



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**CAM FİBER PLAKALARLA KESMEYE KARŞI
GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE ANKRAJ
SAYISININ ETKİSİNİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Canberk YAMAN

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Mustafa KAYA

AKSARAY, 2016

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 122303408 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, "Canberk YAMAN", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "CAM FİBER PLAKALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE ANKRAJ SAYISININ ETKİSİNİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	Doç.Dr. Mustafa KAYA	
	Aksaray Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	Doç. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR	
	Aksaray Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	Doç. Dr. Mehmet BARAN	
	Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	

Teslim Tarihi: 09.03.2016
Savunma Tarihi: 08.04.2016

ÖNSÖZ

Bu çalışma Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Deney sonuçları mevcut olan ve kesmeye karşı cam fiber plakalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerde ankraj sayısının etkisini değerlendirmek amacıyla analitik çalışma yapılmıştır. Mevcut deney sonuçları ile bu çalışmada yapılan modellerin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Canberk YAMAN

Aksaray, Mart 2016

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ve bu eserleri her kullanışmada alıntı yaparak yararlandığımı belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Canberk YAMAN

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez süreci boyunca benimle bilgisini, önerisini ve tecrübesini paylaşan danışmanım sayın Doç. Dr. Mustafa KAYA hocama, deney sonuçlarından yararlandığım İnşaat Yüksek Mühendisi Zeynel Çağdaş KANKAL'a, analitik çalışmalarımda bana yardımcı olan arkadaşlarım İnşaat Yüksek Mühendisi Tolga YILMAZ ve Makine Yüksek Mühendisi Babak RAJIHAMED'e, bana desteklerini bir an olsun esirgemeyen başta babam Raci YAMAN, annem Belma YAMAN, kardeşim Cansu YAMAN ve eşim Hanife Sinem YAMAN olmak üzere aileme tüm kalbimle teşekkürlerimi sunuyorum.

Canberk YAMAN

Aksaray, Mart 2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	i
DOĞRULUK BEYANI.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Açıklamalar	1
1.2 Çalışmanın Amacı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRILMASI	3
2.1 Geçmişte Yapılan Çalışmalar	3
2.2 Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi ve Davranışı	9
2.3 Betonarme Elemanların Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi	11
3. NONLİNEER DAVRANIŞ	13
3.1 Nonlinear Davranışın Yapılar Üzerindeki Etkisi	13
3.2 Nonlinear Çözüm Yöntemleri	15
4. SONLU ELEMANLAR METODU	17
4.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Tanımı, Tarihi ve Prensibi	17
4.2 Problem Çözümünde Sonlu Elemanlar Metodu	18
4.3 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Dezavantajları	20
5. DENEY ELEMANLARININ TANITILMASI	21
6. ANALİTİK ÇALIŞMA.....	32
6.1 ABAQUS CAE Sonlu Elemanlar Programı.....	32
6.2 Modele Ait Parçaların Geometrilерinin Oluşturulması	34
6.3 Malzeme Özelliklerinin ABAQUS Programa Tanıtılması	35
6.4 Oluşturulan Parçaların Montajının Yapılması	42
6.5 Analiz Tipi ve Analiz Adımının Oluşturulması	43
6.6 Parçalar arası Temas Özelliklerinin Tanımlanması	44
6.7 Yük ve Sınır Şartlarının Tanımlanması.....	46
6.8 Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi	48
6.9 Analizin Başlatılması	49
6.10 Analiz Sonuçlarının Görüntülenmesi	49
7. DENEY SONUÇLARI İLE ANALİZ SONUÇLARININ	
KARŞILAŞTIRILMASI	55
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
8.1 Sonuçlar.....	59
8.2 Öneriler	59
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ.....	66

ÖZET

CAM FİBER PLAKALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE ANKRAJ SAYISININ ETKİSİNİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ

Bu çalışmada deneyleri daha önce yapılmış ve deney sonuçları mevcut olan betonarme T kesitli kirişlerde, yüzeylerine yapıştırılan cam elyaf lif takviyeli polimer (GFRP) şeritlerin üzerinde bulunan ankrajların sayısının, kirişlerin kesme dayanımına olan etkisi analitik olarak incelenmiştir. Bu doğrultuda laboratuvar sonuçları mevcut olan bu betonarme kirişlerin ABAQUS/CAE (Complete Abaqus Enviromental) sonlu eleman programı ile modellemesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu uygulanmıştır. Beton modeli olarak Concrete Damaged Plasticity (CDP) beton hasar modeli kullanılmıştır. Donatı için Classical Metal Plasticity (CMP) modeli kullanılmıştır. Bu modellerin nonlinear analizleri yapılmıştır. Daha önceden yapılmış laboratuvar deneylerinden elde edilmiş olan yük-deplasman grafiklerine ait değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması sağlanmıştır. Toplam 5 adet model hazırlanmıştır. Model-1 kesme donatısı yeterli güçlü referans eleman, Model-2 kesme donatısı yetersiz zayıf referans elemanıdır. Güçlendirme yapılan Model-3, Model-4 ve Model-5 için kullanılan kesme donatısı oranı Model-2 ile aynıdır. Aynı GFRP şeritleri kullanılan Model-3, Model-4 ve Model-5 için tek değişken GFRP şeritlerine uygulanan ankraj sayısıdır. Aynı kesme donatısına sahip ve aynı GFRP şeritleri kullanılan Model-3, Model-4 ve Model-5 için sırasıyla her GFRP şeridine 2, 3 ve 4 adet ankraj bulonu kiriş yüzeylerinden karşılıklı olarak montajı yapılmıştır. Model-1, Model-3, Model-4 ve Model-5 için deney sonuçlarındaki yük-deplasman grafiklerine yakın sonuçlar elde edilirken Model-2 için yük değerinin artırılması ile deplasman değerlerinin deney sonuçlarına göre arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun Model-2'nin kesmeye karşı yetersiz olması ve Model 2'ye herhangi bir güçlendirme takviyesi uygulanmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Model-2 kesme donatısı yetersiz zayıf referans elemanı olduğundan üzerine uygulanan yükler doğrultusunda büyük yük değerlerine ulaşmadan küçük yük değerleri altında büyük deplasmanlar yapmıştır. Ankraj sayısının artması ile kesme dayanımın arttığı analiz sonuçlarındaki yük değerleri ile görülmektedir.

Anahtar Kelimeler : ABAQUS, Sonlu Elemanlar Metodu, Nonlinear Analiz, Kesme, Güçlendirme, GFRP, Ankraj, Betonarme Kiriş

ABSTRACT

ANALYTICALLY MODELLING THE EFFECT OF THE NUMBER OF ANCHORAGES IN THE REINFORCED CONCRETE BEAMS THAT STRENGTHENED AGAINST SHEARING WITH GFRP

In this study, tests that were done before and existing test results of T-sliced beams, the number of anchorages that are on glass fiber reinforced polymer (GFRP) strips stuck on surfaces, effects of shearing beams strength are investigated analytically. Accordingly, reinforced concrete beams existing laboratory results are modelled with ABAQUS/CAE finite element method. Finite element method is applied. Concrete Damaged Plasticity (CDP) concrete damage model is used as a concrete model. Nonlinear analysis of these models are done. Classical Metal Plasticity (CMP) Model is used as a reinforcement steel. Comparing the values of force displacement graphics achieved from laboratory tests that are done before, and results of analysis is supplied. 5 models are prepared. Model-1 a strong reference component whose shearing reinforcement is sufficient. Model-2 a weak reference component whose shearing reinforcement is sufficient. The shearing reinforcement ratio that is used for the Model-3, Model-4 and Model-5 that is strengthening is the same with Model-2. The only variable that applied on GFRP strips is the anchorage number for Model-3, Model-4 and Model-5, that uses the same GFRP strips. For Model-3, Model-4 and Model-5 that have the same shearing reinforcement and use the same GFRP strip; 2, 3 and 4 anchorage bolt from beam surfaces interrelatedly montaged. While for Model-1, Model-3, Model-4 and Model-5, intimate results are provided, for Model-2 increasing load value with displacement value is located that they increase according to test results. It is thought that this situation is related with Model-2 is insufficient to shearing and Model-2 do not have any strengthening reinforcement. Without applying major loads in Model-2 is showed big displacement. It is seen in the load value of analysis results that shearing strength increases with the increase in the number of anchorage.

Keywords : ABAQUS, Finite Element Method, Nonlinear Analysis, Shear, Strengthening, GFRP, Anchorage, RC Beam

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1: Asal çekme gerilmesinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının oluşumu(Ersoy, 2001)	10
Şekil 3.1: Yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafikleri (İnan, 1988).	14
Şekil 3.2: Ardışık yaklaşım yöntemine ait moment - eğrilik grafikleri (Cook, 1961).	16
Şekil 4.1: Eleman ve düğüm noktaları gösterilen bir sonlu eleman modeline ait örnek.	19
Şekil 5.1: Deney 1 kirişinin donatı şeması(kesme donatısı yeterli güçlü referans elemanı) (Kankal, 2011).	24
Şekil 5.2: Deney 2,3,4 ve 5 kirişlerinin donatı şeması(kesme donatısı yetersiz) (Kankal, 2011).	25
Şekil 5.3: Deney 1 ve Deney 2 kirişlerinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi(güçlü ve zayıf referas elemanı) (Kankal, 2011).	26
Şekil 5.4: Deney 3 kirişinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (2 adet ankrajbulonu kullanılmıştır) (Kankal, 2011).	27
Şekil 5.5: Deney 4 kirişinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (3 adet ankrajbulonu kullanılmıştır) (Kankal, 2011).	28
Şekil 5.6: Deney 5 kirişinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (4 adet ankrajbulonu kullanılmıştır) (Kankal, 2011).	29
Şekil 5.7: Test edilen kirişlerin deney düzeneği (Kankal, 2011).	31
Şekil 6.1: ABAQUS/CAE 6.14 versiyona ait başlangıç oturumu ve ara yüzü elemanları.	33
Şekil 6.2: ABAQUS adımları (Module).	34
Şekil 6.3: Model-5 'e ait beton kalıp geometrisi ve Part adımı.	35
Şekil 6.4: Property adımı.	36
Şekil 6.5: Basınç etkisi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	37
Şekil 6.6: Çekme gerilmesi altında Concrete Damage Plasticity beton modeliningerilme-şekil değiştirme eğrisi.	38
Şekil 6.7: Yapısal analiz için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin şematik gösterimi (TS EN 1992-1-1 Sayfa-22).	41
Şekil 6.8: Çelik malzemesi için toplam şekil değiştirme üzerinde elastik ve plastikşekil değiştirmenin durumu(URL-2)	42
Şekil 6.9: Model-4 'e ait Assembly adımı.	43
Şekil 6.10: Analiz tipi seçme.	43
Şekil 6.11: Analiz adımları oluşturma.	44
Şekil 6.12: Interaction adımı (parça temasları).	45
Şekil 6.13: Beton-donatı temas özelliklerinin tanımlanması.	45
Şekil 6.14: Beton-GFRP temas özelliklerinin tanımlanması.	46
Şekil 6.15: Beton-ankraj temas özelliklerinin tanımlanması.	46
Şekil 6.16: Load adımı ve yüklerin tanımlanması.	47

Şekil 6.17: Model için sınır şartlarına ait gösterim.	47
Şekil 6.18: Model-3' e ait mesh adımı.	48
Şekil 6.19: Model-3' e ait Job adımı.	49
Şekil 6.20: Model-1 analiz sonucu.	50
Şekil 6.21: Model-1 yük-deplasman grafiği.	50
Şekil 6.22: Model-2 analiz sonucu.	51
Şekil 6.23: Model-2 yük-deplasman grafiği.	51
Şekil 6.24: Model-3 analiz sonucu.	52
Şekil 6.25: Model-3 yük-deplasman grafiği.	52
Şekil 6.26: Model-4 analiz sonucu.	53
Şekil 6.27: Model-4 yük-deplasman grafiği.	53
Şekil 6.28: Model-5 analiz sonucu.	54
Şekil 6.29: Model-5 yük-deplasman grafiği.	54
Şekil 7.1: Deney-1 ve Model-1 yük-deplasman grafiği.	55
Şekil 7.2: Deney-2 ve Model-2 yük-deplasman grafiği.	56
Şekil 7.3: Deney-3 ve Model-3 yük-deplasman grafiği.	56
Şekil 7.4: Deney-4 ve Model-4 yük-deplasman grafiği.	57
Şekil 7.5: Deney-5 ve Model-5 yük-deplasman grafiği.	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1: GFRP Özellikleri	22
Çizelge 5.2: Deney Elemanlarının donatıları(Kankal, 2011).	22
Çizelge 5.3: Deney Elemanlarındaki kullanılan GFRP şeritleri (Kankal, 2011) ..	23
Çizelge 5.4: Deney Elemanlarındaki ankraj sayıları (Kankal, 2011).	23
Çizelge 6.1: Betonun dayanım ve şekil değiştirme özellikleri (TS EN 1992-1-1 Sayfa-17).	40

SİMGELER DİZİNİ

a	Kesme açıklığı
d	Faydalı yükseklik
d_c	Basınç hasar rijitliğini azaltma parametresi
d_t	Çekme hasar rijitliğini azaltma parametresi
E	Elastisite modülü
E_{cm}	Betonun sekant elastisite modülü
E_0	Başlangıç elastisite modülü
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun 28 günlük silindir basınç dayanımının karakteristik değeri
f_{cm}	Beton silindir basınç dayanımının ortalama değeri
K	Rijitlik matrisi
M	Moment
n	Serbestlik derecesi
P	Yük
S_f	GFRP şerit plaka aralığı
W_f	GFRP şerit plaka genişliği
V	Mesnet kuvveti
ε	Şekil değiştirme
ε_c	Beton basınç birim şekil değiştirmesi
ε_{c1}	Basınç dayanımı f_c 'ye tekabül eden gerilme anında beton basınç birim şekil değiştirmesi
ε_c^{in}	Basınçtan dolayı oluşan elastik olmayan şekil değiştirme
ε_c^{pl}	Basınçtan dolayı oluşan plastik şekil değiştirme
ε_{cu1}	Beton nihai basınç birim şekil değiştirmesi
ε_t	Beton çekme birim şekil değiştirmesi
ε_t^{ck}	Çekmeden dolayı oluşan elastik olmayan şekil değiştirme
ε_t^{pl}	Çekmeden dolayı oluşan plastik şekil değiştirme

ϵ_{true}^{pl}	Donatı gerçek plastik şekil değıştirme değeri
ρ_w	Etriye oranı
σ	Gerilme
σ_c	Betonun basınç gerilmesi
σ_{cu}	Beton nihai basınç birim şekil değıştirmesi ϵ_{cu} 'ya tekabül eden basınç gerilmesi
σ_t	Betonun çekme gerilmesi
σ_{true}	Donatı gerçek gerilme değeri
$\emptyset$	Donatı çapı
φ	Eğrilik

KISALTMALAR DİZİNİ

CAD	Computer Aided Design
CAE	Complete Abaqus Enviromental
CDP	Concrete Damaged Plasticity
CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
CMP	Classical Metal Plasticity
FRP	Lif Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Elyaf Lif Takviyeli Polimer
LVDT	Elektronik Deplasman Ölçer Aleti
TS	Türk Standardı

1.GİRİŞ

1.1 Genel Açıklamalar

Dilimize Fransızcadan gelen “béton armé” gevrek betonun ve sünek çeliğin beraber kullanılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Betonarme uygulamaları yüksek mukavemeti, ucuz maliyeti, imalat kolaylığı ve kullanım yaygınlığı gibi nedenlerden dolayı ülkemizde ve tüm dünyada en çok kullanılan yapı malzemeleri arasında bulunmaktadır. Davranışı karışık, sadece birkaç faktöre bağlı olmayan betonarme, istenilen şekle girebilmesi, inşaat yapımındaki kolaylığı, hızlı imalata cevap vermesi, ekonomik ve uzun ömürlü olması gibi olumlu özelliklerinden dolayı sürekli gelişmeye devam etmektedir.

Taşıyıcısı betonarme çerçevelerden oluşan yapı sistemleri, gerek proje ve uygulama hatalarından dolayı gerekse de yapı elemanlarının davranışının ve dayanımının iyileştirilmeye ihtiyacı hususunda güçlendirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Elyaf takviyeli polimerler (FRP) yüksek dayanımları, hafiflikleri ve kolay uygulanabilirlikleri gibi üstün özelliklerinden dolayı güçlendirme çalışmalarında kullanılmaktadır.

Güçlendirme çalışmalarının yapılabilmesi ve geliştirilebilmesi için betonarmenin özelliklerinin ve davranışının iyi bilinmesi gerekmektedir. Betonarme heterojen, anizotrop, elastik olmayan, yük ve zamana bağlı olan bir malzemedir. Bu yüzden betonarmenin nonlinear davranışını daha iyi anlamak için çeşitli araştırmalar halen yapılmaktadır. Laboratuvar deneyleri, sayısal yöntemler ve bilgisayar simülasyon teknikleri ile model analizleri betonarmenin nonlinear davranışı hakkında daha fazla bilgiye sahip olmamız için yapılan çalışmalardır.

Betonarme malzemesinin davranışını anlamak açısından yapılan çalışmalardan biri olan bilgisayar modellemeleri ile analiz; laboratuarlarda yapılan deneysel çalışmalara ve sayısal yöntemlere göre daha ekonomik ve hızlı bir şekilde davranışı gözlemlenebilme ve çalışma imkanı sağlamaktadır. Uygun görülmesi halinde gerekli değişiklikler kolay ve kısa sürede yapılarak farklı parametreler üzerinde bilgi sahibi

olunabilmektedir. Bilgisayar modellemeleri ile analiz, deneysel çalışmalara göre yaklaşık sonuçlar vermektedir. Ancak teknolojinin hızla gelişmesiyle beraber her geçen gün bilgisayar modellemeleri üzerindeki çalışmalar artmakta ve gelişmektedir. Yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışı, gelişmekte olan bilgisayar modelleri ile incelenmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında deneyleri daha önce yapılmış ve deney sonuçları mevcut olan betonarme T kesitli kirişlerde, yüzeylerine yapıştırılan cam elyaf lif takviyeli polimer (GFRP) şeritlerin üzerinde bulunan ankrajların sayısının, kirişlerin kesme dayanımına olan etkisi analitik olarak incelenmiştir. Bu doğrultuda laboratuvar sonuçları mevcut olan bu betonarme kirişlerin ABAQUS/CAE (Complete Abaqus Enviromental) sonlu eleman programı ile modellemesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu prensibi ile modellerin nonlinear analizleri gerçekleştirilmiştir. Beton modeli olarak Concrete Damaged Plasticity beton hasar modeli, donatı çeliği için Classical Metal Plasticity (CMP) modeli kullanılmıştır. Bu modellerin nonlinear analizlerinin sonuçları elde edilmiştir. Daha önceden yapılmış laboratuvar deneylerinden elde edilmiş olan yük-deplasman grafiklerine ait değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması sağlanmıştır. Yapılan modellerin analiz sonuçları ile kirişlerin gerçek davranışlarının belirlenmesi ve güçlendirme çalışmalarında yapılan iyileştirmelerin kiriş davranışına olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Geçmişte Yapılan Çalışmalar

Yapıların onarım ve güçlendirme hususunda geliştirilmesi için geçmişte birçok deneysel ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Özellikle FRP (Fiber Reinforced Polymer) kompozitleri şekil alabilme yeteneği, çekme mukavemetinin yüksek oluşu ve hafifliği gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda güçlendirme çalışmalarında sık karşımıza çıkmıştır. Geçmişte birçok nonlinear analiz için modeller oluşturulmuş ve aynı modeller deneysel sonuçlarıyla mukayese edilmiştir.

Ashour ve Morley, (1993) yaptıkları çalışmada betonarme elemanları nonlinear analiz edebilmek için 3 boyutlu olarak modellemiştir. Bu modelleme yapılırken ABAQUS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Daha önce Karihaloo tarafından deneysel çalışmaları yapılan elemanlar Ashour ve Morley tarafından modellenmiştir ve analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Betonun nonlinear davranışından dolayı çatlakların önemine değinilmiş ve elemanlara çok küçük yükler gelmesi halinde bile çatlakların oluştuğu görülmüştür. Çatlak modeli olarak modelleme kolaylığı bakımından gizli çatlak modeli tercih edilmiştir. Bunun sebebi, ayrık çatlak modelinde elemana tanımlanan mesh yoğunluğunun analiz sonucuna önemli bir şekilde etki etmesidir. Mesh yoğunluğu ve ebatlarının analiz sonuçlarına olan etkisini değerlendirebilmek adına ayrıca bir çalışma daha yapılmıştır. Oluşturulan aynı ebatlardaki iki kiriş modellerine aynı yüklemeler yapılmıştır. Farklı çekme donatısı kullanılarak farklı mesh yoğunluğu analiz edilmiştir. Mesh yoğunluğu ve ebadı kirişlerin açıklığında değiştirilmiştir. Mesh adetleri farklı 3 adet analiz yapılmış ve mesh yoğunluğu fazla olan modelde en uzun yük-deplasman eğrisi tespiti yapılmıştır.

Hsu ve Navakurlar, (2001) yaptıkları çalışmada dayanımı yüksek beton yapılarının çatlama analizleri ile ilgilenmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi ile nonlinear bir model geliştirmişlerdir. ABAQUS sonlu elemanlar programında deneylerden elde ettikleri çekme yumuşaması bağıntısını tanımlayarak boyut etkisini ve eğilme dayanımını

incelemişlerdir. Geliştirmiş oldukları nonlinear bu model, basit ve kiriş testlerinde doğru sonuçlar aldıklarını belirtmişlerdir.

Kachlakev ve Miller, (2001) yaptıkları çalışmada ilk çatlama yükleri, göçme yükleri ve göçme esnasındaki oluşan çatlaklar hususunda modellemeler yapmıştır. Bu modelleme yapılırken ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Horsetail Creek Köprüsünün modelleri geliştirilmiştir. Bu köprüdeki enine kirişlerin gerçek ebatlarında dört adet kiriş test edilmiştir. Bu dört kiriş farklı kompozit elemanlarla (GFRP, CFRP, FRP) güçlendirilmiştir. Oluşturulan modellerin analizinden elde edilen şekil değiştirmeler ile yükleme testlerinden elde edilen şekil değiştirmeler mukayese edilmiştir. Ayrıca kirişlerin SAP2000 ve ANSYS sonlu eleman programlarından elde edilen şekil değiştirmeleri ve orta nokta deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları test sonuçlarından daha rijit olduğu tespit edilmiştir. Güçlendirilmiş kiriş modellerin eğilmeye ve kaymaya karşı yük taşıma kapasitesi, test sonuçlarına göre %105 daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Jia, (2003) yaptığı yüksek lisans çalışmasında betonarme kirişleri CFRP şeritler ile güçlendirmiş, daha sonra da bu kirişlerin modellemesini yaparak sonuçlarını karşılaştırmıştır. Deney çalışmalarında CFRP şeritleri inorganik ve organik epoksi ile kirişlere yapıştırılmıştır. Aynı donatı ve geometride 20 adet kiriş üretilmiştir. CFRP üzerindeki şekil değiştirmeleri ölçmek için dört nokta yüklemesi yapılmıştır. Çalışmanın modelleme kısmında ise ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Bu modelleme yapılırken beton için Solid65, donatı için Link8, CFRP şeritleri için de Solid46 tanımlanmıştır. Analiz sonuçları deney sonuçlarından daha rijit olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarının göçme yükü deney sonuçlarından %5,4-25,9 kadar daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Chung, (2003) yaptığı çalışmada çatlamış beton modelleri üzerinde araştırma yapmıştır. Beton köprü kirişlerin nonlinear analizi için bu modeli geliştirmiştir. Betonarme bu modeli çelik köprü kirişlerindeki çatlakların etkisini araştırmak için ABAQUS sonlu elemanlar programında modellemiştir.

Li v.d., (2003) yaptığı çalışmada çeşitli nedenlerden dolayı hasar görmüş betonarme elemanları FRP takviyesi ile güçlendirmiş ve daha sonra da modellemesini yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. Bu modelleme yapılırken ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Onarılan kolonların rijitliği, betonun dayanımı ve FRP ile beton arasındaki aderans sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır. Yapılan analizlerden FRP takviyesi yapılan kolonun kırılma yükü tespit edilmiştir. Modelin deneysel

sonuçlarla desteklendiği, FRP sargısının kalınlığının artmasıyla dayanımının ve rijitliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Chandrasekaran, v.d., (2004) yaptıkları çalışmada CFRP şeritleriyle güçlendirilmiş modeller tasarlamıştır. Bu yaptıkları modellemeler Norris (1997) tarafından yapılan deney elemanlarıdır. Norris'in deney sonuçları ile modellerin sonlu eleman analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. CFRP şeritleri $\pm 45^\circ$ ve 90° lik açılarla güçlendirilmiştir. Güçlendirme yapılmamış kontrol kirişi, ön çatlaklı ve çatlaksız kirişler kullanılmıştır. Çalışmanın modellemesinde ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Bu modelleme yapılırken beton için Solid65, donatı için Link8, CFRP şeritleri için Solid46, yükleme plakaları için de Solid45 tanımlanmıştır. Aderans ile ilgili bazı kabuller yapılmıştır. Taşıma gücü sonuçları karşılaştırıldığında analiz sonuçlarının ön çatlaklı kiriş elemanı için %8 daha az olduğu tespit edilmiştir. Çatlaksız kiriş elemanı için ise %8 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bazı kabuller sebebiyle modellemenin daha rijit olduğu saptanmıştır.

Hu v.d., (2004) yaptığı çalışmasında güçlendirilmiş betonarme kirişleri ABAQUS sonlu elemanlar programında modellemiştir. Nonlineer olmayan betonarme bu kirişler liflerle güçlendirilmiştir. İki yüzeyden ya da sadece alt yüzeyden lif takviyeleri yapılan bu kirişlerde nihai yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Yaklaşık modeller kullanılarak bu kirişlerin nonlineer davranışı araştırılmıştır. Beton, donatı ve lif için malzeme nonlineerliği irdelenmiştir. Liflerle güçlendirilmiş bu betonarme kirişler ile lif takviyesi ile güçlendirilmemiş betonarme kirişlerin nihai yük taşıma kapasiteleri mukayese edilerek kiriş rijitliğinin etkisini araştırmışlardır.

Yavuzer, (2005) yaptığı çalışmasında dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin, sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan analizini gerçekleştirmiştir. Modelleri ANSYS sonlu elemanlar paket programında oluşturmuştur. Daha önce deneysel çalışması yapılmış olan bu kirişlere monotonik yükler verilmiştir. Modellemesi yapılan kirişlerin deney çalışması Anıl ve Altın tarafından yapılmıştır. Kesme dayanımı yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişlere “U” şeklindeki kelepçeler lama ile sabitlenmiştir. Deneyler kapsamında beş adet kiriş test edilmiştir. Bu modelleme yapılırken beton için Solid65 elemanı seçilmiştir. Analiz ve deney sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Modellerden alınan sonuçların deney sonuçlarına göre daha fazla rijit davranıp daha az süneklik gösterdiği saptanmıştır.

Abdoli, v.d., (2006) yaptıkları çalışmada kesme yetersizliği olan betonarme kirişlerinin güçlendirme çalışmalarını sonlu elemanlar metoduyla modellemiştir.

Kesme kuvveti dayanımı yetersiz olan kirişler FRP şeritleriyle güçlendirilmiştir. Kentucky Üniversitesinde test edilen güçlendirilmiş bu kirişlerde beton basınç dayanımı, farklı lif açılı FRP şeritleri, donatı alanları gibi parametreler incelenmiştir. Çalışmanın modellemesinde ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Ayrık modelleme yapılırken beton için Solid65, donatı için Link8, FRP şeritleri için Shell43 tanımlanmıştır. FRP lif açısı 90° olan modelin yüksek mukavemet ve yüksek süneklik gösterdiği görülmüştür. Etriyelerin kiriş kesme çatlaklarına, FRP şeritlerinden daha az engellediği tespit edilmiştir. Modelleme çalışması deney sonuçlarıyla desteklenmiştir.

Spacone, v.d., (2007) yaptıkları çalışmada eğilmeye karşı FRP plakalarıyla güçlendirilen betonarme kirişlerin deneylerini ve sonlu elemanlar analizini yaparak gevrek kırılma modlarını incelemiştir. Sonlu eleman analizinde ayrık çatlak modeli seçilmiştir. FRP ebatlarının bu gevrek kırılma modu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarında kısa FRP plakasıyla güçlendirilen kirişin göçmesinin plaka sonunda başladığı, uzun FRP plakasıyla güçlendirilen kirişin göçmesinin ise kiriş ortasında başladığı tespit edilmiştir. Göçme modunun beton-FRP ayrışmasında olduğu görülmüştür.

Kaya, (2007) yaptığı çalışmada öngerme toronları ile art çekmeli olarak birleştirilmiş kolon-kirişler modellemiştir ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Kolon-kiriş birleşimleri prefabrik olarak tasarlanmıştır. Prefabrike yapılarda art çekmeli kolon-kiriş birleşimlerinin deprem yüklerine benzer yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında iki adeti monotonik, altı adedi ise prefabrike olan sekiz adet deney elemanı test edilmiştir. Bu deney elemanlarındaki kolonların ebatları 30x30 cm, kirişlerin ebatları ise 24x35cm olarak seçilmiştir. Beton sınıfı ise C50 olarak alınmıştır. Farklı toron çapları ve farklı germe oranları uygulanmıştır. Modeller ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile oluşturulmuştur. Enerji tüketme kapasiteleri, rijitlik ve elemanların moment taşıma kapasiteleri için deney elemanlar ve modeller karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda deney elemanlarının; enerji tüketme kapasitesi, rijitlik ve moment kapasitesi değerleri daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan farklı toron çapları ve bu toronlara uygulanan farklı germe oranlarından dolayı elemanlar için farklı dayanım, enerji tüketme ve rijitlik değerleri tespit edilmiştir.

Tanarşlan, (2007) yaptığı çalışmada kesmeye karşı güçlendirilmiş T kesitli betonarme kirişlerin tersinir-tekrarlanır yükler altında davranışını incelemiştir.

Betonarme kirişler kesmeye karşı CFRP şeritleriyle güçlendirilmiştir. 11 adet deney elemanı CFRP şeritlerinin uygulama şekli, yerleşim düzeni farklı olarak güçlendirilmiştir. Düz, U, L ve Γ şeklinde CFRP şeritleri uygulanmıştır. Ayrıca bazı deney elemanlarına ankraj uygulanmıştır. Deney elemanları sünek bir davranış göstermiş ve kesme kuvveti dayanımı önemli oranda artmıştır. En iyi sonuçlar Γ şeklinde yerleştirilen deney elemanlarından elde edilmiştir. Ankraj uygulanan elemanlarda dayanımın arttığı saptanmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise bu deney elemanlarının sonuçlarını karşılaştırmak için modelleme çalışması yapılmıştır. Çalışmanın modellemesinde ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Analizden elde edilen kesme kuvveti dayanımları, test sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir.

Selvi, (2008) yaptığı çalışmada betonun çarpma etkisini incelemiştir. Dayanımı normal ve yüksek olan beton kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışlarını araştırmıştır. 5 tanesi normal dayanımlı 5 tanesi de yüksek dayanımlı 10 adet dikdörtgen kesitli beton kiriş; yükseklikleri farklı, sabit ağırlıklı bir çekiç ile çarpma etkisi altındaki davranışını tespit etmek için test edilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmanın sonunda çatlak ve göçme şeklinin ABAQUS sonlu elemanlar programı ile modellenmesi yapılmıştır.

Doğan, (2008) yaptığı çalışmada CFRP elemanları ile güçlendirilmiş kirişlerin lineer olmayan analizini yapmıştır. Kirişlerin göçme yükü ve şekil değiştirmesinin CFRP elemanın uzunluğu ile ilişkisini araştırmıştır. Modelleme iki kısımda yapılmıştır. Birinci kısmında beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit uzunluğu birbirinden farklı 16 deney elemanından 7 tanesinin sonlu elemanlar metoduyla modellemesi yapılmıştır. Modellemenin ikinci kısmında ise 6 modelleme yapılmıştır. Bu 6 modelin 2 tanesinin deneyi yapılmamıştır. Diğer 4 model ise birinci modelleme kısmında oluşturan modellerden olup bu 4 modelin CFRP yapışma uzunluğu arttırılmıştır. Bu sayede CFRP-beton arasındaki şekil değiştirmeler incelenmiştir. Efektif yapışma uzunluğunun kontrolü yapılmıştır. Çalışmanın modellemesinde ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Modelleme de beton için Solid 65, CFRP eleman için Solid 46 elemanlarını seçilmiştir. Birinci modelleme kısmı analiz sonuçlarında, göçme yükü değerlerinin, deney sonuçları ile %10 farklı olduğu tespit edilmiştir. Kiriş açıklığındaki deplasman değerlerinde ise deney sonuçlarına yakın değerler bulunamamıştır. İkinci modelleme kısmı analiz

sonuçlarında ise, yine göçme yükü için benzer sonuçlar bulunulsa da, beton-CFRP arasındaki ayrışma tam olarak saptanamamıştır.

Kantar, (2009) yaptığı çalışmada çarpma etkisini incelemiştir. Deney çalışmalarında Karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) ile güçlendirmiş olduğu beton kiriş numunelerinin çarpma etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir. Bu deneylerinde farklı yükseklikten sabit ağırlıkta ve geometride olan bir çekiç ile test etmiştir. Bir başka değişkende beton basın dayanımıdır. Deney çalışmalarında yapılan bu çarpma testini ABAQUS sonlu elemanlar programını kullanarak bilgisayar ortamında modellemiştir. Deney sonuçları ile analiz sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Bulut, (2009) yaptığı çalışmada CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin nonlinear analizini araştırmıştır. Kesme dayanımı yetersiz T kesitli betonarme kirişler ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiştir. Modellemesi yapılan kirişlerin deney çalışması Anıl (2005) tarafından yapılmıştır. Deney çalışmasında yer alan beş kirişin dışında deney çalışmalarında yer almayan farklı aralıklı düzenlenmiş CFRP şeritleriyle güçlendirilen iki kiriş daha modellenmiştir. CFRP şeritlerinin düzenlenme aralığına bağlı olarak taşıma gücü değerleri araştırılmıştır. Bu modelleme yapılırken beton için Solid65, CFRP şeritleri için Solid46, çelik yükleme plakaları için de Solid45 tanımlanmıştır. ANSYS sonlu eleman analizindeki modellerin göçme yükü değerleri deney sonuçları tarafından doğrulanmasına rağmen deplasman değerlerinde yakın sonuçlar elde edilememiştir. Deplasman değerlerinin laboratuvar deney sonuçlarına yakın olmamasının sebebinin ANSYS'te tanımlanan beton modelinin, gerçek beton özelliklerini tam olarak temsil edilememesine yorumlanmıştır.

Lale, (2011) yaptığı çalışmasında öngörülemeyen yükler altındaki betonarme yapıların davranışını araştırmıştır. Nonlinear malzeme modellerinin geliştirilmesi hususunda beton için sargı duyarlılığını araştırmıştır. Bu modeli ABAQUS sonlu elemanlar programında kullanmıştır ve yapı elemanlarına uygulamıştır.

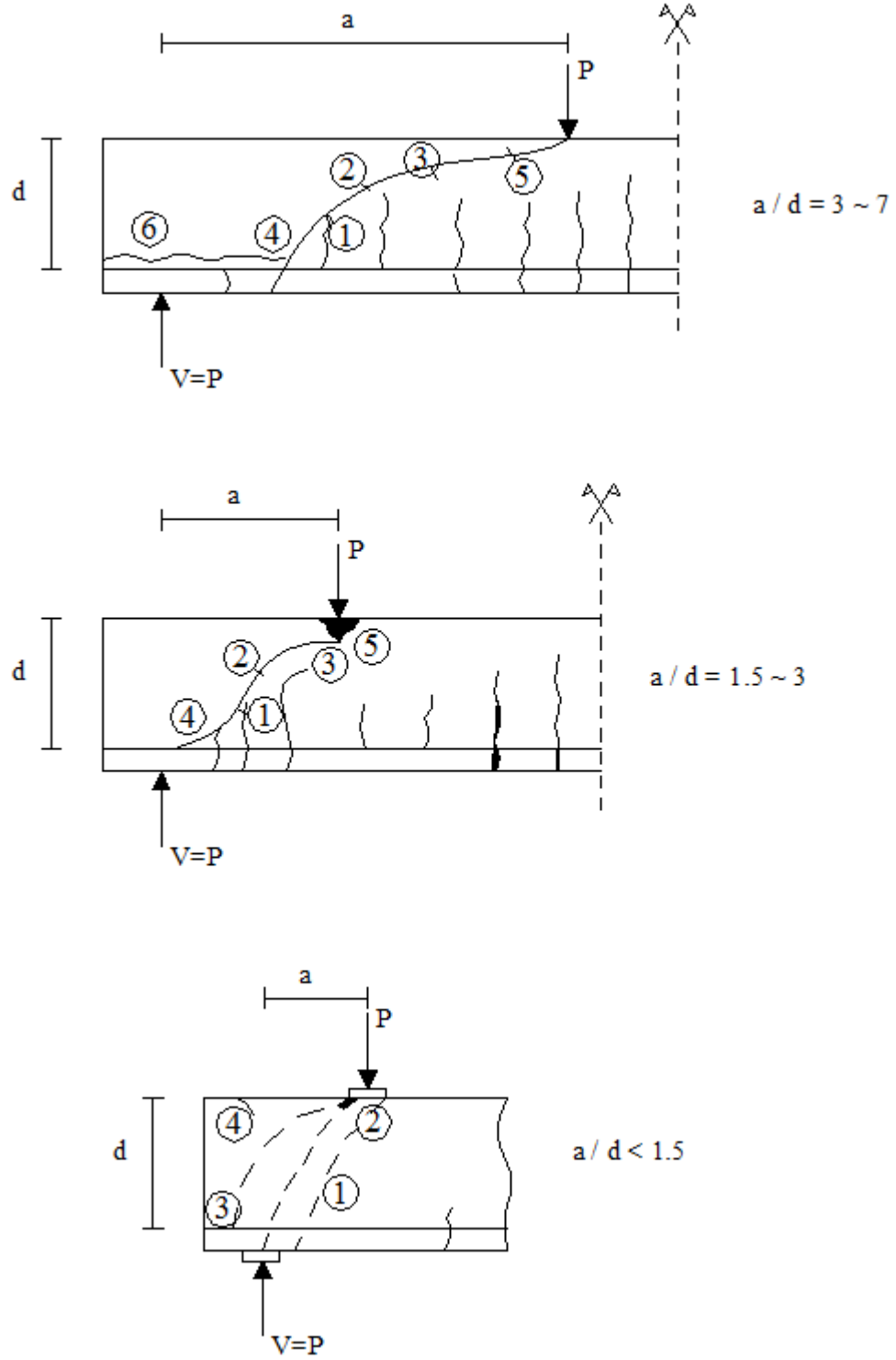
Yılmaz, (2013) yaptığı çalışmasında kesme dayanımı CFRP(Karbon Takviyeli Polimer) şeritleriyle güçlendirilen betonarme kirişlerde çarpma davranışını deneysel yol ile incelemiştir. Deneylerde ağırlık düşürme yöntemi kullanılmıştır. Dört adet deney serisi olmak üzere toplam on altı adet deney tespit edilmiştir. Kullanılan CFRP şeritlerin aralıkları, çarpma hızı ve beton basınç dayanımı gibi parametreler üzerinde değişiklik yapılmış ve bu parametrelerin kiriş çarpma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu betonarme kirişler ANSYS sonlu elemanlar paket programı

ile modellenerek deney sonuçları mukayese edilmiştir. Kesme dayanımı CFRP şeritleriyle güçlendirilen betonarme kirişlerde bu güçlendirme tekniğinin çarpışma davranışını iyileştirmede başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Aryan, (2014) yaptığı çalışmasında polipropilen lifler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmayı bilgisayar ortamı ile desteklemiştir. ABAQUS sonlu elemanlar paket programını kullanarak nonlinear modellerini oluşturmuştur. Analitik modeller ile deney sonuçlarından çıkan yük-deplasman grafiklerini karşılaştırmıştır. Sonuç olarak polipropilen lif ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, takviye yapılmayan betonarme kirişlere göre daha sünek bir davranış gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. Deney sonuçları ile analiz sonuçları uyumlu çıkartmıştır.

2.2 Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi ve Davranışı

Beton, barındırdığı özellikler bakımından yüksek basınç ve kesme dayanımı göstermektedir. Buna karşın çekme dayanımı ise bu değerlerle karşılaştırıldığında daha düşük olmaktadır. Basit kesme durumunda asal basınç ve çekme gerilmeleri kesme gerilmesine eşitlenir. Çekme dayanımının da düşük olması nedeniyle kırılma, gevrek bir şekilde çekmeden dolayı oluşur. Asal çekme gerilmeleri, kesme gerilme yüzeylerine 45°'lik bir açı ile gelir. Kırılma sürecinde asal çekme gerilmelerine dik yönlü kırış alt yüzünden üst yüzüne doğru uzanan eğik çatlaklar görülür. Bu çatlaklara eğik çekme çatlakları denmektedir.. Dolayısıyla eğik çekme çatlaklarının oluşma sebebinin kesme gerilmesinden değil, asal çekme gerilmesinden olduğu görülmektedir. Bu durumdan ötürü alınması gereken önlemler asal çekme gerilmesine göre alınmalıdır. Asal çekme gerilmesinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının oluşumu Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Ersoy, 2001).



Şekil 2.1: Asal çekme gerilmesinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının oluşumu (Ersoy, 2001).

Beton malzemesinin çekme dayanımının düşük olması nedeniyle kirişler, kesme etkisiyle ani ve gevrek şekilde göçmektedir. Bu geçmenin önüne geçmek için standart ve yönetmelikler kirişlerde kesme donatısı yani etriye bulundurulmasını şart

koşar. Etriye donatısının kullanılmasıyla kiriş, sünek bir davranış gösterebilmektedir. Asal çekme gerilmelerinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının büyümesini ve artmasını engeller. Etriye donatısının önemini veya başka bir deyişle betonarme kirişin kesme etkisi davranışını anlayabilmek için birçok çalışmada kesme dayanımı yetersiz elemanlar test edilmiştir ve modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Kesme davranışının betonarme kirişler üzerindeki etkisini anlayabilmemiz için bu davranışı etkileyen etmenleri de bilmemiz gerekmektedir. Bu etmenlerden biri de kesme açıklığının (a), faydalı yüksekliğe (d) bölümüyle elde edilen orandır (a/d). Kesme açıklığı (a), kiriş üzerine gelen yükün mesnet ile olan mesafesidir. Bu oranın aralığı için farklı dayanım, göçme ve çatlak oluşumları görülmektedir.

Bu çalışmadaki $3 < a/d = 4.7 < 7$ durumunda eğilme çatlakları oluşur. Eğilme çatlakları kiriş eksenine dik şekilde gerçekleşir ve yükün artmasıyla beraber tarafsız eksene doğru uzar. Eğilme çatlağı, tarafsız eksene uzarken asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşir. Şekil 2.1’de 4 numarası ile gösterilen eğik çatlak oluşur. Eğik çatlama, donatıya paralel olacak şekilde aderans çatlaklarını da oluşturduktan sonra yükün de artmasıyla Şekil 2.1’deki 5 ve 6 numaralı ile gösterilen çatlakları oluşturur. Bu çatlaklar aniden gelişir ve gevrek bir şekilde kırılır (Ersoy, 2001).

2.3 Betonarme Elemanların Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi

Türkiye deprem kuşağında yer alan ülkelerden biridir. Geçmişte yaşanan büyük çaplı depremler maalesef hala hafızalarda bulunmaktadır. Bu büyük depremlerde meydana gelen can ve maddi kayıplar inşaat mühendislerinin sorunu haline gelmiştir. Deprem etkisi ile hasar görmüş binalarda, proje veya yapının uygulama safhasında yapılan hataların onarılmasında, tarihi binaların restorasyonunda, gelişmekte olan standartlar ve şartnamelere uyum sağlamak amacıyla onarım ve güçlendirme çalışmaları günümüzde çok önem kazanmıştır. Betonarme yapılar da rijitlik, süneklik ve dayanım gibi tasarım şartlarını sağlamak amacıyla çeşitli yöntemlerle güçlendirilmektedir. Kesme kırılmasının olumsuzluklarından bir önceki başlıktan bahsetmiştik. Ani ve gevrek olan bu kırılma biçimi, yapı güvenliğinin sağlanması adına kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Bu kırılma biçimi yerine sünek bir göçme için tasarımlar yapılmaktadır. Bu yüzden betonarme elemanların kesmeye karşı güçlendirilme çalışmaları her geçen gün artmaktadır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar ışığında betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde bir çok yöntemler geliştirilmiş olup yapılan deney sonuçları çeşitli matematiksel yöntem ve bilgisayar modelleri desteklenmeye çalışıldığı görülmektedir. Mantolama yöntemi, kelepçeleme yöntemi, kiriş yüzeylerine dıştan çelik plaka veya elyaf takviyeli polimerler (FRP) uygulaması gibi yöntemler kullanılmaktadır.

FRP plakaları ile güçlendirme çalışmaları son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum FRP plakaların üstün özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Hafiflikleri nedeniyle elemana ve yapıya ek bir yük getirmemektedirler. İçerisinde bulundurdıkları fiberler sayesinde yüksek bir dayanıma sahiptirler. Ayrıca pratikte uygulanma kolaylığı gibi nedenlerden dolayı FRP kompozitleri güçlendirme çalışmalarında son yıllarda önem kazanmıştır. Bu malzemeler kiriş yüzeylerine epoksi esaslı yapıştırıcılar ile uygulanılmaktadırlar. Bu yapıştırıcılar FRP içerisinde bulunan fiberleri bir arada tutar ve yük iletimini sağlamaktadır. Fiberin malzemesine göre elyaf takviyeli polimerler isimlendirilir. En yaygın kullanılan fiber malzemeleri cam, aramid ve karbondur.

Bu çalışma kapsamında modellemesi yapılan kirişler ise, Kankal, (2011) tarafından ulaşım kolaylığı ve ucuz maliyeti gibi nedenlerden dolayı cam lifli polimer (GFRP) plakalar kullanılmıştır. Bu plakaların kiriş yüzeylerinden sıyrılmasını önlemek ve kesme dayanımına olan etkisini araştırmak amacıyla ankraj bulonları kullanılmıştır. Çalışmadaki değişken ankraj sayılarıdır.

3. NONLİNEER DAVRANIŞ

3.1 Nonlinear Davranışın Yapılar Üzerindeki Etkisi

Lineer yani doğrusal analiz yöntemlerinde malzemenin şekil değiştirmesi elastik sınırlar içerisinde kalmaktadır. Elastik bir malzeme, kendisine uygulanan yükler ile doğru orantılı bir biçimde şekil değiştirmektedir. Uygulanan bu yükler kaldırıldığında ise şekil değiştirmeler kaybolmaktadır.

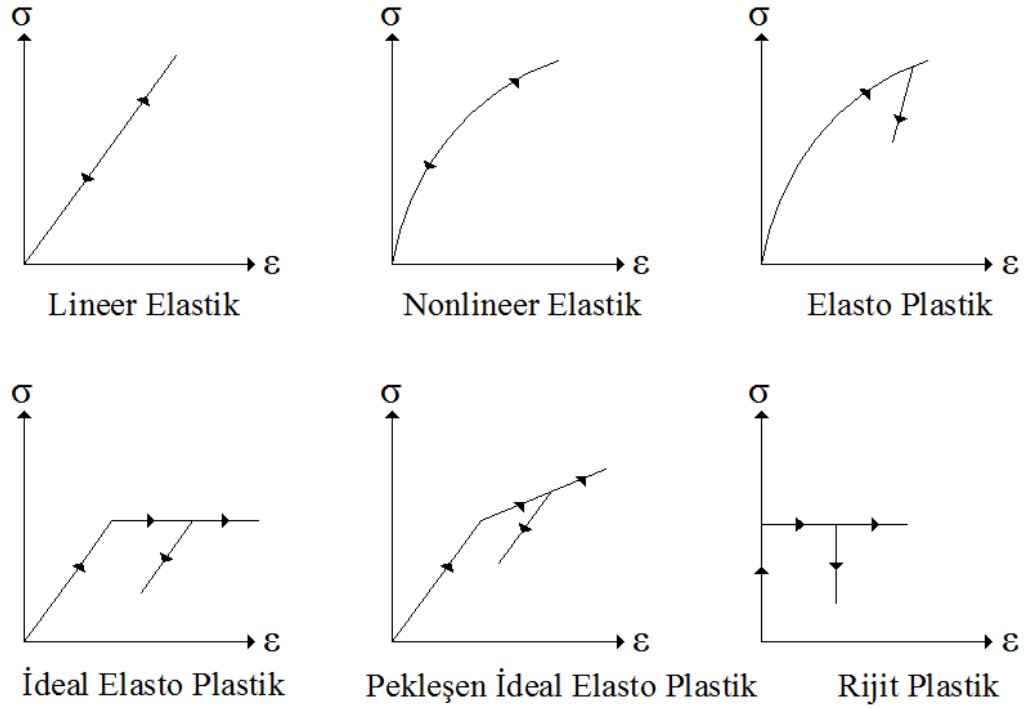
Betonarme yapılar sadece düşük yüklemeler yani servis yükleri etkisi altında lineer bir davranış sergileyebilirler. Ancak; zamana bağlı oluşan etkiler ve/veya sıcaklık, korozyon, sürtünme, büzülme gibi çevresel koşulların getirmiş olduğu etkiler, betonun lineer davranışını etkilemektedir. Çünkü betonarme elemanlarda bu etkilerden dolayı meydana gelen yüklemeler sonucu, zamana bağlı çatlaklar oluşmakta olduğu ve bu çatlakların geliştiği görülmektedir. Bu sebepten ötürü betonarme malzemesinin gerçek davranışı nonlinear analiz ile yaklaşıklştırılabilmektedir.

Nonlinear analizin yani doğrusal olmayan analizin genel prensibi, yükün elemana adım adım etki ettirilmesidir. Her adıma, bir önceki adımın sonuçları etki edilerek gerçek davranışa yaklaşılmaktadır. Bu şekilde yapının analizinde meydana gelen deformasyonlar, yer değiştirmeleri ve rijitlik değişimleri ihmal edilmemiş olunmaktadır. İkinci mertebe moment etkileri, lineer olmayan analize yani nonlinear analize verilebilecek güzel bir örnek olmaktadır.

Yapı elemanlarının nonlinear davranış göstermesinin sebepleri bulunmaktadır. Bunlar; malzeme nonlinearlığı ve geometrik nonlinearlıktır. Elemanda veya yapıda meydana gelecek olan deformasyonlar, sehimler, şekil değiştirmeler, deplasmanlar geometrik nonlinearlık ile ilgilidir. Malzeme nonlinearlığı ise yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin lineer özellik göstermemesi olarak açıklanabilmektedir.

Yapıların nonlinear davranışını anlayabilmek için çeşitli çalışmalar halen yapılmaktadır. Laboratuvar deneyleri, sayısal yöntemler ve bilgisayar simülasyon teknikleri ile model analizleri betonarmenin nonlinear davranışı hakkında daha fazla

bilgiye sahip olmamız için yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalardan elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) değerleri davranışı anlayabilmek için önemli sayılmaktadır. Resim 3.1’de yapı malzemeleri için kabul edilen bazı gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafikleri verilmiştir (İnan, 1988).



Şekil 3.1: Yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafikleri (İnan,1988).

Deneysel çalışmalarda yükleme ve mesnetlenme şartları gerçeğe daha yakın sonuçlar çıkarttığı görülmektedir. Ancak; deney çalışmalarının hazırlanması zaman ve meşakkat istemektedir. Aynı şekilde sayısal yöntemlerle yapılacak olan analiz için gerekli denklemleri elde etmek uzun zaman almaktadır.

Bilgisayar modellemeleri ise diğer yöntemlere göre yaklaşık sonuçlar elde etse de günümüzde birçok çalışmada yer almaktadır. Deneysel çalışmalar gibi uzun zaman ve yüksek maliyet getirmezler. Ayrıca analizde etkili olan parametreler kısa sürede değiştirilerek farklı araştırmalar yapılmasına olanak sağlamaktadırlar.

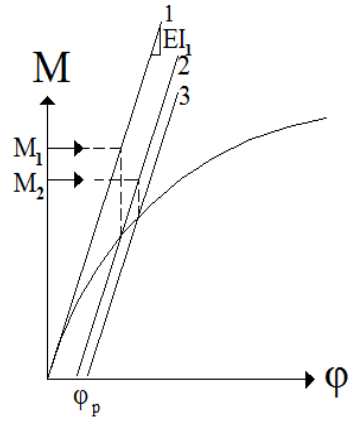
3.2 Nonlinear Çözüm Yöntemleri

Lineer davranış sergileyen malzemelerin, gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafikleri lineer elastik kabul edilir. Bu yapılan kabul ile sistemin rijitliğinin sabit olduğu varsayılır. Oysaki nonlinear davranış gösteren malzemeler de yer değiştirmelere (deplasmanlar ve dönmeler gibi) bağlı olarak sistemin rijitliği değişmektedir.

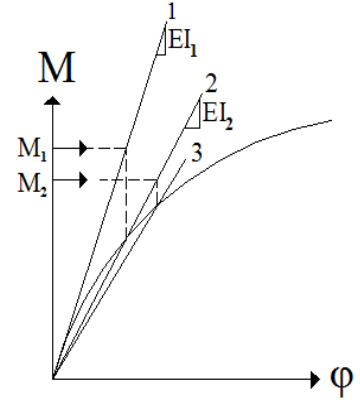
Nonlinear çözüm yöntemlerinden biri artımsal yöntemdir. Yapı sistemine gelen yük, belirli sayıda yük artımına bölünür. Bölünen birinci artırımda, başlangıç rijitlik matrisi kullanılmaktadır. Bu yöntemin gerçek sonuçlar verebilmesi için yük değerine düzeltme uygulanmaktadır. Uygulanan bu düzeltme ile her adımda yük artırılır. Basit artımsal yöntem ve düzeltilmiş artımsal yöntem olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Yöntemlerden biri de ardışık yaklaşımdır. Bu yöntemde, yer değiştirmeler bir önceki değerleri ile doğrusallaştırılır. Hesapta kullanılan doğrusallaştırma yöntemleri; başlangıç teğeti, başlangıç kirişi, kiriş ve teğet yöntemidir. Bu yöntemler ile lineerleştirilmiş olunur.

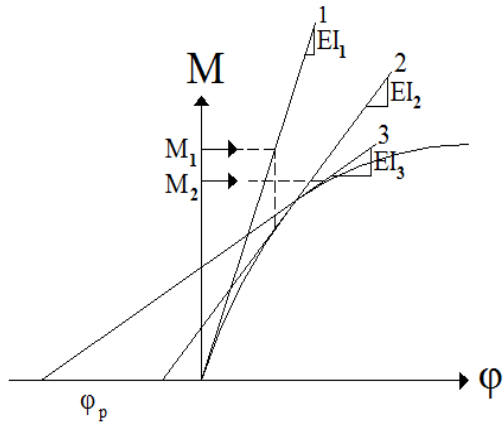
Başlangıç teğet yönteminde hesap her adımda doğrusal olarak yapılır. Rijitlik matrisi (Katsayılar matrisi) de her adımda aynı olmaktadır. Başlangıç kirişi, kiriş ve teğet yöntemlerinde ise katsayılar matrisi her adımda farklıdır. Bu yöntemlerin birbirinden farkı ise yakınsama hızının düzeyidir. Şekil 3.2' de bu yöntemlerin moment-eğrilik (M - ϕ) grafikleri verilmiştir (Cook,1961).



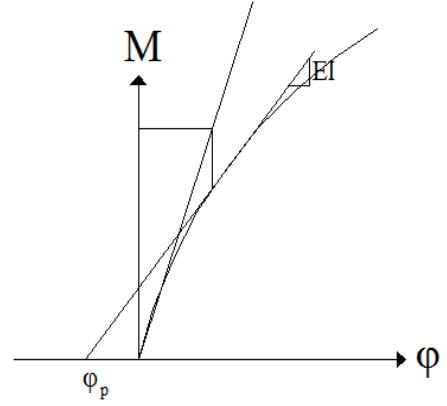
Başlangıç Teğeti Yöntemi



Başlangıç Kirişi Yöntemi



Teğet Yöntemi



Kiriş Yöntemi

Şekil 3.2: Ardışık yaklaşım yöntemine ait moment-eğrilik grafikleri (Cook, 1961).

4. SONLU ELEMENLAR METODU

4.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Tanımı, Tarihi ve Prensibi

Sonlu elemanlar metodu (Finite element method), mühendislik alanlarında karmaşık problemlerin çözülebilmesi için geliştirilen sayısal bir metot olarak kullanılmaktadır. İlk kez bu metot, 1950 yıllarında uçak gövdelerinin ve kanatlarının gerilme analizlerinde kullanılmıştır. Daha sonra uçak, otomotiv, inşaat, uzay bilimleri, mekanik, su kaynakları mühendisliği gibi diğer önemli mühendislik dallarında gelişim göstermeye başlamıştır. Metodun diğer mühendislik dallarında gelişim göstermesinin önemli sebeplerinden biri, bu metodun bilgisayar programlarında kullanılabilirliği olmuştur. Sonlu elemanlar metodunun bilgisayar teknolojisinde kullanılarak hazırlanması, çok uzun süre alan ve yüksek maliyetler gerektiren deneysel ve laboratuvar yöntemlerinin incelenmesi kolaylaştırmıştır.

İlk kez uçak parçaları ve havacılık problemlerinde kullanılmaya başlanmasına rağmen literatürde ilk kez “sonlu elemanlar metodu” adı 1956 yılında Clough tarafından kendi makalesinde yer almıştır. Sonlu elemanlar metodunun ilk kitabı ise 1967 yılında Zienkiewicz ve Cheung tarafından yazılmıştır (Clough, 1960), (Zienkiewicz, Cheung, 1967).

Sonlu elemanlar metodunda esas prensip, karmaşık problemin çözümünü basite indirgeyebilmektir. Basite indirgemek için; çözüm bölgesi, birbiriyle bağıntılı birçok basit küçük elemana bölünmelidir. Yani başka bir deyişle serbestlik derecesi sonsuz olan bir sistemin, düğüm noktalarında birbirleriyle bağlı olan sonlu elemanlara ayrılmasıdır. Burada düğüm noktası, elemanların birbirleriyle kesişim noktasını ifade etmektedir. Örnek olarak bir elemana ait deplasman değeri için hesap elemanın düğüm noktalarındaki değerlerinin interpolasyon yapılarak bulunmasıdır. Serbestlik derecesi ise, elemanın düğüm noktası üzerinde müsaade ettiği yer değiştirmelerdir (deplasman ve/veya dönme). Serbestlik derecesi elemanın özelliğine bağlıdır ve

düğüm noktalarındaki serbestlikleri toplamıdır. Serbestlik derecesi, problemin çözüm boyutuyla ilişkilidir. Serbestlik derecesi “n” olan bir sistemin rijitlik matrisi $[K]$, $[n \times n]$ ’dir. Kuvvetler düğüm noktalarına etki ettirildiği için sonlu elemanlar metodu düğüm noktasına bağlıdır.

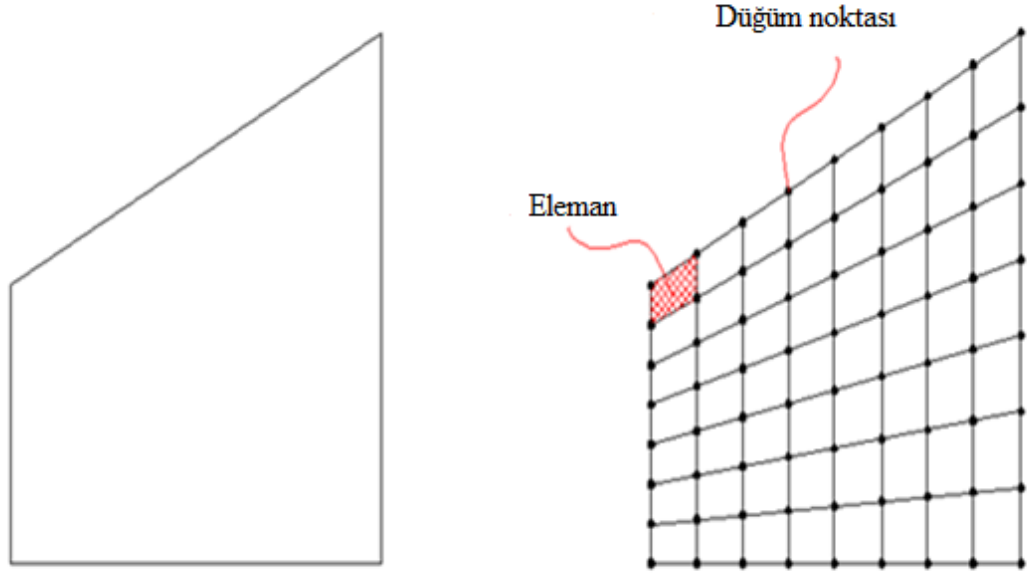
4.2 Problem Çözümünde Sonlu Elemanlar Metodu

Bir problemin sonlu elemanlar metodu ile çözümünde kullanılacak adımlar şu şekilde sıralanmaktadır.

- Cisim sonlu elemanlara ayrılması ve eleman tiplerinin seçilmesi,
- İnterpolasyon fonksiyonları seçilmesi,
- Elemanlar için rijitlik matrisi oluşturulması,
- Sistemin (Global) rijitlik matrisinin elde edilmesi,
- Sistemdeki kuvvetlerin bulunması,
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sistem denkleminin çözümü ile deplasmanların elde edilmesidir.

Sonlu elemanlar metodunda problemin çözümü için yapılacak birinci adım cismin sonlu elemanlara bölünmesi ve eleman tipinin belirlenmesidir. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenmeli ve bu yapıya en müsait eleman tipleri seçilmelidir. Cismin sonlu elemanlara ayrılmasına “mesh etme” denir. Mesh etme de genel prensip, çok sayıda elemana bölünmektir. Bu prensip sonuçların hassasiyetiyle doğrudan ilişkilidir. Sonlu elemanlar prensibinde elemanlar arası sonsuz sayıdaki bağlantı sonlu bir sayıya indirgenir. Parçaların düğüm noktaları adı verilen noktalarla birbirleriyle bağlı olduğu kabul edilir. Sonlu eleman sayısının fazlalığı çözümün hata oranını küçültmesine rağmen sayısal çözümün zorlaşmasına da neden olur. Şekil 4.1’de bir sonlu eleman modeline ait eleman ve düğüm noktaları gösterilmiştir. Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara bölünmesi ile her eleman için rijitlik matrisleri oluşturulur. Bu rijitlik matrisleri her elemanın yerel (lokal) eksen takımlarında oluşur. Yerel eksenler her elemanın Genel (Global) eksene göre yerleşimini gösterir. Elemanlar için yerel eksen takımında elde edilen rijitlik matrislerinin genel eksen takımına taşınması ile sistemin (Global) rijitlik matrisi elde edilir. Genel (Global) eksen takımı, sistemin bulunduğu ortamı belirtir. Her problemin yapay ya da doğal sınır şartları vardır. Bu şartlar cismin yapabileceği yer değiştirmeleri gösterir.

Belirlenen sınır şartlarıyla düğüm noktası deplasmanları elde edilir. Sonlu elemanlar metoduyla bulunan deplasman sonuçlarıyla gerilme değerleri, mesnet tepkimeleri ve kesit tesirleri bulunulabilir.



Şekil 4.1: Eleman ve düğüm noktaları gösterilen bir sonlu eleman modeline ait örnek.

Sonlu elemanlar metodundaki elemanlar dört kısımda incelenir. Bunlar tek, iki, üç boyutlu ve dönel elemanlardır. Tek boyutlu elemanlara tek boyutlu problemlerin çözümünde ihtiyaç duyulur. Düzlem problemlerinde iki boyutlu elemanlar kullanılmaktadır. Üç düğüm noktalı üçgen elemanlar bunlara örnektir. Daha fazla düğüm noktası olan çeşitleri de vardır. Üç boyutlu elemanlara en iyi örnek üçgen piramitidir. Üç boyutlu problemlerinin çözümünde kullanılmaktadırlar. Dönel elemanlar ise eksenel simetrik özellik gösteren problemlerde kullanılır. Gerçekte bu elemanlar üç boyutludur fakat diğer elemanların(tek veya iki boyutlu) eksenleri etrafında simetrik şekilde dönmesiyle oluşturulurlar. Geometrisi simetrik olan problemleri tek veya iki boyut problem gibi çözme kolaylıklarından dolayı daha çok tercih edilirler.

4.3 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Dezavantajları

Sonlu elemanlar metodunun diğer yöntemlere göre bazı üstünlükleri vardır. Yapıları doğrusal olmayan analiz çözümlerine olanak sağlayarak gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmemizi sağlamaktadır. Deneysel çalışmalar gibi uzun zaman ve yüksek maliyet getirmemektedirler. Yine sayısal yöntemlere nazaran çok daha kısa zamanda sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca analizde etkili olan parametreler kısa sürede değiştirilerek farklı araştırmalar yapılmasına olanak sağlarlar. Bu etmenler sonlu elemanlar metodunun olumlu özellikleri olmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun olumsuz özellikleri nedeniyle bazı dezavantajları mevcuttur. Malzeme özelliklerinin ve geometrisinin uygun tanıtılamaması durumunda, sonuçlar gerçek sonuç değerlerinden uzaklaşmaktadır. Sonlu elemanlar metodunu uygulayan programın temin edilmesi ve kullanılabilmesi için çok iyi donanımlı bir bilgisayar kullanılması gerekmektedir. Bu da maliyeti etkilemektedir. Sonlu elemanlar metodunda esas prensip, çözümü yapılacak cismin, birbiriyle bağıntılı birçok basit küçük elemana bölünmesidir. Analizden gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi için ağ yoğunluğunun fazla tutulması gerekmektedir. Ancak, ağ yoğunluğunun fazla tutulduğu çalışmalarda da analiz için bilgisayar kapasitesi yetersiz kalabilmektedir. Bu etmenler sonlu elemanlar metodunun olumsuz özellikleri olmaktadır.

5. DENEY ELEMANLARININ TANITILMASI

Bu tez çalışmasında, Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında Kankal, (2011) tarafından deneyleri yapılan 5 adet betonarme T kesitli kirişlerin modellenmesi yapılmıştır. Oluşturulan bu modellerin analiz sonuçları, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney ile analiz deplasman değerleri karşılaştırılarak irdelenmiştir. Bu irdeleme için modellerin nonlinear analizleri gerçekleştirilmiştir.

Test edilmiş kirişlerde yüzeylerine yapıştırılan cam elyafı takviyeli polimer (GFRP) şeritlerin üzerinde bulunan ankrajların sayısının, kirişlerin kesme dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Boyuna (çekme ve montaj donatısı) ve enine (etriye donatısı) donatıları ile boyutları aynı olan 3 adet güçlendirilmiş betonarme T kesitli kiriş, kesme dayanımı olarak yetersizdir. Bu kirişlerde etriye oranı $\rho_w=0.00157$ olarak alınarak kesme kapasitesi yetersiz kılınmıştır. Etriyeler 6 mm çapında düz donatılardan seçilmiştir. Mesnetler bölgelerinde lokal kırılmanın oluşmaması için 3 adet 33 mm aralıklarla etriye gösterilmiştir. Boyuna donatılardan çekme donatısı 16 mm çapında 3 adet ve 14 mm çapında 2 adet nervürlü, montaj donatısı için 8 mm çapında 2 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Etriye için kullanılan 6 mm çapındaki donatının çelik sınıfı S220 olup diğer donatılar için çelik sınıfı S420'dir. Güçlendirilmiş kirişlerde aynı ebatlarda ve aralıklarda GFRP şeritleri kullanılmıştır. GFRP şeritleri; 280 mm boyunda, (W_f) 90 mm genişliği ve 5 mm kalınlığındadır. Kiriş tabanından ve tablasından 2.5 mm mesafe bırakılmıştır. GFRP şeritleri (S_f) 100 mm arayla yerleştirilmiştir. GFRP şeritleri epoksi bazlı yapıştırıcı ile betonarme kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır. Kullanılan GFRP malzemesinin özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Güçlendirilen 3 kirişte tek değişken, GFRP şeritlerin kiriş beton yüzeyinden sıyrılmasını engelleyen ankraj bulonlarının sayısı ve ankraj eksenleri arası mesafedir. 3, 4 ve 5 numaralı elemanlarda sırasıyla 2, 3 ve 4 adet ankraj bulonu kullanılmıştır. Ankrajlar arası mesafeler ise 2 ankraj kullanılan elemanda 180 mm, 3 ankraj kullanılan elemanda 90 mm ve 4 ankraj kullanılan elemanda ise 60

mm'dir. Güçlendirilme yapılmamış güçlü ve zayıf referans elemanı olarak 2 kirişte modellenmiştir. Güçlü referans kirişinde, etriye donatıları 75 mm arayla konulurken zayıf referans kirişinde ise güçlendirilmiş kirişlerde olduğu gibi etriye oranı $\rho_w=0.00157$ olarak alınmıştır. Modellenen kirişlerin tamamında a/d oranı 4.7 olup T kesitli tablalı betonarme kirişlerin uzunluğu 4000 mm'dir. Kirişlerin tabla genişliği 320 mm, gövde genişliği 120 mm, tabla derinliği 75 mm, kiriş yüksekliği 360 mm'dir. Kullanılan beton sınıfı ise basınç dayanımı 16 Mpa olan BS 16 (C16)'dır.

Çizelge 5.1: GFRP Özellikleri (URL-1).

Özgül ağırlık (g/cm ³)	1.85
Bükülme kuvveti (kg/cm ²)	3500
Darbe mukavemeti (kJ/m ²)	33
Laminasyona dikey elektrik dayanımı (MV/m)	14,2
90°C'de transformatör yayı içinde laminasyona paralel kırılma voltajı (KV)	35
Su içinde doyurulduktan sonraki elektriksel direnç (OHM)	5x108
Renk	Kirli sarı

Deneyleri yapılmış kirişlerin donatı, GFRP şerit bilgileri ve uygulanan ankraj bulon sayıları Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2: Deney Elemanlarının donatıları (Kankal, 2011).

Deney Elemanı No	(a/d)	Boyuna Donatı		Enine Donatı	
		Adet/Çap (mm)	Oranı	Çap/Aralık (mm)	Oranı
1 (Güçlü referans)	4.7	3Ø16+2Ø14 (nervürlü)	0.023	Ø6/75 (düz)	0.00628
2 (Zayıf referans)	4.7	3Ø16+2Ø14 (nervürlü)	0.023	Ø6/300 (düz)	0.00157
3 (Güçlendirilmiş)	4.7	3Ø16+2Ø14 (nervürlü)	0.023	Ø6/300 (düz)	0.00157
4 (Güçlendirilmiş)	4.7	3Ø16+2Ø14 (nervürlü)	0.023	Ø6/300 (düz)	0.00157
5 (Güçlendirilmiş)	4.7	3Ø16+2Ø14 (nervürlü)	0.023	Ø6/300 (düz)	0.00157

Çizelge 5.3: Deney Elemanlarındaki kullanılan GFRP şeritleri (Kankal, 2011).

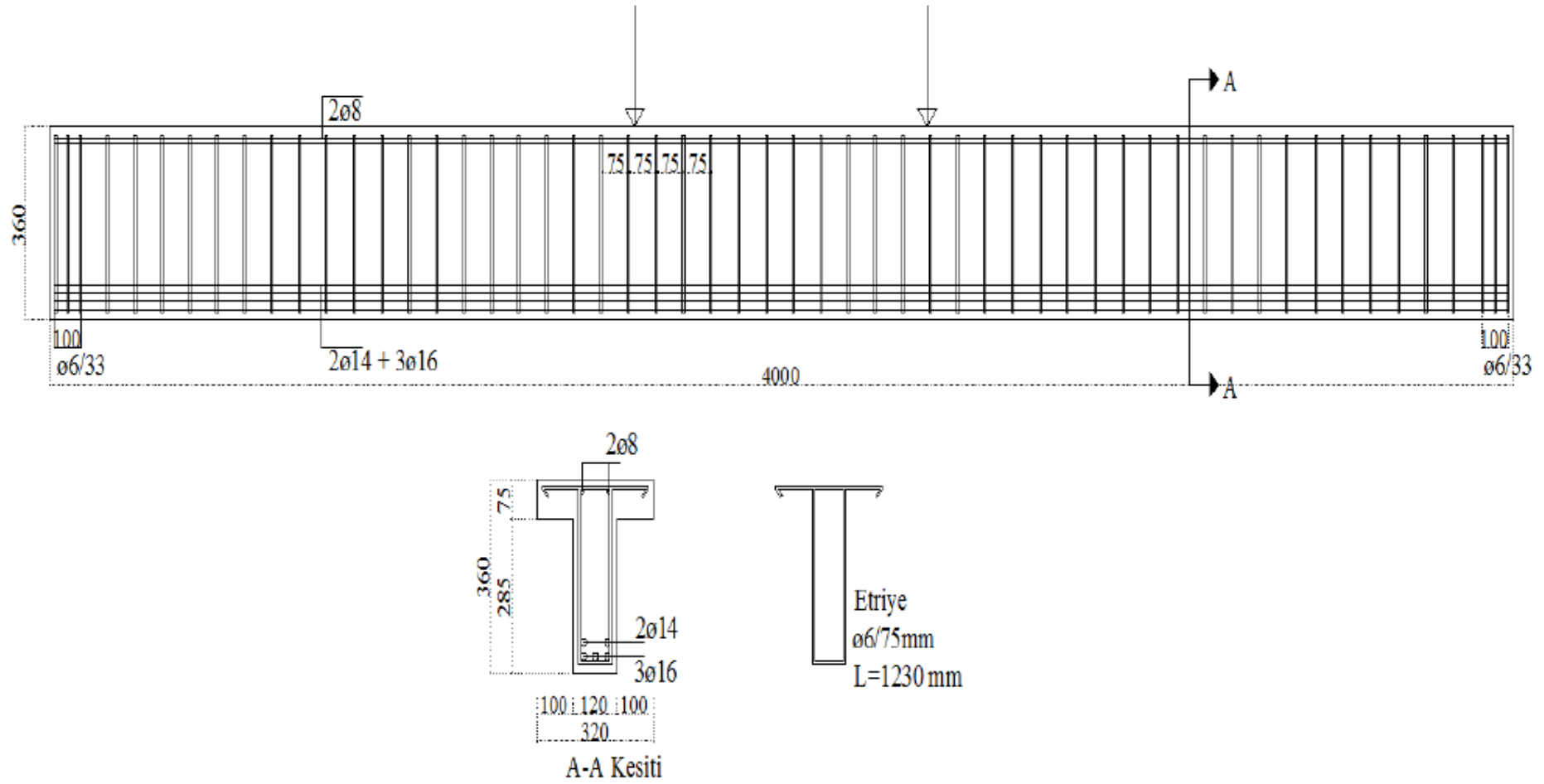
Deney Elemanı No	GFRP Şerit			GFRP Şerit Aralığı(mm)
	Boy(mm)	Genişlik(mm)	Kalınlık(mm)	
1 (Güçlü referans)	-	-	-	-
2 (Zayıf referans)	-	-	-	-
3 (Güçlendirilmiş)	280	90	5	100
4 (Güçlendirilmiş)	280	90	5	100
5 (Güçlendirilmiş)	280	90	5	100

Çizelge 5.4: Deney Elemanlarındaki ankraj sayıları (Kankal, 2011).

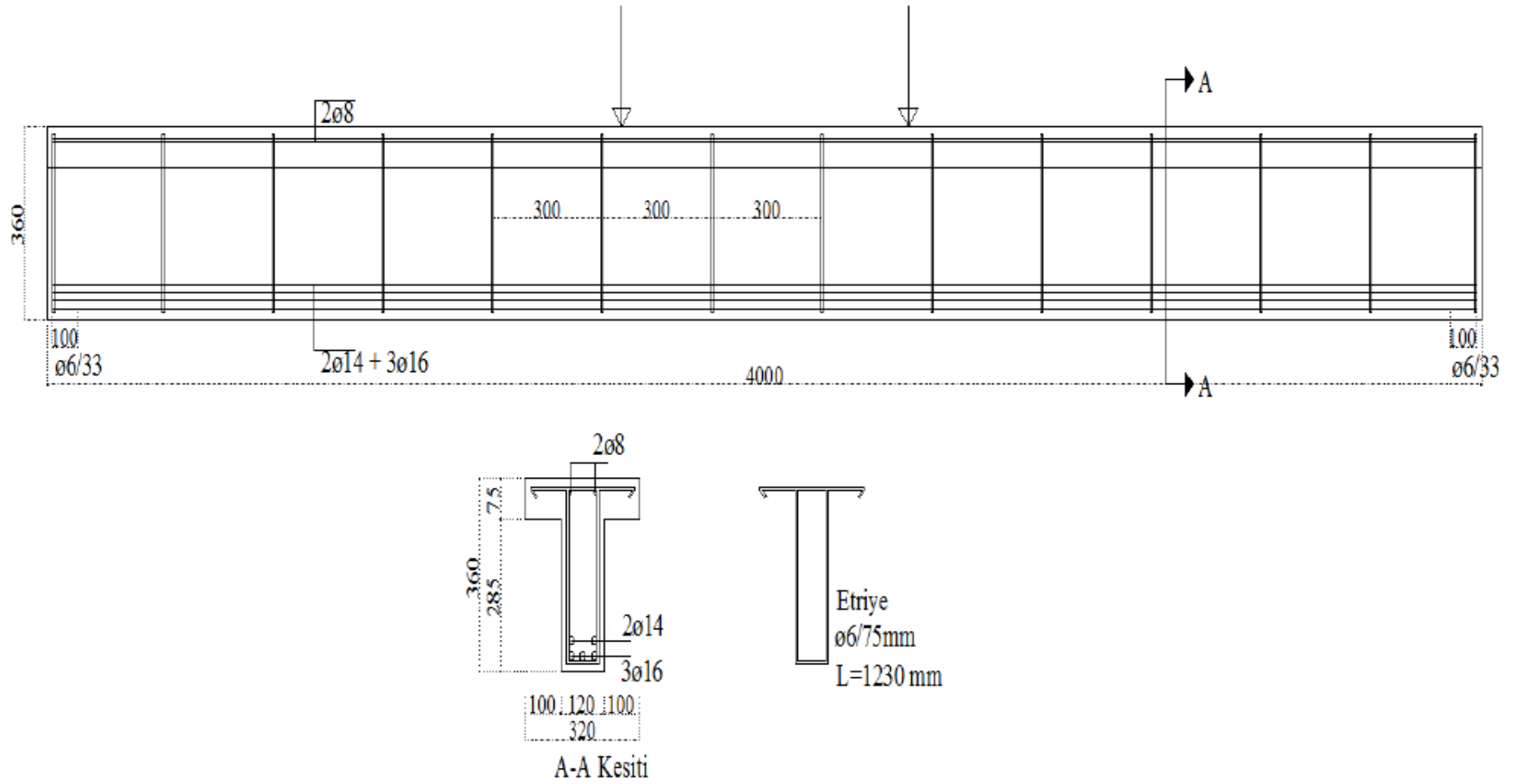
Deney Elemanı No	Ankraj		
	Çap (mm)	Adet	Aralık (mm)
1 (Güçlü referans)	-	-	-
2 (Zayıf referans)	-	-	-
3 (Güçlendirilmiş)	8	2	180
4 (Güçlendirilmiş)	8	3	90
5 (Güçlendirilmiş)	8	4	60

Kirişlerin ölçüleri ve donatı şeması Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

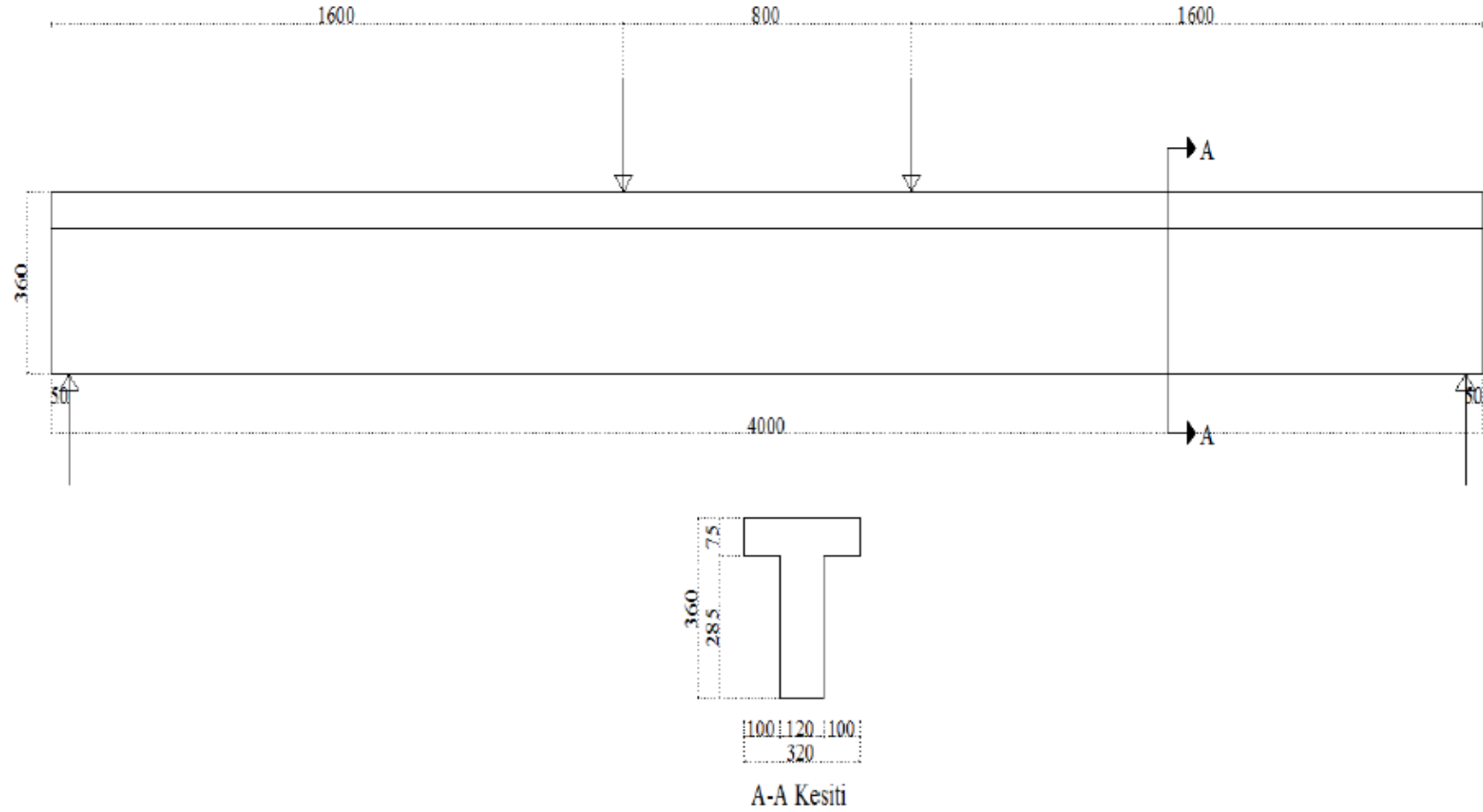
Kirişlere uygulanan GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir.



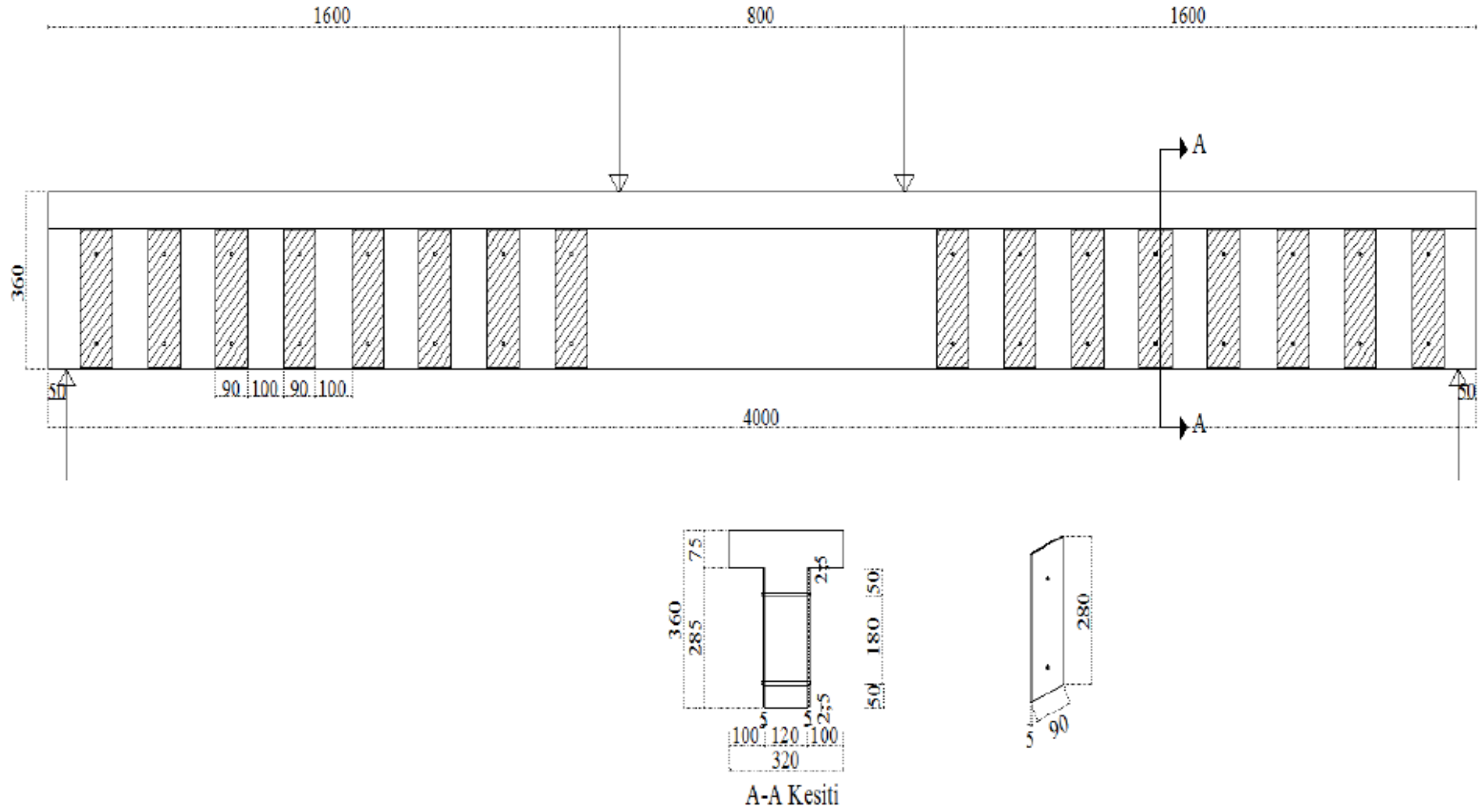
Şekil 5.1: Deney 1 kirişinin donatı şeması (kesme donatısı yeterli güçlü referans elemanı) (Kankal, 2011).



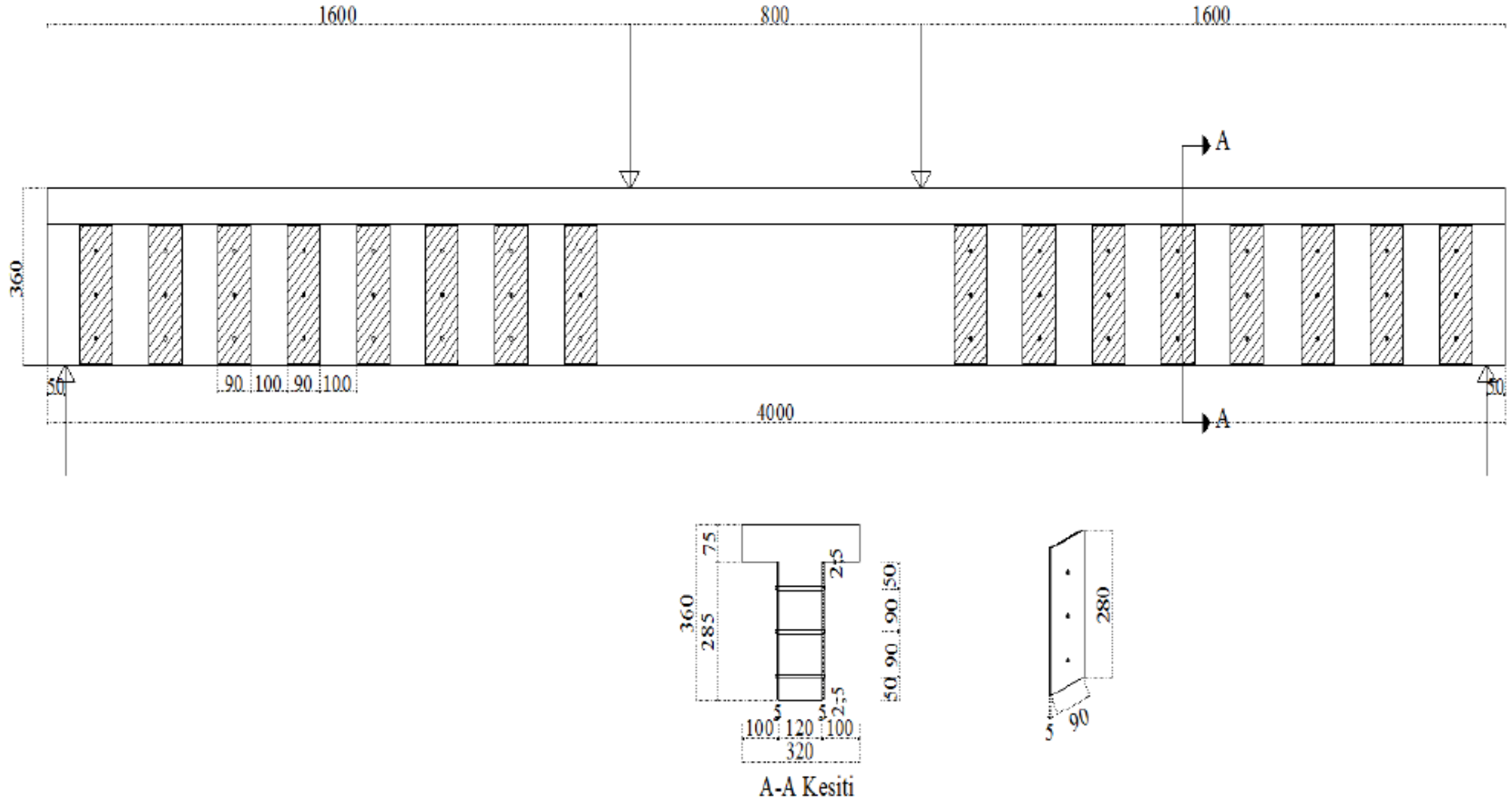
Şekil 5.2: Deney 2,3,4 ve 5 kirişlerinin donatı şeması (kesme donatısı yetersiz) (Kankal, 2011).



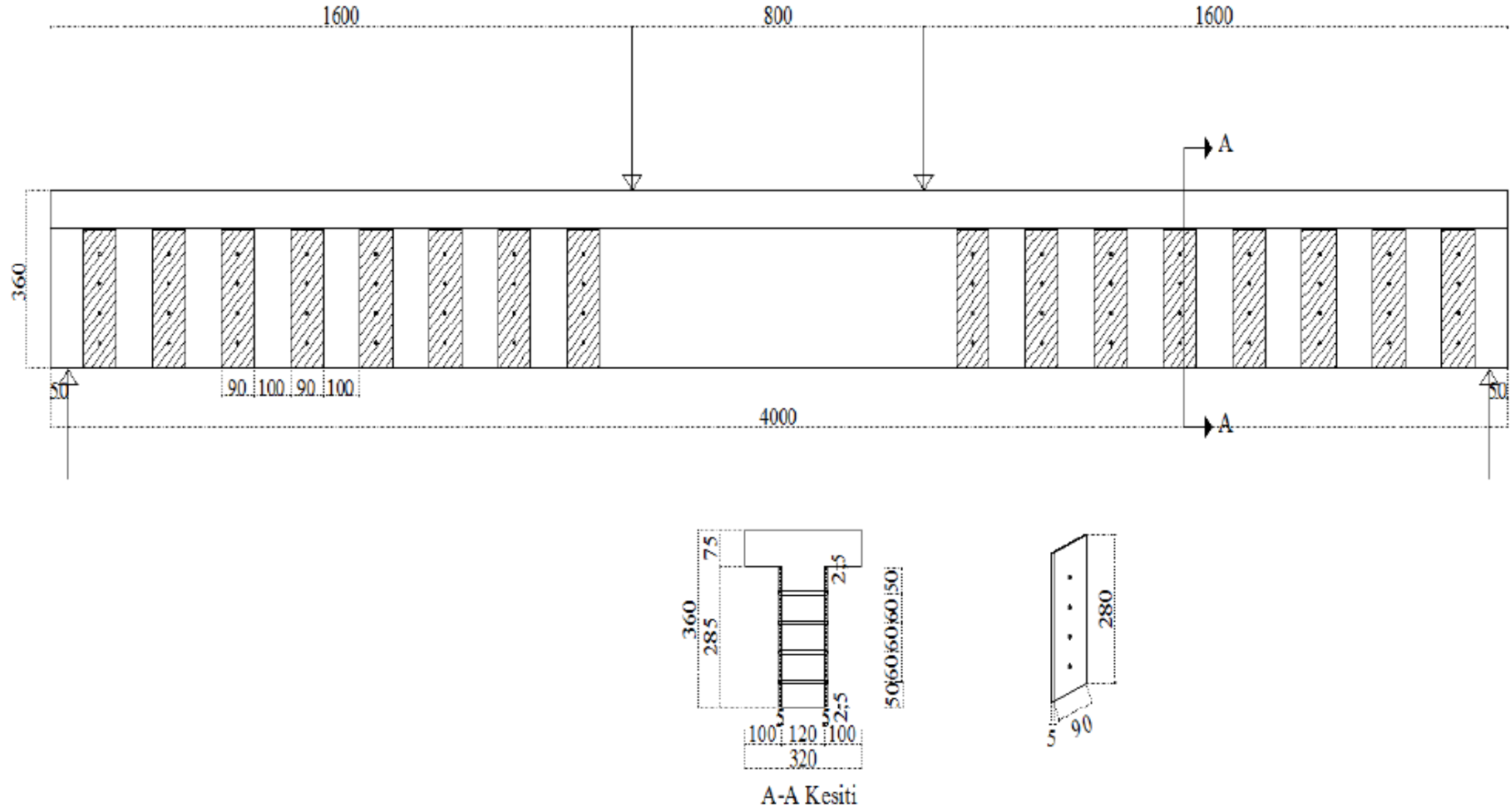
Şekil 5.3: Deney 1 ve Deney 2 kirişlerinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (güçlü ve zayıf referas elemanı) (Kankal, 2011).



Şekil 5.4: Deney 3 kirişinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (2 adet ankraj bulonu kullanılmıştır) (Kankal, 2011).

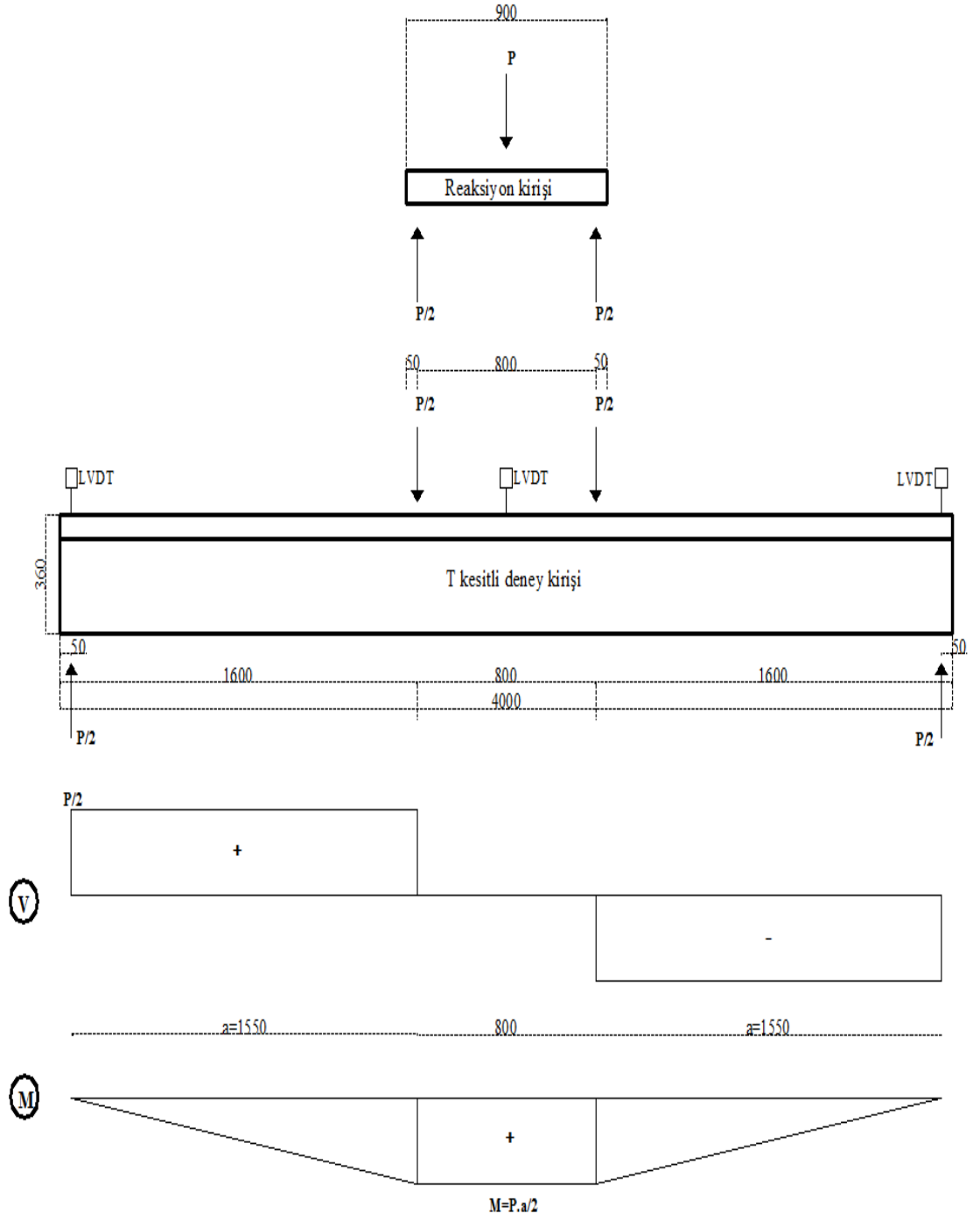


Şekil 5.5: Deney 4 kirişinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (3 adet ankraj bulonu kullanılmıştır) (Kankal, 2011).



Şekil 5.6: Deney 5 kirişinin GFRP şeritlerin ve ankrajların gösterimi (4 adet ankraj bulonu kullanılmıştır) (Kankal, 2011).

Deneyleri yüksek lisans tezi çalışması için Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında Kankal, (2011) tarafından yapılan tüm kirişler, monotonik yükler altında test edilmiştir. Deney elemanlarının yükleme düzeneğinde yük, hidrolik krikoya bağlı mekanik pompa aracılığı ile verilmiş, yükün büyüklüğü ise yük hücresi (load cell) ile ölçülmüştür. Elektronik ölçüm aletleri (LVDT) ile kiriş orta noktası deplasmanı ve mesnetlerdeki çökmeler saptanmıştır. Ölçülen yük ve deplasman ile yük-deplasman grafikleri çizilerek davranışlar elde edilmiştir. Reaksiyon kirişinin uzunluğu 900 mm olup yük, 50 mm kaçıklık ile mesnetlerden T kesitli deney kirişlerine aktarılmaktadır. Kirişlere verilen tekil yükler $P/2$ olarak ara mesafesi 800 mm olacak şekilde verilmiştir. Bu ara mesafede moment maksimumdur. Kesme kuvveti ise sıfırdır. Tüm kirişlerde aynı deney düzeneği kullanılmıştır. Deney kirişlerine ait yapılan tüm modellerde bu ölçü ve düzene kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait ölçüler, kesme kuvveti ve moment diyagramları Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Test edilen kirişlerin deney düzeneği (Kankal, 2011).

6. ANALİTİK ÇALIŞMA

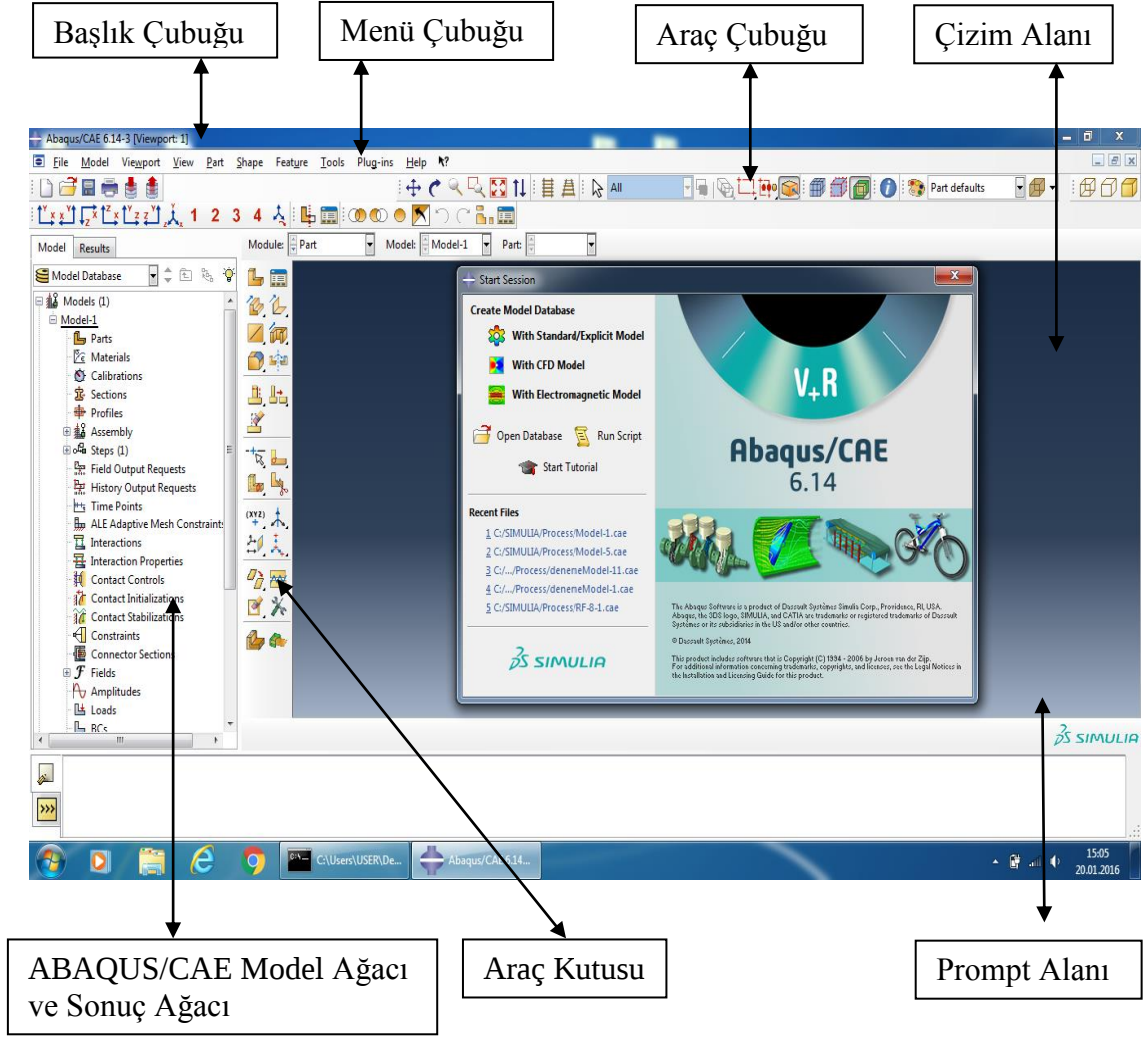
Deneylei daha önceden yapılmış ve sonuçları var olan kiriş elemanları ile ilgili geometri, donatı ve güçlendirilme durumlarına ait bilgiler Bölüm 5'te tanıtılmıştır. Bu kirişler sonlu elemanlar paket programı ABAQUS CAE ile bilgisayar ortamında modellenmiştir.

6.1 ABAQUS CAE Sonlu Elemanlar Programı

ABAQUS, birden fazla alanda nonlinear analiz yapabilen ve sonlu elemanlar prensibi ile hareket eden bilgisayar simülasyon destekli bir mühendislik yazılımıdır. İlk sürümü 1978 yılında piyasaya çıkan ABAQUS, üç boyutlu katı modelleri oluşturulan mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Makine, gemi, uçak, otomobil, çelik, inşaat gibi mühendislik alanlarında hizmet verebilmektedir. Statik, dinamik, akışkanlar dinamiği, akustik, ısı transferi gibi mühendislik problemlerinde modeller oluşturarak analiz yapabilme imkanı sağlamaktadır.

ABAQUS programının 4 ana çekirdek yazılım bulunmaktadır. Bunlar;

- ABAQUS/Standart, genel amaca yönelik implicit analizler yapılabilen yazılımdır.
- ABAQUS/CFD, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapılabilen yazılımdır.
- ABAQUS/Explicit, zamana bağlı dinamik analiz yapılabilen yazılımdır.
- ABAQUS/CAE (Complete Abaqus Enviromental), ABAQUS programının tüm modelleme, çözümleme ve sonuçları görüntüleme yazılımıdır. Bu çalışmada ABAQUS/CAE 6.14 versiyonlu yazılımı kullanılmıştır. ABAQUS/CAE 6.14 versiyona ait başlangıç oturumuna ait görüntü ve ara yüzü elemanları Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

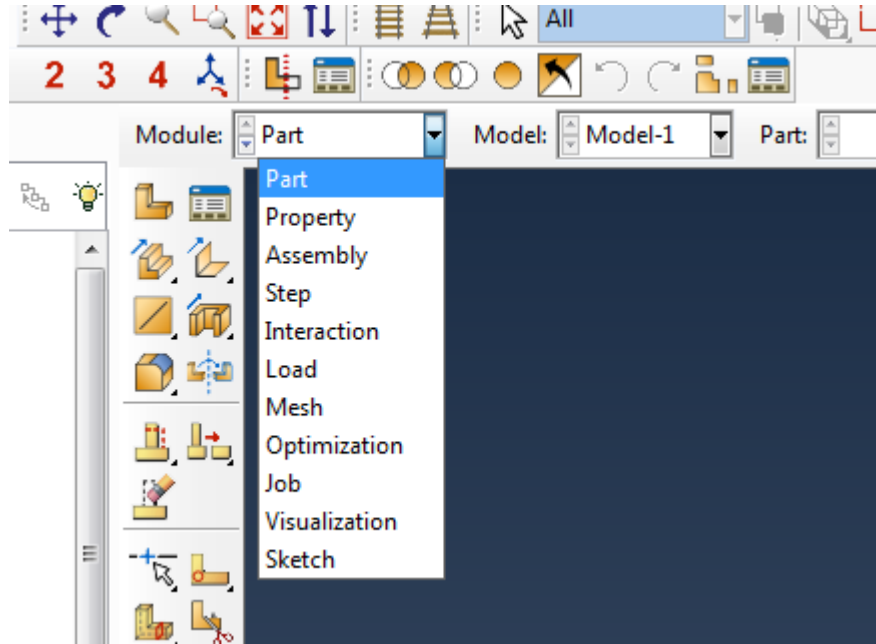


Şekil 6.1: ABAQUS/CAE 6.14 versiyona ait başlangıç oturumu ve ara yüzü elemanları.

Başlık çubuğu, çalıştığımız modele verdiğimiz ismini ve ABAQUS programının kullandığımız versiyonunu gösterir. ABAQUS' te kullanabileceğimiz tüm komutları Menü çubuğunda bulabiliriz. Menü çubuğunda bulunan komutlardan bazıları çok sık kullanılmak durumundadır. Komutlara hızlı erişimi sağlamak için Araç Çubuğu menüsü kullanılmaktadır. Modelimizin ekran üzerinde görüntüsünü Çizim alanında görürüz ve buradan gerekli müdahaleleri yapmamıza olanak sağlar. Model ağacı menüsünden çalıştığımız modelde değişiklik yapmak ve eski girdilere ulaşabilmek mümkündür. Yine aynı menüden sonuçlara ulaşabiliriz. Seçtiğimiz adımlara göre Araç kutusu menüsü o adıma ait komutlara kolayca ulaşmamıza olanak sağlar. Seçilen komut ile ilgili ABAQUS programının kullanıcıya o komut ve seçilen adım hakkında uyarılar, Prompt alanından takip edilir.

Modellerin oluşturulması, analizi ve sonuçların görüntülenmesi için ABAQUS adımları (Module) Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Uygulama adımlarına ait sıralama aşağıdaki gibidir;

- Model ait parçaların geometrilerinin oluşturulması
- Malzeme özelliklerinin ABAQUS programına tanıtılması
- Oluşturulan parçaların montajının yapılması
- Analiz tipi ve analiz adımının oluşturulması
- Parçalar arası temas özelliklerinin tanımlanması
- Yük ve sınır şartlarının tanımlanması
- Modelin sonlu elemanlara bölünmesi
- Analizin başlatılması
- Analiz sonuçlarının görüntülenmesidir.

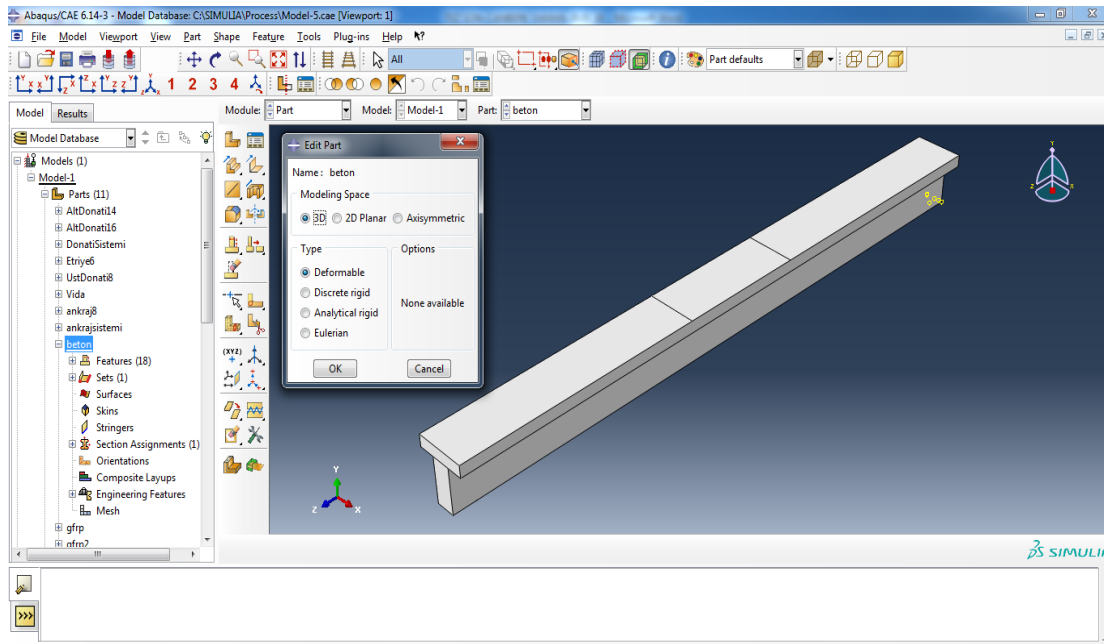


Şekil 6.2: ABAQUS adımları (Module).

6.2 Modele Ait Parçaların Geometrilerinin Oluşturulması

Modellenecek kirişlere ait yapılacak ilk adım modele ait parçaların geometrilerinin oluşturulmasıdır. ABAQUS/CAE sonlu elemanlar paket programı, diğer CAD (Computer Aided Design) ortamlı paket programlarda hazırlanan çizim çalışmaları açabileceği gibi kendi platformunda da bu geometrileri oluşturmaya olanak sağlar.

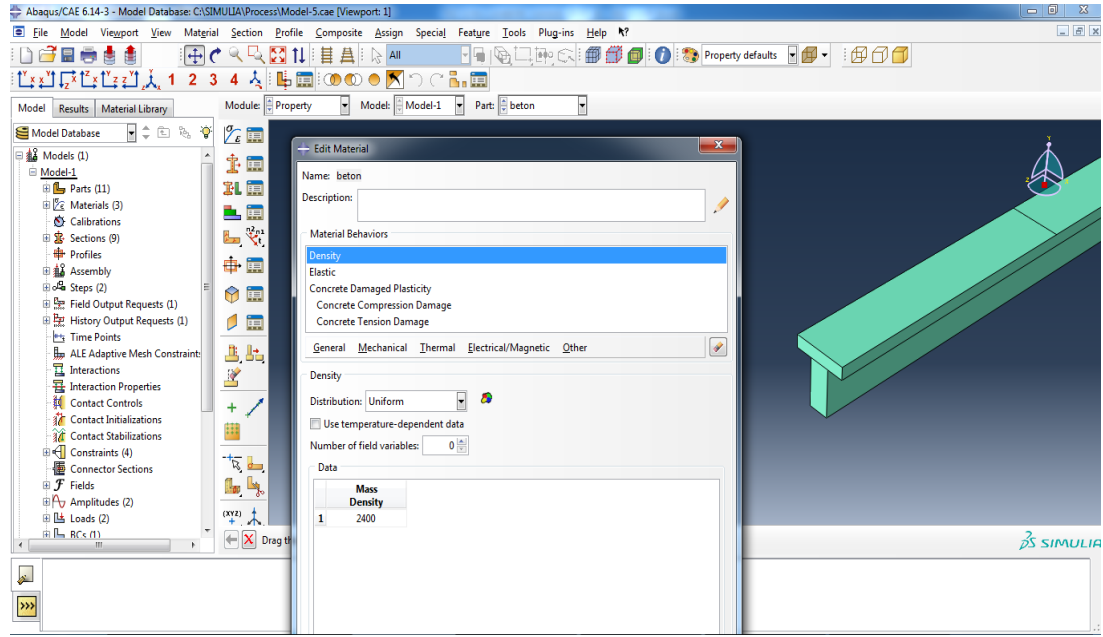
Bu çalışmada geometriler ABAQUS/CAE programının içinde yapılmıştır. T kesitli kirişlere ait modeller için beton kalıp, donatı, GFRP şeridi ve ankraj elemanlarının geometrileri tek tek oluşturulmuştur. ABAQUS/CAE programında parça geometrilerinin oluşturulması Part adımı ile yapılmaktadır. Part adımıdaki komutlar kullanılarak beton kalıp, donatı, GFRP şeridi ve ankraj elemanlarına ait geometriler oluşturulmuştur. GFRP şeridi ve beton kalıp, Solid olarak kirişe ait donatılar ve ankrajlar için Wire eleman tipi seçilmiştir. ABAQUS/CAE çizim ekranından koordinat veya ölçü tanımlanarak geometriler oluşturulmuştur. Model-5 'e ait beton kalıp geometrisi ve Part adımı Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Model-5 'e ait beton kalıp geometrisi ve Part adımı.

6.3 Malzeme Özelliklerinin ABAQUS Programına Tanıtılması

Module' nin bir sonraki adımı ise Property'dir. Property adımıdaki Create Material komutu ile modelde kullanılacak malzemelerin özellikleri programa tanımlanmaktadır. Yine Property adımıdaki Assign Section komutu ile tanımladığımız malzeme özelliklerinin, istenilen geometrinin kesitine atanması işlemi yapılmaktadır. Property adımı Şekil 6.4' te gösterilmiştir.



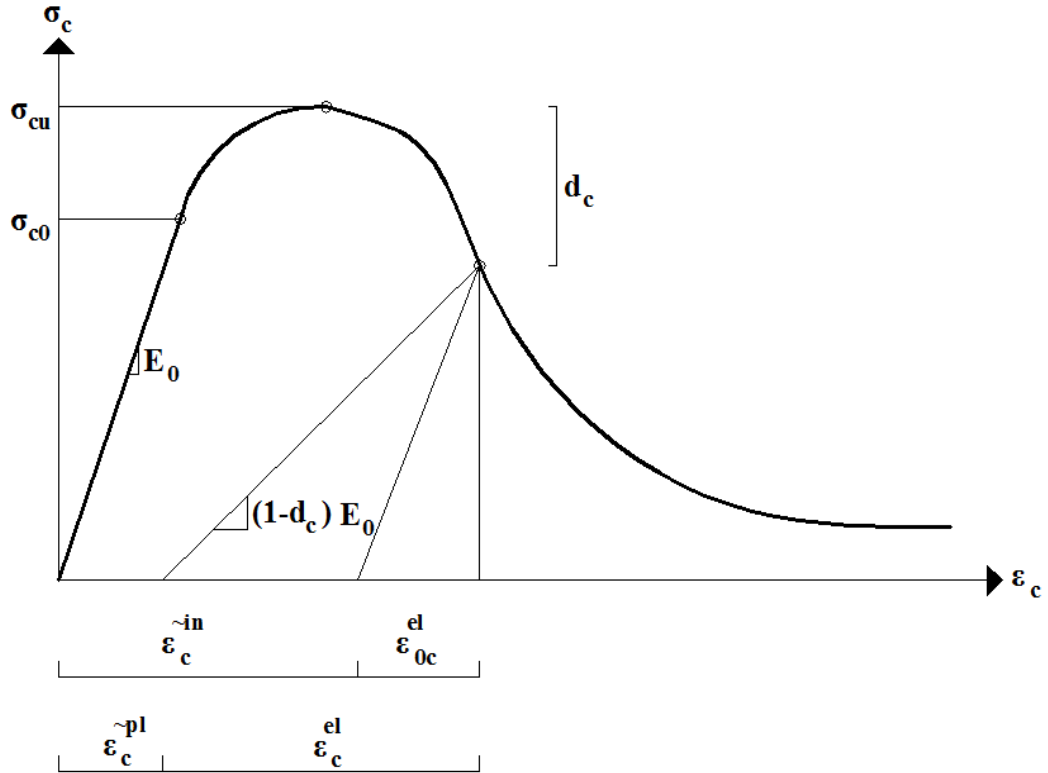
Şekil 6.4: Property adımı.

Modeller için analiz sonuçlarının gerçeğe yakınlığı, malzeme özelliklerinin programa doğru tanıtılması ile bağlantılıdır. Tanımlanan malzeme özellikleri ne kadar doğruysa sonuçlarda o kadar doğru çıkmaktadır. Beton malzemesinin; sargı durumu, numune ebatları, yükleme durumu, basınç mukavemeti vb özellikleri gerilme-şekil değiştirme eğrisini etkilemektedir. Birden fazla parametreye bağlı olan beton malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi için birçok matematiksel model kabulleri yapılmıştır. Bu matematiksel modeller için beton malzemesinin deneysel verileri ile plastik, elastik vs gibi davranışları göz önünde bulundurulmaktadır. Bu çalışma için ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programında betonun malzeme özelliği ve hasar davranışı olarak Concrete Damaged Plasticity (CDP) kullanılmıştır.

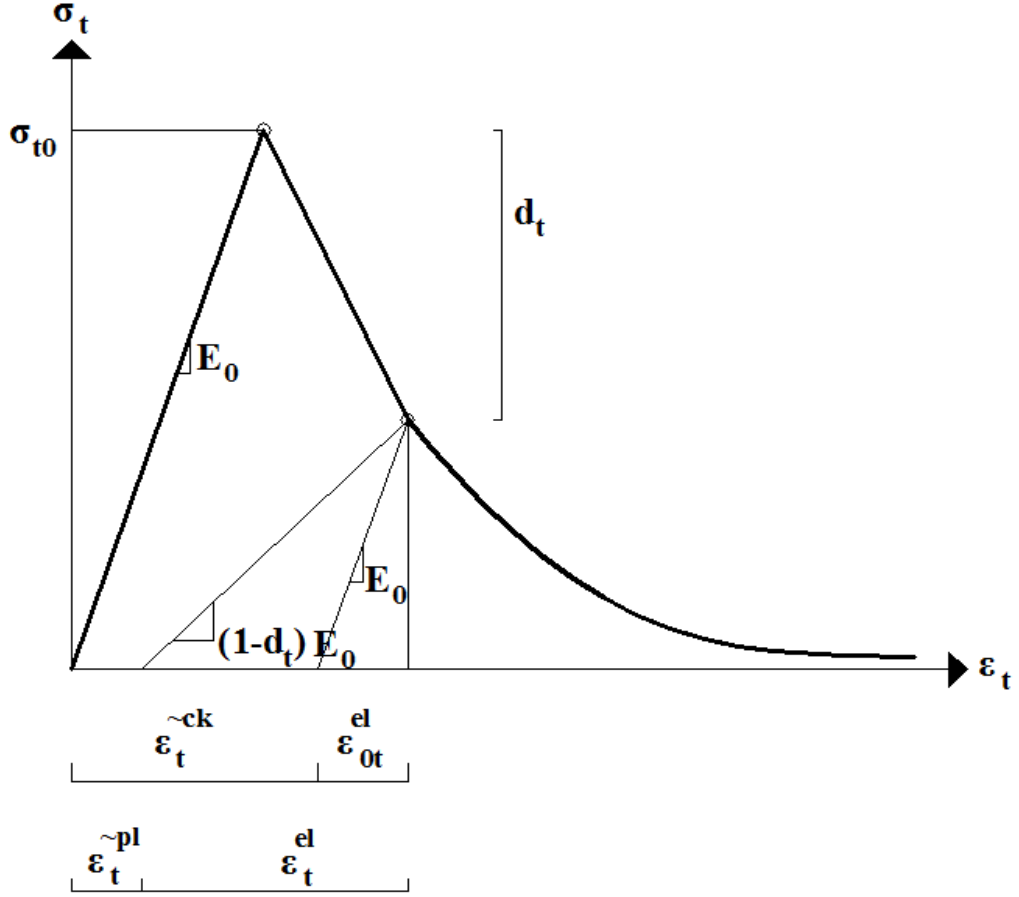
Concrete Damage Plasticity donatısız veya donatılı beton için beton hasar plastisite modelidir. Yük durumları etkisinde betona ait nonlinear analize olanak sağlar. Betonun nonlinear davranışını basınç ezilmesi ve çekme gerilmesi altında tanımlamaktadır.

Concrete Damage Plasticity modeline ait beton için basınç ve çekme gerilmeleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Basınç ve çekme gerilmeleri altındaki davranışını kontrol etmek için d_c (basınç hasar) ve d_t (çekme hasar) rijitliği azaltma parametreleri kullanılmaktadır. Bu parametrelerin matematiksel değeri Denklem (6.1)'de gösterilmiştir. $d=0$ durumunda $E_0=E$ olacaktır ve elastisite modülü değeri elastik bölgeye ait olacaktır. $d=1$ olması

durumunda ise değer tanımsız olacaktır. $0 < d < 1$ aralığında d_c ve d_t rijitliği azaltma parametreleri değişerek nonlineer davranış tanımlanmaya çalışılmaktadır. Ayrıca programa bu model için dilation angle (genişletme açısı), dış merkezlilik, basınç ve çekme merdivenleri arası uzaklık, vizkozite parametresi, betonun iki eksenli basınç dayanımının, çekme dayanımına oranı gibi değerlerinin de tanımlanması gerekmektedir (Hibbitt vd., 2011).



şekil 6.5: Basınç etkisi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd., 2011).



Şekil 6.6: Çekme gerilmesi altında Concrete Damage Plasticity beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd., 2011).

$$E=(1-d_{t,c})E_0 \quad (6.1)$$

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da gösterilen basınç ve çekme gerilme altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri yardımıyla Concrete Damage Plasticity beton modeli oluşturulmuştur. Beton malzemesinin tek eksenli basınç ve çekme deney sonuçlarından elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme verileri alınmaktadır. Basınç ve çekmeden dolayı oluşan elastik olmayan şekil değiştirme değeri Denklem (6.2) ve Denklem (6.3)’te gösterilmiştir (Hibbitt vd., 2011).

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (6.3)$$

Denklem (6.2) ve Denklem (6.3)'ten elde edilen elastik olmayan şekil değiştirme değerleri ile d_c ve d_t rijitliği azaltma parametreleri kullanılarak basınç ve çekmeden dolayı oluşan plastik şekil değiştirme değerleri Denklem (6.4) ve Denklem (6.5)'te gösterilen formüllere göre hesaplanmaktadır. ABAQUS/CAE Property adımıdaki Concrete Damage Plasticity beton modeline ait concrete compression damage (basınç) ve concrete tension damage (çekme) tablolarına veriler girilmiştir (Hibbitt vd., 2011).

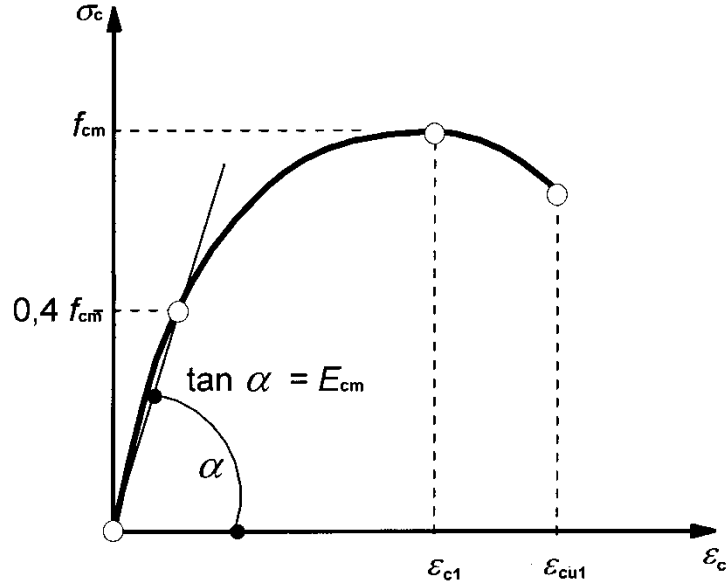
$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} * \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (6.4)$$

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{1-d_t} * \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (6.5)$$

Concrete Damage Plasticity beton modeli oluşturulurken BS 16 beton sınıfı malzeme özellikleri için değerler "TS EN 1992-1-1/Nisan 2009 Beton yapıların tasarımı- Bölüm1-1: Genel Kurallar ve Binalarda Uygulanacak Kurallar (EUROCODE 2)" standardından elde edilmiştir. TS EN 1992-1-1 madde 3.1 Beton TS EN 1992-1-1'de bulunan Betonun dayanım ve şekil değiştirme özellikleri Çizelge 6.1'de, yapısal analiz için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin şematik gösterimi Şekil 6.7'de verilmiştir (TS E 1992-1-1, 2009).

Çizelge 6.1: Betonun dayanım ve şekil değiştirme özellikleri (TS EN 1992-1-1 Sayfa-17).

Beton basınç sınıfları															Analitik ilişki/tarif
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1+(f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ Frekans yüzdelik değeri % 5'lik
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ Frekans yüzdelik değeri % 95
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} MPa olarak)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	$\varepsilon_{c1} (\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8$ Şekil 3.2'ye başvurulmalıdır.
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	$f_{ck} \geq 50$ MPa için $\varepsilon_{cu1} (\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$ Şekil 3.2'ye başvurulmalıdır.
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	$f_{ck} \geq 50$ MPa için $\varepsilon_{c2} (\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$ Şekil 3.3'e başvurulmalıdır.
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	$f_{ck} \geq 50$ MPa için $\varepsilon_{cu2} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$ Şekil 3.3'e başvurulmalıdır.
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	$f_{ck} \geq 50$ MPa için $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	$f_{ck} \geq 50$ MPa için $\varepsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$ Şekil 3.4'e başvurulmalıdır.
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	$f_{ck} \geq 50$ MPa için $\varepsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$ Şekil 3.4'e başvurulmalıdır.



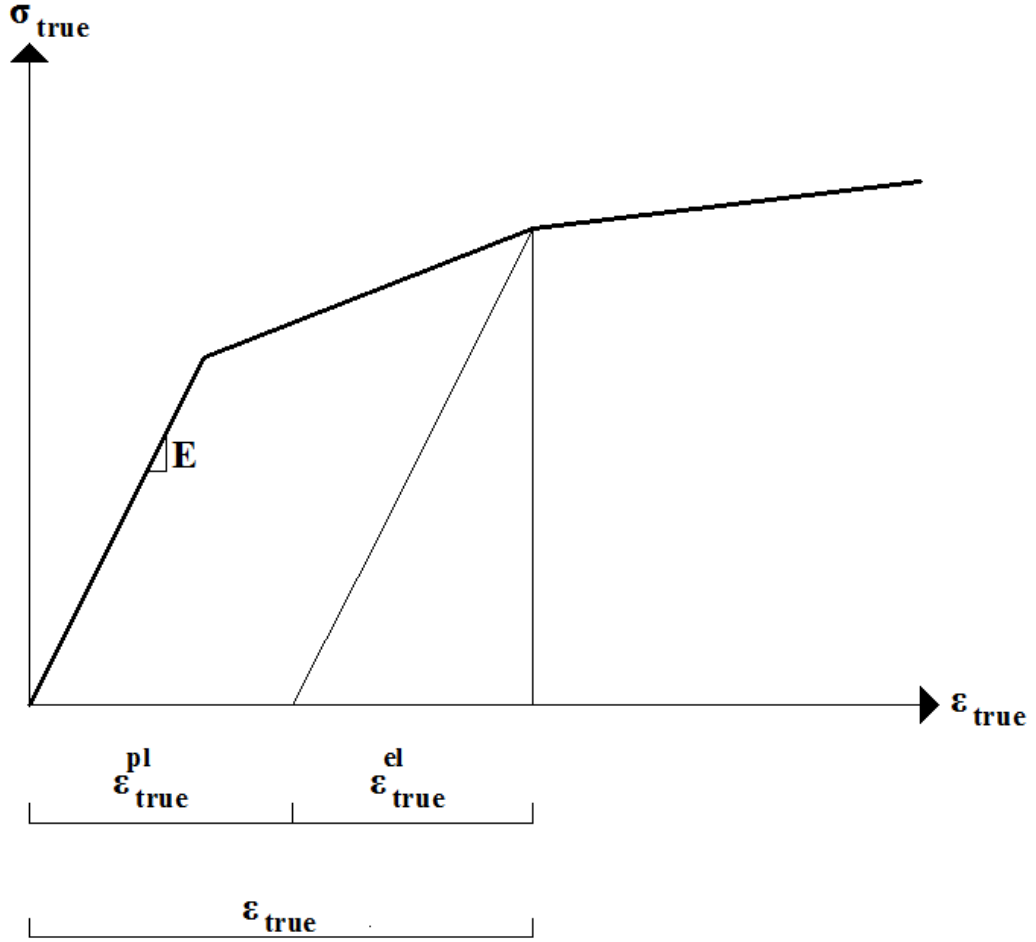
Şekil 6.7: Yapısal analiz için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin şematik gösterimi (TS EN 1992-1-1 Sayfa-22).

Donatı çeliğine ait elastik ve plastik değerler ABAQUS/CAE programına Property adımı ile tanımlanmıştır. Malzeme özelliği için Classical Metal Plasticity (CMP) malzeme modeli kullanılmıştır. Bir malzemenin plastik davranışı akma noktası ve sonrası ile tanımlanmaktadır. Elastik davranıştan plastik davranışa geçiş gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki akma noktasından itibaren gerçekleşir. Nominal gerilme-şekil değiştirme değerleri test verileri kullanılarak temin edilmektedir. Nominal gerilme-şekil değiştirme değerleri kullanılarak gerçek gerilme-şekil değiştirme değerleri bulunmaktadır. ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programında plastisite verilerini tanımlanırken gerçek gerilme değeri (σ_{true}) ve gerçek plastik şekil değiştirme değeri (ϵ_{true}^{pl}) kullanılmaktadır. Gerçek gerilme değeri (σ_{true}) ve gerçek plastik şekil değiştirme değeri (ϵ_{true}^{pl}) için hesaplar Denklem (6.6) ve Denklem (6.7) gösterilmiştir (Ellobody vd., 2014).

$$\sigma_{true} = \sigma * (1 + \epsilon) \quad (6.6)$$

$$\epsilon_{true}^{pl} = \ln(1 + \epsilon) - \frac{\sigma_{true}}{E_0} \quad (6.7)$$

Toplam şekil değiştirme üzerinde elastik ve plastik şekil değiştirmenin durumunu gösteren grafik Şekil 6.8’de gösterilmiştir.

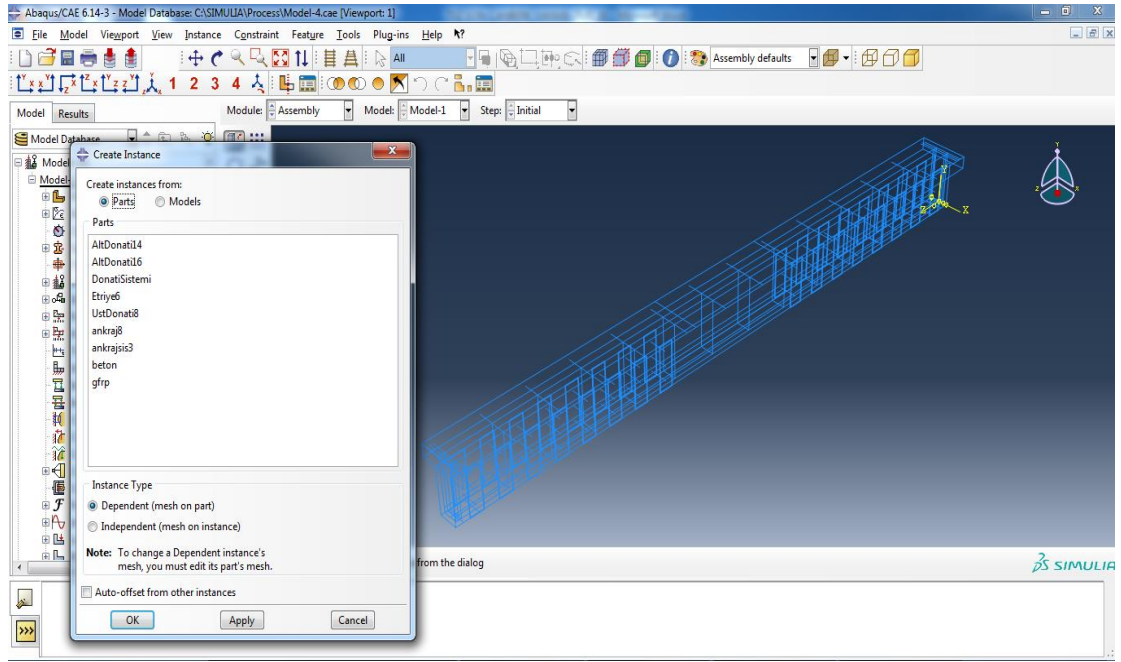


Şekil 6.8: Çelik malzemesi için toplam şekil değiştirme üzerinde elastik ve plastik şekil değiştirmenin durumu (URL-2).

Ankraj ve GFRP malzemesinin lineer-elastik özellikleri programa yine Property adımımdan tanıtılmıştır.

6.4 Oluşturulan Parçaların Montajının Yapılması

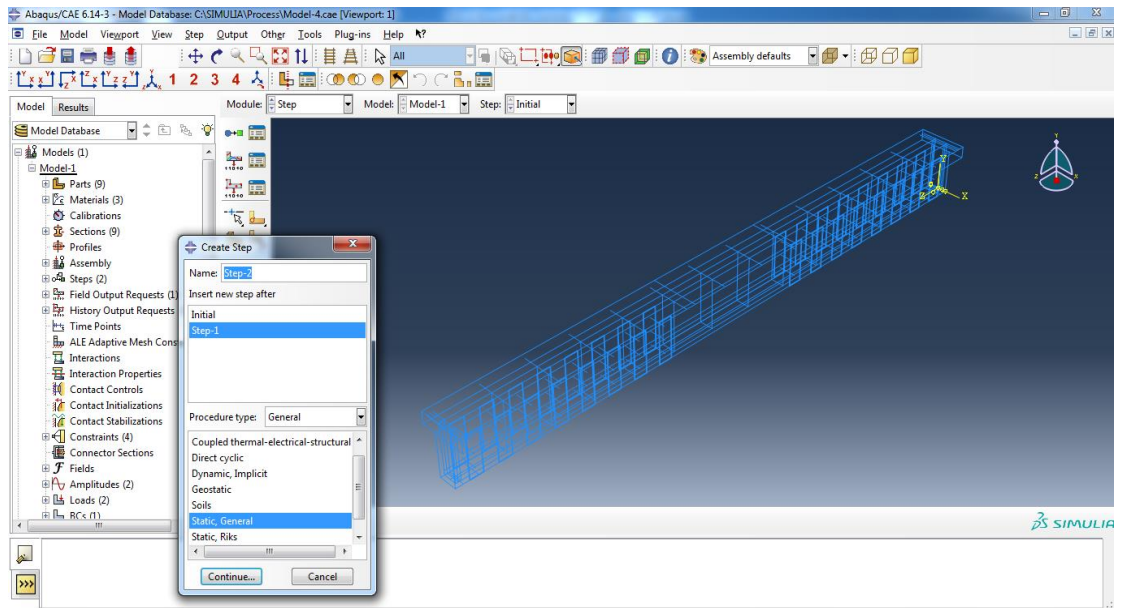
Part adımımda oluşturulan parçalar, Assembly adımımdaki Create Instance komutu kullanılarak bir araya getirilmiştir. Çizim alanında parçaların birbirleri ile montajları bu adımda yapılmıştır. Model-4 'e ait Assembly adımı Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9: Model-4 'e ait Assembly adımı.

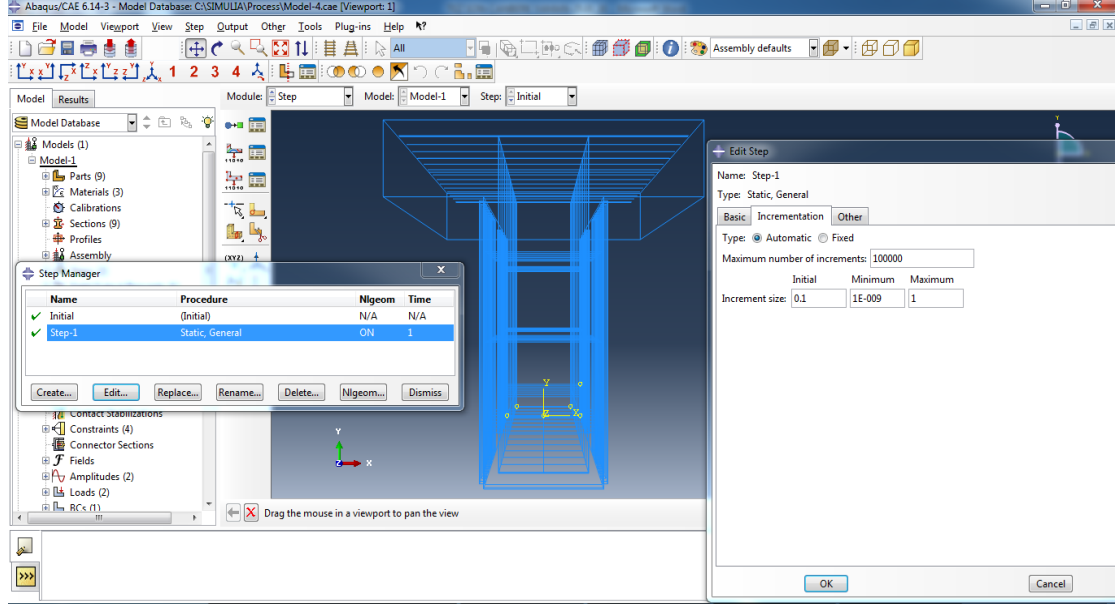
6.5 Analiz Tipi ve Analiz Adımının Oluşturulması

ABAQUS/CAE sonlu elemanlar paket programında Analiz tipi ve analiz adımlarıyla ilgili düzenlemeler Step adımıyla yapılmaktadır. Create Step komutu ile analiz tipi seçilmektedir. bu çalışmada analiz tipi olarak Static General seçilmiştir. Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10: Analiz tipi seçme.

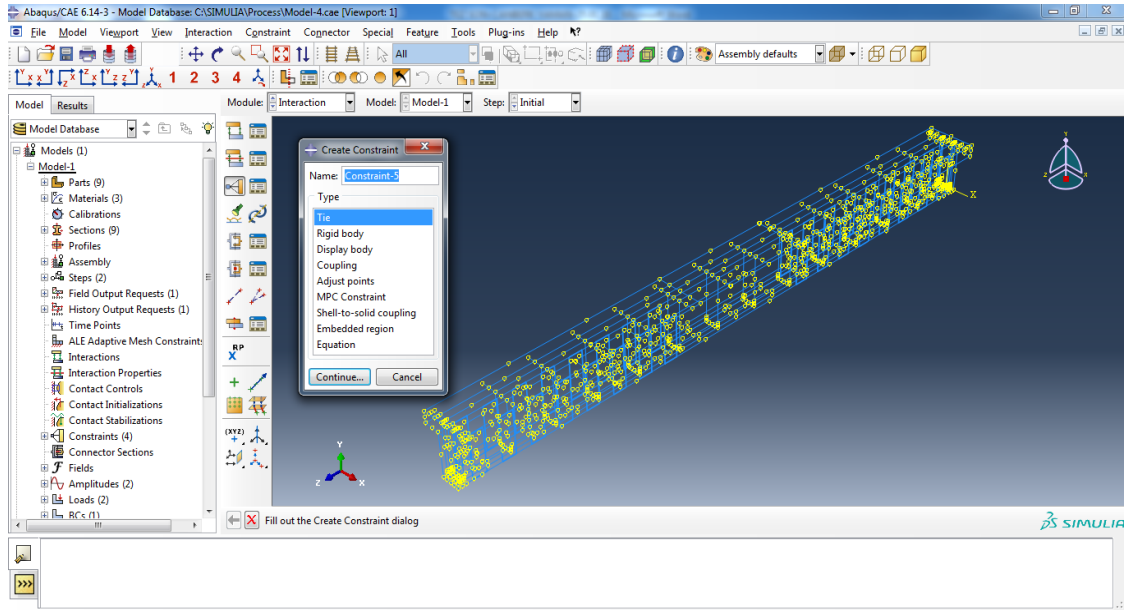
Analiz tipinin seçilmesinin ardından oluşturulan analiz tipine ait analiz adımlarının oluşturulması yapılmıştır. Step Manager/Edit Step komutları kullanılarak analiz adımlarına ait değerler oluşturulmuştur. Şekil 6.11’de analiz adımları gösterilmiştir.



Şekil 6.11: Analiz adımları oluşturma.

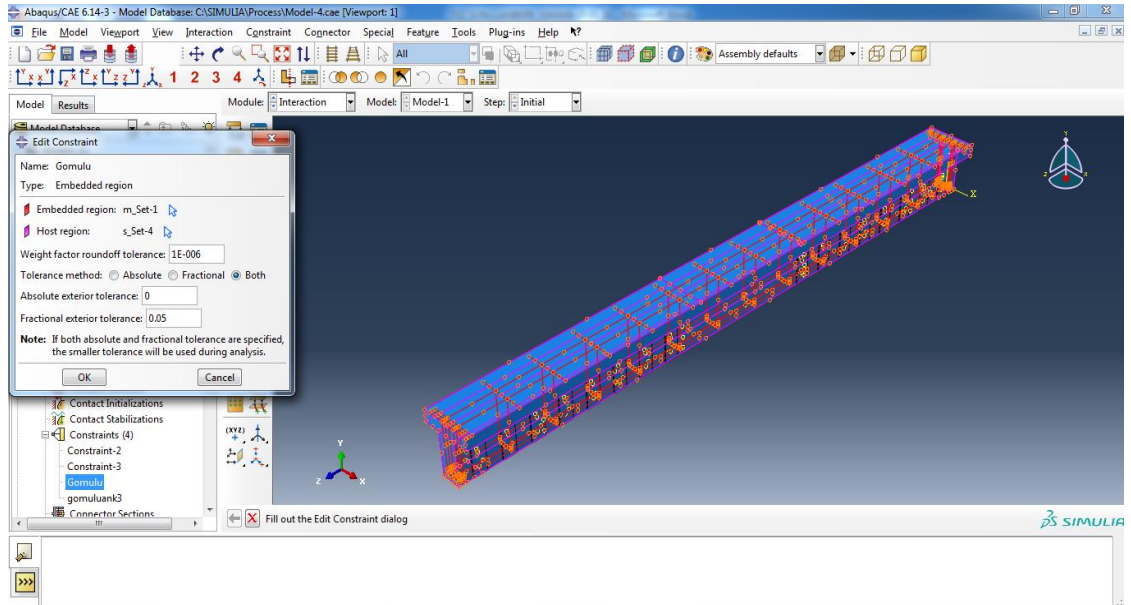
6.6 Parçalar Arası Temas Özelliklerinin Tanımlanması

Module' nin bir sonraki adımı ise Interaction'dır. Bu adımda montajı tamamlanan parçaların birbirleriyle olan temas durumları tanımlanır. Interaction adımı Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Bu adımdaki komutlar kullanılarak beton-donatı, beton-ankraj ve beton-GFRP şeritleri arasındaki temas yüzeylerinin tanımlama işlemi yapılmıştır.

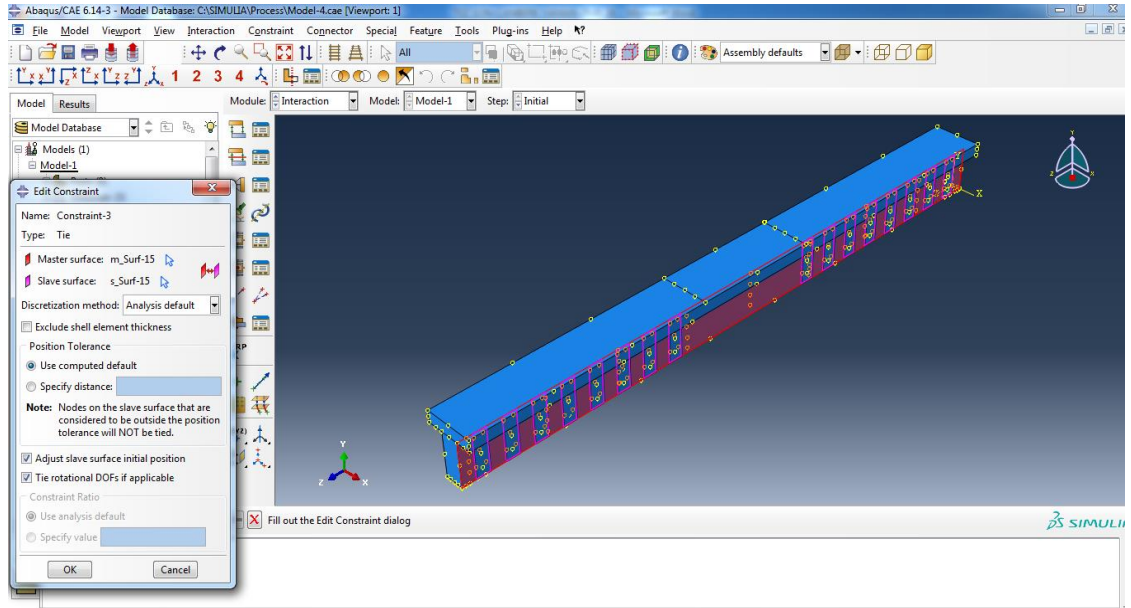


Şekil 6.12: Interaction adımı (parça temasları).

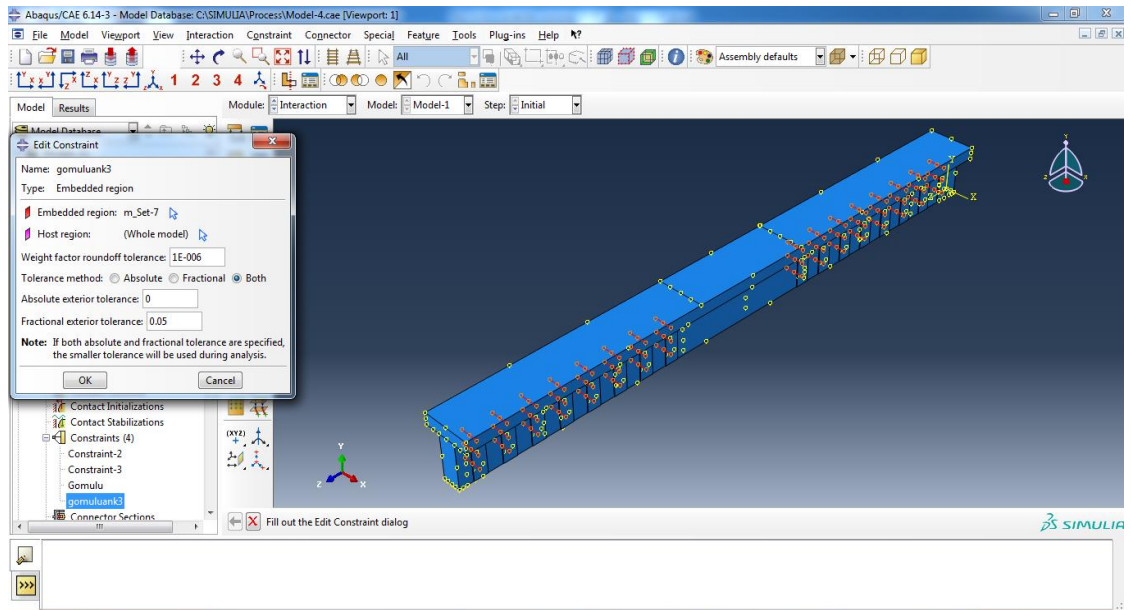
Beton-donatı ve beton-ankraj temas yüzeyi Embedded Region olarak seçilmiştir. GFRP şeritleri ile beton temas yüzeyi ise Tie olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13: Beton-donatı temas özelliklerinin tanımlanması.



Şekil 6.14: Beton-GFRP temas özelliklerinin tanımlanması.

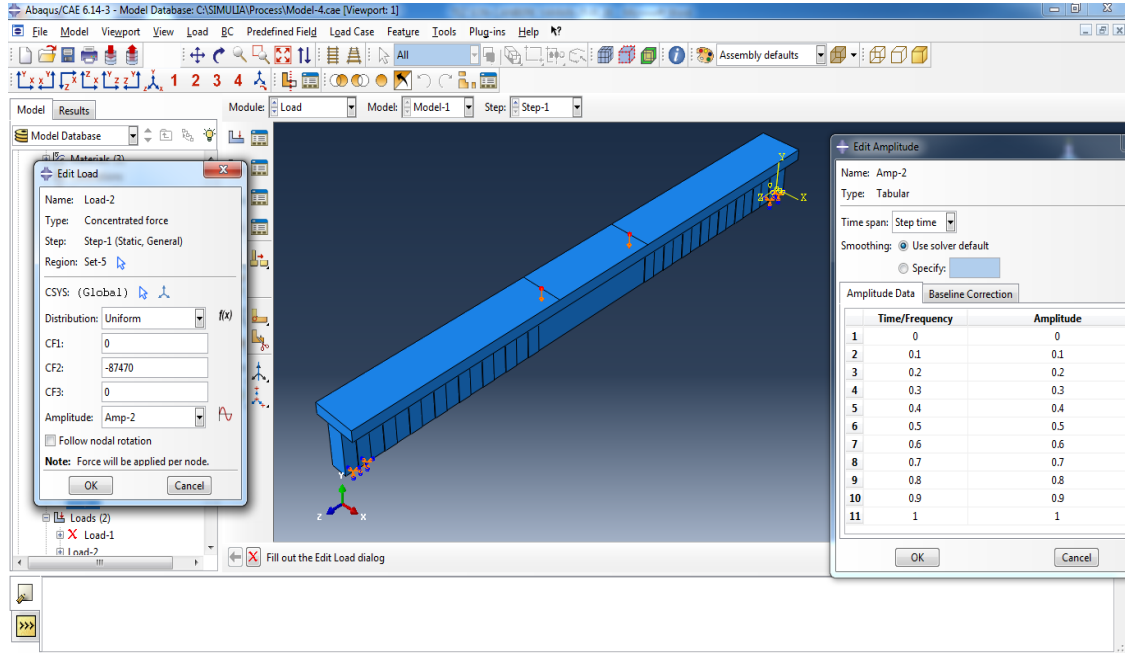


Şekil 6.15: Beton-ankraj temas özelliklerinin tanımlanması.

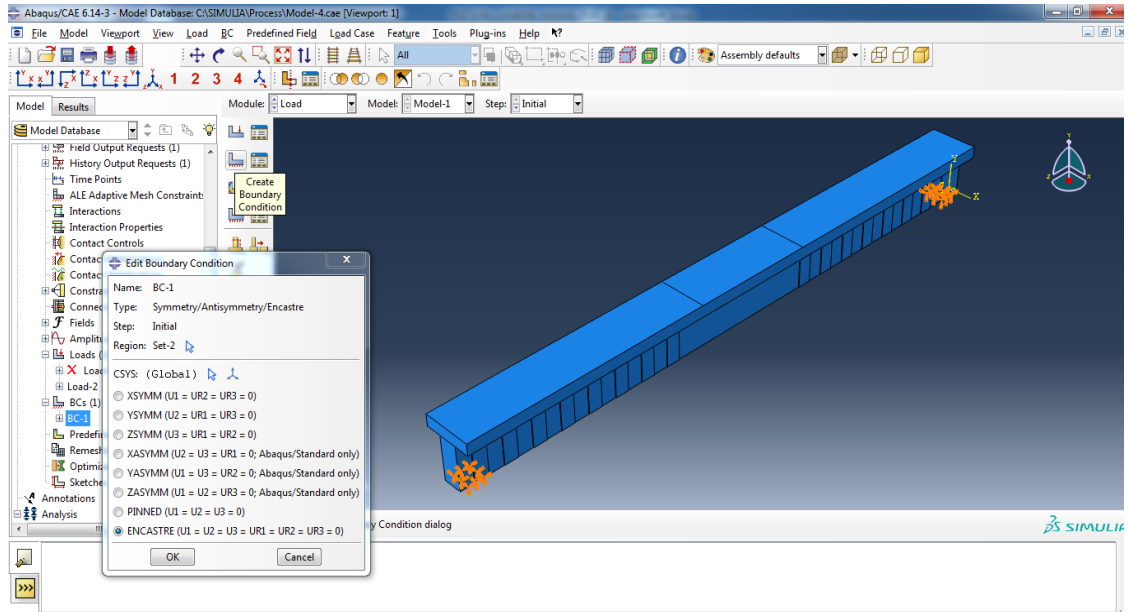
6.7 Yük ve Sınır Şartların Tanımlanması

Modellere ait yüklerin verilmesi ve sınır şartlarının tanımlanması Load adımı ile yapılmaktadır. Model kirişlere, deneylerde uygulandığı gibi tekil yük verilmiştir. Ayrıca Amplitude komutu ile yükün adım adım uygulanması sağlanmıştır. Şekil 6.16’da gösterilmiştir.

Load adımındaki Create Boundary Condition komutu ile sınır şartları tanımlanmıştır. Model için sınır şartlarına ait gösterim Şekil 6.17’de gösterilmiştir.



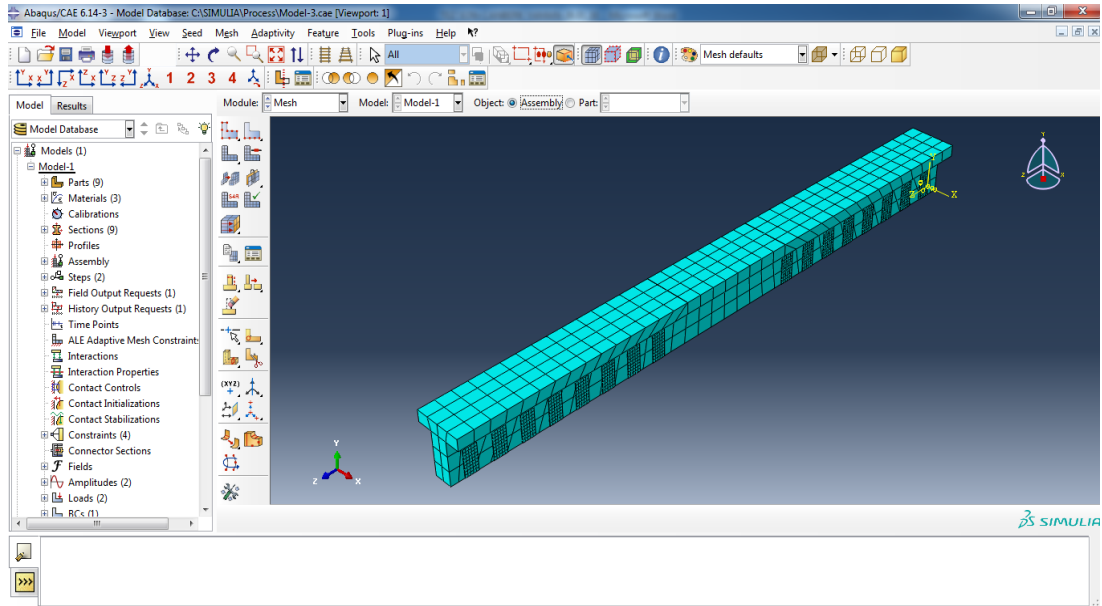
Şekil 6.16: Load adımı ve yüklerin tanımlanması.



Şekil 6.17: Model için sınır şartlarına ait gösterim.

6.8 Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi

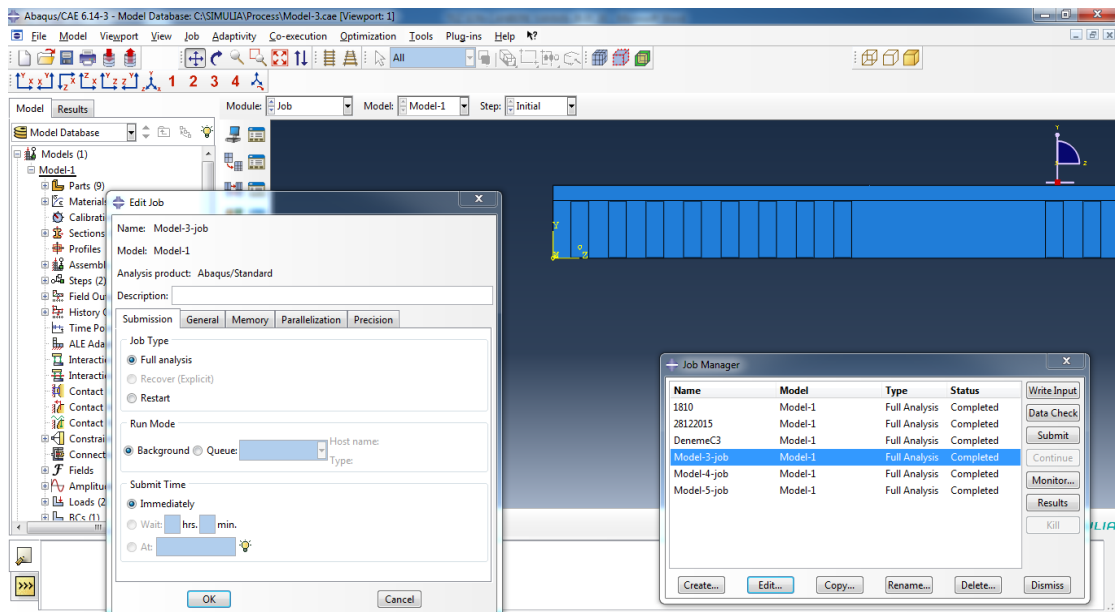
Sonlu elemanlar yönteminin en önemli ve belirgin özelliği olarak cismin sonlu elemanlara bölünmesi işlemi ABAQUS/CAE programında Mesh adımı ile sağlanmaktadır. Her bir parça için ayrı ayrı mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Mesh eleman tipi seçimi için Mesh adımıdaki Element Type komutu kullanılmıştır. Beton ve GFRP için eleman tipi 3D Stress; donatı ve ankraj için eleman tipi Truss seçilmiştir. Seed part komutu ile de mesh aralığı tanımlanmıştır. Seed part/Approximate global size değeri beton için 0.1, donatı ve ankraj için 0.08, GFRP için 0.02 değeri alınmıştır. Malzeme özelliklerinin analiz sonuçlarıyla olan ilgisi gibi düzgün ve sık mesh aralığı ile modelin sonlu elemanlara bölünmesi de çok önemlidir. Model geometrisinin karmaşıklığı da mesh'in kalitesini etkiler. Düzgün mesh yapmak için geometriler Partition komutu ile düzenlenmiştir. Sık mesh aralığı kullanmak gerçek sonuçlara yaklaştırmakla beraber, çok donanımlı bilgisayar desteği istemektedir. Bu çalışmada kullanılan bilgisayarın yeterliliklerine ait azami sık mesh aralığı tanımlanmıştır. Model-3'e ait mesh edilmiş resim Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18: Model-3' e ait mesh adımı.

6.9 Analizin Başlatılması

ABAQUS/CAE programında analizin başlatılması Module'nin Job adımı ile yapılmaktadır. Create Job komutu ile bir analiz ismi oluşturulmuştur. Bu sekmeden bilgisayarın çalışacağı çekirdek sayısı vs gibi ayarlamalar tamamlandıktan sonra Submit komutu ile analiz başlatılmıştır. Monitor komutu ile analiz süresince program tarafından verilen hatalar ve uyarılar gözlenerek düzeltilip tekrar analiz başlatılmıştır. Analiz tamamlandıktan sonra Results komutu ile analiz sonuçlarına geçilmiştir. Model-3'e ait Job adımı Şekil 6.19'de gösterilmiştir.

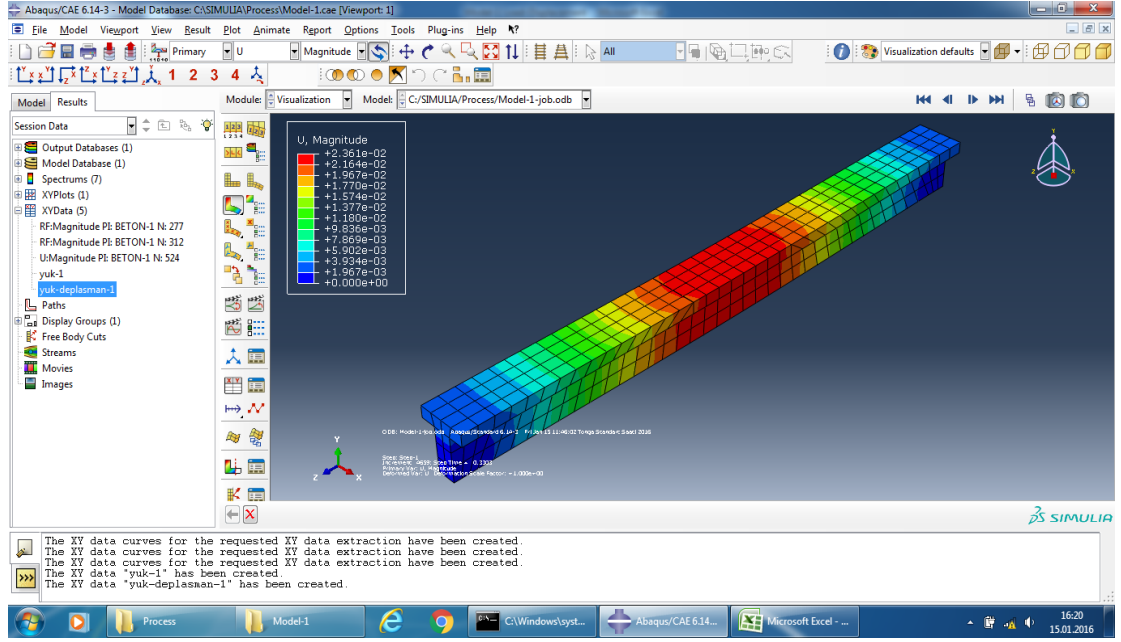


Şekil 6.19: Model-3' e ait Job adımı.

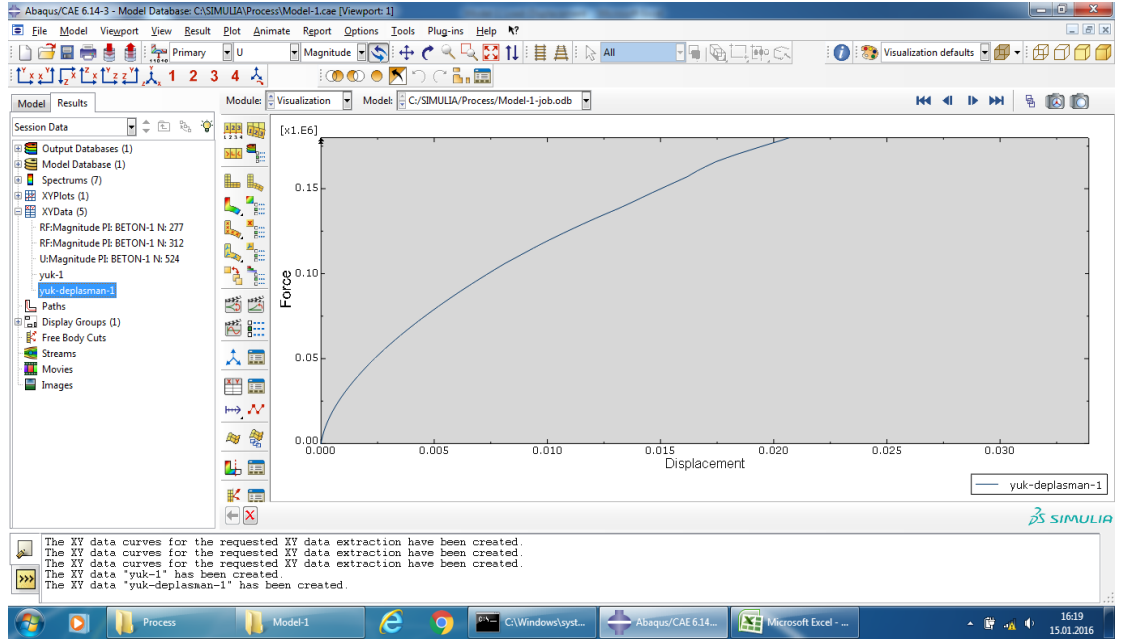
6.10 Analiz Sonuçlarının Görüntülenmesi

Analiz tamamlandıktan sonra Results sekmesiyle modele ait analiz sonuçları görüntülenmiştir. Visualization adımıdaki Create XY Data komutu ile de modele ait grafikler çizilmiştir. Bu grafikler çizilirken node düğüm noktası numaraları belirtilmiştir. Create XY Data/ODB field output komutu ile önce yük-zaman grafiği daha sonra da deplasman-zaman grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerden Create XY Data/Operate on XY Data komutu kullanılarak yük-deplasman grafiklerine geçilmiştir. Model-1, Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5'e ait analiz sonuç

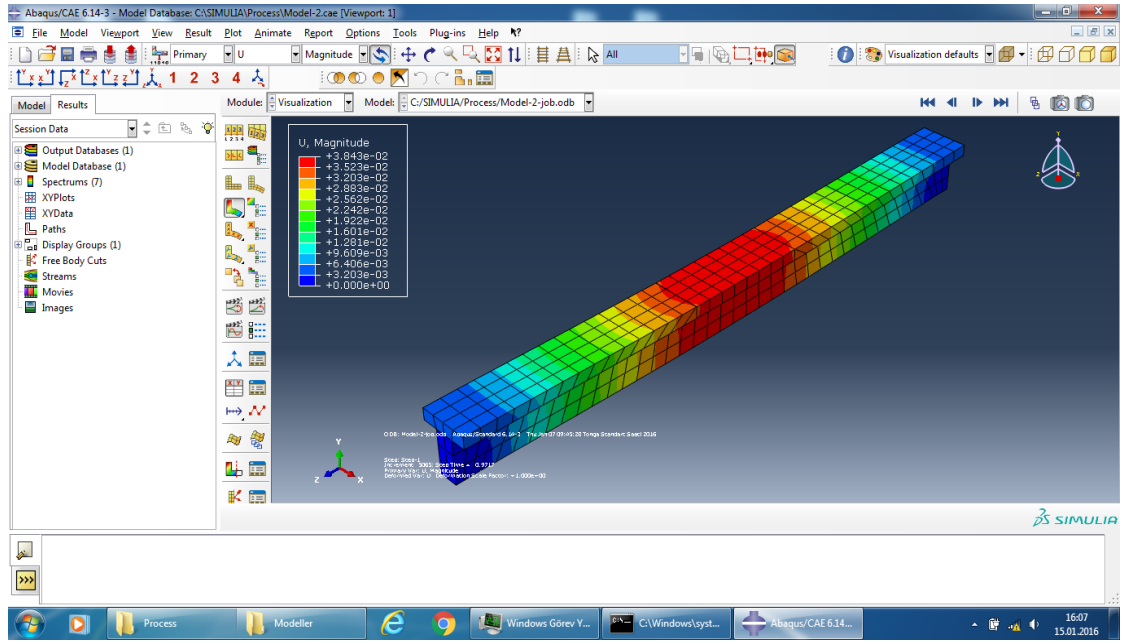
görüntüleri Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23, Şekil 6.24, Şekil 6.25, Şekil 6.26, Şekil 6.27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29’da gösterilmiştir.



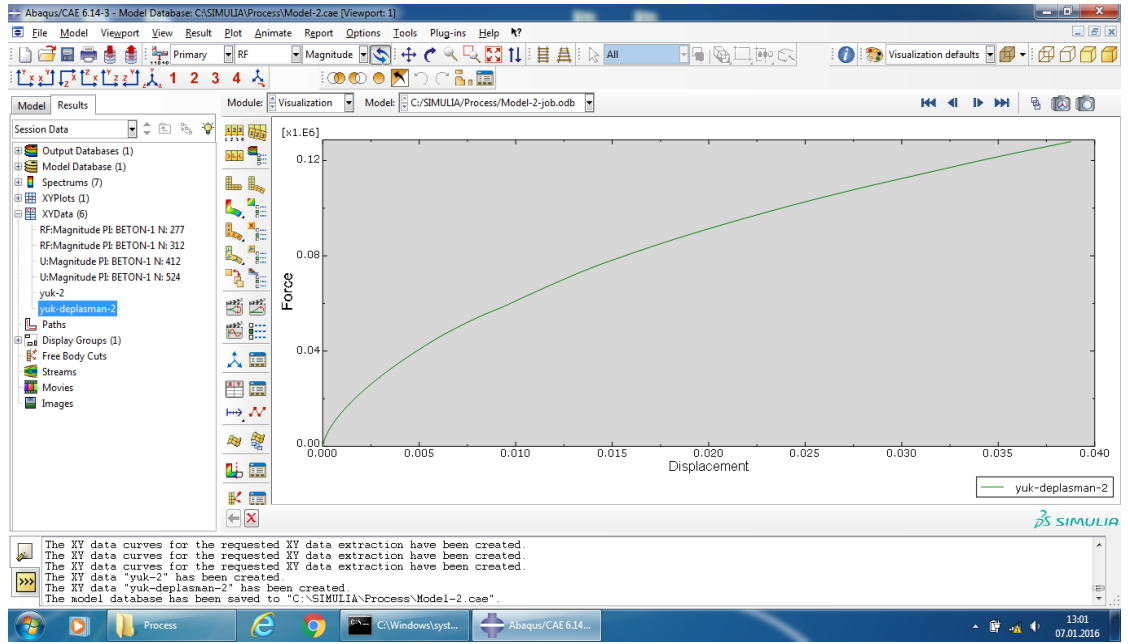
Şekil 6.20: Model-1 analiz sonucu.



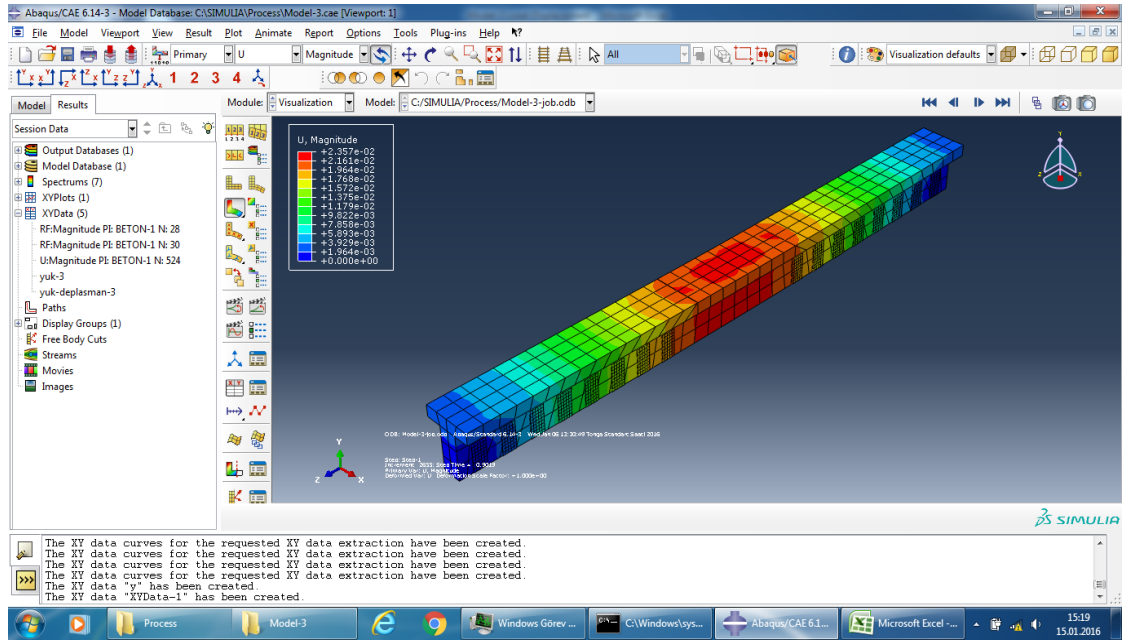
Şekil 6.21: Model-1 yük-deplasman grafiği.



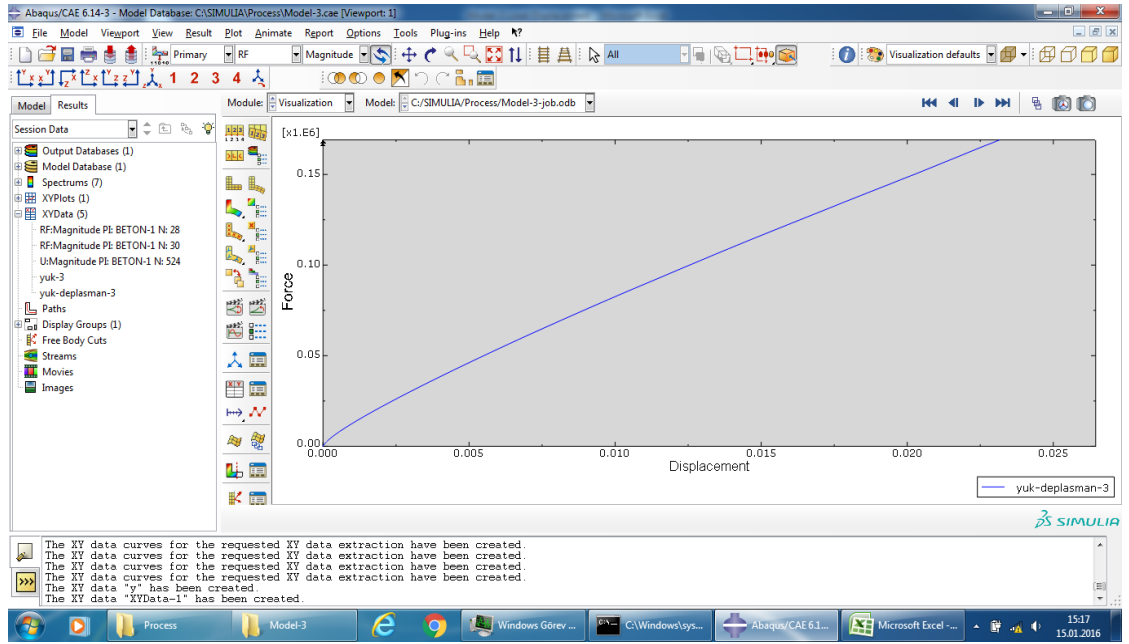
Şekil 6.22: Model-2 analiz sonucu.



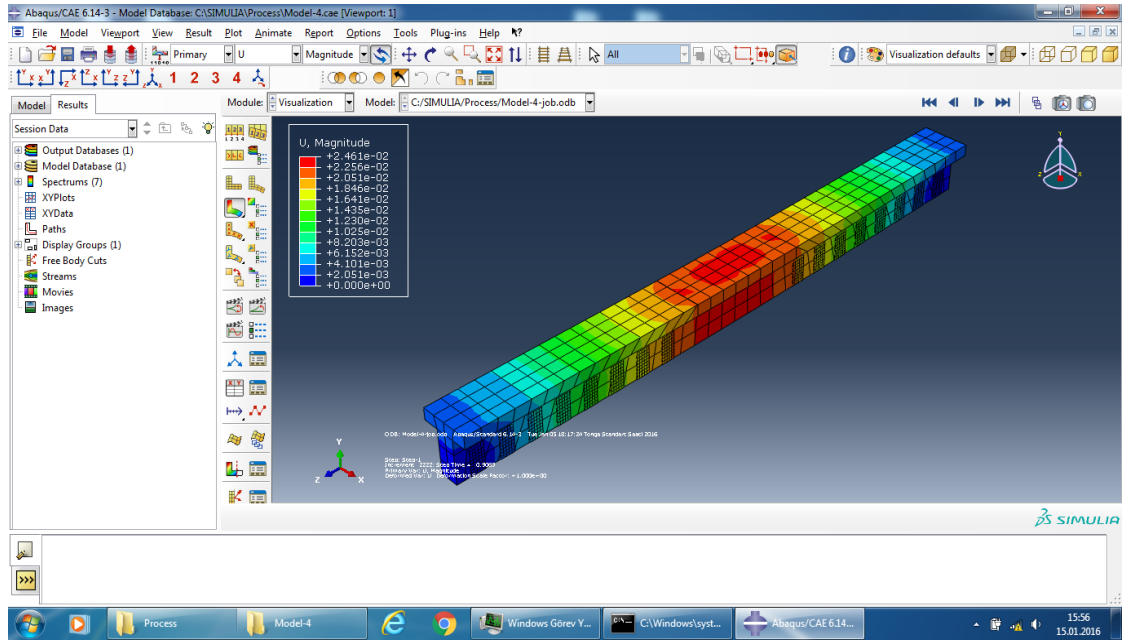
Şekil 6.23: Model-2 yük-deplasman grafiği.



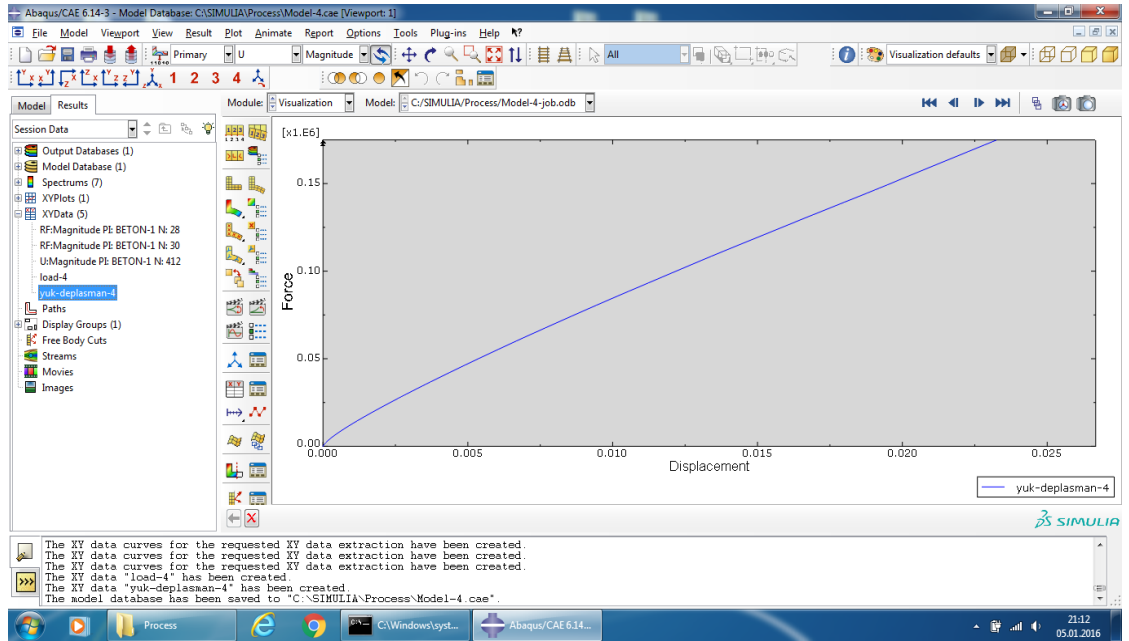
Şekil 6.24: Model-3 analiz sonucu.



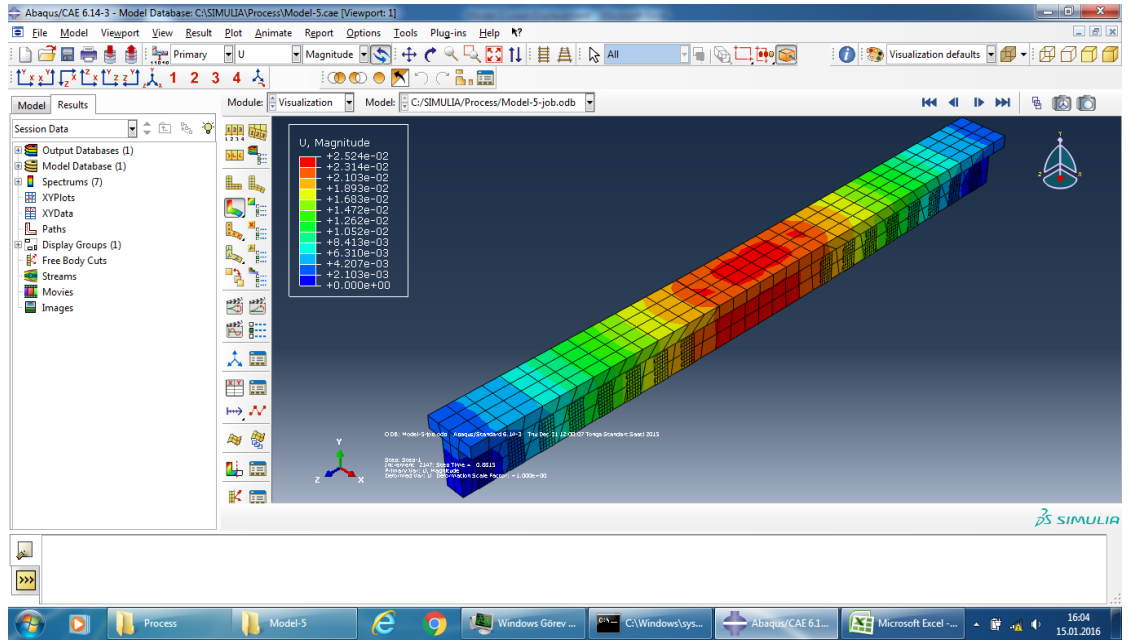
Şekil 6.25: Model-3 yük-deplasman grafiği.



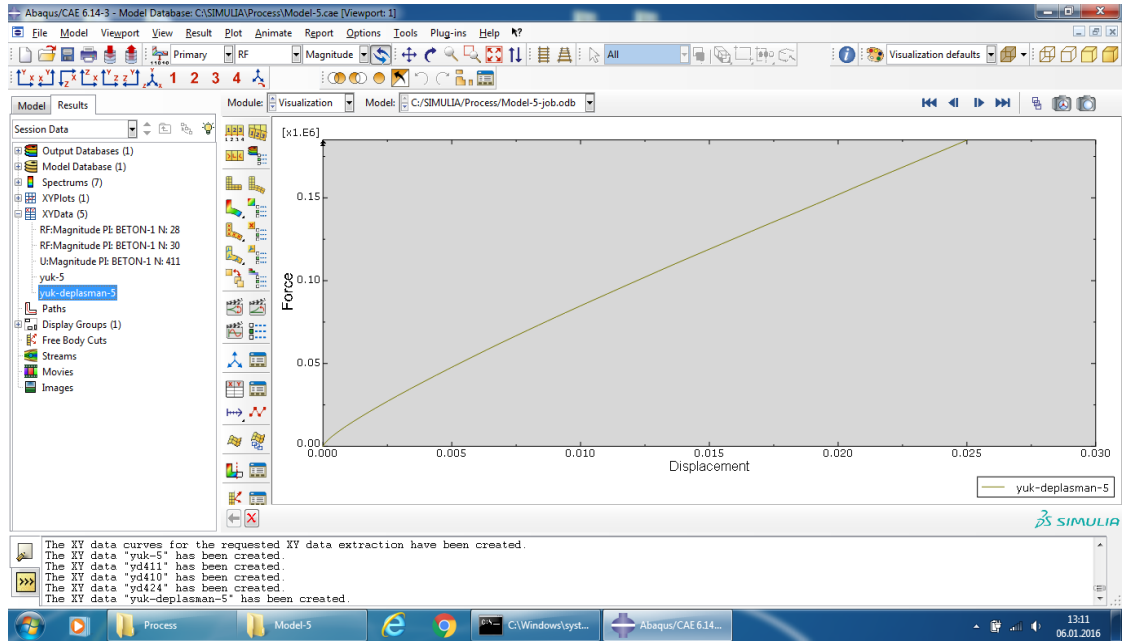
Şekil 6.26: Model-4 analiz sonucu.



Şekil 6.27: Model-4 yük-deplasman grafiği.



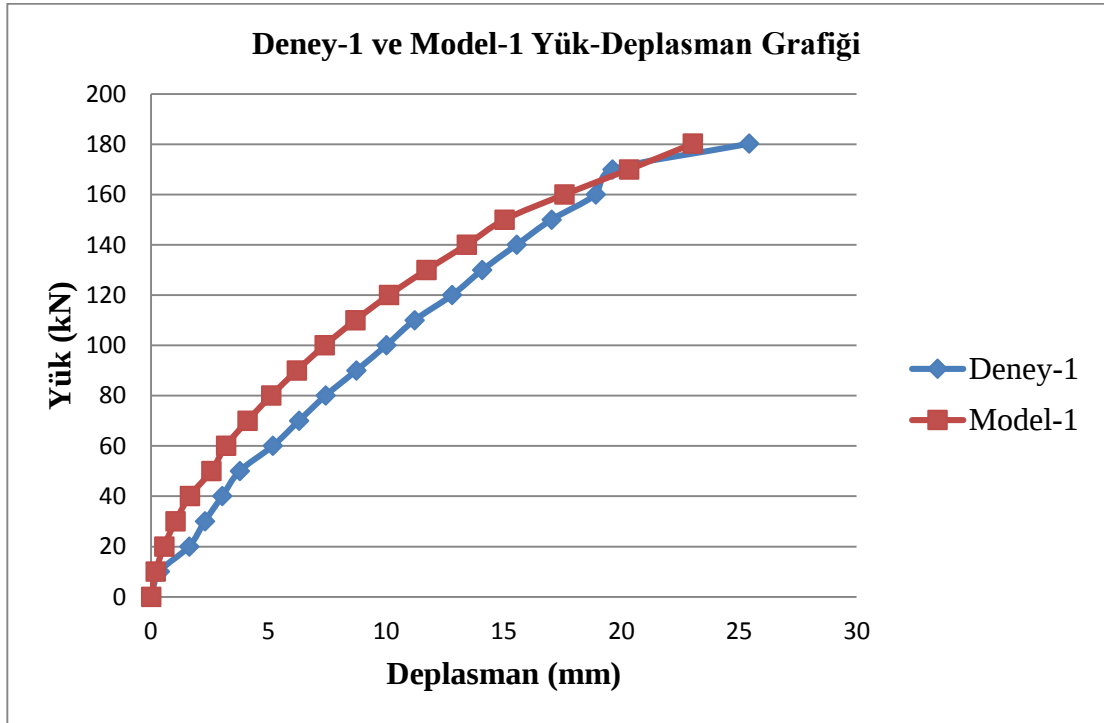
Şekil 6.28: Model-5 analiz sonucu.



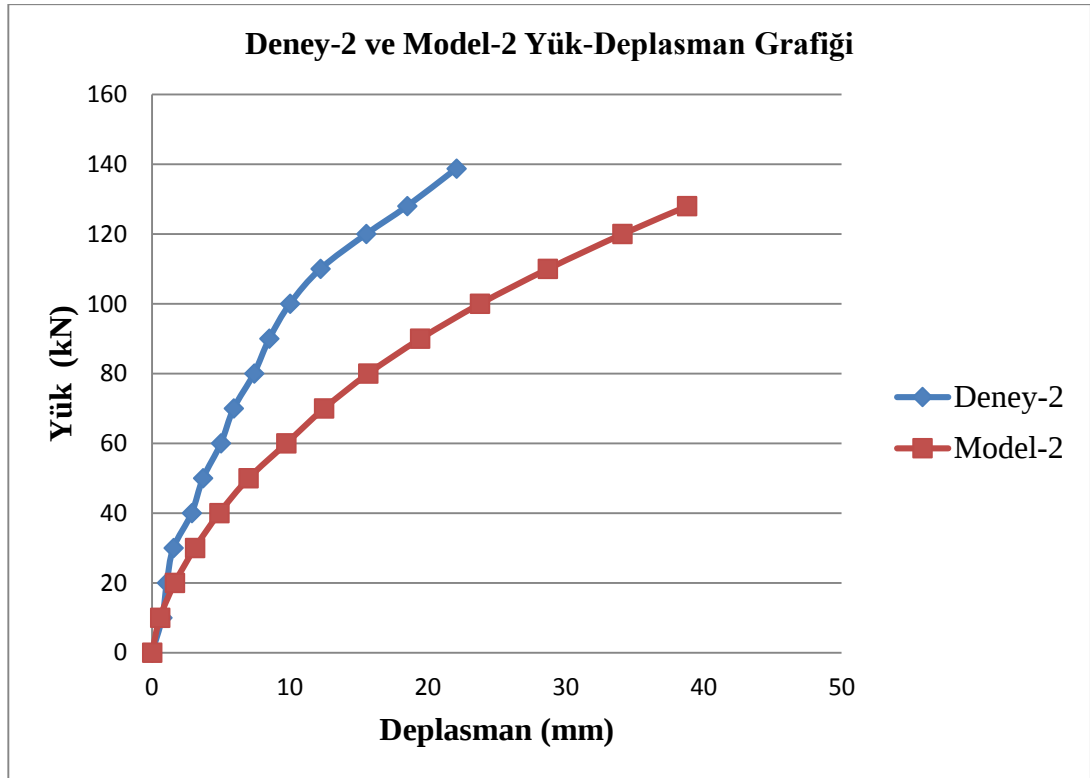
Şekil 6.29: Model-5 yük-deplasman grafiği.

7.DENEY SONUÇLARI İLE ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

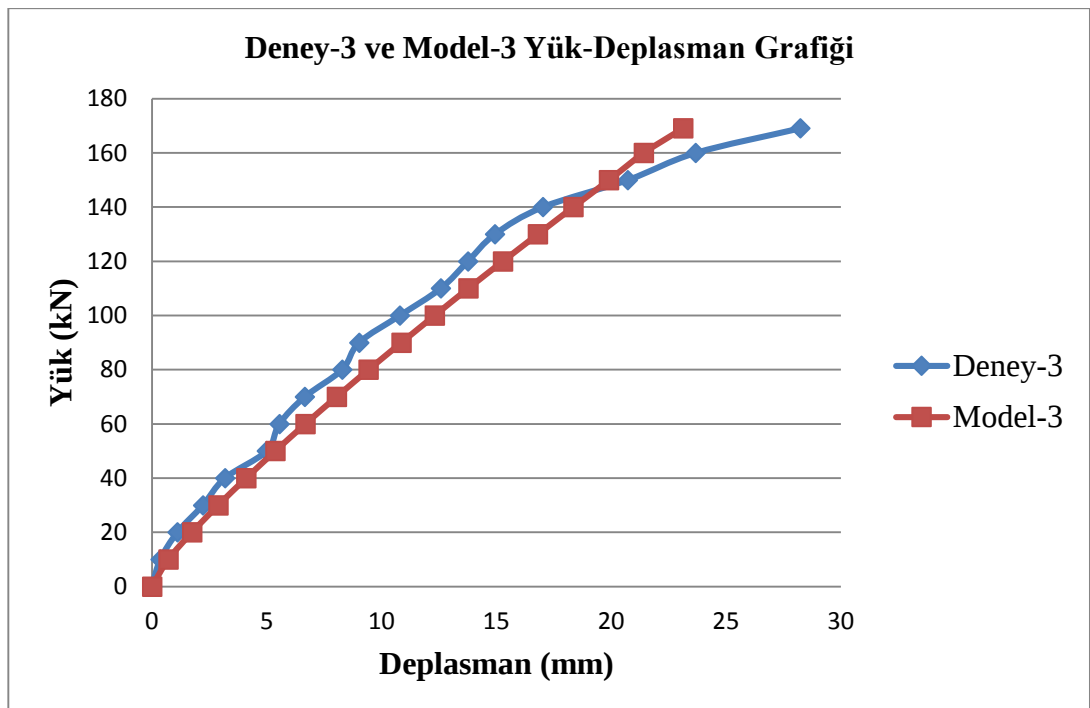
Kesmeye karşı GFRP şeritleri ile güçlendirilmiş T kesitli betonarme kirişlerin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması hususunda yük-deplasman grafikleri Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te gösterilmiştir.



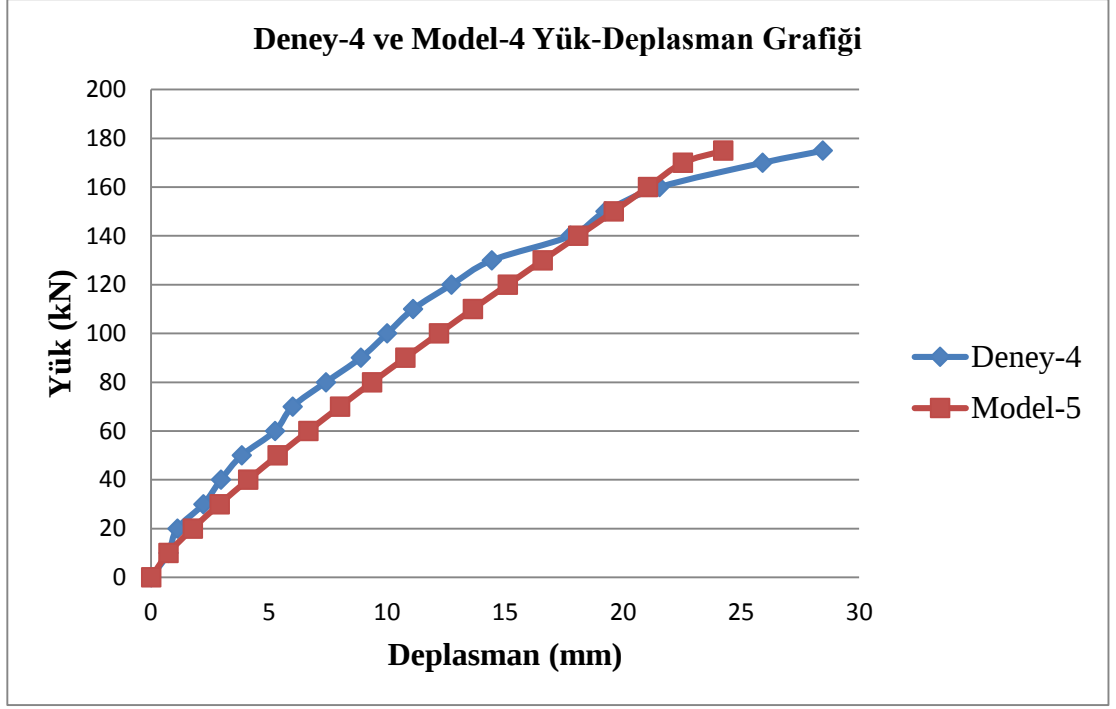
Şekil 7.1: Deney-1 ve Model-1 yük-deplasman grafiği.



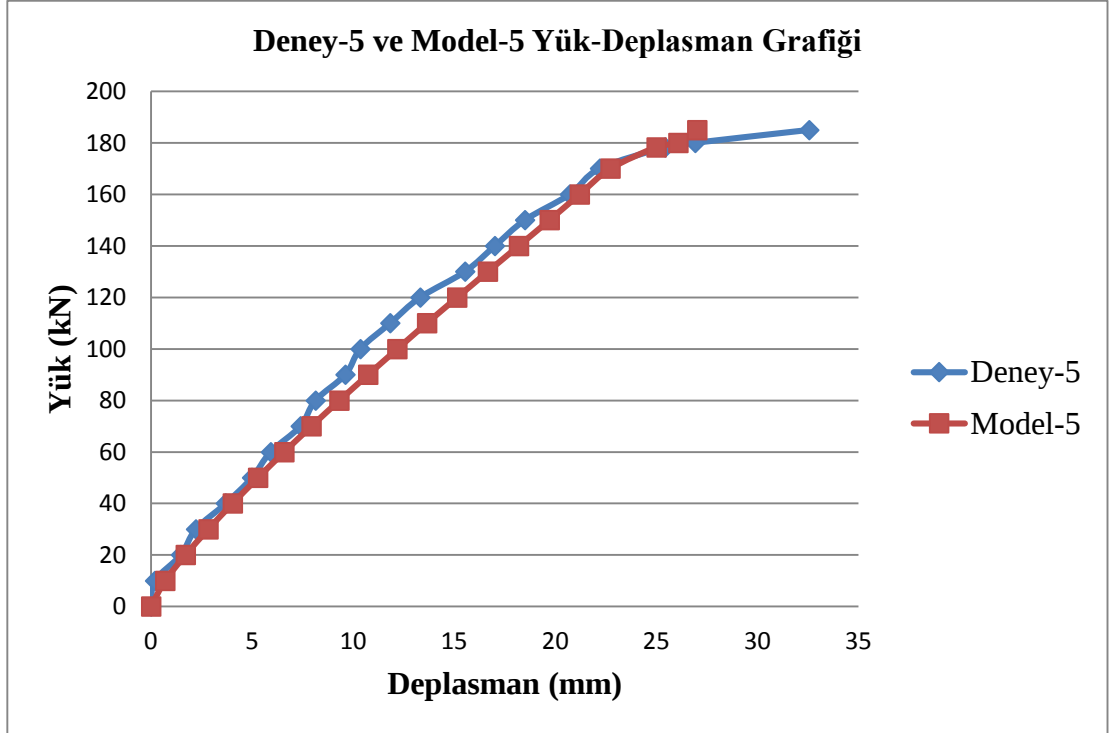
Şekil 7.2: Deney-2 ve Model-2 yük-deplasman grafiği.



Şekil 7.3: Deney-3 ve Model-3 yük-deplasman grafiği.



Şekil 7.4: Deney-4 ve Model-4 yük-deplasman grafiği.



Şekil 7.5: Deney-5 ve Model-5 yük-deplasman grafiği.

Şekil 7.1’de güçlü referans elemanı olan kesmeye karşı yeterli dayanıma sahip model ve deney sonuçları için yakın değerler çıktığı görülmektedir. Deney-1 sonuçlarındaki

akma yükü olan 180.24 kN 'e ait deplasman değeri 25.42 mm iken Model-1 e ait aynı yük için deplasman değeri 23.02 mm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 7.2’de zayıf referans elemanı olan kesmeye karşı yetersiz dayanıma sahip model ve deney sonuçları için küçük kuvvetler için yakın sonuçlar çıksa da yükün artmasıyla beraber deplasman değerleri arasındaki fark artmıştır. Deney-2 elemanı 138.76 kN yüke karşı 22.07 mm deplasman yaparak göçtüğü bilinmekte, Model-2 için 120 kN da 30 mm deplasmanı geçtiği ve göçtüğü tespit edilmiştir.

Şekil 7.3’te kesmeye karşı GFRP şeritleriyle güçlendirilmiş ve 2 adet ankrajlı model ve deney sonuçları için yakın değerler çıktığı görülmektedir. Deney-3’te 169.08 kN göçme yüküne ait deplasman değeri 28.23 mm iken Model-3 için aynı yüke ait deplasman değeri 23.12 mm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 7.4’te kesmeye karşı GFRP şeritleriyle güçlendirilmiş ve 3 adet ankrajlı model ve deney sonuçları için yakın değerler çıktığı görülmektedir. Deney-4’te 174.94 kN göçme yüküne ait deplasman değeri 28.45 mm iken Model-4 için aynı yüke ait deplasman değeri 24.22 mm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 7.5’te kesmeye karşı GFRP şeritleriyle güçlendirilmiş ve 4 adet ankrajlı model ve deney sonuçları için yakın değerler çıktığı görülmektedir. Deney-5 sonuçlarındaki akma yükü olan 178.28 kN 'e ait deplasman değeri 25.44 mm iken Model-5 e ait aynı yük için deplasman değeri 25.01 mm olarak tespit edilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Gevrek betonun ve sünek çeliğin beraber kullanılmasıyla elde edilen kompozit yapı malzemesi olan betonarme geniş uygulama alanına sahiptir. Betonarme kirişler ise kesme etkisiyle ani ve gevrek şekilde geçer. Betonarme kirişlerin sünekliliğini artırmak amacıyla bu kirişlere çeşitli güçlendirme çalışmaları yapılmaktadır. Son yıllarda kiriş yüzeylerine uygulanan FRP elemanları ile ilgili çalışmalar artmaktadır. Bu çalışmada yetersiz kesme dayanımlı T kesitli betonarme kirişlere uygulanan GFRP şerit ve ankraj sayısının etkisinin analitik olarak modellenmesi yapılmıştır. Laboratuvar ortamında deney sonuçları mevcut olan bu kirişler ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir ve nonlinear analizleri tamamlanmıştır. Elemanlara ait yük-deplasman grafikleri deney ve analiz sonuçları karşılaştırılarak yapılmıştır.

ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programı kullanılarak önce modele ait parçaların geometrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu parçaların montajları yapılarak model geometrileri elde edilmiştir. Daha sonra malzemelere ait özellikler ABAQUS/CAE programına tanıtılmıştır ve bu malzeme özellikleri parça kesitlerine atanmıştır. Beton modeli olarak Concrete Damage Plasticity kullanılmıştır. Donatı için Classical Metal Plasticity (CMP) modeli kullanılmıştır. Analiz tipi ve analiz adımı oluşturulduktan sonra parçalar arası temas özellikleri tanımlanmıştır. Yük ve sınır şartları tanımlandıktan sonra modeller sonlu elemanlara bölünmüştür. Kullanılan mesh aralığı olan global size değeri beton için 0.1, donatı ve ankraj için 0.08, GFRP için 0.02 değeri alınmıştır. Analiz başlatıldıktan sonra sonuçlar görüntülenmiştir.

Model-1 kesme donatısı yeterli güçlü referans eleman, Model-2 kesme donatısı yetersiz zayıf referans elemanıdır. Güçlendirme yapılan Model-3, Model-4 ve Model-5 için kullanılan kesme donatısı oranı Model-2 ile aynıdır. Aynı GFRP şeritleri kullanılan Model-3, Model-4 ve Model-5 için tek değişken GFRP şeritlerine uygulanan ankraj sayısıdır.

Model-1, Model-3, Model-4 ve Model-5 için deney sonuçlarındaki yük-deplasman grafiklerine yakın sonuçlar elde edilirken Model-2 için yük değerin artırılması ile deplasman değerlerinin deney sonuçlarına göre arttığı tespit edilmiştir. Deney-2 ile Model-2 sonuçlarının arasındaki farkın Model-2'nin kesmeye karşı yetersiz olması ve Model 2'ye herhangi bir güçlendirme takviyesi uygulanmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Model-2 kesme donatısı yetersiz zayıf referans elemanı olduğundan üzerine uygulanan yükler doğrultusunda büyük yük değerlerine ulaşmadan küçük yük değerleri altında büyük deplasmanlar yapmıştır. Aynı kesme donatısına sahip ve aynı GFRP şeritleri kullanılan Model-3, Model-4 ve Model-5 için sırasıyla her GFRP şeridine 2, 3 ve 4 adet ankraj bulonu kiriş yüzeylerinden karşılıklı olarak montajı yapılmıştır. Ankraj sayısının artması ile kesme dayanımının arttığı analiz sonuçlarındaki yük değerleri ile görülmektedir.

8.2 Öneriler

Yapılan bu çalışmada deney ve modellere ait yük-deplasman grafiklerinin birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Beton ve donatı için elastik ve plastik değerlerinin, GFRP ve ankraj malzemesinin lineer elastik değerlerinin ABAQUS/CAE sonlu elemanlar programına girilmesiyle elde edilen bu sonuçlar için çalışmada kullanılan bilgisayarın yeterliliklerine ait azami sık mesh aralığı tanımlanmıştır. Mesh aralığını sıklaştırmak sonuçlara yakınlaştırmayı arttırdığı gibi yüksek donanım ve uzun analiz süresi gerektirmektedir. Daha yüksek bilgisayar donanımı ile daha sık mesh aralığı seçilerek kiriş modellerinin analizi gerçeğe daha yakın çıkacağı düşünülmektedir.

Deneylerde kullanılan GFRP malzemesinin laboratuvar sonuçlarıyla elde edilen plastik değerlerinin tespit edilip programa tanıtılmasıyla yine gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

Beton ve donatı için bu çalışmada kullanılan Concrete Damage Plasticity ve Classical Metal Plasticity modellerinden farklı modelleri kullanarak araştırılması önerilmektedir.

GFRP şeritlerinin farklı geometride, aralıkta ve yerleşmede uygulanarak kirişlerin kesme dayanıma olan etkisinin deney ve analitik olarak araştırılması önerilmektedir.

Farklı yüklemeler altındaki etkilerinin deney ve analitik olarak araştırılması önerilmektedir.

GFRP dışındaki diğer FRP malzemelerinin veya farklı özellikteki malzemelerin değişik düzeneklerde uygulanarak kirişlerin kesme dayanıma olan etkisinin deney ve analitik olarak araştırılması önerilmektedir.

Kullanılan ankrajdan farklı ankraj çapı ve düzeneği kullanılarak kirişlerin kesme dayanıma olan etkisinin deney ve analitik olarak araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- ABAQUS/CAE Documentation v6.14, 2014. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA.
- Ahmed,A., 2014. Modeling of reinforced concrete beam subjected to impact vibration using ABAQUS, International Journal of Civil and Structural Engineering, volume 4, No 3.
- Ashour, A.F. ve Morley, C.T., 1993. Three-dimensional nonlinear finite element modelling of reinforced concrete structures, Finite Elements in Analysis and Design, 15, 1, 43-55.
- Aryan, A., 2014. Polipropilen lif takviyeli betonarme kirişlerin deneysel ve analitik olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Brar, N.S., Joshi, V.S. ve Harris, B.W., 2009. Constitutive model constatnts for Al7075-T651 and Al7075-T6, Aip Conference Proceedings, 1195, 945-948.
- Bulut, N., 2009. CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Camata, G., Spacone, E. ve Zarnic, R., 2007. Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates, Elsevier, Compsites Part B: Engineering, 38:277-288.
- Chandrupatla, T.R. ve Belegundu, A.D., 1997. Introduction to finite elements in engineering, Prentice Hall International, 1-2, USA.
- Chen, G., Ren, C. ve Yang, X., 2011. Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model, International Journal Advance Manufacturing Technology, 56, 1027-1038.
- Cheung, Y.K. ve Zienkiewicz, O.C., 1967. The finite element method in structural and continuum mechanics, McGraw-Hill Book Company.
- Chung, W.S., 2003. A cracked concrete material model fort he nonlinear finite element analysis of slab-on-girder bridges, Doktora Tezi, Purdue University, West Lafayette.
- Clough, R.W., 1960. The finite element method in plane stres analysis, ASCE, Pittsburgh.
- Cook, R.D., Malkus, D.S. ve Plesha, M.E., 1961. Essai de resolution des systems hyperstatiques dans le domain e'lasto-plastique, Annales de L'institute Technique, 158, 259.

- Coşgun, S.İ., 2014. Betonarme plakların darbe yükü etkisindeki davranışlarının sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Doğan, A.B., 2008. Karbon polimer elyaflar ile güçlendirilmiş beton kirişlerin sonlu elemanlar metodu ile lineer olmayan analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- DBYBHY, 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Elyasian, I., Abdoli, N. ve Ronagh, H.R., 2006. Evalution of parameters effective in FRP shear strengthening of RC beams using FE method, Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 7(3):249-257.
- Ellobody, E., 2014. Finite element analysis and design of steel and steel-concrete composite bridges, Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 501-503.
- Ellobody, E., Feng, R. Ve Young, B., 2014. Finite element analysis and design of metal structures, Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 43-46.
- Ersoy, U., 2000. Betonarme temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı, ODTÜ, Evrim Yayınları, Ankara.
- Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2004, Betonarme temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap, İkinci Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Henchie, T.F., Yuen, S.C.K., Nurick, G.N., Ranwaha, N. ve Balden, V.H., 2014. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study, International Journal of Impact Engineering, 1-10.
- Hibbitt, H., Karlsson, B. ve Sorensen P., 2011. Abaqus analysis users manual version 6.11 Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA.
- Hu, H.T., Lin, F..M., ve Jan, Y.Y., 2004. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics, Comps Struct, Vol. 63, No. 3-4, pp 271-281.
- İnan, M., 1988. Cisimlerin mukameti, İTÜ Vakfı, 560, İstanbul.
- Jia, M., 2003. Finite element modeling of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite sheets, Yüksek Lisans Tezi, The University of Alabama in Huntsville, 4, 20, 22, 27-29, 60.
- Kachlakev, D. ve Miller, T., 2001. Finite element modelling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates, Final Report, Oregon, SPR 316.

- Kaya, M., 2007. Prefabrike yapılarda art çekmeli kolon-kiriş birleşimlerinin tersinir yükler altında performansının incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya, M., ve Kankal, Z.Ç., 2015. Effect of anchorage number on behavior of reinforced concrete beams strengthened with glass fiber plates, International Journal of Concrete Structures and Materials, DO 10.1007/s40069-015-0116-5.
- Kantar, E., 2009. CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kankal, Z.Ç., 2011. Betonarme kirişlerin cam fiber plakalarla kesmeye karşı güçlendirilmesinde ankraj sayısının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Lale, E., 2011. Betonarme elemanların plastisite ve hasar mekaniği esasları kullanılarak doğrusal olmayan analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Li, G., Kidane, S., Pang, S., Helms, J.E. ve Stubblefield, M.A., 2003. Investigation into FRP repaired RC columns, Composite Structures 62, 83-39.
- Navakurlar, R.K. ve Hsu, C.T.T., 2001. Fracture analysis of high strength concrete members, Journal of Materials in Civil Engineering, 13, 3, 185-193.
- Özer, G., 2003. Malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerin hesabı için bir ardışık yaklaşım yöntemi ve bilgisayar programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Santhakumar, R., Chandrasekaran, E. Ve Dhanaraj, R., 2004. Analysis of retrofitted reinforced concrete shear beams using carbon fiber composites, EJSE International, Electronic Journal of Structural Engineering, 4:66-74.
- Selvi, M., 2008. Beton dayanımındaki değişimin çarpma davranışına olan etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tanarşlan, H.M., 2007. CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tersinir-tekrarlı yükler altında davranışı, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- TS 500, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1992-1-1, 2009. Beton yapıların tasarımı-Bölüm 1-1: Genel kurallar ve binalarda uygulanacak kurallar (Eurocode 2), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Turner, M.J., Clough, R.W.W., Martin, H.C. ve Topp, L.J., 1956. Stifness and deflection analyses of complex structures, *Journal of Aeronatutical Sciences*, 23, 9, 805.
- Yavuzer, M., 2005. Monotonik yükleme altında dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile nonlinear analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, T., 2013. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Umer, U., 2012. High speed turning of H-13 tool steel using ceramics and PCBN, *Journal of Material Engineering and Performance (JMEP)*, 21, 1857-1861.
- Zhang, D.N., Shangguan, Q.Q., Xie, C.J. ve Liu, F., 2015. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminium alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 186-194.
- URL-1, www.dogusplastiksanayi.com/index.php?pg=epoxy. Alındığı tarih:16 şubat 2016.
- URL-2, http://home.agh.edu.pl/~danpoc/dydaktyka/krzywa_u/plastycznosc.pdf. Alındığı tarih: 25 şubat 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Canberk YAMAN
Doğum Tarihi ve Yeri: 26.03.1987 Altındağ/ANKARA
E-posta adresi : canberkyaman@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 2009.
Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 2016.

MESLEKİ DENEYİM (Kurum ve Yıl)

Demars İnşaat : Saha mühendisi, Ağustos, 2009 - Kasım, 2009.
Mekan Alt Yapı İnş. : Şantiye şefi, Kasım, 2010 – Mayıs, 2011.
ATGV : Statik ve Altyapı proje kontrol mühendisi, Mayıs, 2011- Halen devam ediyor.