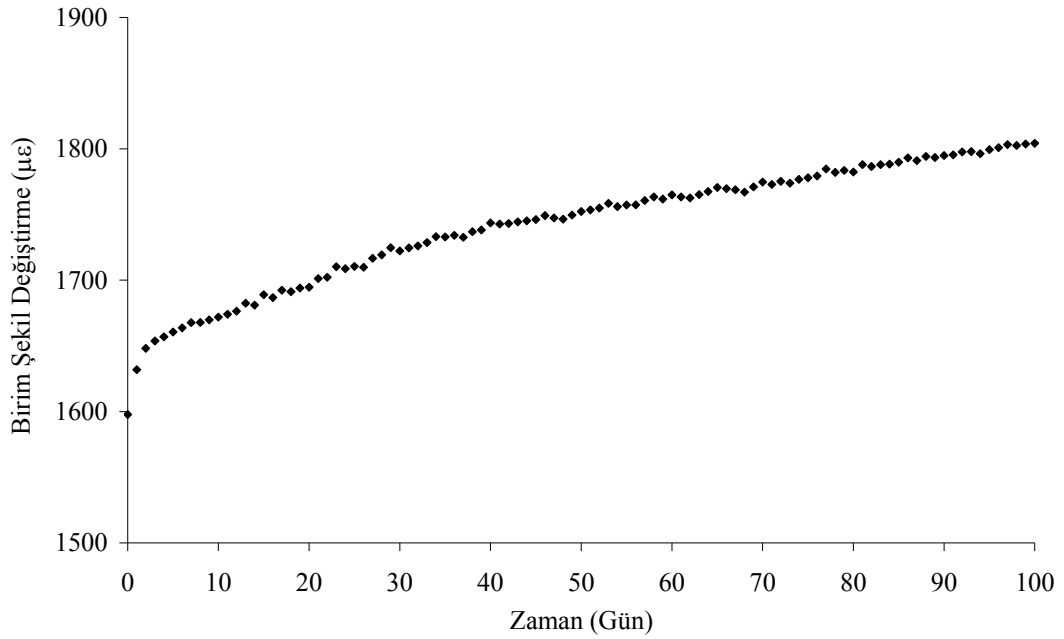
Şekil 5.27 Yükleme sistemi ve incelenen üç deney numunesi.

Çalışmada kullanılan; 250 mm x 40 mm x 6 mm, 250 mm x 30 mm x 6 mm, 250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunelerine uygulanan gerilme değerleri sırasıyla; 42,2 MPa, 56,2 MPa ve 84,3 MPa'dır. Bu gerilme değerleri maksimum çekme gerilmesinin sırasıyla; %10, %14 ve %20'si kadar olup deney süresi olan 100 gün için belirli zaman aralıklarıyla elde edilen şekil değiştirme verileri kaydedilmiştir. Bank (2006), CTP profiller ile oluşturulmuş sistemlerin, taşıyabileceği en büyük gerilmenin %10 – %20'sini aşmayacak gerilmeler altında çalıştırılması gerektiğini belirtmiştir. Bunun nedeni; CTP profiller ile oluşturulmuş sistemlerin kullanım sınır değerlerine düşük gerilme seviyeleri altında ulaşabilmeleri, boyutlandırma sırasında yüksek güvenlik faktörleri kullanılması ve CTP profillerin birleşimlerinin hassas olmasıdır. Çalışmada, seçilen gerilme seviyeleri %10, %14 ve %20 olup Bank (2006)'nın belirttiği sınır değerler aşılmamıştır.

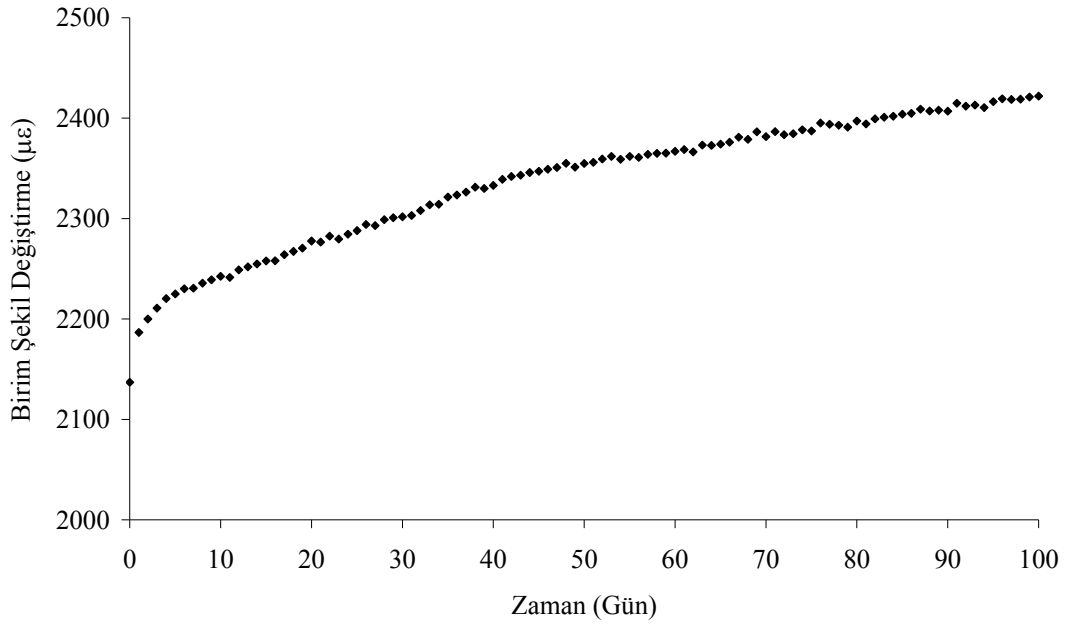
Veri kaydı zaman aralıkları için; Mosallam (1991), Scott ve Zureick, (1998) ve Kang (2001) tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Deney sırasında; ilk saat her 10 saniyede bir veri alınmış, bunu takip eden ilk 23 saat için ise her saat başı veri okuması yapılmıştır. Deney süresi olan 100 günlük sürenin sonuna kadar ise günde bir okuma alınmıştır.

5.5.2.1 Uzun Süre ile Zamana Bağlı Eksenel Çekme Numune Deneyleri Sonuçları

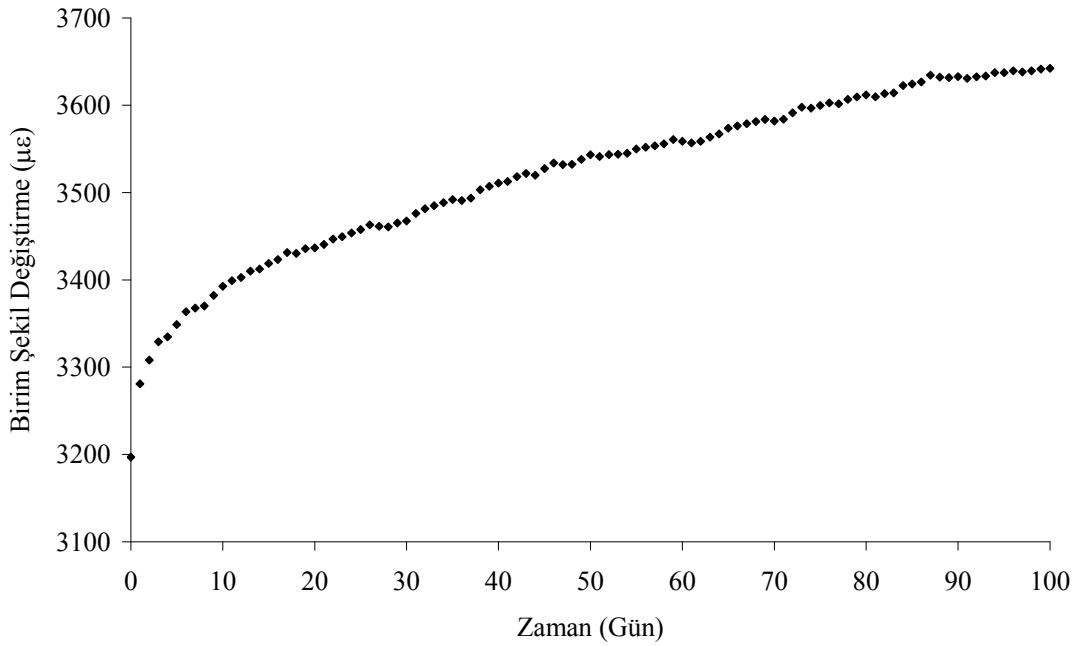
Viskoelastik davranış; 250 mm x 40 mm x 6 mm, 250 mm x 30 mm x 6 mm ve 250 mm x 20 mm x 6 mm ebatlarındaki deney numuneleri için 100 gün süre ile incelenmiştir. Bu deney numuneleri için elde edilen birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri sırasıyla; Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 ile sunulmuştur.



Şekil 5.28 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.



Şekil 5.29 250 mm x 30 mm x 6 mm deney numunesi için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.



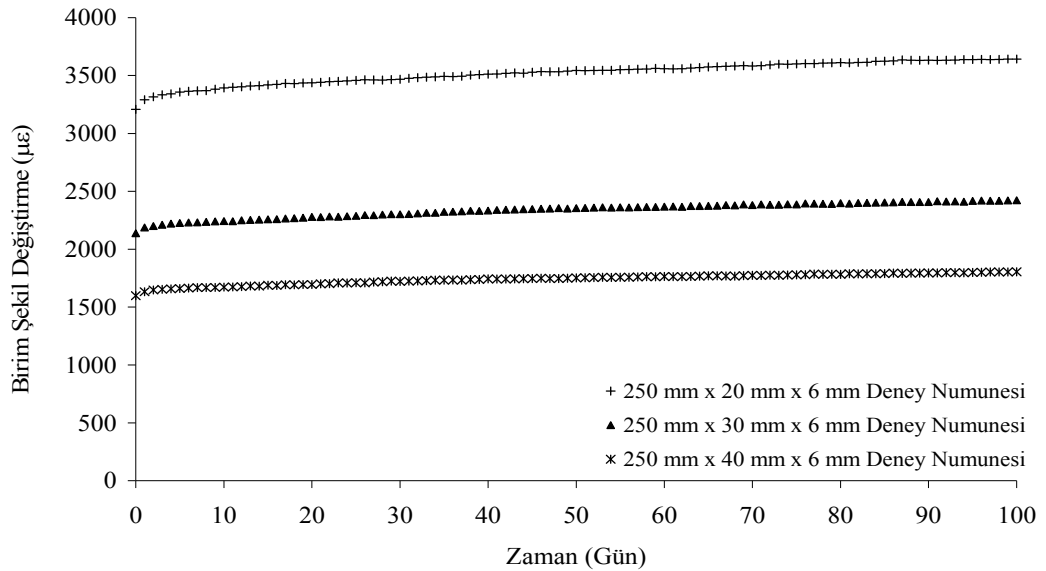
Şekil 5.30 250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunesi için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.

Birinci deney numunesi 250 mm x 40 mm x 6 mm, ikinci deney numunesi 250 mm x 30 mm x 6 mm, üçüncü deney numunesi 250 mm x 20 mm x 6 mm ebatlarında olup sünme nedeni ile birim şekil değişirme değerlerindeki zamana bağlı değişim Tablo 5.4 ile verilmiştir.

Tablo 5.4 Deney numuneleri için birim şekil değiştirme değerleri

	250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi şekil değiştirme	250 mm x 30 mm x 6 mm deney numunesi şekil değiştirme	250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunesi şekil değiştirme
Başlangıç Anı	1598 $\mu\epsilon$	2131 $\mu\epsilon$	3197 $\mu\epsilon$
100 gün	1804 $\mu\epsilon$	2411 $\mu\epsilon$	3633 $\mu\epsilon$

Çalışmada kullanılan; 250 mm x 40 mm x 6 mm, 250 mm x 30 mm x 6 mm, 250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunelerinin şekil değiştirme değerlerindeki artış 100 gün sonunda sırasıyla; %12,9, %13,1 ve %13,6 olarak elde edilmiştir. Şekil değiştirme değerlerindeki artışın birlikte incelenebilmesi amacıyla; deney numuneleri için elde edilen şekil değiştirme – zaman ilişkileri Şekil 5.31’de sunulmuştur.



Şekil 5.31 Uzun süreli aksenal çekme deney numuneleri için birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri.

5.5.3 Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Kiriş Sünme Deneyi

Tek açıklıklı kirişin kesiti CTP kutu kesit olup boyutları 40 mm x 40 mm ve et kalınlığı 4 mm'dir. Şekil 5.32 ile verilen deney sistemi yükleme çerçevesi içerisinde oluşturulmuş ve tek açıklıklı kirişin viskoelastik davranışı bu bölümde araştırılmıştır.



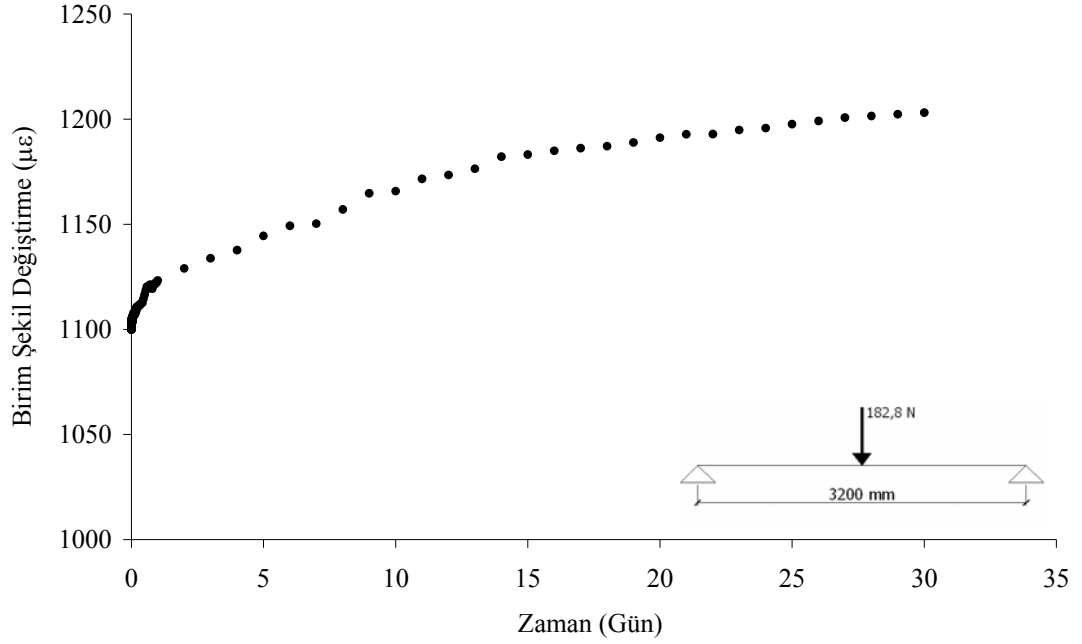
Şekil 5.32 Tek açıklıklı CTP kutu kesitli kiriş.

Tek açıklıklı kirişin mesnet açıklığı 3200 mm olarak dikkate alınmıştır. Viskoelastik davranış, tek açıklıklı kirişin orta noktasından yüklenerek 30 gün için araştırılmıştır. Kirişe uygulanan ve deney süresince sabit tutulan yük; 170 N özel ağırlık yükü ve 12,8 N aparat zati yükü olmak üzere toplam 182,8 N olup tek açıklıklı kirişin açıklık ortasındaki gerilme değeri 23,2 MPa'dır. Bank (2006), CTP profiller ile oluşturulmuş sistemlerin, taşıyabileceği en büyük gerilmenin %10 – %20'sini aşmayacak gerilmeler altında kullanılmasını önermektedir. Çalışmada, tek açıklıklı kirişe uygulanan gerilme maksimum gerilmenin %5'i kadar olup Bank (2006)'nın önerdiği sınır değerler aşılmamıştır. Deney süresi boyunca kiriş orta noktası yer değiştirmesi LVDT kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca, kirişin orta noktasında yer alan birim deformasyon ölçer ile zamana bağlı şekil değiştirme incelenmiştir. Sünme deneyi tamamlandıktan sonra yük kaldırılmış ve geri dönüş davranışı üç gün süre ile incelenmiştir. Sünme deneyi tamamlandıktan sonra yükün kaldırılması esnasında birim deformasyon ölçer devre dışı kalmış ve geri dönüş davranışı üç gün süresince yer değiştirme ölçer ile takip edilmiştir.

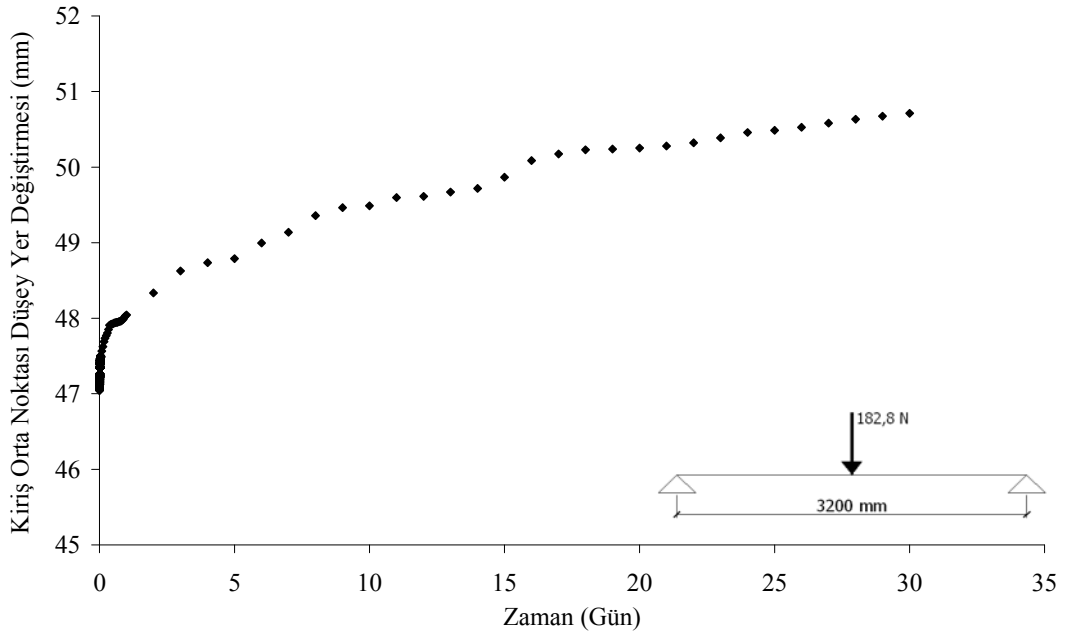
5.5.3.1 Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Kiriş Sünme Deneyi Sonuçları

Tek açıklıklı kirişin viskoelastik davranışı; kesit boyutları 40 mm x 40 mm ve et kalınlığı 4 mm olan CTP kutu kesit kullanılarak araştırılmıştır. Deney sırasında tek açıklıklı kiriş üç nokta deneylerine benzer şekilde ortadan yüklenmiş ve 30 gün süre

için davranış izlenmiştir. Kiriş orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 5.33 ve kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi Şekil 5.34 ile sunulmuştur.



Şekil 5.33 Tek açıklıklı kirişin kiriş orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.



Şekil 5.34 Tek açıklıklı kirişin kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

Tablo 5.5 ile sabit yük etkisi altındaki kirişin orta noktası birim şekil değiştirme değerlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.

Tablo 5.5 Kiriş orta noktası birim şekil değiştirme değerleri

	Kiriş orta noktası birim şekil değiştirme değerleri
Başlangıç Anı	1100 $\mu\epsilon$
1 gün	1124 $\mu\epsilon$
4 gün	1138 $\mu\epsilon$
30gün	1203 $\mu\epsilon$

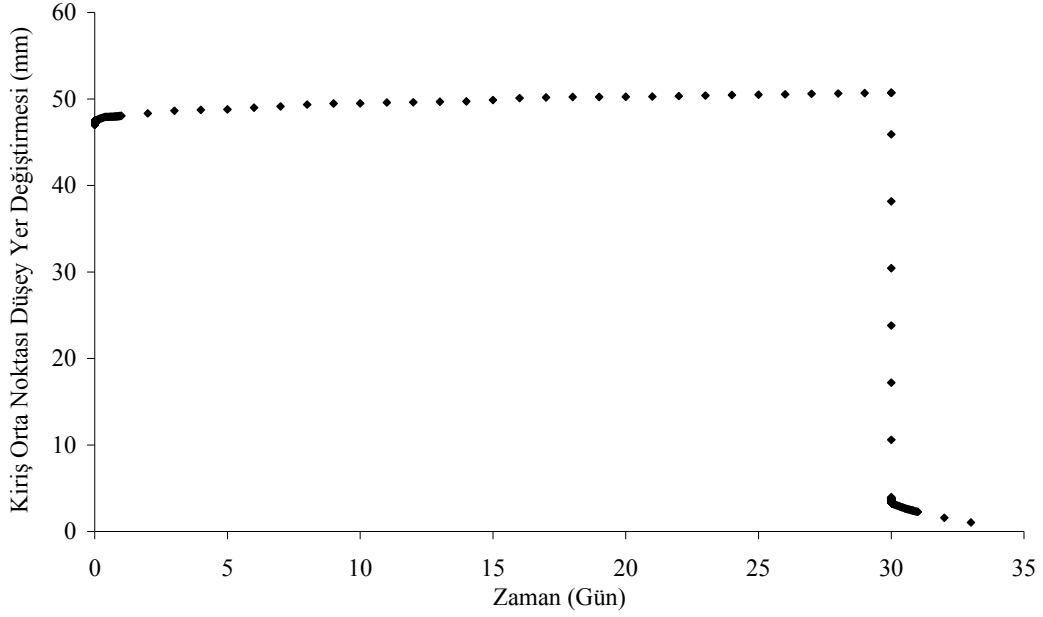
Sünme nedeni ile kiriş orta noktası birim şekil değiştirme değerlerindeki artış başlangıç anı dikkate alınarak hesaplanmış ve artış miktarı birinci günün sonunda %2,2, birinci ayın sonunda ise %9,4 olduğu görülmüştür. Tablo 5.6 ile sabit yük etkisi altındaki kirişin orta noktası düşey yöndeki yer değiştirmesinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.

Tablo 5.6 Kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerleri

	Kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerleri
Başlangıç Anı	47,05 mm
1 gün	48,04 mm
4 gün	48,74 mm
30gün	50,71 mm

Sünme nedeni ile kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesindeki artış başlangıç anı dikkate alınarak hesaplanmış ve artış miktarı birinci günün sonunda %2,1, birinci ayın sonunda ise %7,8 olduğu görülmüştür.

Sünme deneyi için sisteme uygulanan yük 30 gün boyunca sistemde sabit tutulmuş ve deney süresinin tamamlanmasının ardından sistemden kaldırılmıştır. Sisteme uygulanan yükün kaldırılmasından sonraki ilk üç gün için geri dönüş davranışı, kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi verileri kullanılarak incelenmiştir. Kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi; sünme ve yükün sistemden kaldırılması ile birlikte incelenen geri dönüş davranışını kapsayacak şekilde Şekil 5.35 ile sunulmuştur.



Şekil 5.35 Tek açıklıklı kirişin sünme ve geri dönüş davranışı için kiriş orta noktası düşey yer değişirimesi – zaman ilişkisi.

Yük kaldırıldıktan sonraki geri dönüş kısmı için kullanılan zaman aralığı, sünme kısmı için uygulanan zaman aralığı ile aynı şekildedir. Yük kaldırıldıktan 30 sn'ye sonraki yer değışirme değeri 3,72 mm olup deneyin başlangıç anındaki yer değışirme değeri %92,1 kadar azalmıştır. Yük kaldırıldıktan bir saat sonra bu değeri 3,10 mm ve üçüncü günün sonunda 1,04 mm olduğu görülmüştür. Buradan; deneyin başlangıç anındaki yer değışirme değeri birinci saatin sonunda %93,4 ve üçüncü günün sonunda %97,8 kadar azaldığı tespit edilmiştir.

5.5.4 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçeve Sünme Deneyi

Numune deneylerinin yapılmasının deney elemanı boyutu, veri sorunu gibi çeşitli nedenlerden dolayı uygun olmadığı veya yapı davranışını temsil etmek için numune deneylerinin yeterli olmadığı durumlarda tam ölçekli deneyler yapılmalıdır. Yapının gerçek davranışını, imkan olduğu durumlarda tam ölçekli deneyler ile incelemek birçok açıdan önem taşımaktadır.

CTP profiller kullanılarak üretilmiş tek katlı ve tek açıklıklı bir düzlem çerçeve sistemin viskoelastik davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Şekil 5.36 ile sunulan çerçeve sistemin kiriş ve kolon elemanları cam elyaf takviyeli polyeşter reçineli CTP profillerden yapılmıştır. Kirişin akstan aksa boyu 1800 mm ve kolonun zemin seviyesinden kiriş aksına kadar olan yüksekliği 1800 mm olacak şekilde çerçeve sistem oluşturulmuştur. Kolon ve kiriş kesitleri için kullanılan CTP kutu kesitin boyutları; 40 mm x 40 mm ve et kalınlığı 4 mm'dir.



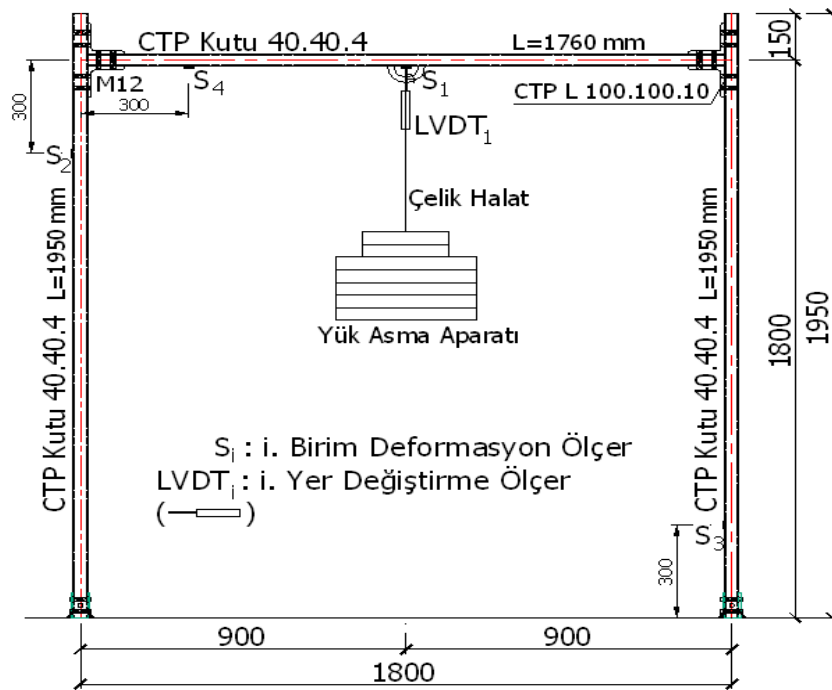
Şekil 5.36 Tek katlı ve tek açıklıklı CTP kutu kesitli düzlem çerçeve.

CTP malzemeli kutu kesitli profillerden oluşturulmuş kolon ve kiriş elemanların birleşim bölgesi Şekil 5.37 ile verilmiştir. Kolon – kiriş birleşimi çelik yapılarda sıkça kullanılan bulonlu bir birleşim tipine benzer şekilde yapılmıştır. Kolon – kiriş birleşiminde kirişin alt ve üst kısmına iki adet CTP malzemeli L 100.100.10 korniyer eleman dört adet 8.8 kalitesinde uygun M12 bulonlar kullanılarak bağlanmıştır. Benzer olarak, kiriş ve korniyer elemanlardan oluşan sistem kolonlara dört adet 8.8 kalitesinde uygun M12 bulonlar yardımı ile birleştirilmiştir. Kolon – kiriş bölgesinde kullanılan korniyer elemanlar birleştirdikleri kolon ve kiriş kesitlerini oluşturan kutu profile göre 2,5 kat daha kalın seçilmiştir. Bu şekilde, düşük yükler altında birleşim davranışının yarı – rijit davranıştan uzaklaşması hedeflenmiştir.



Şekil 5.37 Kolon – kiriş birleşimi.

Tek açıklıklı çerçeve sistemin zamana bağlı davranışının incelenmesinde; yer değiştirme ölçümleri için LVDT ve birim deformasyon ölçümleri için birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. LVDT ve birim deformasyon ölçerlerin yerleşimi Şekil 5.38 ile sunulmuştur. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmış ve deney süresince; yer değiştirme – zaman, şekil değiştirme – zaman değişimleri bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir.



Şekil 5.38 Çerçeve geometrisi ve ölçüm aletleri yerleşimi.

Deney başlamadan önce tüm birim deformasyon ölçüm kanalları kontrol edilmiş ve deneyin başlaması ile veri alma birlikte başlatılmıştır. Sünme deneyi Şekil 5.39 ile gösterildiği şekilde yapılmıştır.



Şekil 5.39 Viskoelastik davranışı incelenen tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistem.

Çalışmada kullanılan sistem, yer değiştirme kullanım sınır değerleri dikkate alınarak seçilmiştir. ASCE (1984) boyutlandırma kılavuzuna göre yer değiştirme sınır değerlerinin; düzgün görüntü sağlamak için $L/180$, titreşim hassasiyeti bulunan yapılar için ise $L/400$ alınması önerilmektedir. Burada, L kiriş elemanının boyudur. Eurocomp (1996) boyutlandırma kılavuzuna göre yer değiştirme sınır değeri; yükün uygulandığı an için $L/300$ olarak verilmiştir. Eurocomp (1996)'da uzun süreli yükler altındaki davranış için; bu sınır değerinin %20'lik bir tolerans ile sağlanması önerilmektedir.

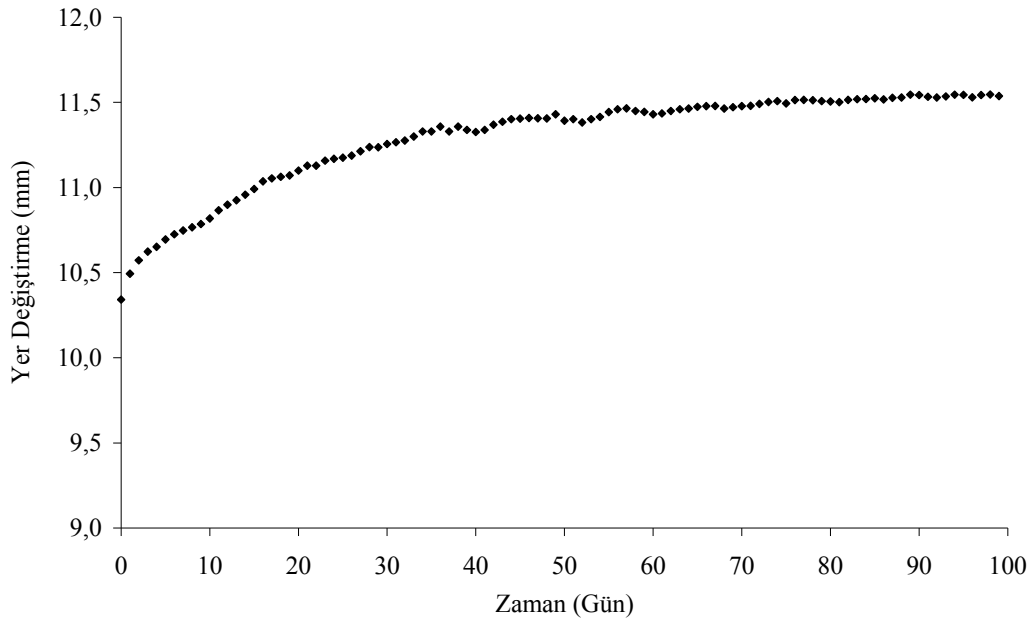
Deney çalışmasında, tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve kirişinin kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi için ASCE (1984) ile verilen $L/180$ değeri göz önüne alınmıştır. Buna göre; çerçeve kirişinin orta noktasından yükleme yapılmış ve çerçeve kirişinin orta noktasının düşey yer değiştirme değeri deneyin başlangıç

anında 10,34 mm'dir. Çerçeve kirişinin yüklenmesi ile birlikte çerçeve kirişi orta noktası gerilme değeri 21,6 MPa'dır. Bank (2006), CTP profiller ile oluşturulmuş sistemlerin, taşıyabileceği en büyük gerilmenin %10 – %20'sini aşmayacak gerilmeler altında kullanılmasını önermektedir. Çalışmada, tek açıklıklı çerçeve kirişinin orta noktasındaki gerilme maksimum gerilmenin %5'i olup Bank (2006)'nın önerdiği sınır değerler aşılmamıştır.

Sisteme uygulanan sabit yük etkisi altında viskoelastik davranış 100 gün için araştırılmıştır. Bank ve Mossallam (1992) tarafından önerilen zaman aralıkları dikkate alınarak elde edilen veriler kaydedilmiştir. Deney okuması için; ilk saat her 10 saniyede bir veri alınmış, bunu takip eden ilk 23 saat için ise her saat başı veri okuması yapılmıştır. Deney süresi olan 100 günlük sürenin sonuna kadar ise günde bir veri okuması alınmıştır.

5.5.4.1 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçeve Sünme Deneyi Sonuçları

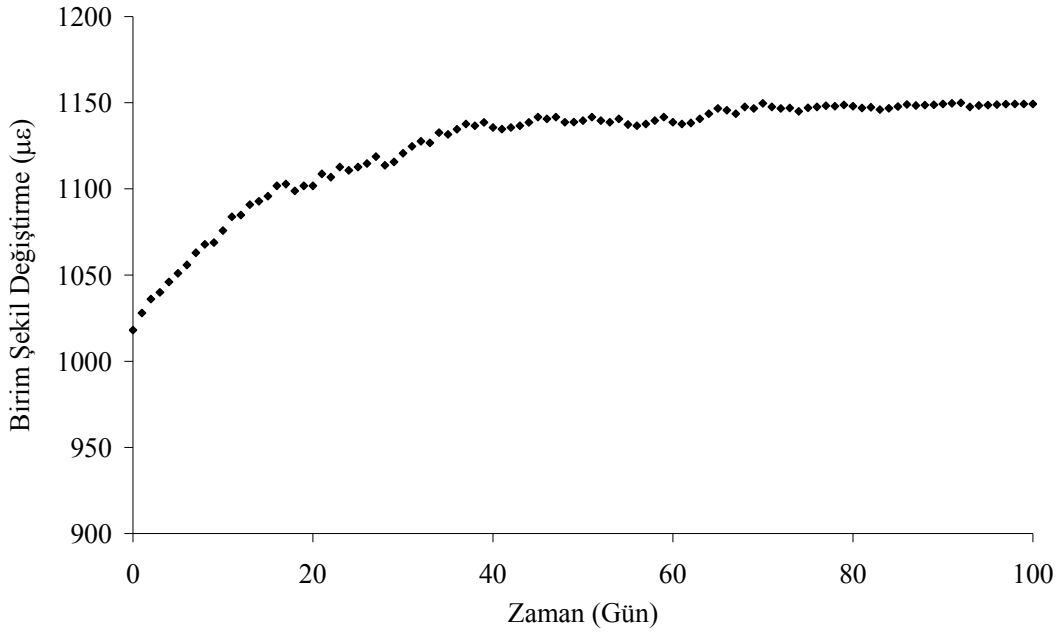
Tek açıklıklı düzlem çerçeve sistemin sünme deneyi sonucunda elde edilen kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi Şekil 5.40 ile sunulmuştur.



Şekil 5.40 Kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

Tek açıklıklı viskoelastik malzemeli çerçeve sistemin kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerleri; başlangıç anında 10,34 mm, 30 gün sonunda 11,25 mm ve 100 gün sonunda 11,53 mm olarak elde edilmiştir. Tek açıklıklı çerçeve sistemin kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerlerindeki artışın; 30 gün sonunda %8,8 ve 100 gün sonunda %11,5 olduğu görülmüştür.

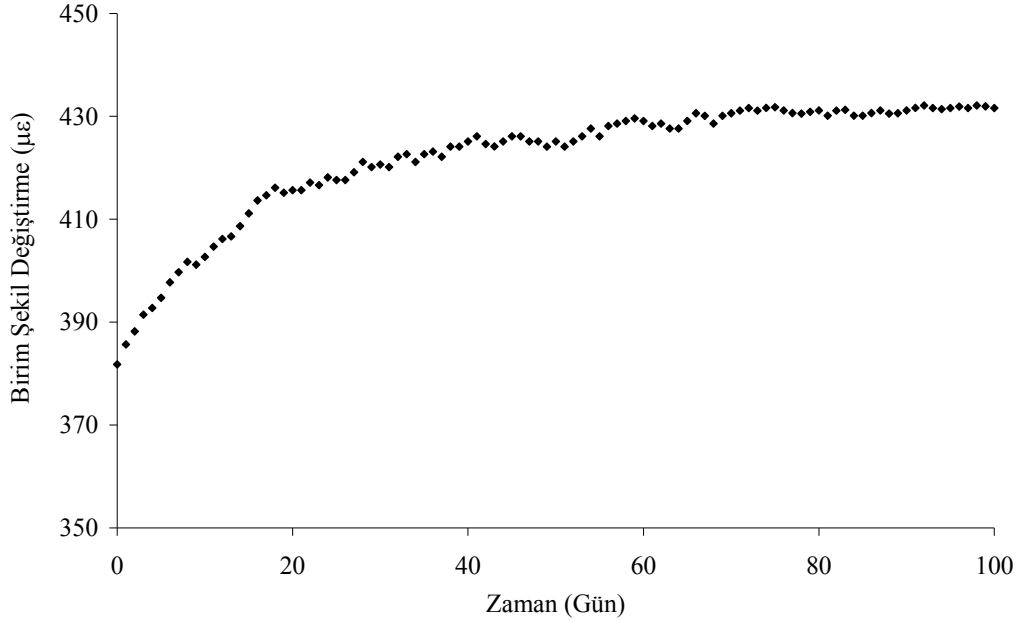
Tek açıklıklı çerçeve sistemin sünme deneyi sonucunda çeşitli noktalar için birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri elde edilmiştir. Tek katlı ve tek açıklıklı çerçevede; S_1 birim deformasyon ölçeri kiriş açıklığının orta noktasına, S_2 birim deformasyon ölçeri çerçevenin sol kolonunun kolon – kiriş birleşimi merkezine göre 30 cm altına ve S_3 birim deformasyon ölçeri çerçevenin sağ kolonuna ait taban levhasının 30 cm üzerine Şekil 5.38’de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir. Buna göre; S_1 , S_2 ve S_3 birim deformasyon ölçerleri ile elde edilen birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri sırasıyla; Şekil 5.41 – Şekil 5.43 ile verilmiştir.



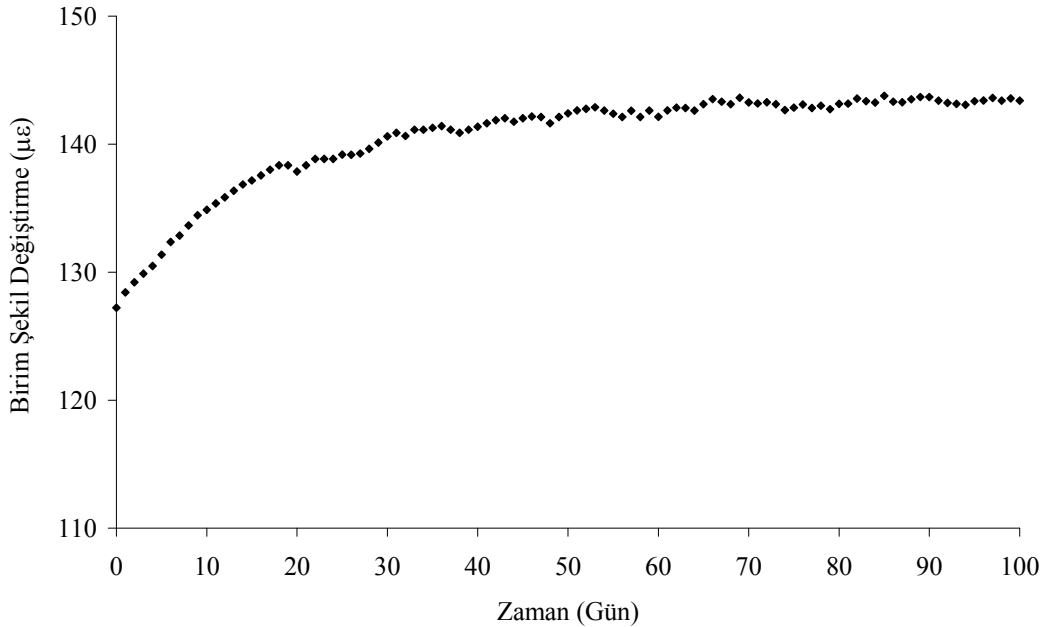
Şekil 5.41 Kiriş orta noktası S_1 birim deformasyon ölçeri şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Tek açıklıklı düzlem çerçeve sistemin kiriş orta noktası S_1 birim deformasyon ölçerinden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri; başlangıç anında 1018 µε, 30 gün sonunda 1121 µε ve 100 gün sonunda 1149 µε’dir. Tek açıklıklı düzlem çerçeve

sistemin giriş orta noktası S_1 birim deformasyon ölçerinden elde edilen birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; 30 gün sonunda %10,1 ve 100 gün sonunda %12,9 olmuştur.



Şekil 5.42 S_2 birim deformasyon ölçeri birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.



Şekil 5.43 S_3 birim deformasyon ölçeri birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Tek açıklıklı düzlem çerçeve sistemin S_2 birim deformasyon ölçerinden birim şekil değiştirme değerleri; başlangıç anında $382 \mu\epsilon$ ve 100 gün sonunda $432 \mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Tek açıklıklı çerçeve sistemin S_3 birim deformasyon ölçerinden birim elde edilen şekil değiştirme değerleri ise; başlangıç anında $127 \mu\epsilon$ ve 100 gün sonunda $143 \mu\epsilon$ 'dir. Tek açıklıklı çerçevenin S_2 ve S_3 birim deformasyon ölçerlerinden 100 gün sonunda elde edilen şekil değiştirme artışları sırasıyla; %13,1 ve %12,6'dır.

Deneyin başlangıç anında, S_4 birim deformasyon ölçeri ile çok küçük birim şekil değiştirme değeri elde edilmiştir. Bunun nedeni, kolon – kiriş birleşiminin rijite yakın davranış göstermesi ve birim deformasyon ölçerin yerleştirildiği noktanın kolon – kiriş birleşiminin rijit olarak modellenmesi ile çözümünden elde edilen moment sıfır noktası olmasıdır. Kolon – kiriş birleşiminin bu davranışı; sisteme uygulanan yük seviyesinin düşük olması ve birleşimde kullanılan korniyer kesitlerinin kolon – kiriş kesitlerine göre daha kalın seçilmesi ile sağlanmıştır.

5.5.5 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistem Sünme Deneyi

Viskoelastik davranışı incelemek üzere hiperstatik bir düzlem kafes sistem hazırlanmıştır. Kafes sistemin tüm çubuk elemanları CTP malzemeli L 50.50.6 korniyer profilleri kullanılarak oluşturulmuştur. Dikme, üst başlık ve alt başlık çubuklarında çift korniyer, çapraz elemanlarda ise tek korniyer kullanılmıştır. Kafes sistemde çubukların birleştiği düğüm noktalarında bulunan birleşim levhaları 10 mm kalınlığında olup St-37 malzemedan üretilmiştir. Birleşim levhaları, her düğüm noktası için ayrı ayrı tasarlanmış ve levha boyutları ile bulon delikleri birleşime özel şekilde hazırlanmıştır. Tüm çubuklar birleşim levhalarına bulonlu şekilde birleştirilmiştir.

Kafes sistem oluşturulurken mesnet levhası güçlü duvara Şekil 5.44 ile görüldüğü gibi sabitlenmiştir. Sünme deneyi, mesnet yer değiştirmesi veya titreşimi gibi durumlardan etkileneceğinden mesnet levhasının güçlü duvara sabitlenmesi birçok kez kontrol edilmiştir. Kafes sistem imal edildikten sonra, mesnet levhasına vinç

yardımı ile monte edilmiştir. Kafes sistem, güçlü duvara monte edilmiş mesnet levhasına özel pim elemanlar kullanılarak sabit mesnet oluşturacak şekilde birleştirilmiştir. Kafes sistem Şekil 5.44 ile sunulmuştur.

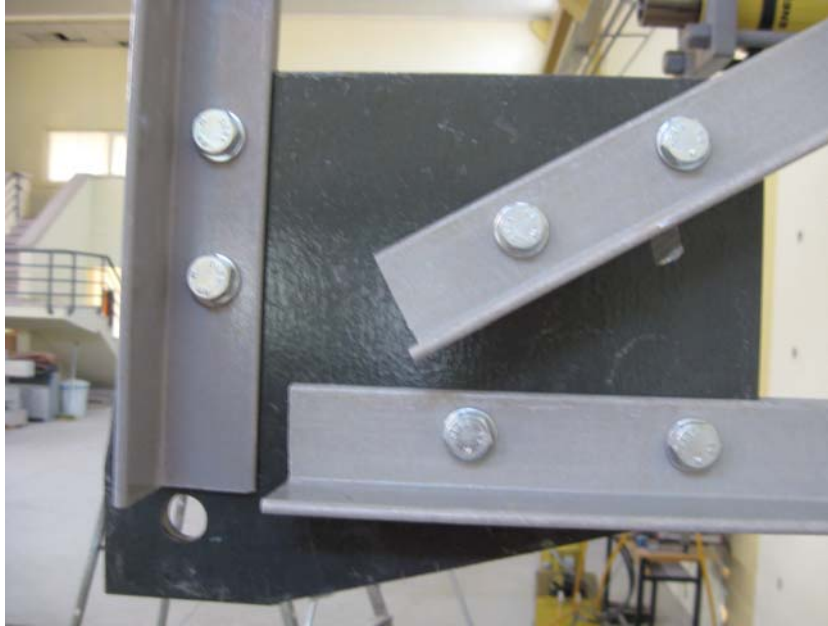


Şekil 5.44 Kafes sistem.

Şekil 5.45 ve Şekil 5.46 ile kafes sistemin düğüm noktalarından bazıları verilmiştir. Deney sisteminde birleşim levhaları için; 8.8 kalitesinde, uygun M12 bulonlar kullanılmıştır. Düğüm noktaları oluşturulurken, çelik levhalar ile CTP profiller çelik bulonlar yardımıyla birleştirilmiştir. Bu nedenle, bulonlar arası mesafeler ve bulonlar arası yük aktarımı sadece çelik malzemeden yapılmış klasik bir birleşim elemanındaki yük aktarımından bir miktar farklıdır. Çalışmada, bulonlar arası mesafeler belirlenirken bu durum dikkate alınmıştır. CTP profillerin hesap ve boyutlandırılması için uluslararası kabul görmüş bir yönetmelik bulunmadığından dolayı bulonlar arası mesafe Bank (2006)'nın çalışmasında verilen sınır değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Buna göre; deney sisteminde yük doğrultusuna paralel yönde kullanılan bulonlar arası en küçük mesafe 80 mm, dış kısımdaki bulonların profilin dışına olan mesafesi 65 mm'dir.

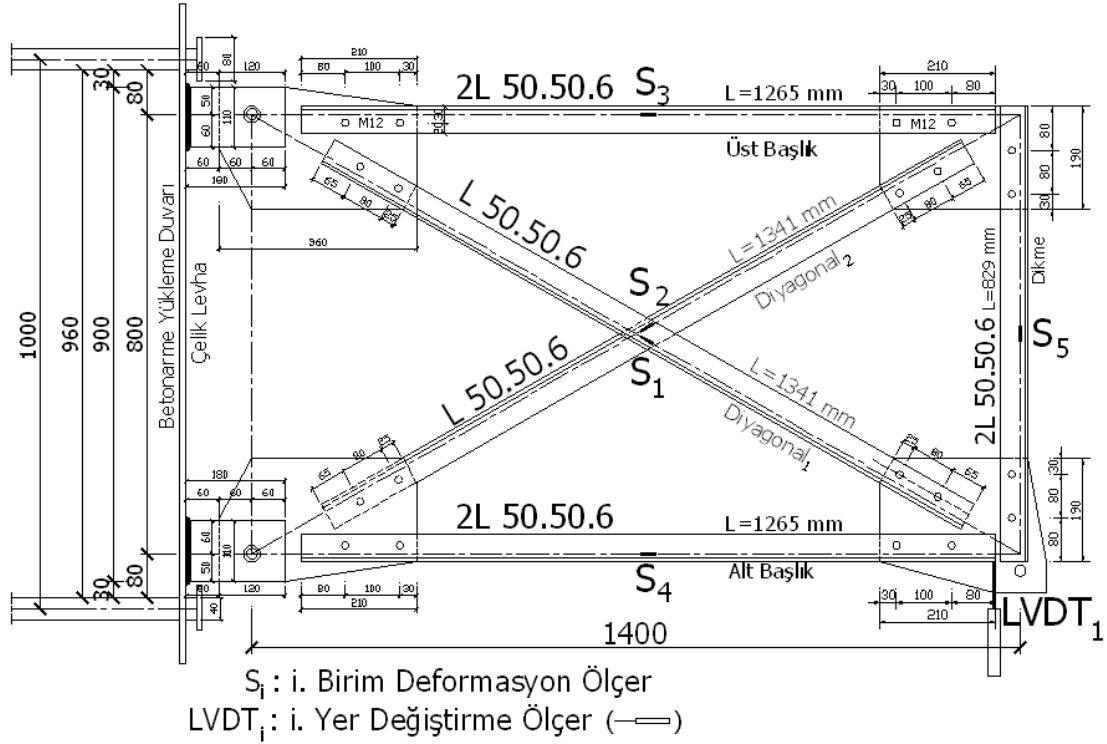


Şekil 5.45 Kafes sistem üst düğüm noktası ve birleşim levhası.



Şekil 5.46 Kafes sistem alt düğüm noktası ve birleşim levhası.

Çalışmada, kafes sistemi oluşturan çubuk elemanlara birim deformasyon ölçerler bağlanmış ve çubuklardaki viskoelastik davranış incelenmiştir. Kafes sistem için LVDT ve birim deformasyon ölçerlerin yerleşimi Şekil 5.47 ile sunulmuştur.

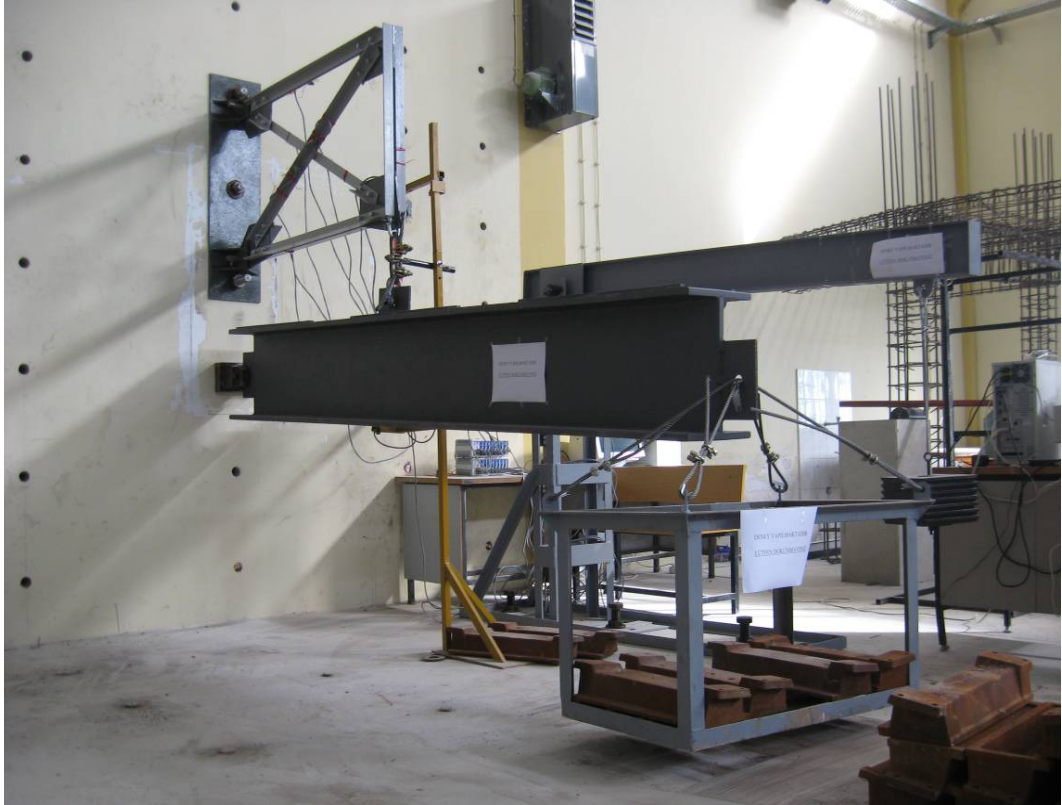


Şekil 5.47 Viskoelastik malzemeli kafes sistem için ölçüm düzeni ve yerleşimi.

CTP profillerden yapılmış kafes sistem ve kaldıraç görevi gören I kesitli profil sistem ile yük asma sepeti Şekil 5.48’de verilmiştir. I kesitli profil sistem, çelik levhaların birbirlerine sürekli kaynak ile birleştirilmesiyle oluşturulmuş olup kesit yüksekliği 446 mm, kesit kalınlığı 23 mm ve başlık genişliği 300 mm’dir. I kesitli çelik profil, güçlü duvara özel olarak hazırlanmış bir mesnet aparatı kullanılarak mafsallı bir şekilde monte edilmiştir. Yük sepeti ise istenilen yükleri aktarmak üzere tasarlanmış olup zati ağırlığı 39,18 kg’dır. Yük sepetinin içerisinde yer alan ağırlıklar çelik malzemeden yapılmış özel kurşun kalıpları olup ortalama olarak 28,50 kg ağırlığındadır.

CTP profiller ile oluşturulmuş sistemlerin, taşıyabileceği en büyük gerilmenin %10 – %20’sini aşmayacak gerilmeler altında çalıştırılması önerilmektedir (Bank, 2006). Bunun nedeni; CTP profiller ile oluşturulmuş sistemlerin kullanım sınır değerlerine düşük gerilme seviyeleri altında ulaşabilmeleri, boyutlandırma sırasında yüksek güvenlik faktörleri kullanılması ve CTP profillerin birleşimlerinin hassas olmasıdır. Bu nedenle; viskoelastik malzemeli CTP profiller ile oluşturulmuş kafes sisteme Şekil 5.48 ile gösterildiği şekilde 10 kN sabit yük uygulanmış, yük seviyesi

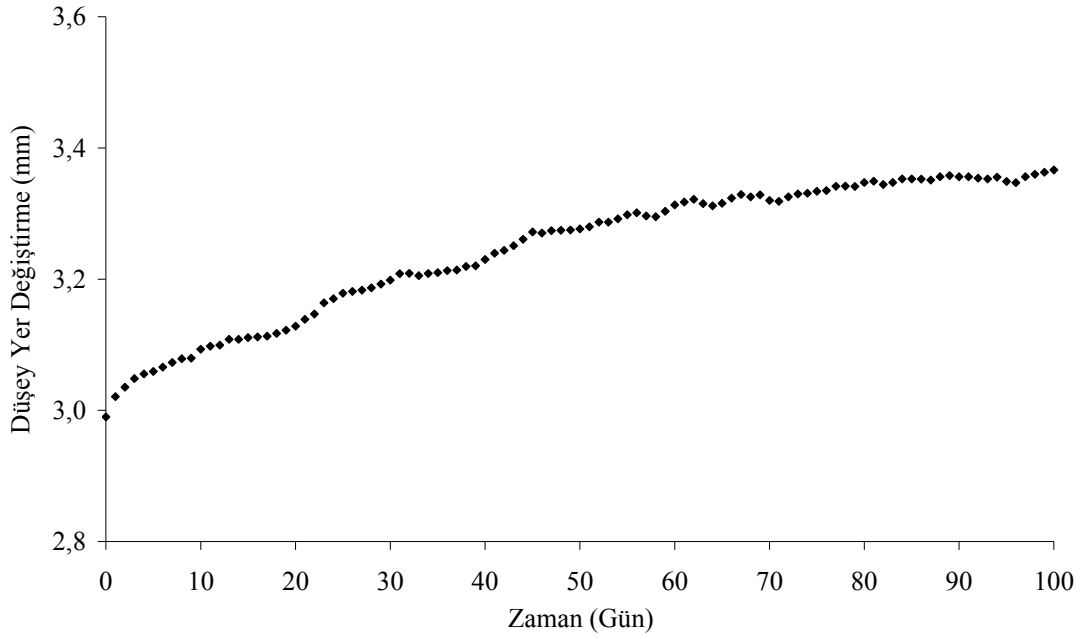
LVDT ve şekil değiştirme ölçerler ile kontrol edilmiştir. Viskoelastik davranışın incelenmesi için deney başlamadan önce tüm birim deformasyon ölçüm kanalları sıfırlanmış ve deneyin başlaması ile veri alma birlikte başlatılmıştır. Sisteme uygulanan sabit yük etkisi altındaki viskoelastik davranış 100 gün için araştırılmış ve belirli zaman aralıklarıyla elde edilen veriler kaydedilmiştir. Deney okumaları için; ilk saat her 10 saniyede bir veri alınmış, bunu takip eden ilk 23 saat için ise her saatte bir veri okuması yapılmıştır. 100 gün sonuna kadar her gün veri kaydedilmiştir.



şekil 5.48 Viskoelastik davranışı incelenen kafes sistem.

5.5.5.1 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistem Sünme Deneyi Sonuçları

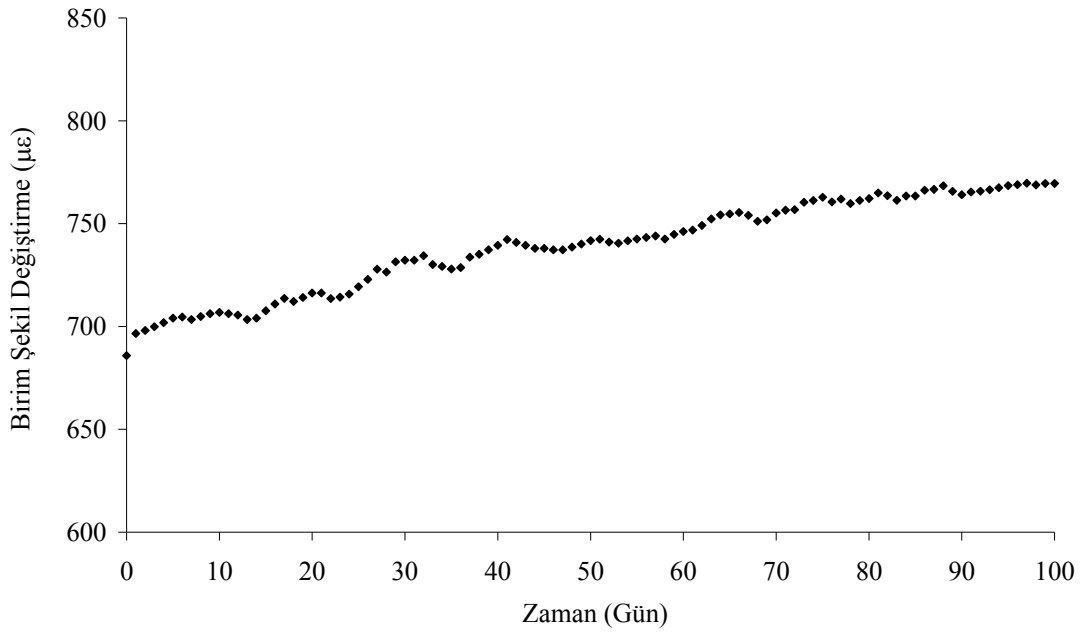
Viskoelastik malzemeli hiperstatik düzlem kafes sistemin sünme deneyi sonucu elde edilen bir numaralı diyagonal, alt başlık ve dikme elemanının birleştiği düğüm noktasının düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi şekil 5.49 ile sunulmuştur.



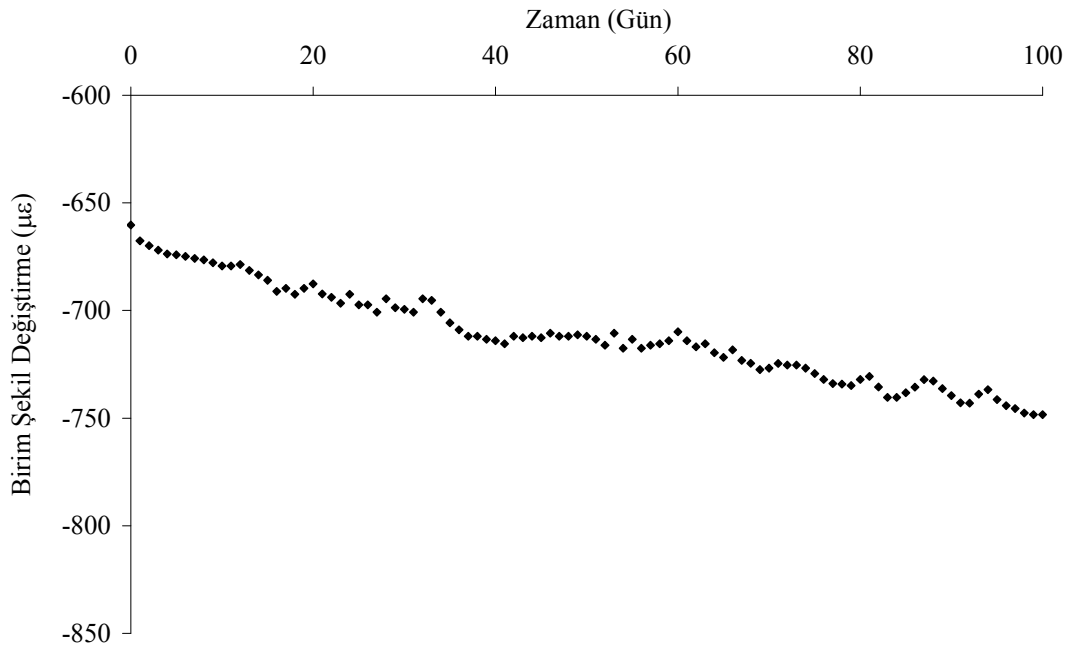
Şekil 5.49 Kafes sistem uç noktası düşey yer değıştirmesi – zaman ilişkisi.

Viskoelastik malzemeli kafes sistemin bir numaralı diyagonal, alt başlık ile dikme elemanının birleştiği düğüm noktasının düşey yer değıştirme değeri başlangıç anında 2,98 mm ve 100 gün sonunda 3,37 mm olarak elde edilmiştir. Kafes sistemin yer değıştirme değeriindeki artışın 100 gün sonunda %13,1 olduğu görülmüştür.

Viskoelastik malzemeli kafes sistemin ölçüm düzeni ve yerleşimi Şekil 5.47’de verilmiştir. Sünme deneyi sonucu bir numaralı diyagonal, iki numaralı diyagonal, üst başlık, alt başlık ve dikme çubukları için; S_1 , S_2 , S_3 , S_4 ve S_5 birim deformasyon ölçerleri ile elde edilen şekil değıştirme – zaman ilişkileri sırasıyla; Şekil 5.50 – Şekil 5.56 ile sunulmuştur.



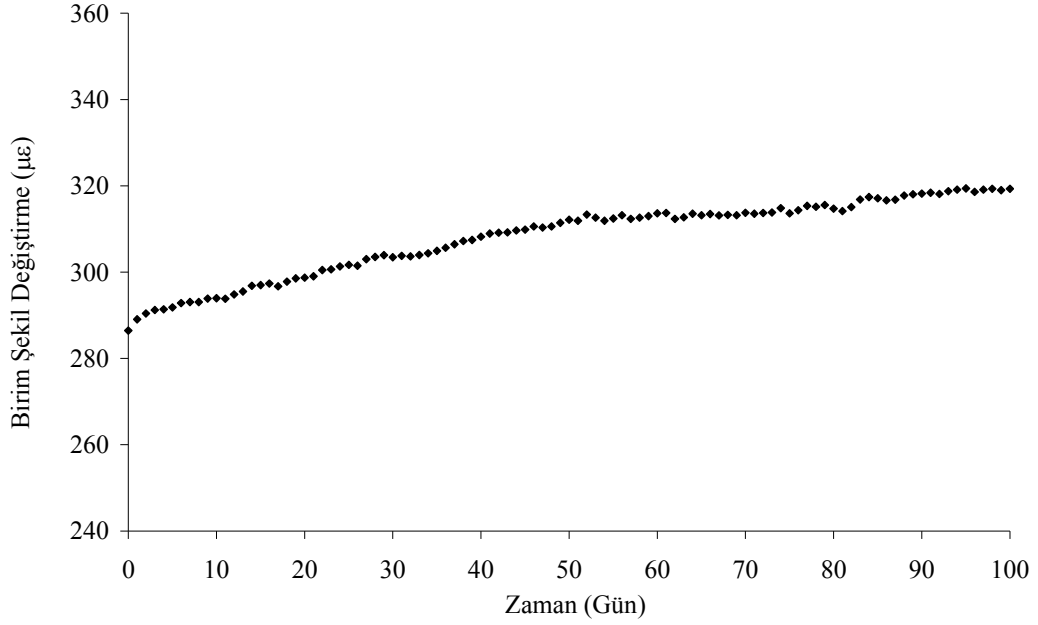
Şekil 5.50 Bir numaralı diyagonal çubuk elemanı için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.



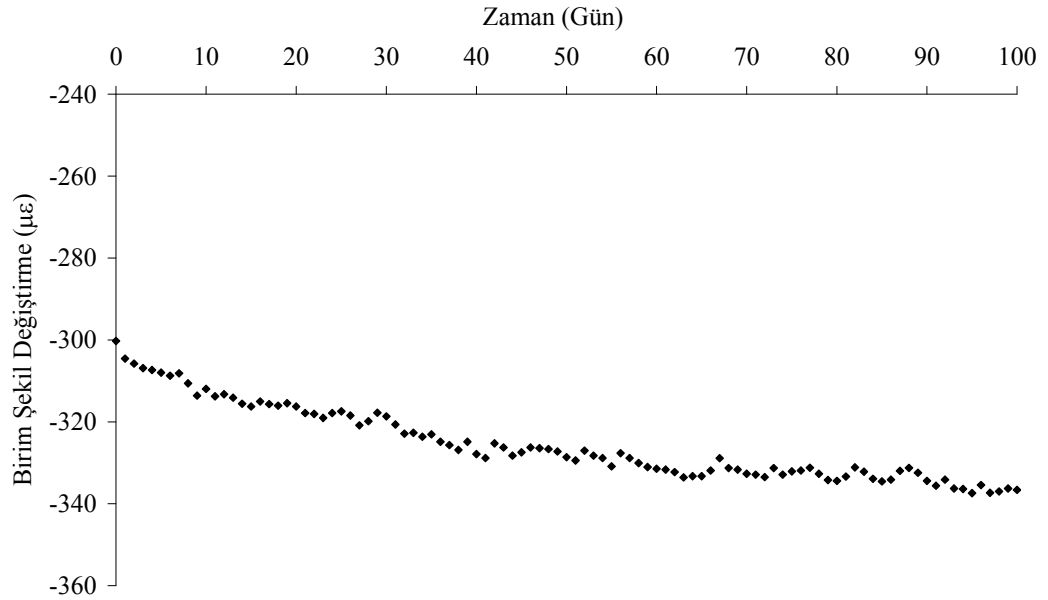
Şekil 5.51 İki numaralı diyagonal çubuk elemanı için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.

Kafes sistemin bir numaralı diyagonalindeki S_1 birim deformasyon ölçerinden birim şekil değişirme değerleri; başlangıç anında $686 \mu\epsilon$ ve 100 gün sonunda $770 \mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Kafes sistemin iki numaralı diyagonalindeki S_2 birim deformasyon ölçerinden birim şekil değişirme değerleri; başlangıç anında $660 \mu\epsilon$ ve

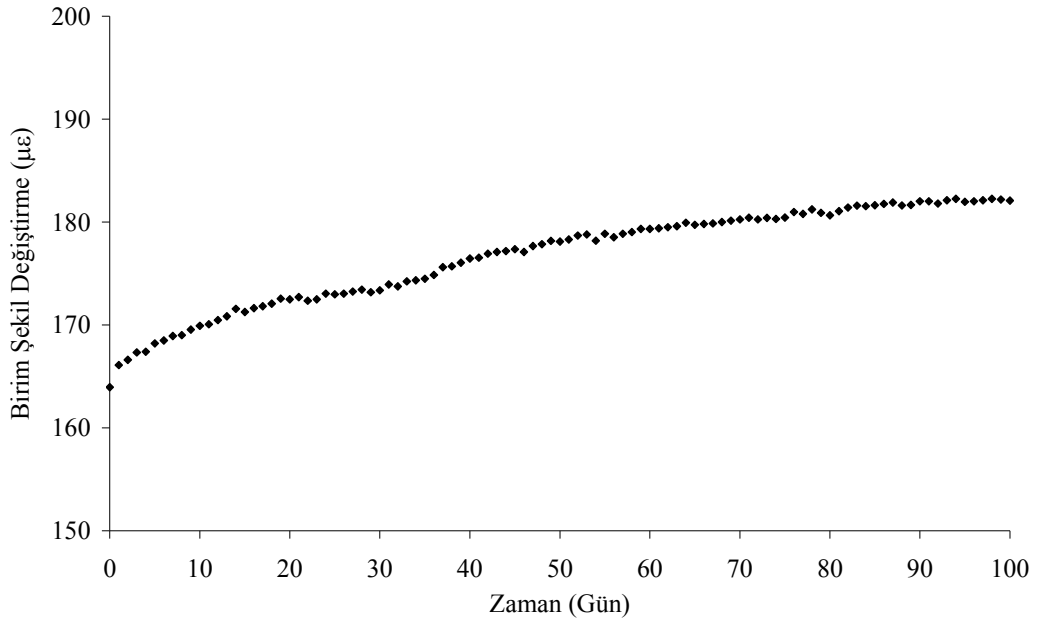
100 gün sonunda 748 $\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Kafes sistemin sünme deneyi sonucu bir ve iki numaralı diyagonalleri için birim şekil değıştirme değerlerindeki artış oranları 100 gün sonunda sırasıyla; %12,2 ve %13,3'tür.



Şekil 5.52 Üst başlık çubuk elemanı için birim şekil değıştirme – zaman ilişkisi.



Şekil 5.53 Alt başlık çubuk elemanı için birim şekil değıştirme – zaman ilişkisi.



Şekil 5.54 Dikme çubuk elemanı için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.

Kafes sistemin üst başlık, alt başlık, dikme çubuklarındaki; S_3 , S_4 , S_5 birim deformasyon ölçerinden birim şekil değişirme değerleri başlangıç anında sırasıyla; 287 $\mu\epsilon$, 300 $\mu\epsilon$, 164 $\mu\epsilon$ ve 100 gün sonunda sırasıyla; 320 $\mu\epsilon$, 336 $\mu\epsilon$, 182 $\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Viskoelastik malzemeli kafes sistemin sünme deneyi sonucu üst başlık, alt başlık ve dikme çubuklarının birim şekil değişirme değerlerindeki artış 100 gün sonunda sırasıyla; %11,5, %12,0 ve %11,0 olarak elde edilmiştir.

BÖLÜM ALTI

CTP PROFİL KULLANILAN ÇUBUK SİSTEMLERİN VISKOELASTİK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

6.1 Giriş

Bu bölümde; Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) profillerden yapılmış çubuk sistemlerin gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerinin analitik ve deneysel olarak incelenmesiyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmanın beşinci bölümünde yer alan ve deneysel kısımda sunulan tek açıklıklı çerçeve ile kafes sistemin zamana bağlı davranışı, çalışmanın dördüncü bölümünde yer alan analitik çözüm yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi, CTP profiller ile hazırlanmış taşıyıcı çubuk sistemlerin araştırılmasında kullanılmıştır. Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi için sünme fonksiyonlarının katsayıları; basit kiriş ve uzun süreli aksenal çekme numune deneylerinden elde edilmiştir. Çerçeve ve kafes sistemlerin incelenmesinde, Kaya (1973) ile Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınarak Matlab (2005)'de hazırlanmış ve akış şemaları Ek-5 ile Ek-6'da verilmiş olan programlar kullanılmıştır. Tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistem için elde edilen deney verileri ile analitik çözüm sonuçları karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur.

6.2 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçevenin Sünme Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Şekil 5.39 ile verilen tek katlı ve tek açıklıklı viskoelastik malzemeli düzlem çerçeve sistemin tüm elemanları kutu kesitli CTP profil olup boyutları; 40 mm x 40 mm ve et kalınlığı 4 mm'dir. Çerçeve kirişinin orta noktasına sabit ağırlıklar kullanılarak 100 gün süresince 450 N sabit yük uygulanmıştır. Çerçeve kirişinin orta noktasının düşey yer değiştirme değeri başlangıç anı için 10,34 mm'dir. Tek

açıklıklı düzlem çerçeve ile ilgili diğer tüm bilgiler beşinci bölümde deney çalışması ile ilgili kısımda verilmiştir.

Tek açıklıklı viskoelastik malzemeli düzlem çerçeve sistemin viskoelastik davranışının incelenmesi için; Kaya (1973), Kural (1977) tarafından geliştirilmiş ve denklem (6.1) ile sunulmuş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılmıştır.

$$\sigma = \varepsilon \left\{ B_0(\varepsilon) + \sum_{i=1}^n B_i(\varepsilon) g_i(t) \right\} \quad (6.1)$$

Burada; σ gerilme, ε şekil değiştirme, $B_i(\varepsilon)$ deformasyona bağlı mekanik özellikleri gösteren fonksiyonlar ve $g_i(t)$ deformasyon için seçilen zamana bağlı fonksiyonlardır. Denklem (6.1)'de kullanılan viskoelastik malzeme fonksiyonları; denklem (6.2) ve denklem (6.3) ile verilmiştir (Kaya, 1973; Kural, 1977).

$$B_0(\varepsilon) = E - k_0 |\varepsilon|^{p_0-1} \quad g_0(t) = 1 \quad (6.2)$$

$$B_1(\varepsilon) = k_1 |\varepsilon|^{p_1-1} \quad g_1(t) = e^{-t/\lambda_1} \quad (6.3)$$

Burada; $B_0(\varepsilon)$, $B_1(\varepsilon)$ deformasyona bağlı mekanik özellikleri gösteren fonksiyonları; k_0 , k_1 malzemenin deformasyonuna bağlı mekanik özelliklerini gösteren katsayıları; E elastisite modülünü; $g_0(t)$, $g_1(t)$ deformasyon için seçilen zamana bağlı fonksiyonları; ε şekil değiştirme; t zaman ve λ_1 malzemenin zamana bağlı özelliklerini gösteren katsayıları ifade eder.

Çalışmada, viskoelastik malzemeli tek açıklıklı kiriş deneyinden elde edilen gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınarak viskoelastik malzeme fonksiyonlarını gösteren denklem (6.2) ile denklem (6.3)'de sunulan katsayılar belirlenmiş ve bu katsayılar dikkate alınarak tek açıklıklı viskoelastik malzemeli düzlem çerçeve sistemin analitik çözümü yapılmıştır.

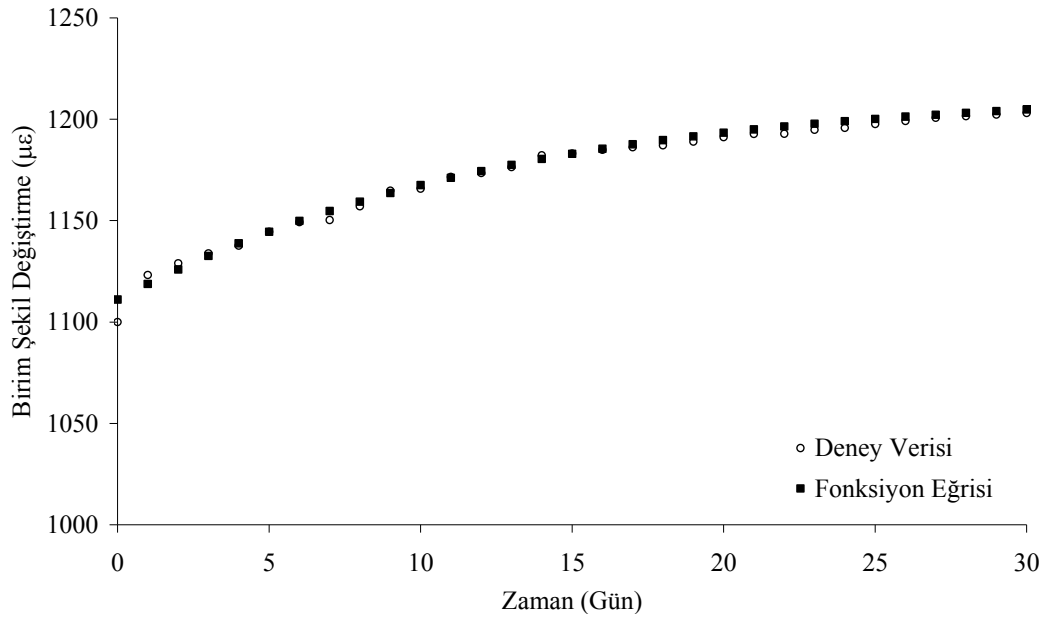
6.2.1 Analitik Çözüm için Kullanılacak Fonksiyon Katsayılarının Tek Açıklıklı Kiriş Deneyi Verileri Kullanılarak Hesaplanması

Çalışmada, Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisinde yer alan fonksiyonlara ait katsayılar; viskoelastik malzemeli tek açıklıklı kiriş deneyi verileri kullanılarak elde edilmiştir. Tek açıklıklı kiriş ve tek açıklıklı düzlem çerçeve, CTP kutu profiller kullanılarak yapılmıştır. Her iki deney çalışmasında kullanılan CTP profillerin boyutları; 40 mm x 40 mm ve et kalınlığı 4 mm'dir. Bu profiller aynı seri ve stok numarasına sahiptir.

Çalışmada, stasyonier bir sünme durumu dikkate alınmış ve tek açıklıklı CTP kirişe ait deney verileri kullanılmıştır. Bu şekilde; denklem (6.1) ile sunulan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisinin viskoelastik malzeme fonksiyonlarına ait katsayıları belirlenmiştir. Viskoelastik malzeme katsayılarının hesaplanmasında; Matlab (2005) ile doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılmış ve $k_0=3482$, $k_1=3505$, $p_0=1,086$, $p_1=1,101$, $\lambda_1=11,75$ olarak bulunmuştur. Buradan, gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi denklem (6.4) ile elde edilmiştir.

$$\sigma = \varepsilon \left\{ 21058 - 3482|\varepsilon_0|^{0,086} + 3505|\varepsilon_0|^{0,101} e^{-t/11,75} \right\} \quad (6.4)$$

Burada; σ gerilme, ε şekil değiştirme, ε_0 başlangıç anı için şekil değiştirme ve t zamandır. Tek açıklıklı kiriş deneyi verileri ve sünme fonksiyonu ile elde edilen değerler Şekil 6.1 ile sunulmuştur.



Şekil 6.1 Tek açıklıklı kiriş deney verileri ve uygun fonksiyonunun birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Sünme fonksiyonu eğrisi ve tek açıklıklı kiriş deney verileri arasındaki performans değerlendirme ölçütleri; determinasyon katsayısı, düzeltilmiş determinasyon katsayısı ve ortalama karesel hataların karekökü olup Matlab (2005) ile hesaplanmıştır. Buna göre; determinasyon katsayısı R^2 0,9888, düzeltilmiş determinasyon katsayısı 0,9871 ve ortalama karesel hataların karekökü 0,5496'dır (Matlab, 2005). Matlab (2005) ile elde edilen performans değerlendirme ölçütleri dışında, bir başka kontrol kriteri olarak Nash – Sutcliffe (NS) Kriteri (Nash, 1970) kullanılmıştır. NS kriteri, denklem (6.5) ile hesaplanmıştır.

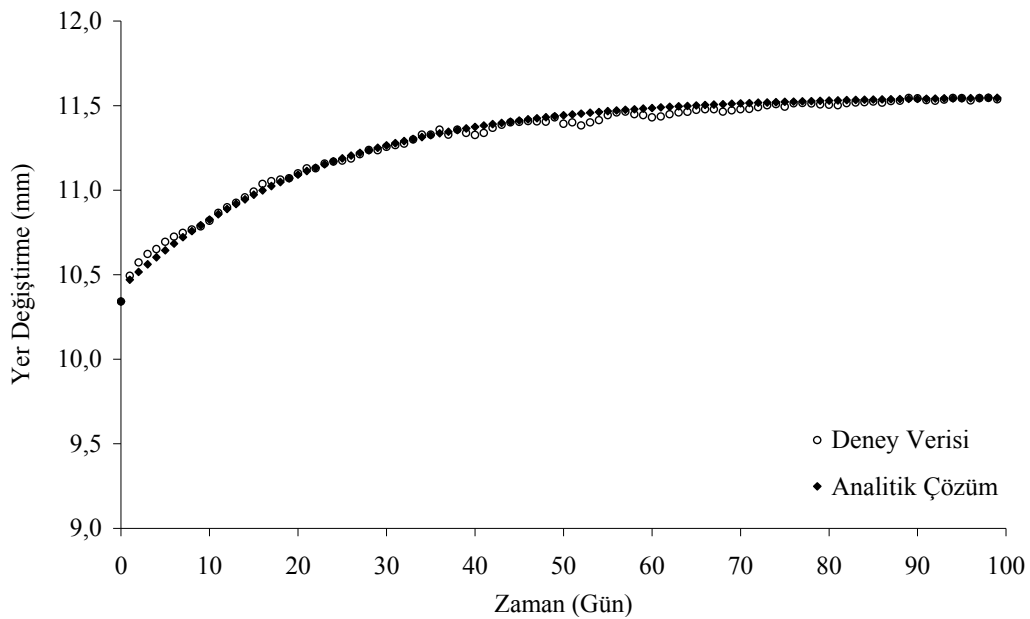
$$NS = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^{n_{obs}} (Q_j^{obs} - Q_j^{sim})^2}{\sum_{j=1}^{n_{obs}} (Q_j^{obs} - \bar{Q}_j^{obs})^2} \right] \times 100 \quad (6.5)$$

Burada; Q_j^{obs} j. deney verisi girdisi, Q_j^{sim} j. fonksiyon verisi girdisi, \bar{Q}_j^{obs} deney verisi girdilerinin ortalaması, n_{obs} ise deney verisi sayısıdır. NS kriteri; $-\infty$ ile %100 arasında değerler alır. Eğer; NS %100 olur ise, fonksiyon verisi girdileri

ile deney verisi girdilerinin mükemmel olarak örtüştüğü anlamına gelir. Çalışmada kullanılan fonksiyon eğrisi için NS kriteri %98,79 olarak hesaplanmıştır.

6.2.2 Tek Katlı ve Tek Açıklıklı Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçevenin Analitik Çözüm ve Deneysel Çalışma Sonuçlarının İncelenmesi

Çalışmada, tek açıklıklı viskoelastik malzemeli düzlem çerçeve sistemin sünme davranışının incelenmesi için, Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen analitik çözüm sonuçları ile beşinci bölümde yer alan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen; yer değiştirme – zaman, şekil değiştirme – zaman ve eğilme momenti – zaman grafikleri bu bölümde incelenmiştir. Deney verileri ve analitik çözüm sonuçları dikkate alınarak kiriş orta noktası düşey yer değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 6.2 ile sunulmuştur.

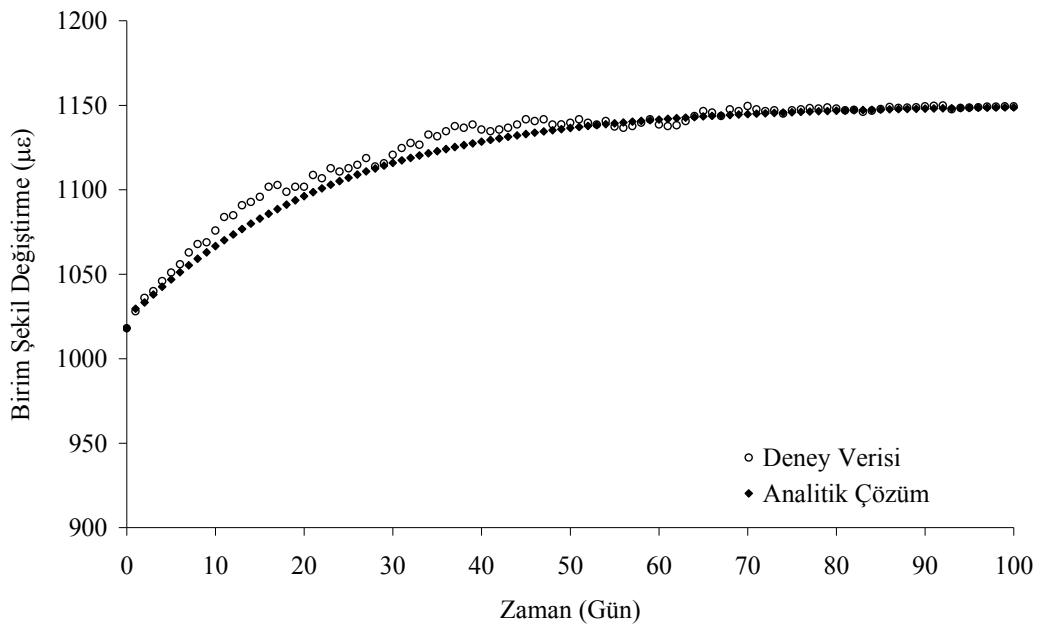


Şekil 6.2 Deney verisi ve analitik çözüm için tek açıklıklı çerçeve sisteminin kiriş orta noktası düşey yer değiştirme – zaman ilişkisi.

Çerçeve kirişi orta noktası düşey yer değiştirme değerlerindeki artış 30 gün sonunda; deney verileriyle %8,8 ve analitik yöntemle %8,9 olarak elde edilmiştir.

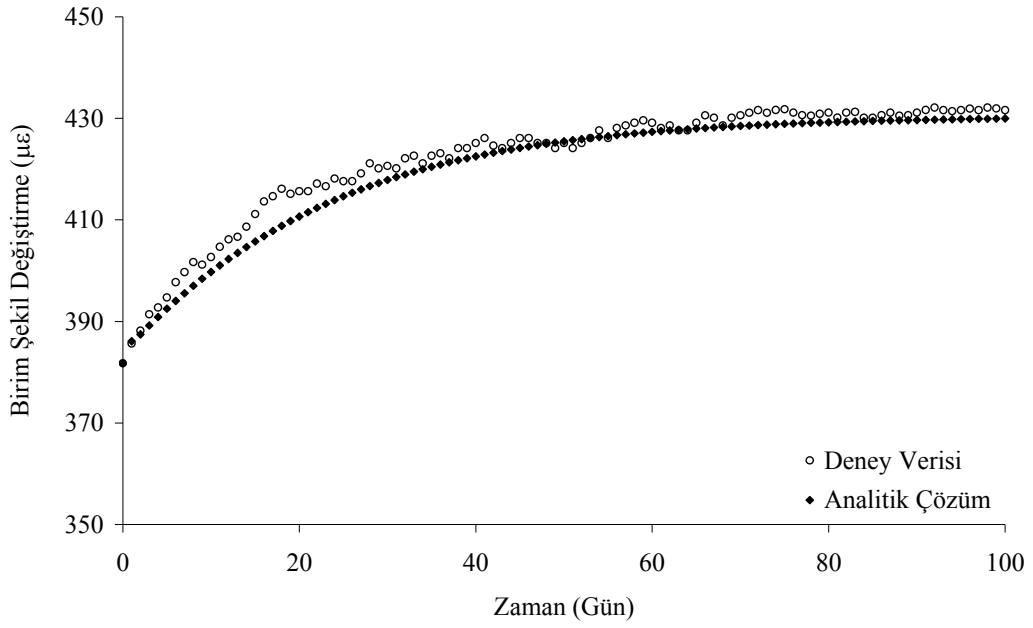
Tek açıklıklı kiriş sünme deneyinde bu artış oranı 30 gün sonunda %7,8'dir. Çerçeve kirişi orta noktası düşey yer değiştirme değerlerindeki artış 100 gün sonunda; deney verileriyle %11,5 ve analitik yöntemle %11,6 olarak bulunmuştur.

Tek açıklıklı çerçevenin kiriş orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi Şekil 6.3 ile sunulmuştur. Şekil değiştirme değerlerindeki artış 30 gün sonunda; deney verileriyle %10,1 ve analitik yöntemle %9,6 olarak elde edilmiştir. Tek açıklıklı kiriş sünme deneyinde bu artış oranı 30 gün sonunda %9,4'tür. Çerçeve kirişi orta noktası birim şekil değiştirme değerlerindeki artış 100 gün sonunda; deney verileriyle %12,9 ve analitik yöntemle %12,8 olarak bulunmuştur.

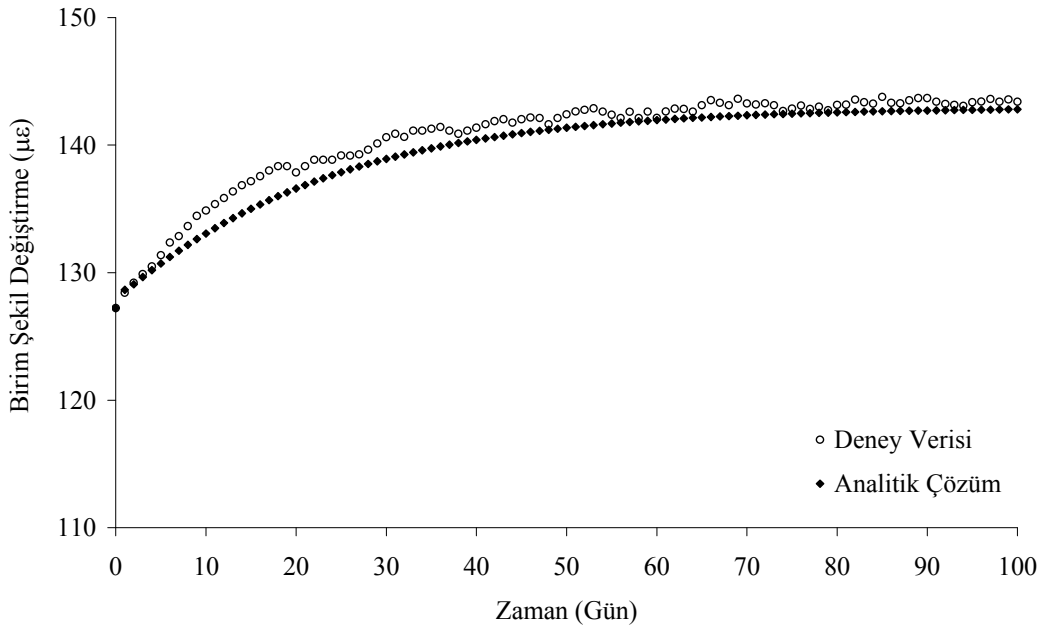


Şekil 6.3 S₁ birim deformasyon ölçeri deney verisi ve analitik çözüm için tek açıklıklı çerçeve sistemin kirişi orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Tek açıklıklı çerçevenin; S₂ birim deformasyon ölçeri sağ kolonun kolon – kiriş birleşiminin 30 cm altına ve S₃ birim deformasyon ölçeri sol kolonun taban levhasının 30 cm üzerine Şekil 5.38 ile verildiği şekilde yerleştirilmiştir. S₂ ve S₃ birim deformasyon ölçerlerinden elde edilen deney verileri ile analitik çözüm sonuçları incelenmiş ve birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri sırasıyla; Şekil 6.4 ve Şekil 6.5 ile sunulmuştur.



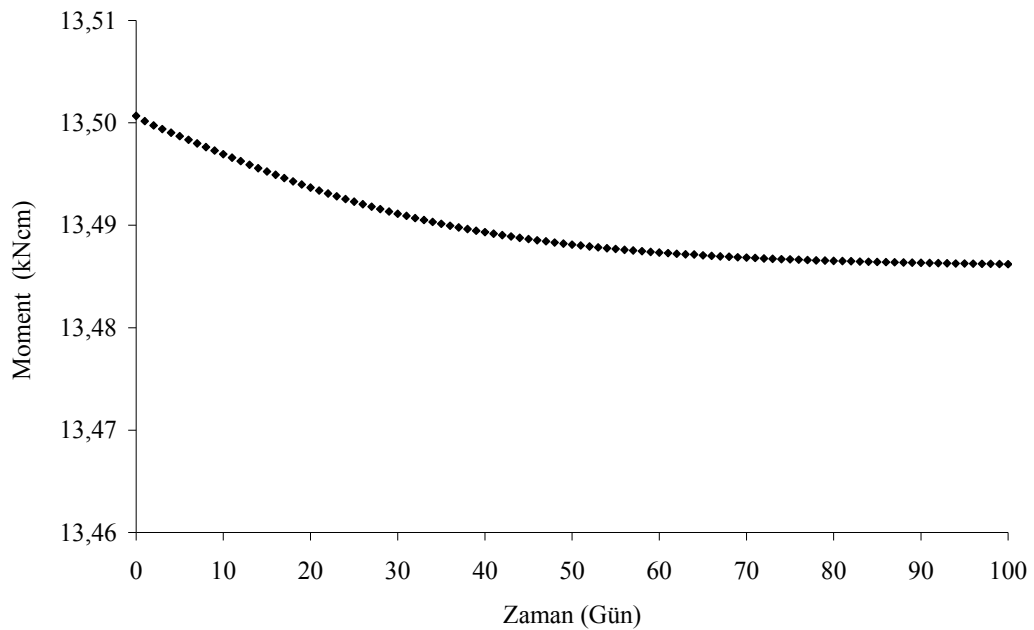
Şekil 6.4 S_2 birim deformasyon ölçeri deney verisi ve analitik çözüm için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.



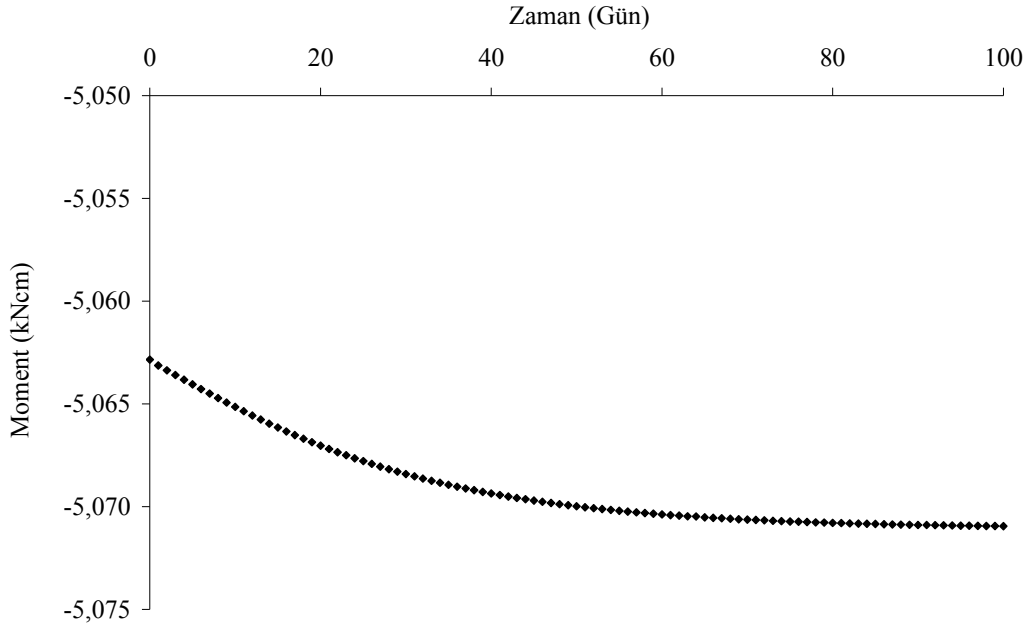
Şekil 6.5 S_3 birim deformasyon ölçeri deney verisi ve analitik çözüm için birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.

Tek açıklıklı çerçevenin S_2 birim deformasyon ölçerinden 100 gün sonunda elde edilen şekil değiştirme artışı %13,1'dir. Analitik yöntem ile bu artış %12,6 olarak bulunmuştur. Çerçevenin S_3 birim deformasyon ölçerinden 100 gün sonunda elde edilen şekil değiştirme artışı %12,6'dır. Analitik yöntem ile bu artış %12,2 olarak elde edilmiştir.

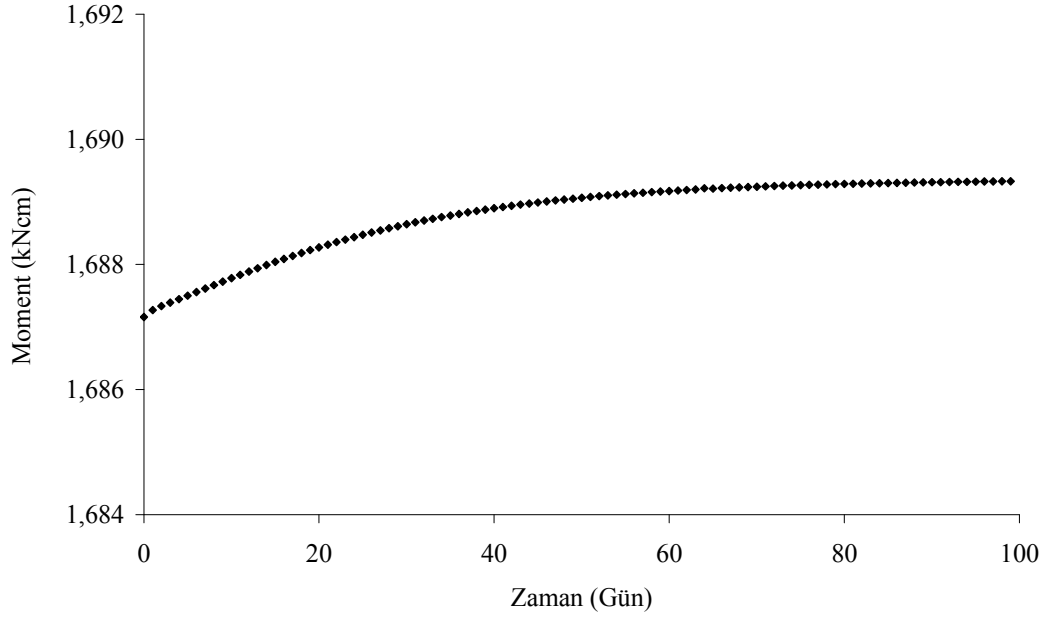
Çalışmada, tek açıklıklı çerçeve sistemin birim şekil değiştirmesi incelenen kesitleri için eğilme momenti – zaman ilişkisi de analitik yöntem ile incelenmiştir. Şekil 5.38 ile verilen tek açıklıklı çerçeve sistemde; kiriş orta noktası, sağ kolonun kolon – kiriş birleşiminin 30 cm altındaki kesiti ve sol kolonun taban levhasının 30 cm üzerindeki kesiti için eğilme momenti – zaman ilişkileri sırasıyla; Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 ile sunulmuştur.



Şekil 6.6 Tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistemin kiriş orta noktası için eğilme momenti – zaman ilişkisi.



Şekil 6.7 Sol kolonun kolon – kiriş birleşiminin 30 cm altındaki kesiti için eğilme momenti – zaman ilişkisi.



Şekil 6.8 Sağ kolonun taban levhasının 30 cm üzerindeki kesiti için eğilme momenti – zaman ilişkisi.

Tek açıklıklı viskoelastik malzemeli çerçeve sistemin birim şekil değiştirmesi incelenen kesitleri için eğilme momenti – zaman ilişkileri incelenmiş ve çerçeve sistemin eğilme momenti değerlerindeki değişimin %1'den küçük olduğu görülmüştür.

6.3 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistemin Sünme Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Şekil 5.44 ile verilen viskoelastik malzemeli hiperstatik düzlem kafes sistemin alt başlık, üst başlık ve dikme çubuk kesitleri CTP 2L 50.50.6, diyagonal çubukları kesitleri ise CTP L 50.50.6'dır. Sistemin alt başlık, dikme ve çekme diyagonalinin birleştiği düğüm noktasına; 10 kN'luk yük 100 gün süresince sabit olarak uygulanmıştır. Viskoelastik malzemeli kafes sistem ile ilgili diğer tüm bilgiler beşinci bölümde, deney ile ilgili kısımda verilmiştir.

Viskoelastik malzemeli kafes sistemin sünme davranışının incelenmesi için; Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş ve denklem (6.6) ile sunulmuş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \sigma \left\{ A_0(\sigma) + \sum_{i=1}^n A_i(\sigma) f_i(t) \right\} \quad (6.6)$$

Burada; σ gerilme, ε şekil değiştirme, $A_i(\sigma)$ malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özelliklerinin gösteren fonksiyonlar ve $f_i(t)$ sünme için seçilen zamana bağlı fonksiyonlardır. Denklem (6.6)'da yer alan sünme fonksiyonları; denklem (6.7), denklem (6.8) ve denklem (6.9) ile verilmiştir (Kaya, 1973; Kural, 1977).

$$A_0(\sigma) = \frac{1}{E} + k_0 |\sigma|^{p_0-1} \quad f_0(t) = 1 \quad (6.7)$$

$$A_1(\sigma) = k_1 |\sigma|^{p_1-1} \quad f_1(t) = 1 - e^{-q_1 t} \quad (6.8)$$

$$A_2(\sigma) = k_2 |\sigma|^{p_2-1} \quad f_2(t) = t \quad (6.9)$$

Burada; $A_0(\sigma)$, $A_1(\sigma)$, $A_2(\sigma)$ malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özelliklerini gösteren fonksiyonlar; σ gerilme; E elastisite modülü; k_0 , k_1 , k_2 malzemenin gerilmeye bağlı mekanik özelliklerini gösteren katsayılar; $f_0(t)$, $f_1(t)$, $f_2(t)$ sünme

için seçilen zamana bağlı fonksiyonlar; t zaman ve q_1 malzemenin zamana bağlı özelliklerini gösteren katsayıdır.

Çalışmada, uzun süreli aksenal çekme numune deneyinden elde edilen şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınarak sünme fonksiyonlarını gösteren denklem (6.7), denklem (6.8) ve denklem (6.9)'a ait katsayılar belirlenmiş ve bu katsayılar dikkate alınarak kafes sistem çözülmüştür.

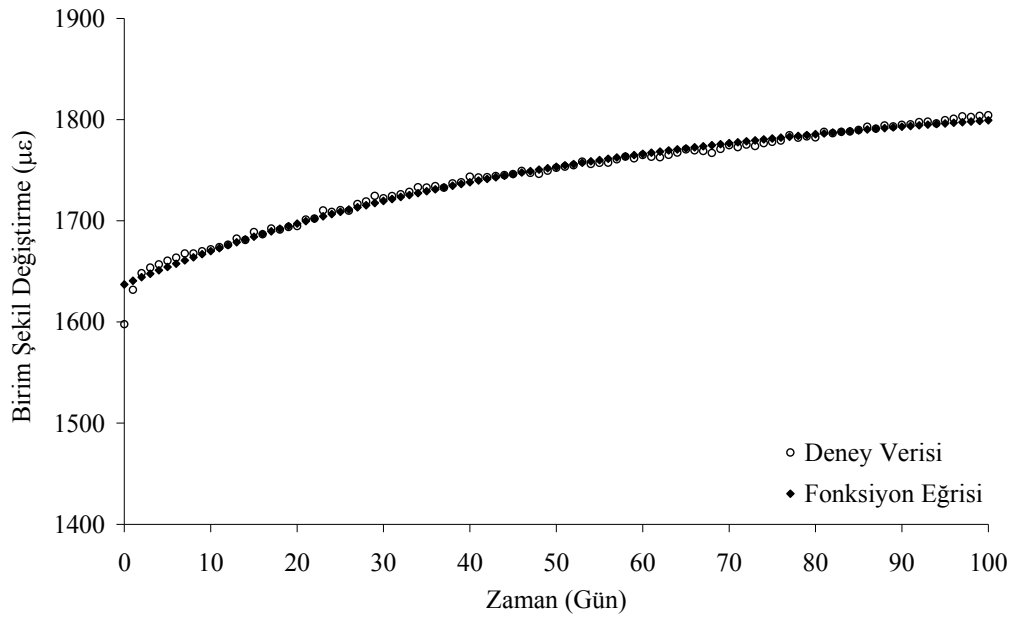
7.3.1 Analitik Çözüm için Kullanılacak Fonksiyon Katsayılarının Aksenal Çekme Numune Deneyi Verileri Kullanılarak Hesaplanması

Çalışmada, Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi için kullanılmış olan fonksiyonlara ait katsayılar; 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesinin 100 günlük aksenal çekme numune deneyi verileri kullanılarak elde edilmiştir. CTP malzemeli deney numunesi, kafes sistem deneyini oluşturan profil elemanlar ile aynı kalınlık, seri ve stok numarasına sahip korniyer eleman kullanılarak hazırlanmıştır.

Çalışmada; stasyonere bir sünme durumu dikkate alınmış ve 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesinin 100 günlük deney verileri kullanılmıştır. Bu şekilde; denklem (6.6) ile sunulan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisinin viskoelastik malzeme fonksiyonlarına ait katsayılar belirlenmiştir. Bu katsayıların hesaplanmasında; Matlab (2005) ile doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılmış ve $k_0=4,36 \times 10^{-10}$, $k_1=2,32 \times 10^{-9}$, $k_2=7,49 \times 10^{-16}$, $p_0=3$, $p_1=3$, $p_2=5$, $q=0,02006$ bulunmuştur. Buradan; sünme fonksiyonu denklem (6.10) ile elde edilmiştir.

$$\varepsilon = \sigma \left\{ 3,792 \times 10^{-5} + 4,36 \times 10^{-10} \sigma_0^2 + 2,32 \times 10^{-9} \sigma_0^2 (1 - e^{-0,02006t}) + 7,49 \times 10^{-16} \sigma_0^4 t \right\} \quad (6.10)$$

Burada; ε şekil değiştirme, σ gerilme, σ_0 başlangıç anı için gerilme ve t zamandır. 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesinin 100 günlük deney verileri ve sünme fonksiyonu ile elde edilen değerler Şekil 6.9 ile sunulmuştur.



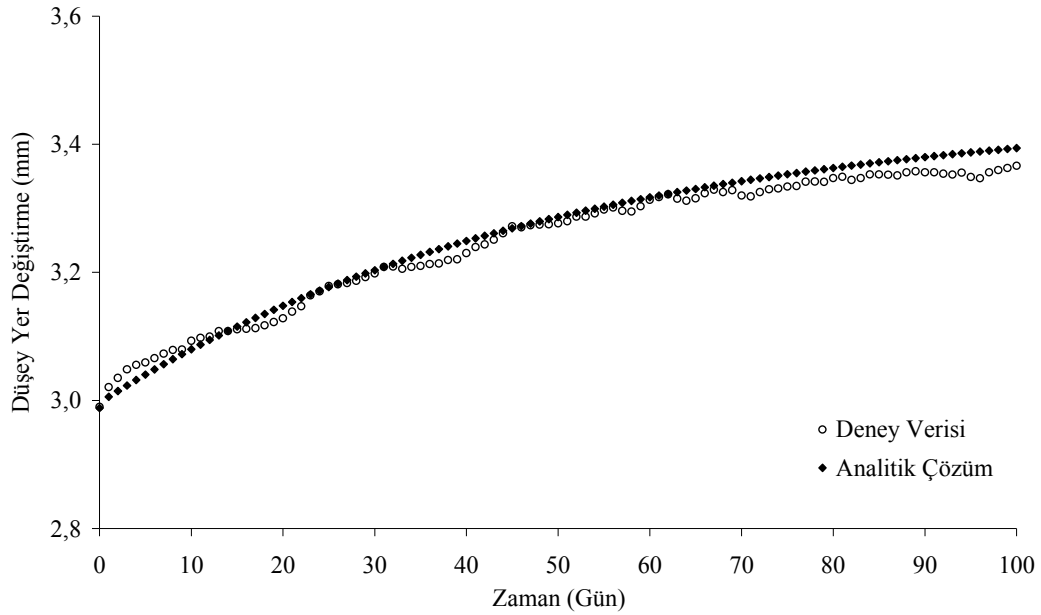
Şekil 6.9 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi verileri ve uygun fonksiyonunun birim şekil değişirme – zaman ilişkisi.

Sünme fonksiyonu eğrisi ve 250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesinin 100 günlük deney verileri arasındaki performans değerlendirme ölçütleri; determinasyon katsayısı, düzeltilmiş determinasyon katsayısı ve ortalama karesel hataların karekökü olup Matlab (2005) ile hesaplanmıştır. Buna göre; determinasyon katsayısı R^2 değeri 0,9885, düzeltilmiş determinasyon katsayısı değeri 0,9878 ve ortalama karesel hataların karekökü $5,12e-006$ 'dır (Matlab, 2005). Matlab (2005) ile elde edilen performans değerlendirme ölçütleri dışında, bir başka kontrol kriteri olarak Nash – Sutcliffe (NS) Kriteri (Nash, 1970) kullanılmıştır. NS kriteri, denklem (6.5) ile gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan fonksiyon eğrisi için NS kriteri %98,86 olarak elde edilmiştir.

6.3.2 Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistemin Analitik Çözüm ve Deneysel Çalışma Sonuçlarının İncelenmesi

Çalışmada, viskoelastik malzemeli hiperstatik düzlem kafes sistemin sünme davranışının incelenmesi için, Kaya (1973) ve Kural (1977) tarafından geliştirilmiş gerilme – şekil değişirme – zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen

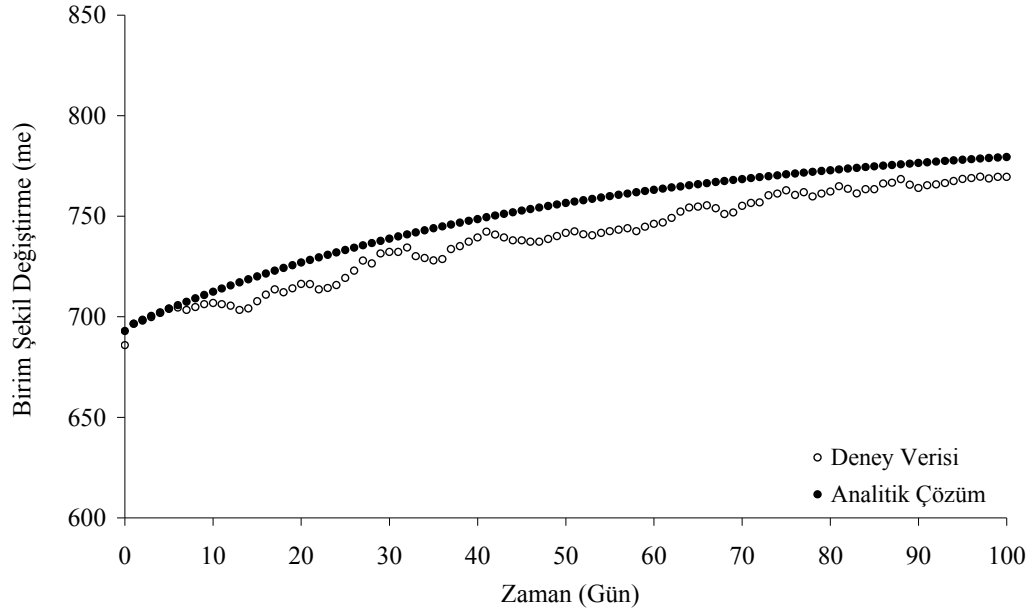
analitik çözüm sonuçları ile beşinci bölümde yer alan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen; yer değiştirme – zaman, şekil değiştirme – zaman ve gerilme – zaman grafikleri bu bölümde incelenmiştir. Deney verileri ve analitik çözüm dikkate alınarak Şekil 6.10 ile kafes sistemin bir numaralı diyagonal, alt başlık ile dikme elemanının birleştiği düğüm noktasının düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi sunulmuştur.



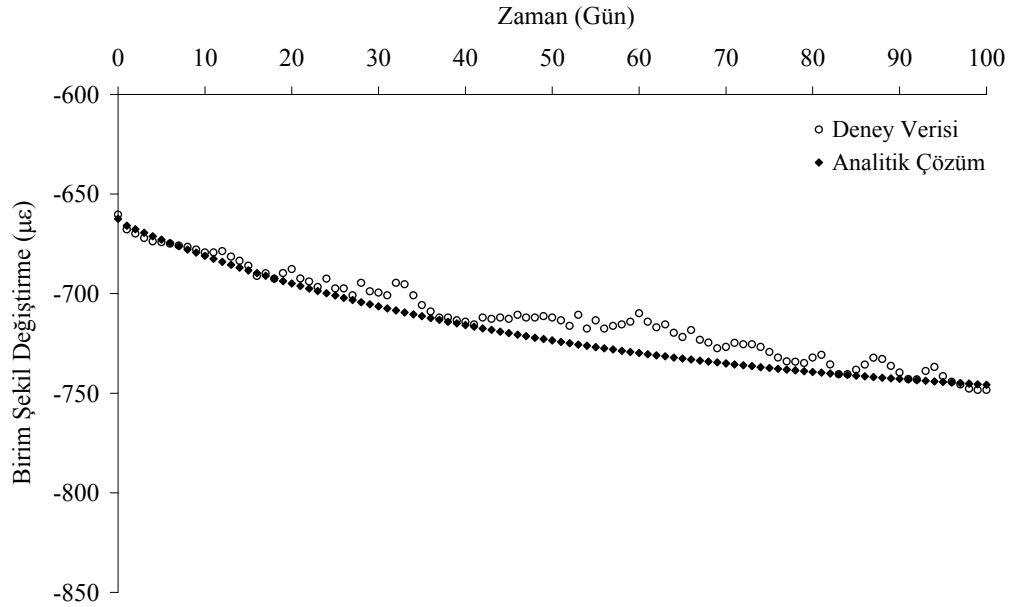
Şekil 6.10 Deney verisi ve analitik çözüm için kafes sistem uç noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi.

Viskoelastik malzemeli kafes sistemin bir numaralı diyagonal, alt başlık ile dikme elemanının birleştiği düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirme değerindeki artışı 100 gün sonunda deney verileriyle %13,1 ve analitik yöntemle %13,6 olarak elde edilmiştir.

Viskoelastik malzemeli düzlem kafes sistemin sünme deneyinde bir numaralı diyagonal, iki numaralı diyagonal, üst başlık, alt başlık, dikme çubukları için sırasıyla; S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 birim deformasyon ölçerleri ile deney verileri elde edilmiştir. Deney verileri ve analitik çözüm ile elde edilen şekil değiştirme – zaman ilişkileri sırasıyla; Şekil 6.11 – Şekil 6.15 ile sunulmuştur.



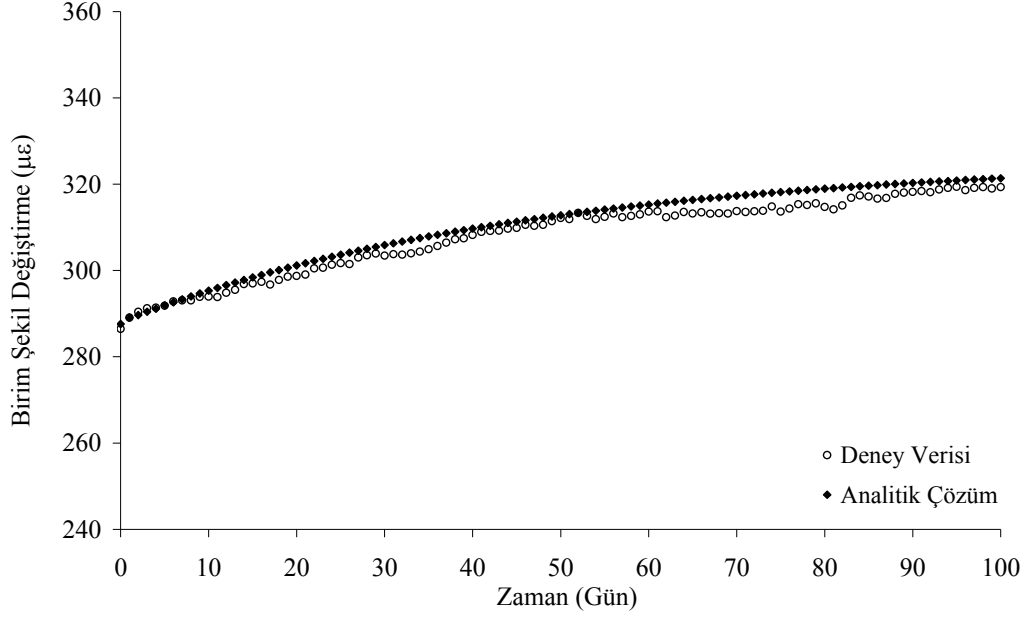
Şekil 6.11 Deney verisi ve analitik çözüm için bir numaralı diyagonal çubuk elemanı birim şekil değışirme – zaman ilişkisi.



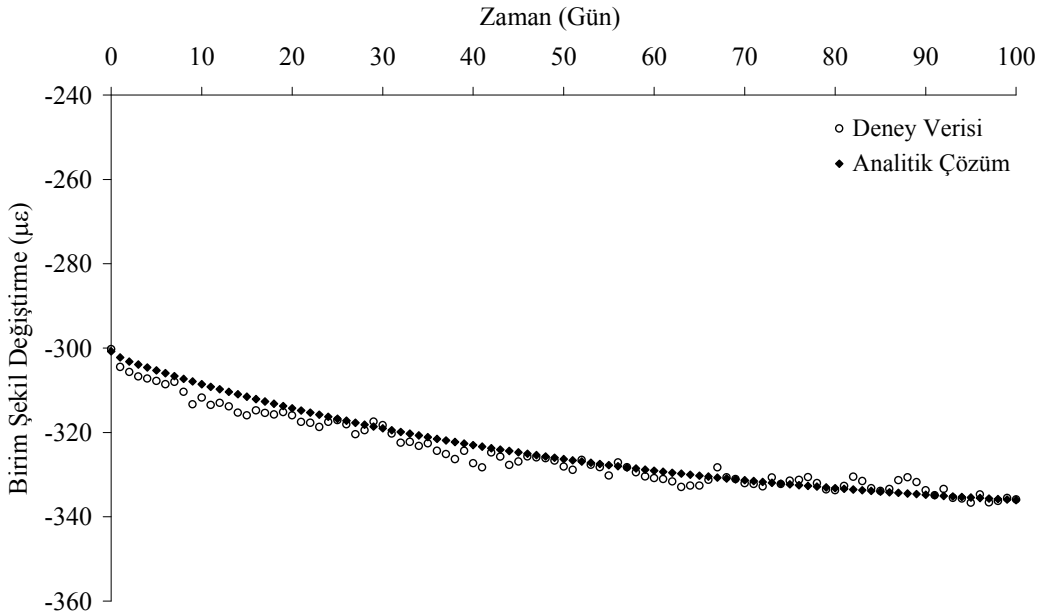
Şekil 6.12 Deney verisi ve analitik çözüm için iki numaralı diyagonal çubuk elemanı birim şekil değışirme – zaman ilişkisi.

Viskoelastik malzemeli kafes sistemin sünme deneyi sonucu bir numaralı diyagonal birim şekil değışirme değeriindeki artış 100 gün sonunda; deney verileriyle %12,2 ve analitik yöntemle %12,5 olarak bulunmuştur. İki numaralı

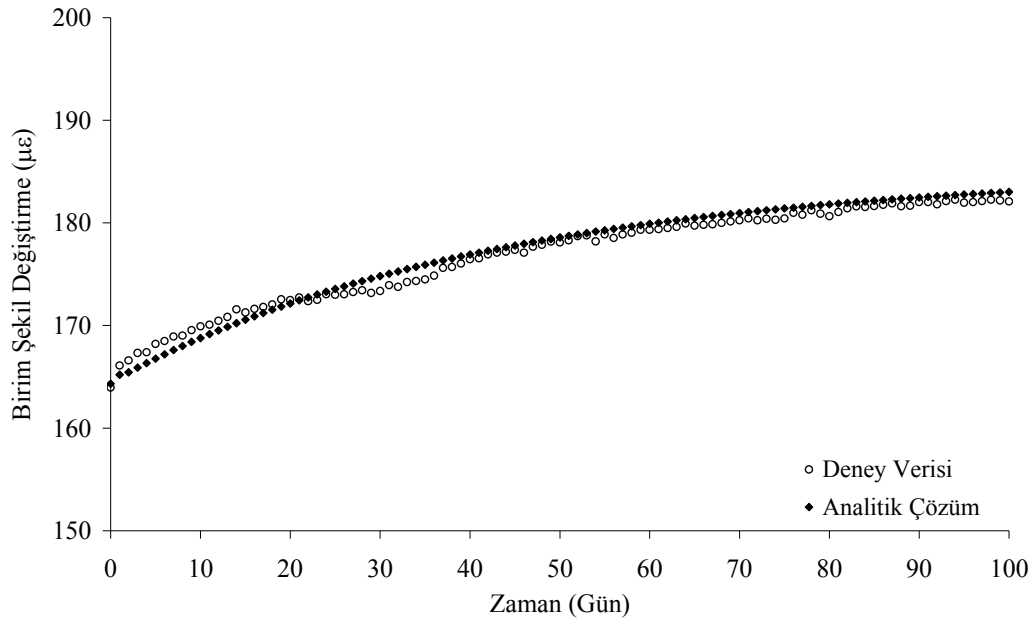
diyagonal birim şekil değıştirme değerlerindeki artış 100 gün sonunda deney verileriyle %13,3 ve analitik yöntemle %12,6 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.13 Deney verisi ve analitik çözümler için üst başlık çubuk elemanı birim şekil değıştirme – zaman ilişkisi.



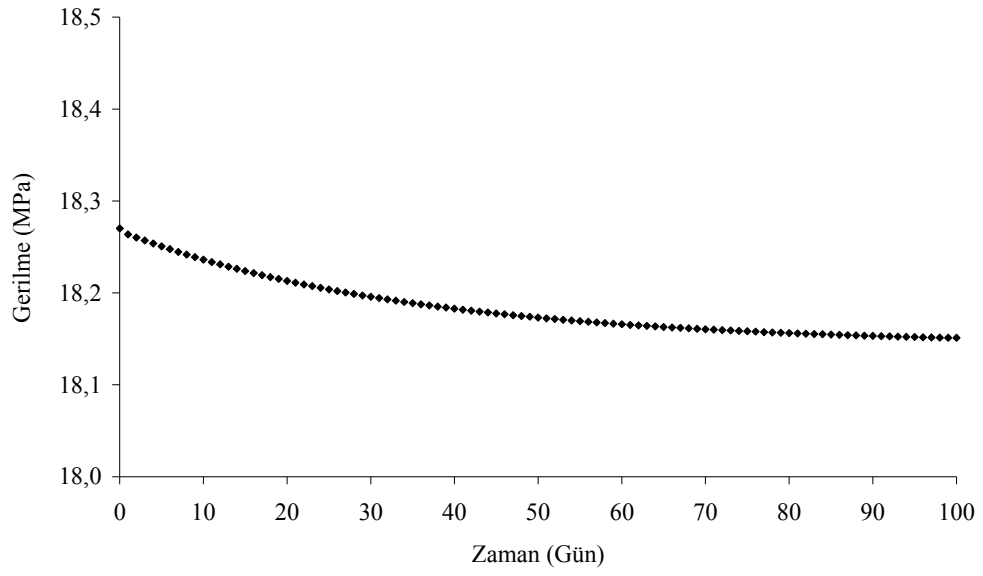
Şekil 6.14 Deney verisi ve analitik çözümler için alt başlık çubuk elemanı birim şekil değıştirme – zaman ilişkisi.



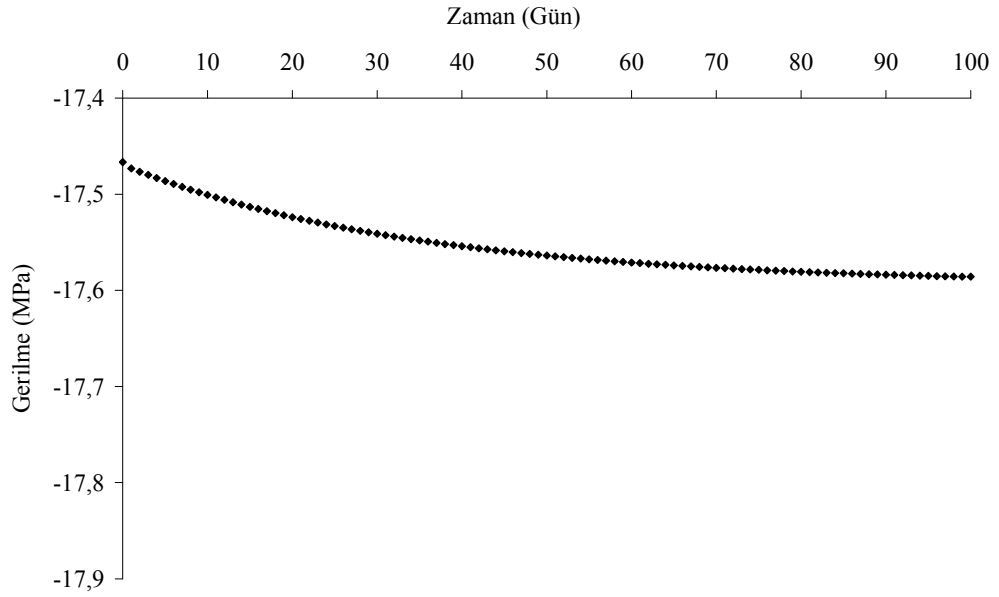
Şekil 6.15 Deney verisi ve analitik çözüm için dikme çubuk elemanı birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Viskoelastik malzemeli kafes sistemin sünme deneyi sonucu üst başlık çubuğu için birim şekil değiştirme değerlerindeki artış deney verileriyle %11,5 ve analitik yöntemle %11,8 olarak elde edilmiştir. Alt başlık çubuğu için birim şekil değiştirme değerlerindeki artış deney verileriyle %12,0 ve analitik yöntemle %11,7 olarak bulunmuştur. Dikme çubuğu için birim şekil değiştirme değerlerindeki artış deney verileriyle %11,0 ve analitik yöntemle %11,4 olarak elde edilmiştir.

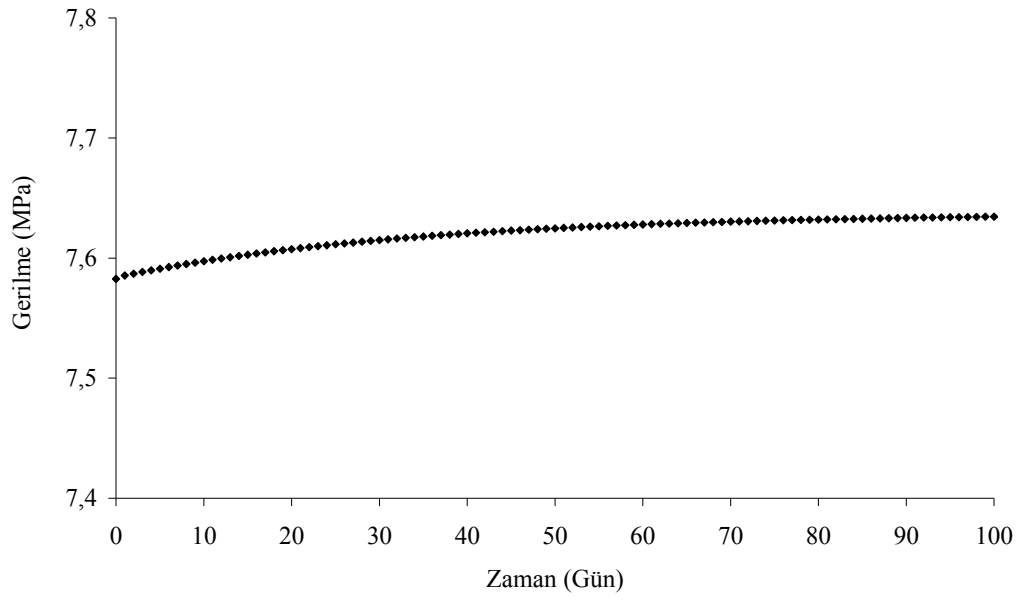
Çalışmada, viskoelastik malzemeli hiperstatik düzlem kafes sistemin birim şekil değiştirmesi incelenen kesitleri için çubuk gerilmesi – zaman ilişkileri de analitik yöntem ile incelenmiştir. Kafes sistemin; bir numaralı diyagonalı, iki numaralı diyagonalı, üst başlık, alt başlık ve dikme çubuk elemanları için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi sırasıyla; Şekil 6.16 – Şekil 6.20 ile sunulmuştur.



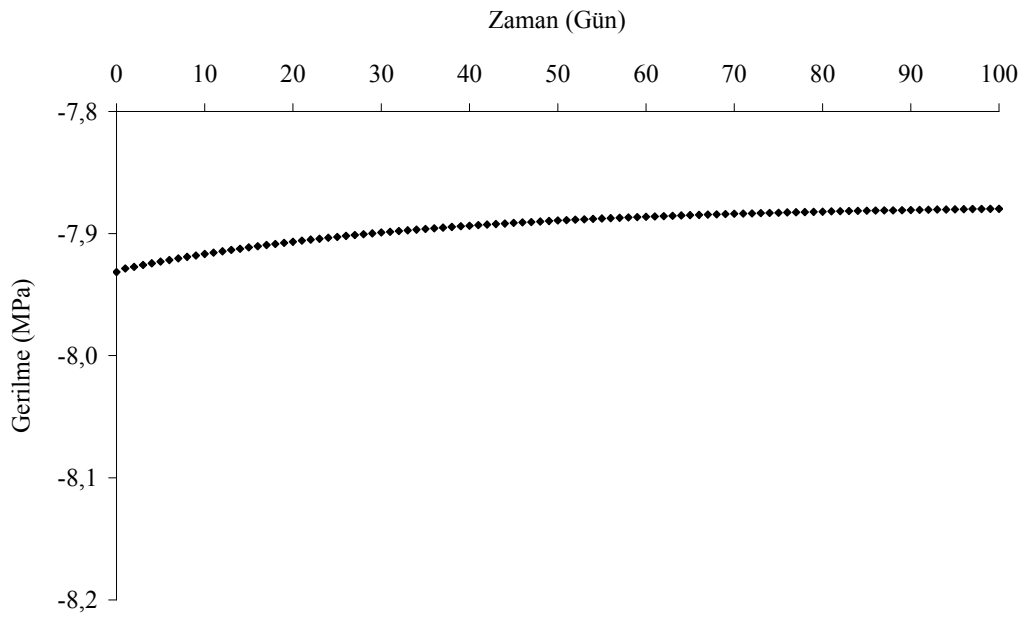
Şekil 6.16 Bir numaralı diyagonal çubuk eleman için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi.



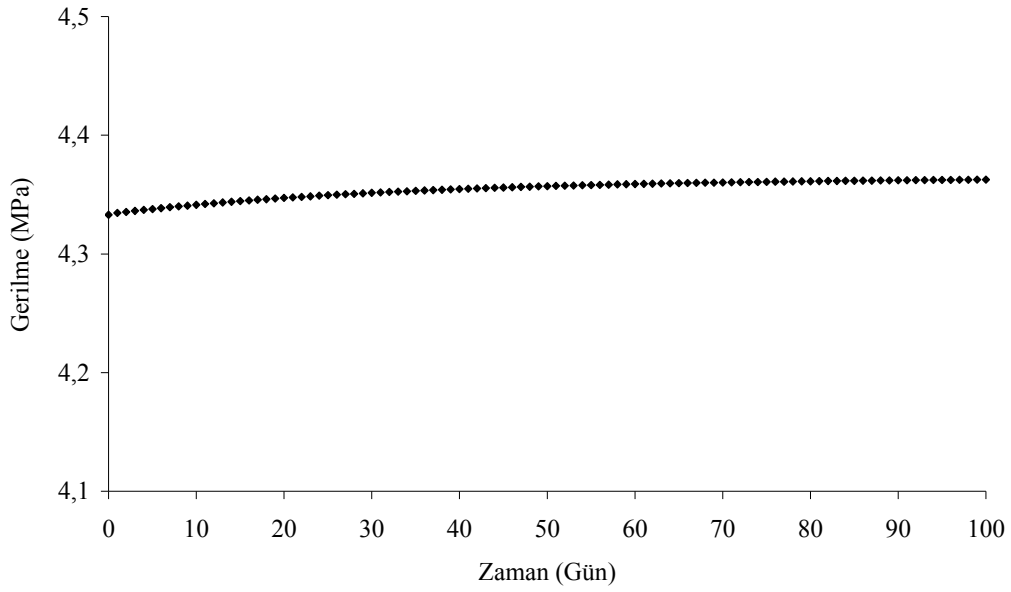
Şekil 6.17 İki numaralı diyagonal çubuk eleman için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi.



Şekil 6.18 Üst başlık çubuk elemanı için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi.

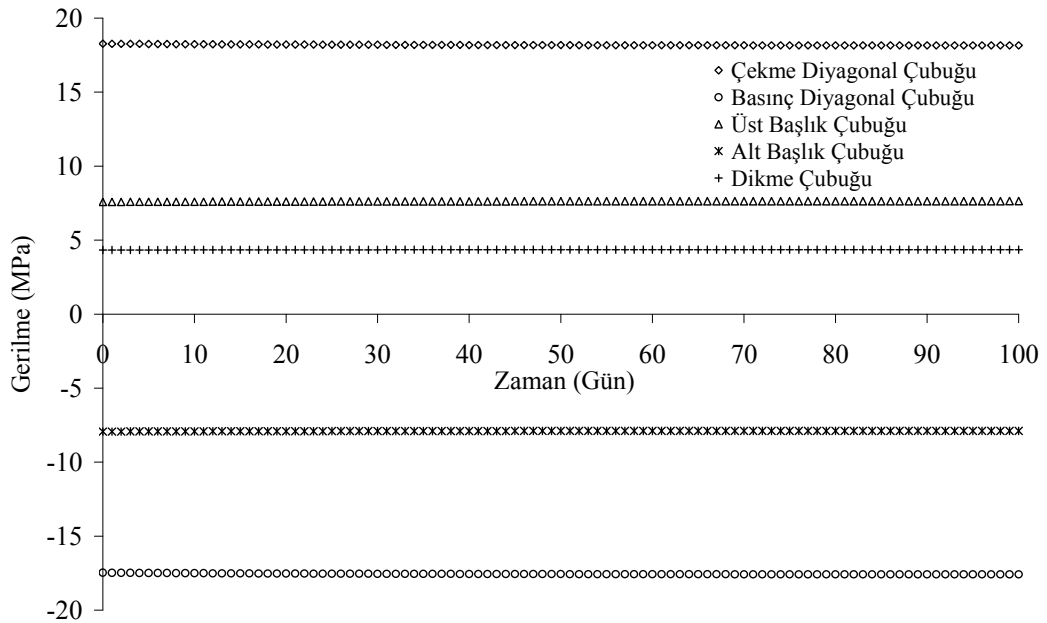


Şekil 6.19 Alt başlık çubuk elemanı için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi.



Şekil 6.20 Dikme çubuk elemanı için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi.

Kafes sistemi oluşturan tüm çubuk elemanlar için elde edilen çubuk gerilmesi – zaman ilişkileri incelendiğinde gerilme değişimlerinin %1'in altında olduğu görülmüş ve tüm çubuklar için gerilme – zaman ilişkileri Şekil 6.21 ile sunulmuştur.



Şekil 6.21 Kafes sistem çubuk elemanları gerilme – zaman ilişkileri.

Çalışmada, viskoelastik malzemeli hiperstatik düzlem kafes sistemin düşey yer değiştirmesi deneysel olarak incelenmiş ve analitik yöntem ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu nedenle; bir numaralı diyagonal, alt başlık ve dikme elemanının birleştiği düğüm noktasının düşey yer değiştirmesi uzun süreli davranışı incelemek amacıyla analitik yöntem kullanılarak incelenmiştir. Buna göre; başlangıç yer değiştirmesinin sünme nedeni ile bir yıl sonra %15,3 ve on yıl sonra %20,3 olarak arttığı hesaplanmıştır. Yapının tasarlanan kullanım ömrü dikkate alınarak, uzun süreli davranış için yer değiştirme sınır değerinin bu şekilde ön görülebileceği düşünülmüştür. Yapı, bu şekilde kullanım ömrü süresince istenilen emniyet sınırları içerisinde kalabilecek şekilde boyutlandırılabilir.

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

İnşaat mühendisliği uygulamalarında sık kullanılan yapı malzemeleri; beton, çelik, alüminyum ve ahşaptır. Son yıllarda, teknolojik gelişmeler doğrultusunda mukavemet özelliklerinin geliştirilmesiyle birlikte, kompozitler inşaat mühendisliğinde kullanım alanı bulmaktadır. Bazı uygulamalarda; düşük özgül ağırlık, yüksek mekanik dayanım, montaj kolaylığı, kimyasal dayanım, elektriksel ve elektromanyetik yalıtım gibi özellikleri nedeniyle Cam Elyaf Takviyeli Plastikler (CTP) avantaj sağlamaktadır. Bu tür malzemelerden yapılan taşıyıcı sistemler dünyada yeni gelişim göstermekte ve konu ile ilgili akademik çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, CTP malzemeden yapılmış taşıyıcı çubuk sistemlerin davranışlarının incelenmesi ve tüm yönleri ile araştırılması önem taşımaktadır.

Bu çalışmada; CTP profillerden yapılmış çubuk sistemlerin uzun süreli sabit yükler altındaki viskoelastik davranışları deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, CTP profillerden yapılmış tipik taşıyıcı çubuk sistemler laboratuvarında uzun süreli yükler altında test edilmiş ve deformasyonları ölçülmüştür. Bu deformasyonların hesaplanabilmesi için bir hesap yöntemi sunulmuştur. Tez çalışması kapsamında, analitik ve deney çalışmaları ile elde edilen sonuçlar bu bölümde sırasıyla verilmiştir.

Çalışmada, viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin davranışlarının matematiksel incelenmesinde kullanılan ve Laplace dönüşümlerini esas alan; diferansiyel denklem, integral, elastik – viskoelastik analogi yöntemleri ile sayısal uygulamalar yapılmıştır. Bu yöntemlerin, tüm serbestlik dereceleri için her zaman aralığında uygulanması gerektiğinden, nispeten büyük yapı sistemlerinde kullanılmasının zahmetli olduğu ve çeşitli matematiksel zorluklar içerdiği görülmüştür.

Çubuk sistemlerin viskoelastik davranışlarını incelemek amacıyla; gerilme – şekil değiştirme ve gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkileri kullanılarak

matris – deplasman yöntemiyle sayısal uygulamalar yapılmıştır. Birinci uygulamada; doğrusal olmayan bir gerilme – şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak sistem çözülmüş, elde edilen düğüm noktası yer değiştirmesi ve çubuk gerilmeleri sonuçlarına göre; bu ilişkiye ait malzeme katsayılarının sistem davranışını doğrudan etkilediği görülmüştür. İkinci uygulamada; gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi Kelvin modeli ile dikkate alınmış ve iki ayrı durum için hesap yapılmıştır. Birinci durumda; çubuk sistemdeki tüm çubukların viskoelastik, ikinci durumda ise çubuklardan birinin viskoelastik, diğerlerinin doğrusal elastik davranış gösterdiği varsayılmıştır. Gerilme dağılımının zaman içerisindeki değişimi bakımından her iki durum incelenmiş ve birinci durum için çubuk gerilmelerinin sabit, ikinci durum için ise değişim gösterdiği görülmüştür. İkinci durumda, sistemde yer alan viskoelastik elemanda gerilme zamanla azalırken diğer elemanların gerilme değerleri zaman ilerledikçe artmıştır. Düğüm noktası düşey yer değiştirme değerleri bakımından her iki durum incelenmiş ve zaman içerisinde birinci durum için elde edilen artışın ikinci durum için elde edilen artıştan daha fazla olduğu görülmüştür.

Çalışmada, beton ve çelik kullanılan çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışı için geliştirilmiş olan analitik yöntemler sunulmuş ve iki sayısal uygulama ile davranış incelenmiştir. Birinci uygulamada; kompozit kiriş ve çelik kolonlar ile oluşturulmuş tek açıklıklı bir çerçeve sistemin sünme davranışı Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi ile incelenmiştir. Sünme nedeniyle, kompozit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesinde %22'lik bir artış hesaplanmıştır. Bu durum, çerçeve kirişinin sehim değeri yükün sisteme uygulandığı anda emniyet sınırının altında olmasına rağmen, belirli bir süre sonra sünme nedeni ile emniyetli görülen bu sınır değerini aşabileceğini göstermektedir. Sistemin eğilme momenti diyagramları karşılaştırıldığında, kompozit kirişteki betonun sünme davranışı göstermesi nedeni ile çelik kolonlardaki eğilme momenti değerleri artmıştır. Sünme nedeniyle; betonun elastisite modülü ve dolayısıyla kompozit kirişinin eğilme rijitliği zamana bağlı olarak azalırken, çelik kolon elemanlarının eğilme rijitliğinde herhangi bir değişim olmamaktadır. Çerçeve sistemdeki bu bağıl değişimden dolayı kompozit kirişin açıklık ortasındaki eğilme momenti

değeri azalmış, çelik kolon uçlarındaki eğilme momenti değerleri ise artmıştır. Bu nedenle; viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerin boyutlandırılması aşamasında uzun süreli davranışın dikkate alınması önem taşımaktadır.

Beton ve çelik kullanılan çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışını incelemek amacıyla bir başka sayısal örnek olarak; içerisi beton ile doldurulmuş kutu kesitli bir kolon elemanın sünme ve büzülme etkileri altındaki davranışı araştırılmıştır. Kompozit kolon elemanın viskoelastik davranışı; Etkin Modül Yöntemi, Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi, Sünme Oranı Yöntemi ve Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada kullanılan; Etkin Modül Yöntemi ve Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Sünme Oranı Yöntemi ise, bu iki yönteme göre betondaki gerilmeleri nispeten düşük, çelikteki gerilmeleri ise yüksek bulmuştur. Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi ise; başlangıçta bu yöntemlerden bir miktar farklı sonuçlar vermiş, ancak zaman ilerledikçe elde edilen sonuçların diğer yöntem sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür. Sünme ve büzülme etkileri nedeniyle; incelenen tüm yöntemler için beton bileşen üzerindeki gerilmenin zamana bağlı olarak azaldığı, çelik kutu kesit bileşen üzerindeki gerilmenin ise zamana bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. Çalışmada; ani, sünme ve büzülme şekil değiştirme bileşenlerinin davranışları dört yöntem ile sunulmuştur. Ayrıca, şekil değiştirmenin tüm bileşenleri Yaş Etkisini Dikkate Alan Etkin Modül Yöntemi için bir arada verilmiş ve şekil değiştirme bileşenlerindeki zamana bağlı değişim gösterilmiştir.

Çalışmada, viskoelastik malzemeler için geçerli bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi dikkate alınmış ve bu ilişki sabit, değişken gerilme durumları için araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi ile zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımları literatürde sunulan bir örnek kullanılarak incelenmiştir. Buna göre; bu çalışmada kullanılan gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi, deformasyon sertleşmesi ve zaman sertleşmesi yaklaşımına göre gerilme artışı durumunu daha başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

Çalışmada, viskoelastik malzemeli CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. CTP profillerin mukavemet özelliklerinin belirlemek için zamana bağlı olmayan ve CTP profillerin viskoelastik davranışlarını incelemek için zamana bağlı deneyler yapılmıştır. Zamana bağlı olmayan aksenal çekme deneyinden elastisite modülü 26 GPa, maksimum çekme gerilmesi 410 MPa ve poisson oranı 0,31 olarak bulunmuştur. Üç nokta eğilme numune deneyinden elde edilen kayma modülü 0,85 GPa ve elastisite modülü 21 GPa'dır. Bu değer, aksenal çekme deneyinden elde edilen değerden bir miktar düşüktür.

Zamana bağlı davranış numune ve tam ölçekli deney sistemleri ile incelenmiştir. Zamana bağlı davranışın incelendiği numune deneyleri; kısa süreli üç nokta eğilme ve uzun süreli aksenal çekmedir. Kısa süreli üç nokta eğilme numune deneyleri beş farklı gerilme durumu için yapılmıştır. Bu gerilme değerleri maksimum gerilmenin sırasıyla; %15, %20, %25, %30, %35'i kadar olup gerilme seviyesi değişiminin sünme şekil değiştirmeleri üzerine olan etkisi 24 saat süresince araştırılmıştır. Buna göre; deney numunelerinin orta noktası için düşey yer değiştirme değerlerindeki artış 24 saat sonunda sırasıyla; %2,39, %2,85, %3,05, %3,22, %3,39 olmuştur. Benzer şekilde, şekil değiştirme değerlerindeki artışın 24 saat sonunda sırasıyla; %2,18, %2,69, %3,03, %3,12, %3,45 olduğu görülmüştür. Gerilme seviyelerinin artması, sünme nedeniyle oluşan deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin artış miktarını etkilemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sünmenin önemli bir kısmının ilk saatlerde meydana geldiği ve sünme hızının yüksek gerilme seviyeleri için arttığı gözlenmiştir. Uzun süreli aksenal çekme numune deneyleri ise; 100 gün süresince viskoelastik davranışı incelemek amacıyla farklı gerilme seviyeleri için yapılmıştır. Uzun süreli aksenal çekme numune deneyinde; maksimum gerilmenin %10, %14 ve %20'sine karşılık gelen gerilme seviyeleri için deney numunelerinin birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri incelenmiş ve 100 gün sonunda şekil değiştirme artışları sırasıyla; %12,9, %13,1 ve %13,6 olarak elde edilmiştir.

Tam ölçekli deneyler kısmında; çubuk sistem davranışını yansıtmak amacıyla CTP profiller kullanılarak yapılmış basit kiriş, tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistemin viskoelastik davranışları araştırılmıştır. Tam ölçekli deneylerden; tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistemin viskoelastik davranışı 100 gün süresince sabit yük etkisi altında incelenmiştir. Çalışmada, viskoelastik malzemeler için geçerli bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi kullanılarak, düzlem çerçeve ve kafes sistemlerin incelenmesi için akış şeması Ek-5 ile Ek-6’da verilmiş olan programlar hazırlanmıştır. Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi için dikkate alınan sünme fonksiyonlarının katsayıları; tek açıklıklı çerçeve için basit kiriş deneyinden, kafes sistem için ise uzun süreli eksenel çekme numune deneyinden elde edilmiştir. Tek açıklıklı çerçeve ve kafes sistem deney verileri ile viskoelastik hesap sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tek açıklıklı çerçeve sistemin kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerlerindeki artış; 30 gün sonunda deney verileri ile %8,8, analitik yöntemle %8,9 olarak hesaplanmıştır. Tek açıklıklı kiriş sünme deneyinde bu artış oranı 30 gün sonunda %7,8’dir. Çerçeve kirişinin orta noktası düşey yer değiştirme değerlerindeki artış; 100 gün sonunda deney verileri ile %11,5, analitik yöntemle %11,6 olarak bulunmuştur. Tek açıklıklı çerçevenin kiriş orta noktası şekil değiştirme değerlerindeki artış; 30 gün sonunda deney verileri ile %10,1, analitik yöntemle %9,6 olarak elde edilmiştir. Tek açıklıklı kiriş sünme deneyinde bu artış oranı 30 gün sonunda %9,4’tür. Çerçeve kirişinin orta noktası birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; 100 gün sonunda deney verileri ile %12,9, analitik yöntemle %12,8 olarak hesaplanmıştır. Tek açıklıklı çerçevenin S_2 birim deformasyon ölçerinden 100 gün sonunda elde edilen şekil değiştirme artışı; deney verileri ile %13,1, analitik yöntemle %12,6’dır. Çerçevenin S_3 birim deformasyon ölçerinden 100 gün sonunda elde edilen şekil değiştirme artışı; deney verileri ile %12,6, analitik yöntemle %12,2’dir. Tek açıklıklı çerçeve sistemin birim şekil değiştirmesi incelenen kesitleri için eğilme momenti – zaman ilişkileri incelenmiş ve çerçeve sistemin eğilme moment değerlerindeki değişimlerin %1’den küçük olduğu görülmüştür.

Düzlem kafes sistemin bir numaralı diyagonal, alt başlık ile dikme elemanının birleştiği düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirme değerindeki artış; 100 gün sonunda deney verileri ile %13,1 ve analitik yöntemle %13,6 olarak elde edilmiştir. Sünme nedeniyle bir numaralı diyagonal birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; 100 gün sonunda deney verileri ile %12,2, analitik yöntemle %12,5 olarak bulunmuştur. İki numaralı diyagonal birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; 100 gün sonunda deney verileri ile %13,3, analitik yöntemle %12,6 olarak elde edilmiştir. Üst başlık çubuğu için birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; deney verileri ile %11,5, analitik yöntemle %11,8 olarak hesaplanmıştır. Alt başlık çubuğu için birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; deney verileri ile %12,0, analitik yöntemle %11,7 olarak bulunmuştur. Dikme çubuğu için birim şekil değiştirme değerlerindeki artış; deney verileri ile %11,0, analitik yöntemle %11,4 olarak elde edilmiştir. Düzlem kafes sistemin analitik çözümünden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; gerilme dağılımlarının zaman içerisinde değiştiği görülmüştür. Sistemi oluşturan tüm çubuk elemanlar için elde edilen çubuk gerilmesi – zaman ilişkileri incelendiğinde gerilme değişimlerinin %1'in altında olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, yük uygulanan düğüm noktasının düşey yer değiştirmesi daha uzun süreler için analitik yöntem ile incelenmiştir. Buna göre; başlangıç yer değiştirmesinin sünme nedeni ile bir yıl sonra %15,3 ve on yıl sonra %20,3 arttığı hesaplanmıştır. Yapının, tasarlanan kullanım ömrü dikkate alınarak, uzun süreli davranış için yer değiştirme sınır değerinin bu şekilde ön görülebileceği düşünülmektedir. Bu tür bir yaklaşımla, yapının kullanım ömrü süresince istenilen emniyet sınırları içerisinde kalabilecek şekilde boyutlandırılabilmesi sağlanmış olur.

Bu çalışmada, CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin zamana bağlı davranışları düşük gerilme seviyeleri altında araştırılmıştır. Bunun nedeni; CTP profiller ile oluşturulmuş çubuk sistemlerin kullanım sınır değerlerine düşük gerilme seviyeleri altında ulaşabilmeleri, boyutlandırma sırasında yüksek güvenlik faktörleri kullanılması ve CTP profillerin birleşimlerinin oldukça hassas olmasıdır. Teknolojideki ilerlemelere paralel olarak CTP malzemenin

özelliklerinin ve birleşim yöntemlerinin geliştirilmesiyle, bu tür sistemler yüksek gerilme seviyeleri altında incelenebilir.

Viskoelastik malzemeli çubuk sistemlerde, sünme nedeni ile meydana gelen şekil değiştirmelerin büyük değerler alması halinde kullanım, görünüş ve hatta emniyet açısından bir takım önemli problemler ortaya çıkabilir. Sünme, sistemlerde gerilme dağılımında küçük miktarlarda da olsa değişikliklere neden olmaktadır. Sünmenin önemli olduğu durumlarda, şekil değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişmesi nedeniyle gerilme, yalnız o andaki değerine bağlı değildir. Ayrıca; sünme davranışı gösteren bir taşıyıcı sistemde, diğer malzemelerin aynı şekil değiştirmeyi yapamaması sonucu bir takım sorunlar oluşabilir. Sünme nedeni ile büyük şekil değiştirmeler olduğu zaman bunların mertebesi hassas bir biçimde hesaplanmalı ve yapının kullanım ömrü süresince emniyet sınırları içerisinde kalabilmesi sağlanmalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen teorik ve deneysel verilerden yararlanılarak iki boyutlu ve üç boyutlu sistemler üzerinde araştırma yapılabilir. Viskoelastik malzemeler için önemli bir etki olan ısı değişimleri dikkate alınarak bu çalışmalar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

ACI 209R–92 (1997). *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*, ACI Committee 209, American Concrete Institute.

ACI 435R–95 (2003). *Control of deflection in concrete structures*. ACI Committee 435, American Concrete Institute.

Ali, R.H. ve Kilic, H. (2002). Nonlinear behavior of pultruded FRP composites, *Composites: Part B*, 33, 173–191.

Alper, H., Barton, F.W. ve McCormick, F.C. (1997). Optimum design of a reinforced plastic bridge girder, *Computer and Structures*, 7, 249–256.

Andrade, E.N.C. (1910). On the viscous flow of metals and allied phenomena. *Proc. Roy. Soc., Ser. A.*, 84, A567.

Arutyunyan, N.K., & Zevin, A.A. (1997). *Design of structures considering creep*. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.

ASCE (1984), *Structural plastics design manual (SPDM)*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 63. American Society of Civil Engineers. Reston, VA.

ASTM D638 – 08 (2008). *Standard test method for tensile properties of plastics*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

ASTM D790 – 07 (2007). *Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

- ASTM D2990 – 01 (2001). *Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep – rupture of plastics*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- ASTM D3039 – 08 (2008). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- ASTM D6272 – 02 (2008). *Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials by four-point bending*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- Au, F.T.K., Liu, C.H. ve Lee, P.K. (2009). Creep and shrinkage analysis of reinforced concrete frames by history-adjusted and shrinkage-adjusted elasticity moduli. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18, 13–35.
- Bai, Y. ve Keller, T. (2008). Modal parameter identification for a GFRP pedestrian bridge. *Composite Structures*, 82, 90–100.
- Bailey, R.W. (1935). The utilization of creep test data in engineering design. *Proc. J. Mech. E.*, 84.
- Bakis, C.E, Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., ve diğeri. (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction – State-of-the-Art Review. *ASCE Journal of Composite for Construction*, 6, 2.
- Baker, A., Dutton, S. ve Kell D. (2004). *Composite materials for aircraft structures*. 2nd ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia.

- Bank, L.C. (1989). Flexural and shear moduli of full-section fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams. *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA*, 17, 1, 40–45.
- Bank, L.C. (2006). *Composites for construction: Structural design with FRP materials*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Bank, L.C. ve Mosallam, A.S. (1992). Creep and failure of a full size fiber reinforced plastic pultruded frame. *Composite Engineering*, 2 (3), 213-227.
- Bank, L.C., Yin, J., Nadipelli, M. (1995). Local buckling of pultruded beams: nonlinearity, anisotropy and inhomogeneity, *Construction & Building Materials*, 9 (6), 325–331.
- Baradan, B. (1998). *Yapı Malzemesi I*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi.
- Barbero, E. J. (1999). *Introduction to composite materials design*. Philadelphia: Taylor & Francis.
- Bazant, Z.P. (1972). Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method. *ACI Journal*, 69 (20), 212–217.
- Bazant, Z.P. ve Chern, J.C. (1982). Comment on the use of Ross' Hyperbola and recent comparisons of various practical creep prediction models. *Cement and Concrete Research*, 12, 527–532.
- Bazant, Z.P. (1983). Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature. *Nuclear Engineering and Design*, 76, 183–191. North-Holland, Amsterdam.
- Bazant, Z.P. ve Chern, J.C. (1984). Double – power logarithmic law for concrete creep. *Cement and Concrete Research*, 14, 793–806.

- Bazant, Z.P. (Ed.). (1988). *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. London: John Wiley & Sons.
- Bedford, R.P. (1993). *Design guide*. Bedford (PA): Bedford Reinforced Plastics, Inc.
- Bland, D.R. (1960). *The theory of linear viscoelasticity*. Oxford: Pergamon Press.
- Boltzmann, L. (1876). Zur Theorie der Elastischen Nachwirkung, *Pogg. Ann. Physik*, 7, 1876.
- Bottoni, M., Mazzotti, C. ve Savoia, M. (2008). A finite element model for linear viscoelastic behaviour of pultruded thin-walled beams under general loadings. *International Journal of Solids and Structures*, 45, 770–793.
- Boyle, J.T. & Spence, J. (1983). *Stress analysis for creep*, London-Boston: Butterworths.
- Bradley, S.W., Puckett, P.M., Bradley, W.L., ve Sue, H.J. (1997). Viscoelastic creep characteristic of neat and e-glass reinforced thermoset resins. *Journal of Composite Technology and Research*, 20 (1), 51–88.
- Braestrup, M.W. (1999). Footbridge constructed from glass-fiber-reinforced profiles. *Denmark Structural Engineering International*, 9 (4), 256–258.
- Branson, D.E. (1977). *Deformation of concrete structures*. New York: McGraw–Hill,
- CEB–FIP (1990). *Model code for concrete structures*. Comité Euro–Internationale du Béton (CEB) – Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), London: Thomas Telford.

- Chen, W.H. ve Lin, T.C. (1982), Dynamic analysis of viscoelastic structure using incremental finite element method. *Computers and Structures*, 4, 271 – 276.
- Chienna, G., Dezi, L. ve Tarantino, A.,M. (1992), Method for analyzing complex viscoelastic structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 121, 2.
- Christensen, R.M. (1982). *Theory of viscoelasticity*. California: Academic Press.
- Creus, G.J. (1986). *Viscoelasticity – Basic theory and applications to concrete structures*. Berlin: Sprineger-Verlag.
- Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F. ve Çağlayan, B.Ö. (2008). *Çelik Yapılar*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- Dezi, L, Leoni, G. ve Tarantino, A.M. (1998). Creep and shrinkage analysis of composite beams. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1 (12), 170–177.
- Dischinger, F. (1937). Untersuchungen über die Knicksicherheit, die elastische Verformung und das Kriechen des Betons bei Bogenbrücken, *Der Bauingenieur*, 18 (33/34), 487–520.
- Dorn, J.E. (1955). Some fundamental experiments on high temperature creep. *Journal of Mech. Phys. Solids*, 3 (2), 85.
- Drozdov, A.D. (1998a). *Mechanics of viscoelastic solids*. England: John Wiley & Sons.
- Drozdov, A.D. (1998b). *Viscoelastic structures: Mechanics of growth and aging*. England: Academic Press.

- Echigo, S., Tachibana, Y. ve Kitajima, A. (1998). New type of hybrid structures and practical analysis method of creep and shrinkage, *Construction and Building Materials*, 12 (2/3), 99–103.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001). *Betonarme*. İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Eurocomp (1996), Structural design of polymer composites, *Eurocomp Design Code and Handbook*, London: E&FN Spon.
- Faber, O. (1927). Plastic yield, shrinkage and other problems of concrete and their effects on design. *Minutes of Proc. of the Inst. of Civil Engineers*, 225, Part 1, 27–73.
- Fabrizio, M. & Angelo, M. (1992). Mathematical problems in linear viscoelasticity. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. Philadelphia.
- Findley, W.N. (1944). Creep characteristics of plastic, Symp. on Plastics, *Proc. ASME*, 44, 118.
- Findley, W.N. (1987). 26-year creep and recovery of poly(vinyl chloride) and polyethylene. *Polymer Engineering and Science*, 27, 8, 582–585.
- Findley, W.N. ve Lai, J.S.Y. (1968). Prediction of uniaxial stress relaxation from creep of nonlinear viscoelastic material. *Transactions of the Society of Rheology*, 12 (2), 243–257.
- Findley, W.N., Adams, C.H. ve Worley, W.J. (1948). The effect of temperature on the creep of two laminated plastics as interpreted by the Hyperbolic-sine Law and activation energy theory. *Proc. ASTM*, 48. 1217.
- Findley, W.N., Lai, J.S., & Onaran K. (1989). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*. New York: Dover Publications.

- Finnie, I., ve Heller, W.R. (1959). *Creep of engineering materials*, USA: McGraw Hill.
- Flügge, W. (1967). *Viscoelasticity*. USA: Blaisdell Publishing Company.
- Freudenthal, A.M. (1950). *The Inelastic Behaviour of Engineering Material and Structures*. New York: John Wiley & Sons.
- Garofalo, F. (1965). *Fundamentals of creep and creep rupture in metals*. MacMillan Series in Material Science. New York: MacMillan.
- Gilbert, R.I. (1988). *Time effects in concrete structures*. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc.
- Gilbert, R.I. (2001). Shrinkage, cracking and deflection – the serviceability of concrete structures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 1, 15–37.
- Ghali, A., Favre, R. ve Elbadry, M. (2002). *Concrete structures*. New York: Taylor & Francis.
- Graham, A. & Walles, K.F.A. (1955). Relation between long and short time properties of a commercial alloy, *Journal of Iron and Steel Inst.*, 1, 179.
- Haddad, Y.M. (1955). *Viscoelasticity of engineering materials*. London: Chapman and Hall.
- Hansen, T.C. (1962). On the rheology of hardened concrete. *Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Royal Institute of Technology Stockholm, Proceedings*, 37.

- Harris, J.S. ve Barbero, E.J. (1998). Prediction of creep properties of laminated composites from matrix creep data. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 17.
- Holmes, M. ve Rahman, T.A. (1980). Creep behavior of glass reinforced glass box beams, *Composites*, 11 (2), 79–85.
- Hoff, N.J. (Ed.). (1962). *Creep in structures*. California: Colloquium held at Stanford University.
- Inan, M. (1996). *Cisimlerin Mukavemeti*. İstanbul: İTÜ Vakfı Yayınları.
- Jahic, J. (2000). *Mechanical behavior of pultruded composite materials under elevated temperature conditions*, M.Sc. Thesis, California State University, Fullerton.
- Johnson, A.E., Henderson, J., Khan, B. (1963). Multiaxial creep strain, complex stress, time relations for metallic alloys with some applications to structures. *Proc. Int. Conf. on Creep, ASME(ASTM), J. Mech. E.* 26, New York/London.
- Jurkiewicz, B., Destrebecq, J.F. ve Vergne, A. (1999). Incremental analysis of time–dependent effects in composite structures, *Computers and Structures*, 73, 425 – 435.
- Kang, J.O. (2001). *Fiber reinforced polymeric pultruded members subjected to sustained loads*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Kaya, I. (1968). *Very early time characteristics of linear viscoelastic materials*, Ph.D. Thesis, California: University of California Berkeley.

- Kaya, I. (1973). *Visko-elastik malzemeler için geçerli bir gerilme – deformasyon – zaman ilişkisinin tesbiti ve uygulanması*. Doçentlik Tezi, İzmir: Ege Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Fakültesi.
- Kraus, H. (1980). *Creep analysis*, New York – Toronto: John Wiley & Sons.
- Kural, M.E. (1977). *Visko-elastik malzemeler için geçerli bir gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisinin iki boyutlu elemanlar için genelleştirilmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile plaklara uygulanması*. Doktora Tezi, İzmir: Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Lakes, R.S. (1999). *Viscoelastic solids*. USA: CRC Press.
- Leaderman, H. (1943). *Elastic and creep properties of filamentous materials*, Washington D.C.: Textile Foundation.
- Lee, J., Hollaway, L., Thorne, A. ve Head, P. (1994). Long-term static testing of an FRP prototype highway structure, *Composite Structure*, 28, 441–448.
- Lee, E.H., Radok, J.R.M ve Woodward, W.B. (1959). Stress analysis for linear viscoelastic materials, *Transactions of the Society of Rheology*, 3, 41–59.
- Lemaitre, J. & Chaboche, J.L. (1985). *Mecanique des materiaux solides*. Paris: BORDAS.
- Lockett, F.J. (1972). *Nonlinear viscoelastic solids*. London: Academic Press Inc. Ltd.
- Malinin, N.N. & Rzysko, J. (1981). *Mechanika materialow*, Warsaw: PWN Polish Scientific Publishers.
- Malinin, N.N. (1975). Viscous creep rupture of the orthotropic cylindrical shell. *Izv. Ak. Nauk SSSR, Mekh. Tverd. Tela*, 1.

Matlab 7.0.4.365 (R14) Service Pack 2 (2005). The MathWorks, Inc.

McClure, G. ve Mohammadi, Y. (1995). Compression creep of pultruded E-glass-reinforced-plastic angels. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7 (4), 269–276.

McVetty, P.G. (1934). Working stress for high temperature service, *Mech. Eng.* 56.

McVetty, P.G. (1943). Creep of metals at elevated temperatures – the hyperbolic sine relation between stress and strain rate. *Trans. ASME*, 65.

Mohammadi, Y. (1993). *Compression creep measurements in pultruded angle sections made of fibre glass reinforced plastics*. Ph.D. Thesis, Canda, Montreal, Quebec: Dept. of Civil Eng. and Applied Mech., McGill University.

Morino, S., Kawaguchi, J. ve Cao, Z.S. (1996). Creep behavior of concrete – filled steel tubular members, *Composite Construction in Steel and Concrete III: Proc. Engineering Foundation Conf.*, Irsee, Germany, 514–525.

Mosallam, A.S. (1990). *Short and long term behavior of a pultruded fiber reinforced plastic frame*, Ph.D. Thesis, America: The Catholic University of America.

Mottram, J.T. (1993). Short and long-term structural properties of pultruded beam assemblies fabricated using adhesive bonding, *Composite Structures*, 25, 387–395.

Na, G.S. (2008). *Load-displacement behavior of frame structures composed of fiber reinforced polymeric composite materials*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.

- Nadai, A. (1938). The influence of time upon creep, the hyperbolic sine creep law. *S. Timoshenko Anniversary*. New York: McMillan.
- Naguib, W. ve Mirmiran, A. (2003). Creep modeling for concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 1327–1344.
- Nakai, H., Kurita, A. ve Ichinose, H. (1991). An experiment study on creep of concrete filled pipes, *Proc. 3rd Int. Conf. on Steel – Concrete Composite Structures*, 55–60.
- Neto, A.B.S.S., Rovere, H.L.L. (2007). Flexural stiffness characterization of fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams. *Composite Structures*, 81, 274–282.
- Neville, A.M. (1997). *Properties of concrete*. Wiley: New York.
- Neville, A.M., & Dilger, W. (1970). *Creep of concrete: Plain, reinforced, and prestressed*. New York: American Elsevier Publishing Company Inc.
- Neville, A.M., Dilger, W. ve Brooks, J.J. (1983). *Creep of plain and structural concrete*. New York: Construction Press, Longman Group Ltd.
- Nielsen, L.F. (1970). Kriechen und Relaxation des Betons, *Beton und Stahlbetonbau*, 65, 272–275.
- Norton, F.H. (1929). *The creep of steel at high temperature*. New York: McGraw-Hill.
- Nutting, P.G. (1921). A study of elastic-viscous deformation, *Proc. ASTM*, 21, p. 1162.
- Oding, I.A. (1959). *Theory of creep and long time strength of metals*. Moscow, Metalurgizdat.

- Odqvist, F.K.G. (1966). *Mathematical theory of creep and creep rupture*. Oxford: Clarendon Press.
- Oliveira, B.F. ve Creus, G.J. (2003). Nonlinear viscoelastic analysis of thin – walled beams in composite material. *Thin-Walled Structures*, 41, 957–971.
- Onaran, K. (1969). *Sürekli ortamlar mekaniği: Viskoelastite*. İTÜ İnşaat Fakültesi Taşkışla Binası, 1. Yaz Okulu, 19–24 Ağustos 1969.
- Oplinger, D.W., Plumer, J. ve Gandhi, K.R. (1983). Design fabrication and testing of a pultruded framework for tent applications. *Proceedings of the 28th National SAMPE Symposium*, 12–14 April, pp.1478–1491.
- Othman, A.M. ve Hayhurst, D.R. (1990). Multi – axial creep rupture of a model structure using two parameter material model. *Int. J. Mech. Sci.*, 32, 1, 35 – 48.
- Öner, A. (2009). Çekme deneyi raporu. 25.05.2009 tarih ve B.30.2.KOÜ.045.00.00–417/0856 sayılı İnşaat Mühendisliği Bölümü Bilirkişi Raporu. İzmit: Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığı.
- Penny, R.K. ve Marriott, D.L. (1971). *Design for creep*, Maidenhead-Berkshire, England: McGraw Hill.
- Phillips, P. (1905). The slow stretch in india rubber, glass and metal wires when subjected to a constant pull. *Phil. Mag.*, 9, 513.
- Prandtl, L. (1928). Ein Gedenkenmodell zur kinetischen Theorie der festen Körper, *ZAMM*, 8, 85-106.
- Pul-tech (2009). *Ürün kataloğu*. Uşak: Pul-tech FRP, <http://www.pultechfrp.com/>.

- Qiao, R., Zou, G. ve Davalos, J.F. (2003). Flexural–torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams. *Composite Structures*, 60, 205–217.
- Quinn, J.A. (1989). Pultrusion: An economic manufacturing technique, *Engineering Plastics*, 5, 270–273.
- Rabotnov, N.Y. (1969). *Creep problems in structural members*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Ranzi, G. ve Bradford, M.A. (2006). Analytical solutions for the time-dependent behaviour of composite beams with partial interaction. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 3770–3793.
- Rüsch, H., Jungwirth, D. ve Hilsdorf, H.K. (1983). *Creep and shrinkage – Their effect on the behavior of concrete structures*. New York: Springer–Verlag.
- Scott, D.W. ve Zureick, A. (1998). Compression creep of a pultruded E-glass/vinylester composite. *Composites Science and Tehcnology*, 98, 1361–1369.
- Scott, G.W.B. ve Veinglou, B.C. (1944). A study of the firmness of soft materials based on Nutting equation. *J. Science and Instruments*, 21, 149.
- Schapery, R.A. (2000). Nonlinear viscoelastic solids, *International Journal of Solids and Structures*, 37, 359-366.
- Seçer, M. (2008). Investigations of creep effects on composite frames. 5th *International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, Gemikonağı, Lefke, TRNC, 27-28 Nov. 2008, 99 – 104.

- Seçer, M. ve Kural, M.E. (2009). Beton kullanılan yapı sistemlerinde gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerinin incelenmesi. Türkiye Prefabrik Birliği, *Beton Prefabrikasyon*, 90, 13 – 23.
- Seçer, M. ve Kural, M.E. (2010). İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkilerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 1.
- Sharma, R.K. ve Nagpal, K. (2007). A procedure for creep and shrinkage analysis of frames with low beam stiffness, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.
- Skryzpek, J.J. ve Hetnarski, R.B. (1993). *Plasticity and creep*. Florida: CRC Press Inc.
- Smerda, Z. ve Vladimir, K. (1988). *Creep and shrinkage of concrete elements and structures*. New York: Elsevier Science.
- Soderberg, C.R. (1936). The interpretation of creep tests for machine design. *Trans. ASME*, 58, 733.
- Soliman, F.Y. (1969). Creep and rupture of graphite/epoxy composites, *Composite Materials, Testing & Design, ASTM STP 460*, American Society for Testing and Materials, 254–270.
- Sridharan, S. (1997). *Environmental durability of e-glass/vinylester composites in hot moist conditions*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Starr, T.F. (1983). Structural applications of pultruded profiles. *Composite Structures 2, Proc. 2nd International Conf. on Composite Structures*, Paisley, Scotland, 14–16 Sept., 192-213. Scotland: Applied Science.

- Stoddard, W.P. (1997). *Lateral-torsional buckling behavior of polymer composite I-shaped members*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Strongwell (2009). *Design manual*. Bristol, VA: Strongwell.
- Susantha, K.A.S., Ge, H. ve Usami, T. (2001). Uniaxial stress – strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes. *Engineering Structures*, 23, 1331–1347.
- Terry, P.J., Bradford, M.A. ve Gilbert, R.I. (1994). Creep and shrinkage of concrete in concrete – filled circular steel tubes, *Proc. 6th Int. Symposium on Tubular Structures*, 293–298, Melbourne, Australia.
- Thien, N.P. (2002). *Understanding viscoelasticity*. Germany: Springer-Verlag.
- Thurson, R.H. (1895). *Materials of construction*, New York: John Wiley.
- Trost, H. (1967). Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriech und Relaxations Probleme bei Beton und Spannbeton. *Beton und Stahlbetonbau*, 62 (10), 230–238.
- TS 500 (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standardı. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Uy, B. (1998). Concrete – filled fabricated steel box columns for multi storey buildings: behavior and design. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1 (2), 150–158.
- Uy, B., Das, S. (1997). Time effects in concrete-filled steel box columns in tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 6, 1–22.

- Uy, B. ve Patil, S.B. (1996). Concrete filled high strength steel box columns for tall buildings: behavior and design. *The Structural Design of Tall Buildings*, 5, 75–94.
- Ünsaç, O. (1960). Creep problemlerinin incelenmesinde kullanılan metodlar. İstanbul: Marifet Matbaası.
- Vicat, L.T. (1834). Note Sur l'Allongement Progressif du Fil de Fer Soumis a Diverses Tensions, *Annales, Ponts et Chaussees, Memoires et Docum.*, 7.
- Virtuoso, F. ve Vieira, R. (2004). Time dependent behaviour of continuous composite beams with flexible connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, 451–463.
- Volterra, V. (1909). Sulle equazioni integro-differenziali della teoria dell elasticita, *Atti della Reale Accademia dei Lincei*, 18, 295.
- Yagh, K., Tschhoegl, (1970). Response of viscoelastic materials to piecewise continuous excitations. *Transactions of the Society of Rheology*, 14 (1), 1–18.
- Yoon, S.J. (1993). *Local buckling of pultruded I-shape columns*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Wang, Y. ve Zureick, A.H. (1994). Characterization of the longitudinal tensile behavior of pultruded I-shape structural members using coupon specimens. *Composite Structures*, 29, 463–472.
- Whitney, C.S. (1932). Plain and reinforced concrete arches. *American Concrete Institute (ACI) Journal*, 28, 479–519.
- Wood, A.S. (1983). Pultrusion: It's getting to be something extra in RP processing. *Modern Plastics*, 60 (7), 50–53.

EKLER

Ek-1: Şekil Listesi

<u>Şekil</u>	<u>Şekil Başlığı</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	Sabit gerilme etkisi altında şekil değiştirme davranışı	21
2.2	Sünme etkisi altında şekil değiştirme – zaman ilişkisi	22
2.3	Farklı yük seviyeleri için şekil değiştirme – zaman ilişkisi	23
2.4	Sabit gerilme altında metal ve plastiklerin sünme ve geri dönüş davranışları	23
2.5	Sabit şekil değiştirme altında yumuşama davranışı	24
2.6	Çeşitli gerilme seviyeleri için şekil değiştirme – zaman ilişkisi	29
2.7	Zaman sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi yaklaşımları	31
2.8	Düzgün yayılı $p(t)$ yükü – zaman ilişkisi: (a) Birinci yükleme (b) İkinci yükleme	35
2.9	Düzgün yayılı yüklü basit kirişin orta noktası yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	39
2.10	Sinüs eğrisi formunda yayılı yüklü basit kiriş	39
2.11	Sinüs eğrisi formunda yüklü basit kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	40
2.12	$p(t)$ yükü etkisindeki iki ucu ankastre kiriş	41
2.13	İki ucu ankastre kirişin orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	42
2.14	Gerilme – şekil değiştirme ilişkisi ile sünme davranışı incelenen kafes sistem	43
2.15	Gerilme – şekil değiştirme – zaman ilişkisi ile sünme davranışı incelenen kafes sistem	45
2.16	1. ve 3. çubukları lineer elastik ve 2. çubuk viskoelastik olan kafes sistem için gerilme – zaman ilişkisi	46
2.17	Tüm çubukları viskoelastik olan kafes sistem için gerilme – zaman ilişkisi	47
2.18	Bir numaralı düğüm noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	47
3.1	Sabit gerilme altında beton için şekil değiştirme bileşenleri	49
3.2	Beton elemanın sünme şekil değiştirmesi	52
3.3	Sabit ve değişken gerilme durumları için sünme davranışı	57
3.4	Sünme oranı yöntemi sünme eğrileri	59
3.5	Gerçek ve ideal şekil değiştirme – zaman ilişkisi	61
3.6	Kompozit kesit	63
3.7	Tek açıklıklı çerçeve sistem ve kompozit kiriş kesiti	68
3.8	Tek açıklıklı çerçevenin t_0 anı moment diyagramı	69
3.9	BC kompozit kirişinde sünme nedeni ile oluşan kuvvet ve momentler	71
3.10	Sünme ile oluşan toplam kuvvet ve momentler	72
3.11	Tek açıklıklı çerçevenin t_1 anı moment diyagramı	72

3.12	BC kompozit kirişinin G noktası için çelik ve beton bileşenlerdeki gerilme dağılımları: (a) t_0 anı (b) sünme etkisi (c) t_1 anı	74
3.13	İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitler	75
3.14	Kolon eleman için beton gerilmesi – zaman ilişkisi	77
3.15	Kolon eleman için çelik gerilmesi – zaman ilişkisi	77
3.16	Kolon eleman için ani şekil değiştirme – zaman ilişkisi	78
3.17	Kolon eleman için sünme şekil değiştirmesi – zaman ilişkisi	78
3.18	Kolon eleman için toplam şekil değiştirme – zaman ilişkisi	79
3.19	Kolon elemanın şekil değiştirme bileşenleri – zaman ilişkisi	79
4.1	Matematiksel model için hazırlanmış reolojik model	82
4.2	Zaman ve deformasyon sertleşmeleri sayısal örnek sonuçları	91
4.3	Çubuk eleman	102
5.1	Deney çalışmalarında kullanılan ağırlıklar	109
5.2	ASTM D3039 – 08 (2008) dikdörtgen kesitli deney numunesi	112
5.3	Eksenel çekme deneyi numuneleri	113
5.4	Eksenel çekme deney makinesi	113
5.5	Eksenel çekme deneyi: (a) Ön görünüş (b) Yan görünüş	114
5.6	Gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi	116
5.7	Boyuna birim şekil değiştirme – enine birim şekil değiştirme ilişkisi	116
5.8	Deney sonrası CTP numuneler	117
5.9	Deney sonrası CTP numuneler ve cam elyaflar	119
5.10	Üç nokta eğilme deneyi sistemi	118
5.11	Üç nokta eğilme deney sistemi ve CTP numunesi	119
5.12	Üç nokta eğilme deneyi için mesnet açıklıkları ile deney verileri	121
5.13	E_a/E ile L/h ilişkisi	123
5.14	Üç nokta deneyi yük – kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi ilişkisi	124
5.15	Kısa süre ile zamana bağlı üç nokta eğilme deney numunesi	126
5.16	Farklı gerilme seviyeleri için kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkileri	127
5.17	Farklı gerilme seviyeleri için kiriş orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri	127
5.18	120 MPa gerilme etkisi altındaki deney numunesinin orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	129
5.19	120 MPa gerilme etkisi altında deney numunesinin orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	129
5.20	Uzun süreli eksenel çekme numune deneyleri için geliştirilmiş yükleme sistemi tasarımı	130
5.21	Uzun süreli eksenel çekme numune deneyleri için geliştirilmiş yükleme sistemi	131
5.22	Pürüzlendirilmiş ve çizilmiş çelik levhalar	132
5.23	Viskoelastik davranışı incelenen deney numuneleri	133
5.24	250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi	134
5.25	250 mm x 30 mm x 6 mm deney numunesi	134
5.26	250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunesi	135
5.27	Yükleme sistemi ve incelenen üç deney numunesi	136
5.28	250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	137

5.29	250 mm x 30 mm x 6 mm deney numunesi için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	138
5.30	250 mm x 20 mm x 6 mm deney numunesi için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	138
5.31	Uzun süreli aksenal çekme deney numuneleri için birim şekil değiştirme – zaman ilişkileri	139
5.32	Tek açıklıklı CTP kutu kesitli kiriş	140
5.33	Tek açıklıklı kirişin kiriş orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	141
5.34	Tek açıklıklı kirişin kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	141
5.35	Tek açıklıklı kirişin sünme ve geri dönüş davranışı için kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	143
5.36	Tek katlı ve tek açıklıklı CTP kutu kesitli düzlem çerçeve	144
5.37	Kolon – kiriş birleşimi	145
5.38	Çerçeve geometrisi ve ölçüm aletleri yerleşimi	145
5.39	Viskoelastik davranışı incelenen tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistem	146
5.40	Kiriş orta noktası düşey yer değiştirme – zaman ilişkisi	147
5.41	Kiriş orta noktası S_1 birim deformasyon ölçeri şekil değiştirme – zaman ilişkisi	148
5.42	S_2 birim deformasyon ölçeri birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	149
5.43	S_3 birim deformasyon ölçeri birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	149
5.44	Kafes sistem	151
5.45	Kafes sistem üst düğüm noktası ve birleşim levhası	152
5.46	Kafes sistem alt düğüm noktası ve birleşim levhası	152
5.47	Viskoelastik malzemeli kafes sistem için ölçüm düzeni ve yerleşimi	153
5.48	Viskoelastik davranışı incelenen kafes sistem	154
5.49	Kafes sistem uç noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	155
5.50	Bir numaralı diyagonal çubuk elemanı için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	156
5.51	İki numaralı diyagonal çubuk elemanı için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	156
5.52	Üst başlık çubuk elemanı için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	157
5.53	Alt başlık çubuk elemanı için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	157
5.54	Dikme çubuk elemanı için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	158
6.1	Tek açıklıklı kiriş deney verileri ve uygun fonksiyonunun birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	162
6.2	Deney verisi ve analitik çözüm için tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistemin kiriş orta noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	163
6.3	S_1 birim deformasyon ölçeri deney verisi ve analitik çözüm için tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistemin kiriş orta noktası birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	164
6.4	S_2 birim deformasyon ölçeri deney verisi ve analitik çözüm için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	165
6.5	S_3 birim deformasyon ölçeri deney verisi ve analitik çözüm için birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	165

6.6	Tek katlı ve tek açıklıklı çerçeve sistemin kiriş orta noktası için eğilme momenti – zaman ilişkisi	166
6.7	Sol kolonun kolon – kiriş birleşiminin 30 cm altındaki kesit için eğilme momenti – zaman ilişkisi	167
6.8	Sağ kolonun taban levhasının 30 cm üzerindeki kesiti için eğilme momenti – zaman ilişkisi	167
6.9	250 mm x 40 mm x 6 mm deney numunesi verileri ve uygun fonksiyonunun birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	170
6.10	Deney verisi ve analitik çözüm için kafes sistem uç noktası düşey yer değiştirmesi – zaman ilişkisi	171
6.11	Deney verisi ve analitik çözüm için bir numaralı diyagonal çubuk elemanı birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	172
6.12	Deney verisi ve analitik çözüm için iki numaralı diyagonal çubuk elemanı birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	172
6.13	Deney verisi ve analitik çözüm için üst başlık çubuk elemanı birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	173
6.14	Deney verisi ve analitik çözüm için alt başlık çubuk elemanı birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	173
6.15	Deney verisi ve analitik çözüm için dikme çubuk elemanı birim şekil değiştirme – zaman ilişkisi	174
6.16	Bir numaralı diyagonal çubuk eleman için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi	175
6.17	İki numaralı diyagonal çubuk eleman için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi	175
6.18	Üst başlık çubuk elemanı için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi	176
6.19	Alt başlık çubuk elemanı için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi	176
6.20	Dikme çubuk elemanı için çubuk gerilmesi – zaman ilişkisi	177
6.21	Kafes sistem çubuk elemanları gerilme – zaman ilişkileri	177

Ek-2: Tablo Listesi

<u>Tablo</u>	<u>Tablo Başlığı</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	Gerilme fonksiyonu	25
2.2	Zaman fonksiyonu	26
2.3	Gerilme – zaman fonksiyonu	27
3.1	Kompozit BC kirişinin t_0 anı için kesit özellikleri	69
3.2	Kompozit BC kirişinin t_0 anı için şekil değiştirme ve eğrilik hesabı	70
3.3	Kompozit BC kirişinin şekil değiştirme ve eğrilik değerleri değişimi hesabı	70
3.4	Kompozit BC kirişindeki uç kuvvet ve momentlerin değişimi	71
3.5	Kompozit BC kirişindeki G kesiti için gerilme dağılımı hesabı	73
5.1	CTP profillerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Pul-Tech FRP, 2009).	111
5.2	Farklı gerilme seviyeleri için deney numunelerinin orta noktası düşey yer değiştirme değerleri	128
5.3	Farklı gerilme seviyeleri için deney numunelerinin orta noktası şekil değiştirme değerleri	128
5.4	Deney numuneleri için birim şekil değiştirme değerleri	139
5.5	Kiriş orta noktası birim şekil değiştirme değerleri	142
5.6	Kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerleri	142

Ek-3: Sembol Listesi

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>
A	kesit alan
A_c	beton kısma ait alan
A_k	dönüştürülmüş kesit için alan
\bar{A}	betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin alanı
$A_i(\sigma)$	gerilmeye bağlı mekanik özellikler fonksiyonu
B_c	beton kısım için ait statik moment
$B_i(\varepsilon)$	deformasyona bağlı mekanik özellikler fonksiyonu
B_k	dönüştürülmüş kesit için tarafsız eksene göre statik moment
\bar{B}	yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin statik momentini
b	dikdörtgen kesit genişliği
$C_i, D_i, a_i, l_i, z_i,$ $K, K_p, k_i, p_i, q_i,$ $q_r, \zeta, \lambda_i, \rho$	malzeme katsayıları
c	sabit sayı
d	dikdörtgen kesit yüksekliği
E	elastisite modülü
E_a	kesme tesirlerinin ihmal edildiği durum için elastisite modülü
$E_c(t)$	betonun t anı için elastisite modülü
$E_c(\tau_0)$	betonun yükleme yapıldığı τ_0 anındaki elastisite modülü
$E'_c(\tau_0)$	betonun yükleme yapıldığı τ_0 anındaki fiktif elastisite modülü
$\bar{E}_c(t, t_0)$	betonun yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş etkin modülü
$E_e(t, \tau_0)$	betonun etkin modülü
$\bar{E}_e(t, \tau_0)$	betonun yaş etkisini dikkate alan etkin modülü
E_i	i. yayın elastisite modülü
E_k	k. parçanın elastisite modülü
E_{ref}	referans malzemenin elastisite modülü
E_s	çelik malzemenin elastisite modülü
$F(\sigma)$	başlangıç şekil değiştirmesi fonksiyonu
$f_1^c(\sigma)$	sünmenin gerilme bileşeni fonksiyonu
$f_2^c(t)$	sünmenin zaman bileşeni fonksiyonu
$f_i(t)$	sünme fonksiyonu
G	kayma modülü
GF	birim deformasyon faktörü
$G(\sigma)$	sünme şekil değiştirme hızı fonksiyonu
$G(\sigma, t)$	sünme şekil değiştirmesi fonksiyonu
$g(\sigma, t)$	zaman sertleşmesi fonksiyonu
$g_i(t)$	deformasyon için seçilen zaman bağlı fonksiyon
H	düşey mesafe
$H(t)$	birim adım fonksiyonu
h	deney numunesi kesit kalınlığı
$h(\sigma, \varepsilon^c)$	deformasyon sertleşmesi fonksiyonu

I_c	beton kısma ait atalet momenti
I_k	dönüştürülmüş kesit için tarafsız eksene göre atalet momenti
I_0	dikdörtgen kesitin atalet momenti
I_{pi}	dikdörtgen kesit geometrisine bağlı bir sabit
\bar{I}	yaş etkisini dikkate alan dönüştürülmüş kesitin atalet momenti
i	deney elemanının atalet yarıçapı
$J(t)$	sünme uyum fonksiyonu
k'_y	nümerik çarpan
k	kesit numarası
L	mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyu
L_c	çubuk eleman boyu
$LVDT_i$	i. yer değiştirme ölçer
M	eğilme momenti
$M(x,t)$	x kesiti için t anındaki eğilme momenti
M_i^1	birinci iterasyon sonucu eğilme momenti değeri
M_i^m	gerçek eğilme momenti değeri
M_i^x	iterasyon sonucu eğilme momenti değeri
$M_j(t), M_k(t)$	çubuk j. ve k. ucundaki zamana bağlı moment değerleri
m	iterasyon sayısı
m_k	kesitteki parça sayısı
$m_v(x)$	virtüel sistemin herhangi bir kesitindeki moment
N	eksenel kuvvet
NS	Nash – Sutcliffe kriteri
n	incelenen nokta sayısı
n_{obs}	deney verisi sayısı
P	kirişin açıklık ortasına uygulanan tekil yük değeri
P_t	tekil kuvvet
P_i	malzemenin gerilme ve mekanik özelliklerine bağlı fonksiyon
Q_i^{obs}	deney verisi girdisi
\bar{Q}_j^{obs}	deney veri girdilerinin ortalaması
Q_j^{sim}	fonksiyon veri girdisi
$\hat{P}(s), \hat{Q}(s)$	gerilme ve şekil değiştirme için Laplace operatörleri
p	düzgün yayılı yük
p_r	gerilme için malzeme sabiti
$p(t)$	yük – zaman fonksiyonu
R^2	determinasyon katsayısı
r	zaman aralığı sayısı
S_i	i. birim deformasyon ölçer numarası
s	Laplace değişkeni
$T_i(t)$	zaman fonksiyonları
t	zaman
t_0	yükün sisteme uygulandığı başlangıç anı
t_1	gerilme artışının olduğu an
t_p	yükleme anı
u	şekil değiştirme fonksiyonu için malzeme katsayısı
V_0	okunan volt değeri
V_{gain}	kanal kazanç değeri

V_i	uygulanan gerilim
v	deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirme değeri
$w(x,t)$	konum ve zaman değişkenine bağlı kiriş yer değiştirmesi
$\hat{w}(x,s)$	konum ve Laplace değişkenine bağlı kiriş yer değiştirmesi
x	konum değişkeni
y	incelenen beton lifi ile referans noktası arasındaki mesafe
y_{ns}	incelenen çelik lifi ile referans noktası arasındaki mesafe
z	lif ile tarafsız eksen arasındaki mesafe
α_i, β_i	doğrusal viskoelastik malzemenin mekanik özellikleri
γ_c	betonun sünme düzeltme katsayısı
γ'_{sh}	betonun büzülme düzeltme katsayısı
Δ	çubuk uçları arasındaki ötelenme miktarı
$\{\Delta D\}$	t_0 ile t arasındaki zaman için yer değiştirme vektörü
$\{\Delta F\}$	t_0 ile t arasındaki zaman için kuvvet vektörü
ΔM	eğilme momenti değişimi
ΔN	eksenel kuvvet değişimi
Δt	zaman adımı
Δx	konum değişkeninin değişimi
$\Delta \varepsilon(t)$	şekil değiştirmedeki zamana bağlı değişim
$\Delta \varepsilon_0$	referans noktası için şekil değiştirmedeki değişim
$\Delta \sigma$	gerilme artışı
$\Delta \sigma_c$	betonda gerilmedeki değişimi
$\Delta \sigma_{ns}$	çelikte gerilmedeki değişim
$\Delta \Omega$	eğrilik değerlerindeki değişim
δ_1, δ_2	düğüm noktası yatay ve düşey yer değiştirmesi
δ_G	G noktası düşey yer değiştirmesi
ε	birim deformasyon (şekil değiştirme)
$\dot{\varepsilon}$	şekil değiştirmenin zamana göre birinci türevi
$\varepsilon(t)$	zamana bağlı şekil değiştirme fonksiyonu
$\varepsilon(t, \tau_i)$	τ_i anında uygulanan yük ile t anındaki toplam şekil değiştirme
ε_0	başlangıç (ani) elastik şekil değiştirme
$\varepsilon'_0(t)$	betonun fiktif ani şekil değiştirmesi
ε^c	sünme şekil değiştirmesi
$\dot{\varepsilon}^c$	sünme şekil değiştirmesinin zamana göre birinci türevi
ε_i^c	i. çubuk sünme şekil değiştirmesi
$\varepsilon_c(t)$	sünme şekil değiştirmesi fonksiyonu
$\varepsilon_c(t, \tau_i)$	τ_i anında uygulanan yük ile t anındaki sünme şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{ca}(\tau_1, \tau_0)$	τ_0 anında ani uygulanan yük ile τ_1 'deki sünme şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{cb}(\tau_1, \tau_0)$	τ_0 anında zaman içerisinde kademeli şekilde arttırılarak yük uygulanmış eleman için τ_1 'deki sünme şekil değiştirmesi
ε_d	sünmenin geri dönen elastik şekil değiştirme bileşeni
ε_f	sünmenin geri dönüşü olmayan şekil değiştirme bileşeni
ε_i	i. elemanın şekil değiştirmesi
$\dot{\varepsilon}_i$	i. şekil değiştirmenin zamana göre türevi
ε_k	k. birim deformasyon değeri
ε_0	referans noktasındaki şekil değiştirme

$\varepsilon_O(t_0)$	t_0 anında referans noktasındaki şekil değiştirme
$\varepsilon_{sh}(t)$	betonun büzülme şekil değişimi
$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$	betonun t_0 ile t anı arasında oluşan serbest büzülmesi
$\dot{\varepsilon}_{sh}$	betonun büzülme şekil değişiminin birinci türevini
ε_t	toplam şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}(t, \tau_i)$	betonun τ_i anında uygulanan yük etkisi altında t anındaki toplam şekil değişiminin birinci türevi
$\bar{\varepsilon}$	ortalama birim deformasyon değeri
η_i	i. sönüm kutusunun viskozite katsayısı
$\theta_j(t), \theta_k(t)$	lokal eksenlerde çubuğun j. ve k. ucundaki zamana bağlı dönme
λ	malzeme sabitleri q_0 ile q_1 arasındaki oran
σ	gerilme
$\dot{\sigma}$	gerilmenin zamana göre birinci türevi
$\sigma(t)$	zamana bağlı gerilme fonksiyonu
σ_0	başlangıç (anı) gerilme değeri
σ_1	artış sonrası gerilme değeri
σ_i	i. elemanın gerilmesi
σ'_i	i. yay elemanı için gerilme
σ''_i	i. sönüm kutusu için gerilme
$\sigma_j^m(t)$	j. çubuk eleman için gerçek gerilme değeri
$\sigma_j^r(t)$	j. çubuk eleman için r. gerilme iterasyonu deneme değeri
$\sigma_j^*(t)$	j. çubuk eleman için gerilme iterasyonunun sonunda çubuk gerilmesi
σ_k	k. gerilme değeri
$\sigma_v(t)$	virtüel sistem için gerilme
$\bar{\sigma}$	ortalama gerilme değeri
τ_i	yükleme anı
τ_k	herhangi bir k anı için zaman terimi
$\varphi(t)$	betonun sünme katsayısı
$\varphi(t, \tau_i)$	τ_i anında uygulanan yük için t anındaki sünme katsayısı
$\varphi(\tau_i, \tau_0)$	τ_0 yükleme anı olmak üzere τ_i anı için betonun sünme katsayısı
$\varphi(t, t_0)$	k. beton kısım için sünme katsayısı
$\varphi'(t, \tau)$	betonun azaltılmış sünme katsayısı
$\dot{\varphi}(t, \tau_0)$	τ_0 anında uygulanan yük için t anındaki sünme katsayısının türevi
$\varphi_c(t)$	çekirdek fonksiyonu
φ_d	gecikmiş elastik sünme katsayısı
φ_f	geri dönüşü olmayan kısmın sünme katsayısı
$\phi_j(t), \phi_k(t)$	çubuk uçları j. ve k. için zamana bağlı dönme
$\chi(t, \tau_i)$	beton yaş katsayısı
$\Psi_i(\sigma)$	gerilme fonksiyonu
Ω	eğrilik
$\Omega_x(t)$	zamana bağlı eğrilik
$\Omega_x^m(x, t)$	x kesiti için t anındaki gerçek eğrilik değeri
$\Omega_x^x(x, t)$	x kesiti için t anındaki x. eğrilik deneme değeri

Ek-4: Kısaltma Listesi

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
ASCE	Amerikan İnşaat Mühendisleri Odası (American Society of Civil Engineers)
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (American Society for Testing and Materials)
CEB-FIP	Avrupa Beton Komitesi – Uluslararası Beton Federasyonu (Comité Euro-International du Béton – Federation Internationale du Beton)
CTP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
DIN	Alman Standartları Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung)
ISO	Uluslararası Standard Organizasyonu (International Organization for Standardization)
LVDT	Elektronik yer değiştirme ölçüm aletleri (Linear Variable Differential Transformer)
NS	Nash – Sutcliffe (NS) Kriteri (Nash, 1970)
TS	Türk Standardı

Ek-5: Bilgisayar Programlarının Değişken Listesi

Viskoelastik Malzemeli Düzlem Kafes Sistemlerin Çözümü (Visco2Dtruss) ve Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçeve Sistemlerin Çözümü (Visco2Dframe) için geliştirilen bilgisayar programlarına ait değişkenler listesi verilmiştir.

Visco2Dtruss ve Visco2Dframe uygulamaları için, Matlab 7.1 (2005) kullanılarak geliştirilen, hesap algoritmalarına dayalı bilgisayar programlarında kullanılan değişkenler aşağıda sunulmuştur.

i. Visco2Dtruss:

DNK	: Düğüm noktası koordinatları (No: X_i , Y_i)
DNS	: Düğüm noktası sayısı
ELEMANBAG	: Eleman bağlantı şeması (Eleman No: I, J)
EO	: Eleman özellikleri (Elastisite modülü, kesit alanı)
ES	: Eleman sayısı
KUCUKQ	: q katsayısı
MESNET	: Mesnet şartları (Yeri, Yönü, Mesnet) MESNET=1 ise hareketli mesnet (X yönünde hareketi engellenmiş ise 1, Y yönünde hareketi engellenmiş ise 2), MESNET=2 ise sabit mesnet
MS	: Mesnet sayısı
VISCOPAR	: Viskoelastik malzeme fonksiyonu veri girdileri
YS	: Yük sayısı
YUK	: Dış yük (Düğüm noktası, yük yönü, büyüklüğü) Yönü=1 ise yatay, Yönü=2 ise düşey
controlcounter	: Viskoelastik modül fark kontrolü için kullanılan zaman sayacı
cosine	: Elemanın kosinüsü
counter	: Rijitlik matrisi oluşturulmasında kullanılan sayaç
D	: Global yer değiştirme matrisi
Dindex	: Serbestlik derecesine göre numaralı düğüm noktası yer değiştirmeleri
Dnesd	: Düğüm noktalarına göre eleman serbestlik dereceleri matrisi
Dof	: Sistem serbestlik dereceleri matrisi
dt	: Zaman adımı
Edof	: Eleman serbestlik dereceleri matrisi
Elbag	: Eleman bağlantı şeması
Eldisp	: Eleman yer değiştirmesi

Elkuvvek	: Eleman kuvveti
Elsigma	: Eleman gerilmesi
f	: Dış kuvvet vektörü
farkcounter	: Viskoelastik modül fark kontrolü için kullanılan sayaç
K	: Global rijitlik matrisi
Kel	: Eleman lokal rijitlik matrisi
Kters	: Global rijitlik matrisinin tersi
length	: Eleman uzunluğu
maincounter	: Gerilme iterasyonu hesap sayacı
modulfarkcontrol	: Viskoelastik modül fark
nokta1	: Elemanın başlangıç noktası
nokta2	: Elemanın bitiş noktası
PDIs	: Dış yük vektörü
sayac	: Matris atamaları için kullanılan sayaç
sigcounter	: Gerilme iterasyonu sayacı
sigmaiterasyon	: İterasyonda kullanılan gerilme değerleri
sine	: Elemanın sinüsü
time	: Zaman adımı sınırı
timecounter	: Zaman adımı sayacı
timedisplacements	: Zaman adımına göre yer değiştirme matrisi
timeE	: Viskoelastik modül matrisi
timekuvvek	: Zaman adımına göre çubuk kuvvetleri matrisi
timesigma	: Zaman adımına göre çubuk gerilmeleri matrisi

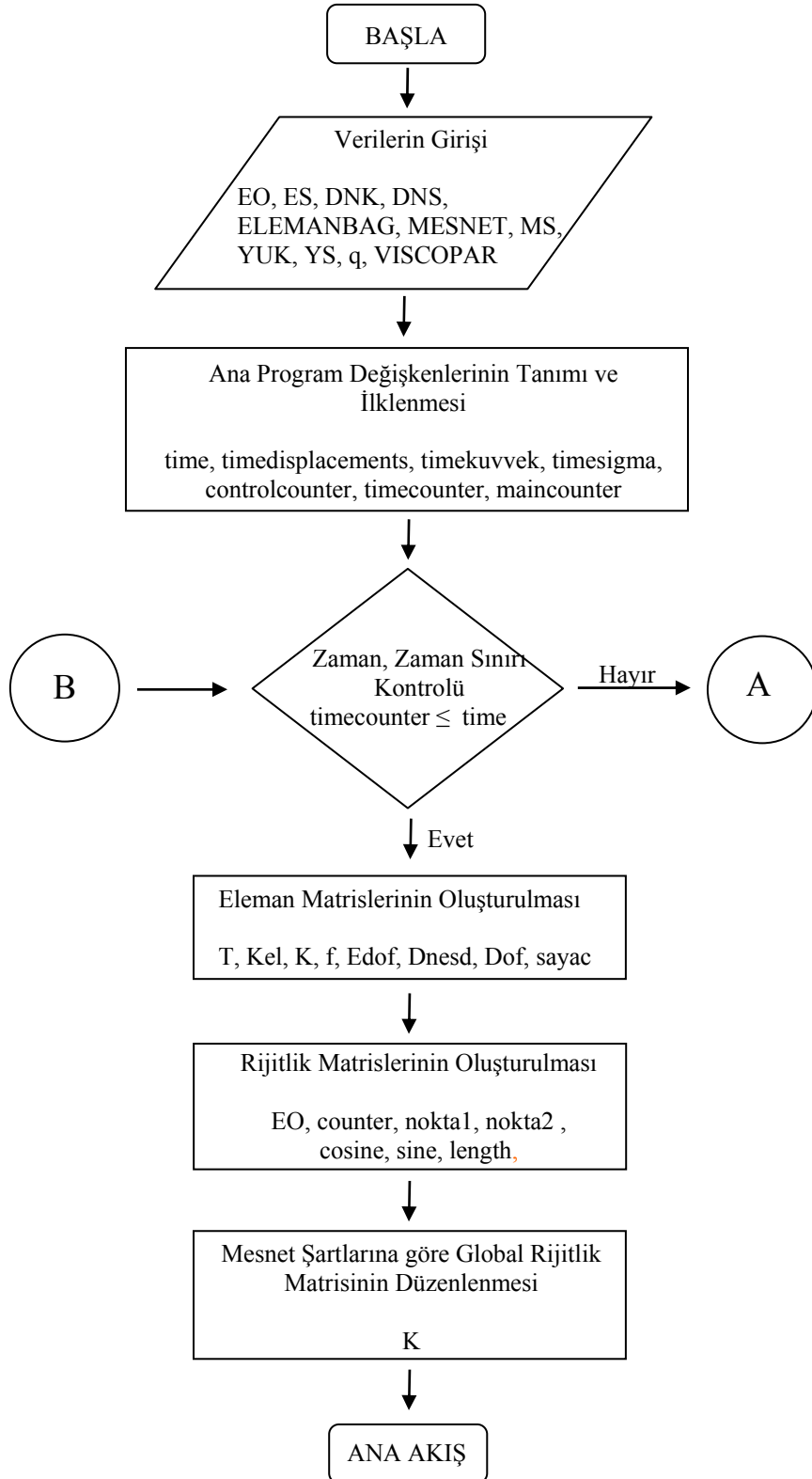
ii. Visco2Dframe:

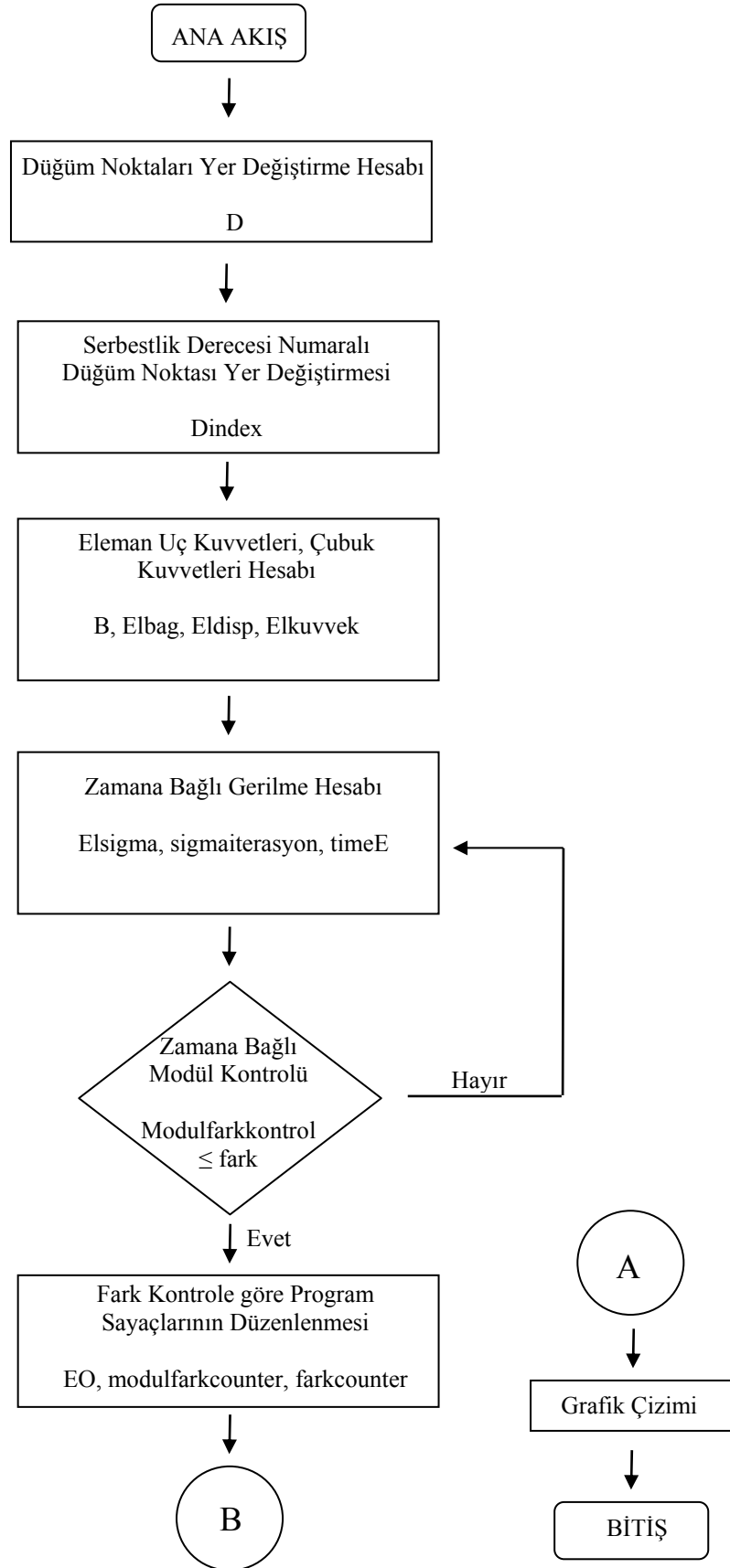
DNK	: Düğüm noktası koordinatları (No: X_i , Y_i)
DNS	: Düğüm nokta sayısı
ELEMANBAG	: Eleman bağlantı şeması (Eleman No: I, J)
EO	: Eleman özellikleri (Elastikite modülü, alanı, atalet momenti)
ES	: Eleman sayısı
KESİTBOYUT	: Kesit boyutu
MESNET	: Mesnet şartları (Yeri, mesneti) MESNET=1 ankastre mesnet, MESNET=2 sabit mesnet, MESNET=3 hareketli mesnet (x yönünde serbest), MESNET=4 hareketli mesnet (y yönünde serbest)
MS	: Mesnet sayısı
YS	: Yük sayısı
YUK	: Dış yük (Yeri, Konumu, Büyüklüğü) (1. yatay, 2. düşey, 3. moment)
cosine	: Elemanın kosinüsü
D	: Düğüm noktaları yer değiştirmeleri matrisi
deltat	: Zaman adımı

Dnesd	: Dügüm noktalarına göre eleman serbestlik dereceleri matrisi
Dof	: Serbestlik dereceleri matrisi
Edof	: Eleman serbestlik dereceleri matrisi
EI	: Çubuk eğilme rijitliği matrisi
eM	: Çubuk uç momentleri matrisi
esM	: Parça sayısına göre moment matrisi
farkcontrol	: Eğrilik değerleri iterasyonu fark kontrolü
Galfa	: Transformasyon matrisi
K	: Global rijitlik matrisi
kikat	: k_i katsayıları
KLokal	: Eleman lokal rijitlik matrisi
Koorx	: X koordinatları matrisi
Koory	: Y koordinatları matrisi
Krdnt	: Dügüm noktası koordinatları matrisi
Kters	: Global rijitlik matrisinin tersi
kutukalinligi	: Kutu kalınlığı
lam	: Lamda katsayıları $i=1...n$
length	: Eleman uzunluğu
Lif	: Temel kuvvetler ve lokal kuvvetler arasındaki bağlantı
Pdis	: Dış kuvvet vektörü
Pisizer	: p_i katsayısı sayacı
pkat	: p_i katsayıları $i=0...n$
Psay	: Parça sayısı
sine	: Elemanın sinüsü
time	: Zaman sınırı
timecounter	: Zaman sayacı
TimeD	: Zamana göre yer değiştirme matrisi
timemj	: Temel rijitlik matrisi terimi
timemk	: Temel rijitlik matrisi terimi
W	: İterasyonda kullanılan kesit eğrilik değeri
wson	: Eğrilik değerleri matrisi

Ek-6: Bilgisayar Programlarının Akış Diyagramları

Viskoelastik Malzemeli Kafes Sistemlerin Zamana Bağlı Hesap Uygulamaları için Geliştirilen Bilgisayar Programına Ait Akış Diyagramı





Viskoelastik Malzemeli Düzlem Çerçeve Sistemlerin Zamana Bağlı Hesap Uygulamaları için Geliştirilen Bilgisayar Programına Ait Akış Diyagramı

