

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ÇELİK LEVHALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLEN
BETONARME KİRİŞLERİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ**

Okan DÜZGÜNLÜ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ÇELİK LEVHALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLEN
BETONARME KİRİŞLERİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ**

Okan DÜZGÜNLÜ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

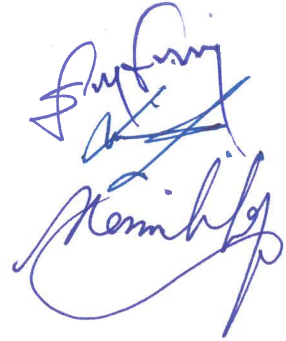
T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK LEVHALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLEN
BETONARME KİRİŞLERİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ**

Okan DÜZGÜNLÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 30.07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN (Danışman)
Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU
Dr. Öğr. Üyesi Hamid Farrokh GHATTE



ÖZET

ÇELİK LEVHALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ

Okan DÜZGÜNLÜ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Temmuz 2019; 47 sayfa

Mühendislik yapılarının imalatından başlayarak kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği birçok tehdit bulunmaktadır. Bunlara yanlış tasarım, yanlış imalat, deprem, rüzgâr vb. örnekleri verebiliriz. Hasar gören yapıları tekrardan inşa etmek yerine güçlendirme yoluna gitmek maddi ve zaman kayıplarını azaltmak için doğru bir seçenek olabilmektedir. Bu nedenle günümüzde güçlendirme çalışmaları oldukça önem kazanmıştır.

Oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan betonarme eleman ve yapıların çeşitli yükler altında davranışının belirlenmesi, laboratuvar ortamında yapılan model deneylerle mümkün olmaktadır. Ancak deneylerde kullanılan eleman boyutlarının büyüklüğü ve gerçekçi yük verme gücü gibi nedenlerden dolayı bu çalışmaların maliyeti oldukça yüksek olmakta ve uygulamalar uzun zaman alabilmektedir. Bu sebeple deneyi yapılamayan bazı ara durumların bilgisayar ortamında sayısal olarak incelenmesinde büyük fayda vardır. Aynı zamanda bu tür çalışmalar hazır bilgisayar programların kapsamının anlaşılabilmesi için de önemlidir. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan sayısal modelin oluşturulma tekniğinden de oldukça etkilenmektedir. Yapı mekaniğinde, gerçek davranışa uyan ideal analitik modelleme tekniklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılacak olan çalışmalar gereklidir.

Bu tez çalışmasında, deneysel çalışması literatürde yer alan T kesitli betonarme kirişlerin bilgisayar ortamında doğrusal olmayan sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin kesme etkisine karşı çelik levhalarla güçlendirme durumlarına göre elde edilen sonuçlar dayanım, rijitlik, deplasman ve çatlak gelişimi yönünden karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Böylece, bilgisayar modelinin doğruluğu kontrol edilmiş ve kullanılan modelleme tekniği idealize edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrusal ötesi davranışa ait bulgular karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

ANAHTAR KELİME: Betonarme kiriş, Çelik levhayla güçlendirme, Doğrusal olmayan analiz, Kesme etkisi, Sonlu elemanlar yöntemi.

JURİ: Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Dr. Öğr. Üyesi Hamid Farrokh GHATTE

ABSTRACT

ANALYTICAL MODELING OF RC BEAMS RETROFITTING WITH STEEL PLATES AGAINST SHEAR FORCES

Okan DÜZGÜNLÜ

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

July 2019; 47 pages

There are many threats that may be encountered during the life of the engineering structures. Wrong design, wrong manufacturing, earthquake, wind etc. we can give samples. Instead of rebuilding damaged structures, reinforcing the right is the right option to reduce material and time losses. For this reason, strengthening studies have started to gain importance.

The determination of the behavior of reinforced concrete elements and structures under various loads is possible with model experiments performed in the laboratory. However, due to reasons such as the size of the elements used in the experiments and the realistic load-bearing difficulties, the cost of these studies is quite high and applications can take a long time. For this reason, it is of great benefit to numerically examine some intermediate situations that have not been tested. At the same time, such studies are important for understanding the scope of ready-made computer programs. The results obtained are highly influenced by the technique of preparing the numerical model. In structural mechanics, studies are needed to determine the ideal analytical modeling techniques that match actual behavior.

In this thesis, a nonlinear numerical analysis of a T-section reinforced concrete beams, whose experimental work is in the literature, was performed. The results obtained according to the retrofit with steel plates against the shear effect of the beams were compared in terms of strength, stiffness, displacement and crack development. Thus, the accuracy of the computer model was checked and the modeling technique used was idealized. The results of the experimental study and the findings of the nonlinear behavior were compared and interpreted.

KEYWORDS: Reinforced concrete beam, Reinforcement with steel plates, Nonlinear analysis, Shear effect, Finite element method.

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Asst. Prof. Dr. Hamid Farrokh GHATTE

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında hiçbir konuda yardımını esirgemeyen, yaptığı yorumlarla tezime katkıda bulunan, genel hatlarıyla tezimi belirlememde yardımcı olan, mesleki ve kişisel anlamada gelişmemde katkıda bulunan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN'e şükran ve saygılarımı sunarım.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi her konuda bana destek olan, hiçbir şeyi esirgemeyen, bana sonuna kadar güvenen Merve DOĞAN'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarak bu tez çalışmasını aileme ithaf ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Açıklamalar.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOT	5
3.1. Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi ve Davranışı	5
3.2. Betonarme Elemanların Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi.....	5
3.3. Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Davranış.....	6
3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi	9
3.4.1. Sonlu elemanlar yönteminin tanımı	9
3.4.2. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanışı.....	9
3.4.3. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları ve dezavantajları	10
3.5. ABAQUS Analiz Programı	11
3.5.1. ABAQUS programının kullanımı	11
3.5.2. Malzeme davranışı ve CDP (Concrete Damaged Plasticity) modeli	14
3.5.2.1. Beton	14
3.5.2.2. Donatı çeliğinin matematiksel modeli.....	18
3.5.3. Kullanılan eleman tipi (C3D8R)	19
4. BULGULAR.....	20
4.1. Giriş	20
4.2. Deney Elemanlarının Tanıtılması.....	20
4.3. Analitik Çalışma.....	27
4.3.1. Geometrilerin oluşturulması.....	28
4.3.2. Malzeme özelliklerinin tanıtılması.....	30
4.3.3. Parçaların birleştirilmesi	33

4.3.4.	Analiz tipinin oluşturulması	34
4.3.5.	Parçalar arası etkileşimin tanımlanması	34
4.3.6.	Sınır şartlarının tanımlanması	35
4.3.7.	Modele sonlu eleman ağının tanımlanması	36
4.3.8.	Analizin başlatılması	37
4.3.9.	Analiz sonuçlarının görüntülenmesi	38
5.	TARTIŞMA	39
5.1.	Giriş	39
5.2.	Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	39
6.	SONUÇLAR	44
7.	KAYNAKLAR	46

ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çelik Levhalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Analitik Olarak Modellenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

30/07/2019

Okan DÜZGÜNLÜ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	: Elastisite modülü
f_c	: Betonun basınç dayanımı
kg	: Kilogram
kN	: Kilo Newton
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
P	: Yük
ϵ	: Şekil değiştirme
ϵ_c	: Beton basınç birim şekil değiştirmesi
σ	: Basınç gerilmesi
σ_c	: Betonun basınç gerilmesi
$\emptyset$	: Donatı çapı
δ	: Yer değiştirme

Kısaltmalar

CAE	: Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CDP	: Concrete Damaged Plasticity (Beton için Hasarlı Plastisite)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kirişlerde kesme tipi çatlak gelişimi	5
Şekil 3.2. Kirişlerde çelik levhalarla yapılan güçlendirme örneği	6
Şekil 3.3. Yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	7
Şekil 3.4. Saatçioğlu-Razvi beton gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	7
Şekil 3.5. Yapısal çeliğin gerilme-şekil değiştirme grafiği	8
Şekil 3.6. Yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafikleri	8
Şekil 3.7. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar.....	9
Şekil 3.8. ABAQUS Programının açılış görüntüsü	11
Şekil 3.9. Programda kullanılan sekmeler	12
Şekil 3.10. Property, Assembly ve Step sekmesi ve alt modülleri	13
Şekil 3.11. Load, Mesh ve Job sekmesi ve alt modülleri.....	13
Şekil 3.12. Analize hazır hale getirilmiş örnek bir kiriş	14
Şekil 3.13. Betonun mekanik özelliklerinin girilmesi	15
Şekil 3.14. p-q düzleminde genişleme açısı.....	15
Şekil 3.15. Deviatorik düzlemde yüzeylerin görüntüsü.....	16
Şekil 3.16. Basınç etkisi altında CDP beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd. 2014).	17
Şekil 3.17. Çekme etkisi altında CDP beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd. 2014).	17
Şekil 3.18. TBDY2018’de donatı çeliğin gerilme - birim şekil değiştirme ilişkisi	18
Şekil 3.19. 8-noktalı hexahedral eleman (C3D8R).....	19
Şekil 4.1. Deney elemanlarının donatı şemaları (Altın vd. 2005)	22
Şekil 4.2. Çelik levhalar (Altın vd. 2005).....	23
Şekil 4.3. Güçlendirme durumu: Kiriş-3, Kiriş-4 (Altın vd. 2005)	23
Şekil 4.4. Güçlendirme durumu: Kiriş-5 (Altın vd. 2005).....	23
Şekil 4.5. Güçlendirme durumu: Kiriş-6, Kiriş-7 (Altın vd. 2005)	24
Şekil 4.6. Güçlendirme durumu: Kiriş-8 (Altın vd. 2005).....	24
Şekil 4.7. Güçlendirme durumu: Kiriş-9 (Altın vd. 2005).....	24
Şekil 4.8. Güçlendirme durumu: Kiriş-10 (Altın vd. 2005).....	24
Şekil 4.9. Güçlendirme durumu: Kiriş-11 (Altın vd. 2005).....	25
Şekil 4.10. Kirişlerin kesit görünüşü (Altın vd. 2005).....	25
Şekil 4.11. Deney ve ölçüm düzeneği (Altın vd. 2005).....	25
Şekil 4.12.a) Kiriş 1-6 deney sonucu (Altın vd. 2005).....	26

Şekil 4.12.b) Kiriş 7-11 deney sonucu (Altın vd. 2005).....	27
Şekil 4.13. ABAQUS programında kullanılan birimler.....	28
Şekil 4.14. ABAQUS beton kiriş geometrisi	29
Şekil 4.15. ABAQUS donatı geometrisi	29
Şekil 4.16. ABAQUS çelik levha geometrisi	29
Şekil 4.17. Malzeme özellikleri bölümü	30
Şekil 4.18. Betonun basınç altında CDP modeli (Kiriş-1).....	31
Şekil 4.19. Betonun çekme altında CDP modeli (Kiriş-1)	31
Şekil 4.20. Donatılar için TBDY2018 modeli (TBDY 2018).....	32
Şekil 4.21. Parçaların birleştirilmesi, 3D görünüş (Kiriş-1)	33
Şekil 4.22. Parçaların birleştirilmesi, 2D yan görünüş (Kiriş-1)	33
Şekil 4.23. Parçaların birleştirilmesi, 2D kesit görünüş (Kiriş-1)	33
Şekil 4.24. Parçaların birleştirilmesi, 2D yan görünüş (Kiriş-6)	34
Şekil 4.25. Yükleme durumunun oluşturulması	34
Şekil 4.26. Beton-donatı etkileşiminin tanımlanması	35
Şekil 4.27. Beton-çelik levha etkileşiminin tanımlanması	35
Şekil 4.28. Hareketli mesnedin tanımlanması.....	36
Şekil 4.29. Simetri kesitinin normal davranışı için mesnet tanımlanması.....	36
Şekil 4.30. Sonlu eleman ağı (Kiriş-1 ve Kiriş-2)	37
Şekil 4.31. Sonlu eleman ağı (Kiriş-3).....	37
Şekil 4.32. Sonlu eleman ağı (Kiriş-6).....	37
Şekil 4.33. Yük-düşey yer değiştirme grafiği (Kiriş-2)	38
Şekil 5.1. Kapasite anında etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-1)	40
Şekil 5.2. Kapasite anında etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-2)	40
Şekil 5.3. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-3).....	40
Şekil 5.4. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-5)	40
Şekil 5.5. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-6).....	41
Şekil 5.6. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-8).....	41
Şekil 5.7. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-9)	41
Şekil 5.8. Deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri (Altın vd. 2005)	42
Şekil 5.9. Bu çalışmada elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri	42
Şekil 5.10. Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Donatı çeliklerine ait bilgiler	18
Çizelge 4.1. Deney elemanlarının beton ve etriye özellikleri (Altın vd. 2005)	21
Çizelge 4.2. Deney elemanlarında kullanılan çelik levhalar (Altın vd. 2005).....	21
Çizelge 4.3. Deneyde kullanılan çeliklerin özellikleri (Altın vd. 2005).....	22
Çizelge 4.4. Hesapta kullanılan CDP parametreleri (Dere ve Koroglu 2017).....	31



1. GİRİŞ

1.1. Genel Açıklamalar

Betonarme kirişler döşemelerden gelen yükleri kolonlara aktaran tek boyutlu yatay taşıyıcı elemanlardır. Betonarme kirişlerde sünek davranış çelik donatılar ile sağlanmaktadır. Kirişler genel olarak moment ve kesme etkisinde çalışan elemanlardır. Kirişlerde meydana gelen hasar çeşitleri eğilme ve kesme çatlağı olarak sınıflandırılabilir. Eğilme çatlağı beton dayanımının düşüklüğü veya donatı yetersizliğinden oluşur. Kesme çatlakları ise kesme bölgelerinde yeterli oranda etriye bulunmamasından meydana gelmektedir. Mevcut betonarme yapılarda donatı yetersizliğinden ve çeşitli sebeplerden dolayı bu tür hasarlar meydana gelebilmektedir.

Kirişlerde moment kapasitesi yeterli olmasına rağmen kesme dayanımındaki yetersizlik elemanın gevrek kesme kırılması yapmasına neden olmaktadır. Kesme etkisindeki kırılma ani ve gevrek olur. Bu tür kırılma yapının beklenen taşıma kapasitesine ulaşmasına engel olmaktadır. Doğru tespitler ve hesaplamalarla güçlendirme yapılarak bu tür hasarlar önlenabilir. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde çeşitlik teknikler kullanılmaktadır. Son yıllarda kullanılan tekniklerden bir tanesi de kirişlere dışarıdan çelik levhaların güçlü kimyasallarla yapıştırılmasıdır. Çelik levhaların kolay uygulanabilirliği ve yüksek dayanımı gibi özellikleri güçlendirme projelerinde tercih edilen eleman olmasını sağlamaktadır.

Güçlendirmenin uygulanabilmesi ve geliştirilebilmesi için güçlendirmede kullanılacak malzemelerin özelliklerinin ve davranışlarının çok iyi kavranması gerekmektedir. Betonarme yapı elemanlarının yükler etkisindeki doğrusal olmayan (non-linear) davranışlarının belirlemesi amacıyla deneyler, sayısal yöntemler ve bilgisayar simülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Literatür araştırmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışının gerçeğe çok yakın olarak modellenemediği birçok kişi tarafından başarıyla gösterilmiştir. Bilgisayar kapasitelerindeki artış sayesinde programlar daha hızlı doğrusal olmayan çözüm yapmaya başlamıştır. Bu sayede deneylerden elde edilen sonuçlara yakın değerler bilgisayar sonuçlarında da gözlenmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında, deneysel çalışması literatürde yer alan T kesitli betonarme kirişlerin bilgisayar ortamında doğrusal olmayan sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin kesme etkisine karşı çelik levhalarla güçlendirme durumlarına göre elde edilen sonuçlar dayanım, rijitlik, deplasman ve çatlak gelişimi yönünden karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Böylece, bilgisayar modelinin doğruluğu kontrol edilmiş ve kullanılan modelleme tekniği idealize edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrusal ötesi davranışa ait bulgular karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişler için düşünülen analitik çalışma ABAQUS (Student Edition) sonlu eleman programıyla gerçekleştirilmiştir. ABAQUS hazır programının seçilme nedeni, programda kullanılan sonlu eleman tipleri ve malzeme modellerinin gerçek betonarme eleman davranışına olan uygunluğudur. Bu konuda oldukça başarılı sonuçlar alındığını gösteren çalışmalara literatürde rastlanmaktadır.

Programın edinilen sürümünde sınırlı sayıda sonlu eleman kullanımı söz konusudur. Bu nedenle literatürde deneysel çalışmada verilen toplam 11 adet durumun ancak 7 tanesi analitik olarak incelenebilmiştir. Gerek bu nedenle gerekse doğrusal olmayan analiz süresini azaltmak amacıyla tam ortasından simetrik olan kirişlerin yarısı modellemede dikkate alınmıştır. Bu amaçla, kiriş ortasında bulunan simetri özelliğini sağlayacak nitelikteki sınır şartları, analitik modele yansıtılmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

Swamy ve diğerleri (1989), tarafından yapılan çalışmada hasar görmüş betonarme kirişlerin çelik levhalar ile onarılmasını incelemişlerdir. Bu kapsamda 9 adet 155×255×2500 mm ebatlarında dikdörtgen kesitli betonarme kiriş deneyi yapmışlardır. Deney elemanlarından iki tanesi referans kiriş olarak test edilmiştir. Diğer kirişler ise yüzeyine 1.5 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılarak takviyeli olarak edilmiştir. Çalışma sonunda tüm kirişler maksimum moment bölgesinde betonun ezilmesi, donatı ve çelik levhanın akması ile eğilme kapasitelerine ulaşmıştır fakat tüm kirişlerin benzer süneklik özelliği göstermiş olup güçlendirme sonrası süneklik değerlerinde bir artış gözlenmemiştir. Genel olarak bu yöntemin hasar görmüş kirişlerde rijitlik ve dayanım açısından etkili bir yöntem olduğu savunulmuştur.

Ashour ve Morley (1993), betonarme elemanlarını ABAQUS programı kullanarak doğrusal olmayan analizlerini yapmışlardır. Deneyleri yapılan elemanları analiz sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Betonda çok küçük yükler etkisinde bile oluşan çatlakların önemine dikkat çekmişlerdir.

Altın ve diğerleri (2004) kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin eleman dışından çeşitli düzenlerde yerleştirilen kelepçeler ile kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Bu çalışmanın amacı sahada kolaylıkla uygulanabilen etkin bir kelepçe türü geliştirilmesidir. Beş adet dikdörtgen kesitli kiriş geliştirilen kelepçelerle güçlendirilip tek düze yükler altında test edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek, güçlendirme yönteminin deney elemanlarının dayanım, rijitlik, süneklik ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Geliştirilen kelepçeler kesme çatlaklarını başarılı bir biçimde kontrol ederek çatlakların genişlemesini engellemiş ve elemanda sünek eğilme davranışının gelişmesini sağlamıştır.

Altın ve diğerleri (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada kesme dayanımı yetersiz T kesitli kirişlerin kesme kapasitelerinin dışarıdan yapıştırılan çelik plakalarla güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışma için biri referans elemanı olmak üzere toplam 11 adet kesme dayanımı yetersiz deney elemanı üretilmiştir. Deneylerde amaç, yapılan güçlendirmeler neticesinde kirişlerin sünek davranış göstererek eğilme göçmesine uğramalarını sağlamaktır. Yapılan deneylerde güçlendirilen kirişlerde dışarıdan yapıştırılan çelik plakaların testlerden elde edilen veriler ışığında dayanım, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Yapılan deneylerde kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı $a/d = 4.3$ olarak tercih edilmiştir. Ayrıca deneylerde geometrik özellikleri ve donatılandırmaları aynı olan elemanlar kullanılmıştır. Deneylerde güçlendirme için kalınlıkları aynı, şekil ve ölçüleri farklı çelik plakalar kullanılmıştır. Ayrıca güçlendirmede kullanılan çelik plakalar farklı aralıklarla kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır. Yapılan deneylerde bütün elemanlarda ilk eğilme çatlağı moment kapasitesinin %17' si seviyelerinde oluşmaya başlamıştır. Ayrıca kesme çatlakları da göçme yükünün %40 ile %50'si seviyelerinde gelişmeye başlamıştır. Deneylerde elemanlar benzer deplasman yapmış olup akma rijitlikleri de birbirine çok yakın çıkmıştır. Testlerde güçlendirilen dokuz elemanın üçü eğilme göçmesine, geri kalanları ise kesme göçmesine uğramışlardır. Yapılan deneyler neticesinde güçlendirmede kullanılan çelik plaka tiplerinin tamamının kirişlerin kesme dayanımlarını, rijitliğini ve sünekliğini arttırdığı, güçlendirilen elemanların benzer davranış gösterdiği, çelik plakaların yapıştırılma şeklinin süneklik davranışını ve göçme

türünü etkileyen parametrelere direkt etki ettiği, kesme çatlaklarının açılmasına ve genişlemesine olumlu yönde katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Adhikary ve Mutsuyoshi (2006), kesme kapasitesi yetersiz kirişlere çelik levhalarda güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. 17 adet kirişte deney yapmışlardır. Çelik levhaların kirişlerin kesme dayanımlarını artırdığı sonucuna varmışlardır.

Cılız (2007), kesme kapasitesi yetersiz 6 adet tablalı kirişlere CFRP levha kullanarak güçlendirme çalışmaları yapmıştır. Beton dayanımının düşük olmasından ötürü güçlendirme elemanlarının kolay soyulmasına neden olmuştur. Bu yöntemde elemanlar sünek bir davranış göstermemiş ve iyi bir performans sergilememiştir.

Karahan (2008), 7 adet betonarme kirişe çelik levhalarla güçlendirme deneyi yapmıştır. Deneyde kirişlerin eğilme davranışlarını incelemiştir. Kiriş deneyleri iki noktalı tek düze yükler altında test edilmiştir. Bu çalışmada yan yüz çelik levha kullanımının güçlendirme üzerine etkileri de incelenmiştir.

Kantar (2009), Çarpma etkisinde CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin deneylerini yapmışlardır. Ayrıca ABAQUS programını kullanarak deneysel çalışması yapılan kirişleri bilgisayar ortamında simülasyonu yapmışlardır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmış bir sonlu eleman modeli oluşturulması için çalışmalar yapılmıştır. Genel olarak sonuçlarda maksimum değerlerinin birbirine yakın oldukları görülmüştür.

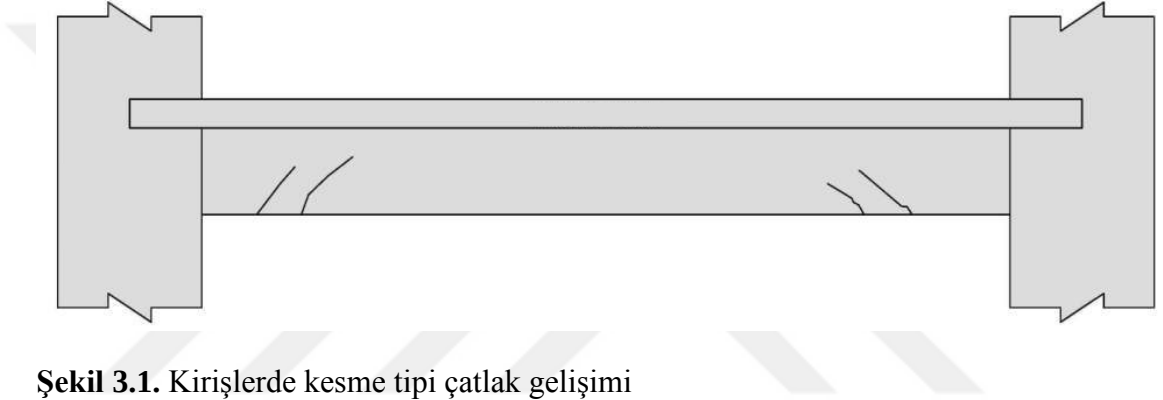
Yaman (2016), cam fiberlerle kesmeye karşı güçlendirme deneyleri yapılmış betonarme kirişlerin, ABAQUS programı kullanarak analitik modellemesini yapmışlardır. 5 adet T kesitli kiriş kullanılmıştır. Kiriş-1, Kiriş-3, Kiriş-4 ve Kiriş-5 için deney sonuçlarındaki yük-deplasman grafiklerine yakın sonuçlar elde edilirken Kiriş-2 için yük değerinin arttırılması ile deplasman değerlerinin deney sonuçlarına göre arttığı tespit edilmiştir.

Aryan (2014), deneyleri yapılmış polipropilen lif takviyeli betonarme kirişlerin, ABAQUS programı kullanarak analitik modellemesini yapmışlardır. Deneysel çalışmadaki sonuçlar ile analitik modellemedeki sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kirişlerin akma yükleri, maksimum deplasmanları, enerji yutma kapasitesi ve süneklik katsayıları yüzde olarak karşılaştırılmasına göre, genel olarak analitik modellemeden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların birbirine yakın oldukları görülmüştür.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi ve Davranışı

Betonarme kirişlerde enine kesme donatısının yeterli olmaması veya bulunmaması durumunda ani (gevrek) kesme kırılması görülür. Bu tür kırılma haberli olmadığı için istenmeyen bir davranıştır. Kesme kırılması oluştuktan sonra artık yapı elemanı sünek olan eğilme kapasitesine ulaşamaz. Kesme çatlakları eğik yöndedir ve genellikle 45° 'lik açıyla kiriş uç bölgelerinde oluşur. Enine donatıların temel işlevi, kirişin kesme etkisinde kırılması önleyerek eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Ayrıca bu enine donatılar kirişin göbek betonuna sargı etkisi yaparak beton davranışında iyileşme sağlamakta ve böylece kritik kesitlerde bulunan çekme donatısının akma olasılığını arttırmaktadır. Kesme kırılmasına maruz betonarme kat kirişlerinde örnek çatlak gelişimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Öztürk 2016).



Şekil 3.1. Kirişlerde kesme tipi çatlak gelişimi

3.2. Betonarme Elemanların Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi

Mühendislik yapılarının imalatından başlayarak kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği birçok tehdit bulunmaktadır. Bunlar; yanlış tasarım, yanlış imalat, deprem, rüzgâr vb. etkileri örnekleri verebiliriz. İnşaat mühendisinin en önemli sorumluluklarından bir tanesi depremlerde meydana gelebilecek can ve maddi kayıpları en aza indirmektir. Hasar görme olasılığı bulunan yapıları yıkarak tekrar inşa etmek yerine güçlendirme yoluna gitmek maddi ve zaman kayıplarını azaltmak açısından daha doğru bir seçenek olabilmektedir. Bu amaçla günümüzde güçlendirme çalışmaları oldukça önem kazanmış durumdadır (Kantar 2009).

Güçlendirme çalışmalarının yoğunlaştığı betonarme elemanlardan bir tanesi de kat kirişleri ve bu kirişlerde oluşabilecek kesme hasarıdır. Kesme kırılması beklenen betonarme kirişlerde gevrek kırılmayı önlemek için kirişin taşıma kapasitesini, sünekliğini, rijitliğini ve stabilitesini artırmak için güçlendirme çalışması yapılmaktadır. Bu amaçla düşünülen güçlendirme yöntemlerinden bir tanesi de kirişlerin gövdesine dışından çelik levhaların yapıştırılmasıdır. Bu tür güçlendirme son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır (Şekil 3.2). Çelik levhayla güçlendirmenin uygulamadaki kolaylığı ve ekonomik maliyetinin düşük olması, bu yöntemi kullanmaya iten etkenlerdir. Ancak bu yöntemin etkin olabilmesi için güçlendirme yapılacak elemanların davranışın çok iyi şekilde araştırılması gerekmektedir (Ersoy 2002).

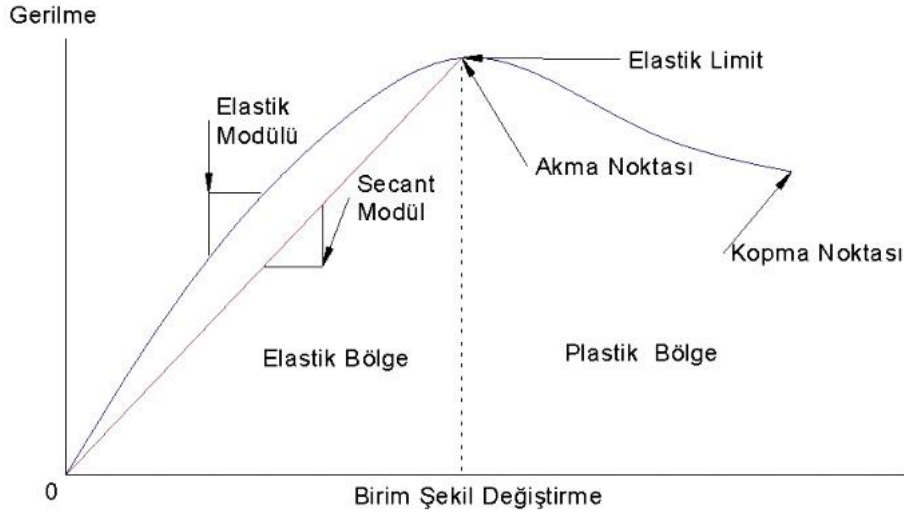


Şekil 3.2. Kirişlerde çelik levhalarla yapılan güçlendirme örneği

3.3. Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Davranış

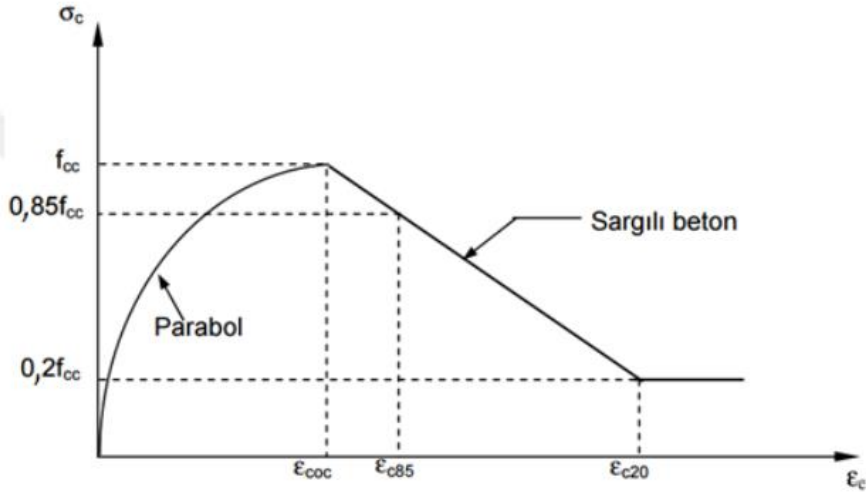
Betonarme yapıların tasarımında doğrusal olmayan davranışın yani nonlinearitenin kullanışı oldukça eskiye dayanmaktadır. Kullanılan malzemelerin daha iyi tanınması ve bununla beraber bilgisayar teknolojinin gelişerek daha düzgün ve kısa sürede çözümünün mümkün olması, doğrusal olmayan davranışın sonuçlarının daha gerçekçi bir şekilde elde edilmesine olanak sağlamıştır. Güncellenen her deprem yönetmeliğinde de bu davranışın daha çok kullanılmasını yaygınlaştırmaya çalışmaktadır.

Yapılar belirli yükler etkisinde şekil değişikliğine uğrarlar. Şekil değişikliği gelen yüklerin tamamen ortadan kalkmasından sonra ilk haline dönebileceği gibi, kalıcıda olabilir. İlk haline dönen duruma (elastik bölge) doğrusal davranış, kalıcı olan duruma (plastik bölge) ise doğrusal olmayan davranış denir. Şekil 3.3'te bazı yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı gösterilmiştir. Diyagram malzemenin tipine ve test hızına göre değişiklik gösterebilir.

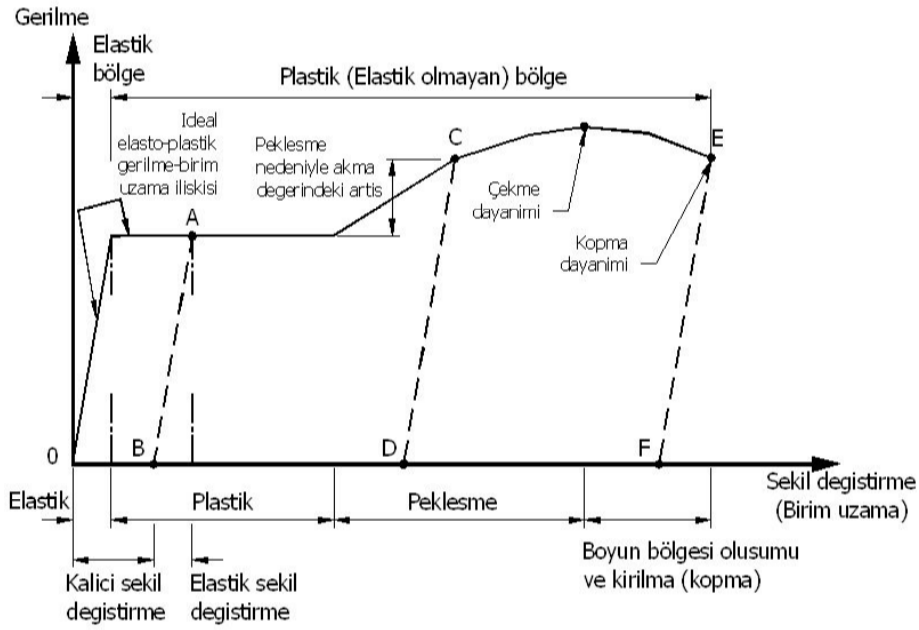


Şekil 3.3. Yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Beton malzemesi için kullanılabilecek gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için farklı malzeme modelleri önerilmiştir. Bunlar Mander beton modeli (Mander vd. 1988), Saatçioğlu-Razvi (Saatçioğlu ve Razvi, 1992) beton modeli kullanılabilecek modeller arasındadır. Şekil 3.4'te Saatçioğlu-Razvi beton modeli için gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ayrıca, Yapısal çeliğin gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.5'te verilmiştir.

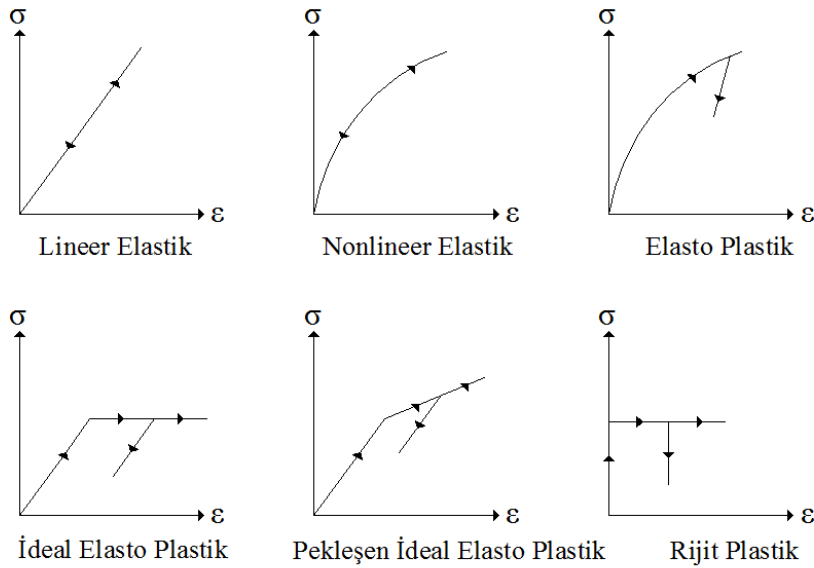


Şekil 3.4. Saatçioğlu-Razvi beton gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 3.5. Yapısal çeliğin gerilme-şekil değiştirme grafiği

Doğrusal olmayan davranış durumunda, ilk olarak malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olan kısmı (elastik bölge) kullanılır (Şekil 3.6). Analizin ilerleyen kısımlarında gerilme artışının az olmasına rağmen nispeten büyük şekil değiştirmelerin yaşandığı ikinci bölge (plastik bölge) kullanılarak analiz devam ettirilir. İkinci bölümde doğruluk olmadığı için hesaplamalar adım adım yapılır ve superpozisyon uygulanamaz. Elemanların kapasitesi sonuna kadar kullanıldığı için daha gerçekçi sonuçlar elde edilir ve daha ekonomik bir çözüm yapılmış olur.



Şekil 3.6. Yapı malzemeleri için gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafikleri

Yapılan deneylerin sonuçlarında gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir. Ancak deney çalışmalarının gerçekleştirilmesi uzun zaman aldığı ve zor olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sayısal yöntemlerle yapılan analiz denklemlerinin elle çözümü uzun zaman almaktadır. Günümüzde bu sayısal çözümlemeyi yapabilen birçok bilgisayar hazır programları geliştirilmiş olup elde edilen sonuçların gerçeğe oldukça uygun olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir. Maliyetinin düşük olması, daha kısa sürede analiz yapılması bu yöntemlerle çözüm yapılmasına imkân sağlamaktadır. Ancak, bu tip hazır programların yeni mühendislik uygulamaları üzerindeki geçerliliğinin araştırılmasına büyük fayda bulunmaktadır.

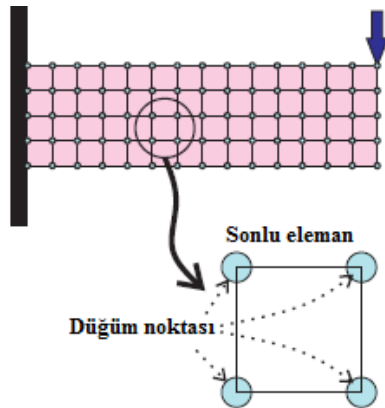
3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

3.4.1. Sonlu elemanlar yönteminin tanımı

Mühendislik ve birçok alanda karşılaşılan problemleri daha basite indirgeyerek çözümünü yardımcı olan yöntemlerden bir tanesi sonlu elemanlar yöntemidir. Karmaşık problemlerin çözümünü en kısa yoldan ve doğru sonuca en yakın olarak bu yöntem sayesinde daha kolayca yapılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi ilk kez 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizinin hesaplarını yapmak için geliştirilmiştir. Ardından gelen süreçte birçok dalda problemlerin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Bunlara örnek olarak ısı iletimi, uzay bilimleri, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar gibi bir sürü mühendislik dalı sayılabilir. Yöntemin bu kadar çok uygulama alanı bulmasının nedenlerinden birisi, değişik mühendislik problemlerinin arasındaki benzerliklerdir. Zamanla hızlı bir şekilde geliştirilen bu yöntem mühendislik alanında problem çözümü için en iyi seçenek halini almıştır.

3.4.2. Sonlu elemanlar yönteminin uygulaması

Sonlu elemanlar yönteminde yapı, daha önce davranışı belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Burada amaç karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme götürmektir. Bu yöntemde elemanlar, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Yani kısacası birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla bağlanmış parçaların çözümü kolay bir şekilde yapılabilecektir. Şekil 3.7’de örnek bir yapısal analizde sonlu elemanlar yönteminin alt elemanlarca uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

Maddeler halinde sonlu elemanlar yönteminin uygulanışını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Yapı küçük parçalara ayrılır (Düğüm noktaları içeren elemanlara),
- Her bir eleman için fiziksel büyüklüklerin davranışları tanımlanır,
- Elemanlar her bir düğüm noktasından bağlanılarak bütün yapı için yaklaşık bir denklem sistemi oluşturulur,
- Denklem çözümleriyle düğüm noktalarının bilinmeyen değerleri çözülür (Yer değiştirme),
- Seçilen elemanların değerleri hesaplanır (Gerilmeler).

3.4.3. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları ve dezavantajları

Sonlu elemanlar metodunun diğer yöntemlere göre bazı avantajları vardır. Avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesinde çözümünün yapılmasına olanak sağlar. Alt bölgelere bölünerek çözüm yapıldığı için daha hassas hesaplamalar yapılabilir,
- Malzeme özellikleri karışık olan örneğin anizotropi, nonlineer gibi sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir,
- Hesaplanan parçaların geometrisinde değiştirme, basitleştirme yapma ihtiyacı yoktur. Bu sayede istenilen eleman hesaplanabilir,
- Kurulan matematiksel denklemler genelleştirilebilir. Aynı modelle çok sayıda problem hızlı bir şekilde çözülebilir,
- Yöntemi mühendislik uygulamalarında kullanmak için birçok yazılımın mevcut olması (Fortran, ABAQUS, ANYSYS vs.),

Sonlu elemanlar metodunun diğer yöntemlere göre bazı dezavantajları vardır. Dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Elde edilen sonuçların doğru kabul edilmesi verilerin ve uygulanan yöntemin doğruluğuna bağlı olması,
- Hesap yapılacak parçanın mesh yani bölgenin haritasının çıkarılması düzgün yapılmalıdır,
- Elde edilen sonucun doğruluğu üzerinde dikkat edilmeli. Yaklaşık bir yöntem olduğu için sonuçlar test edilmeli ve yorumlanmalıdır,
- Yazılımların düzgün çalışabileceği yüksek kapasitelerde bir bilgisayara sahip olunmalıdır.

3.5. ABAQUS Analiz Programı

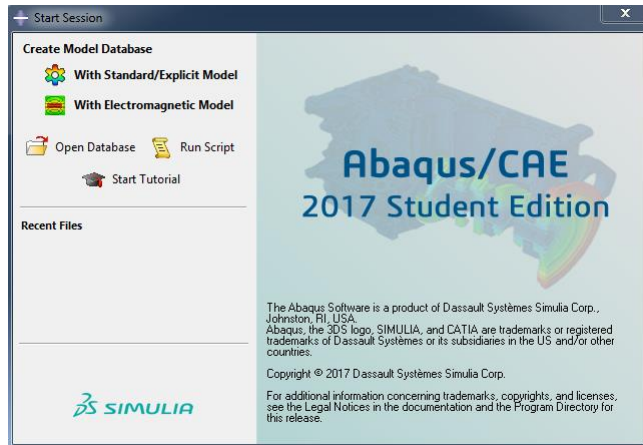
Sonlu elemanlar metodu sayısal çözüm yöntemlerinin en sık kullanılanlarından birisidir. Bu yöntemde hayali düğümler oluşturularak, düğümlerde kütle ve rijitlik matrisleri yardımıyla sistemin hareket denklemi, dolayısıyla deplasmanları ve gerilmeleri hesaplanmaktadır. Sayısal çözüm yöntemlerinde gerçek problem daha basite indirgenerek çözüm aranmaktadır. Yapılan bu basitleştirmelerden dolayı genelde kesin sonuçlar yerine yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar mantığına dayalı birçok hazır paket program mevcuttur. Tez çalışmasında deneysel sonuçların karşılaştırılması için ABAQUS paket programı kullanılmıştır.

ABAQUS, ilk sürümü 1978 yılında piyasaya çıkan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirebilen bir bilgisayar destekli mühendislik yazılımıdır. Havacılık, makine sanayi, yapı tasarımı, otomotiv gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Isı transferi, dinamik analizler, statik problemlerin çözümü gibi hemen hemen tüm mühendislik analizlerinde kullanılmaktadır. Kullanımının kolay olması ve özelleştirilebilir olması akademik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmesini sağlamıştır. ABAQUS dört ana bölümden oluşmaktadır.

- ABAQUS/CAE, tüm elemanların modellenmesi, analizinin yapılması ve sonuçların görüntülenebildiği bölümdür.
- ABAQUS/Standart, genel amaçlı implicit analiz yapılabilen bir bölümdür.
- ABAQUS/CFD, akışkanlar dinamiği için modelleme, analiz ve sonuçların görüntülenebildiği bir bölümdür.
- ABAQUS/Explicit, çarpışma, patlama gibi zamana bağlı doğrusal olmayan analizlerin yapıldığı bölümdür.

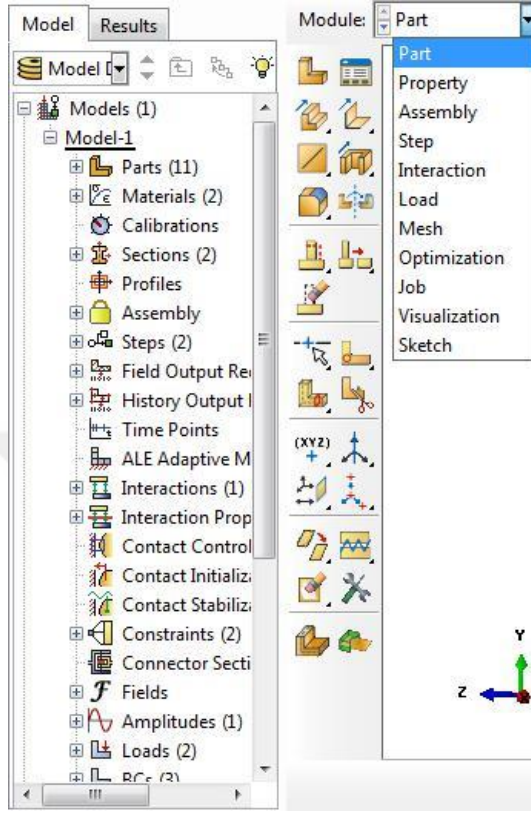
3.5.1. ABAQUS programının kullanımı

ABAQUS doğrusal olmayan problemleri çözebilen SEM analizi yazılımıdır. Analizler Intel Core i7 2.8 GHz işlemci, 8 GB fiziksel bellek kapasiteli bilgisayara ABAQUS paket programı kurularak yapılmıştır. Yapılan deneme analizleri sonucunda analiz tipi olarak Dynamic/Explicit seçilmiştir. Beton malzemenin plastik özellikleri programın içerisinde bulunan Concrete Damaged Plasticity (CDP) kullanılarak tanımlanmıştır. Programın ilk açılış görüntüsü Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. ABAQUS Programının açılış görüntüsü

Kiriş elemanlar Şekil 3.9’da gösterildiği gibi sırasıyla Part (kısım), Property (özellik), Assembly (montaj), Step (adım), Load (yük), Mesh (ağ) ve Job (işlem)’ sekmeleri kullanılarak oluşturulmuştur.

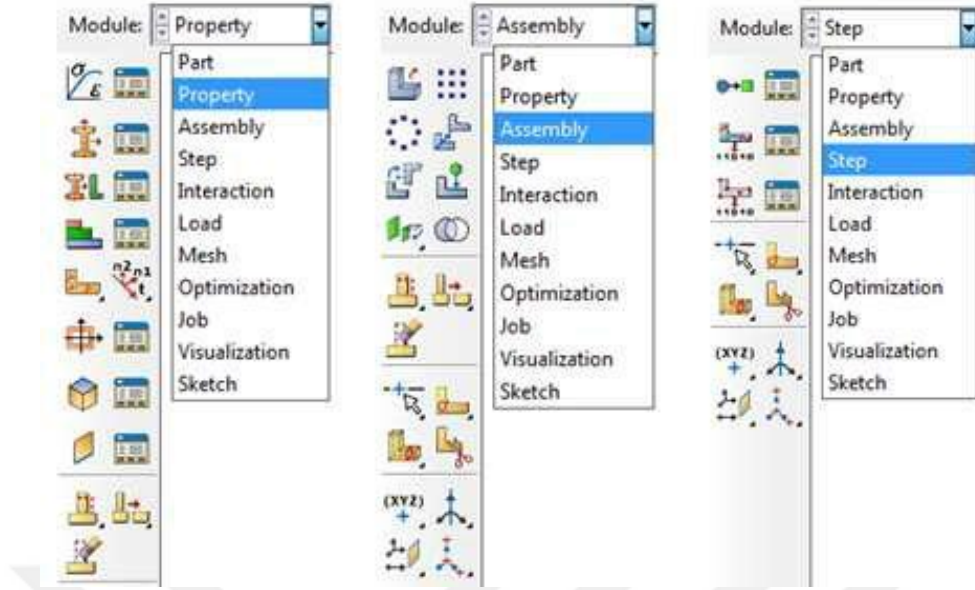


Şekil 3.9. Programda kullanılan sekmeler

“Part” sekmesi ve altındaki modüller yardımıyla kiriş elemanlar, donatılar, güçlendirme elemanları teker teker çizilip oluşturulmuştur. “Property” sekmesi yardımıyla kiriş elemanlar, donatılar, güçlendirme elemanlarının malzeme özellikleri girilmiştir. Beton ve çelik için gerilme şekil değiştirme bağıntıları ve hasar parametreleri tanımlanmıştır.

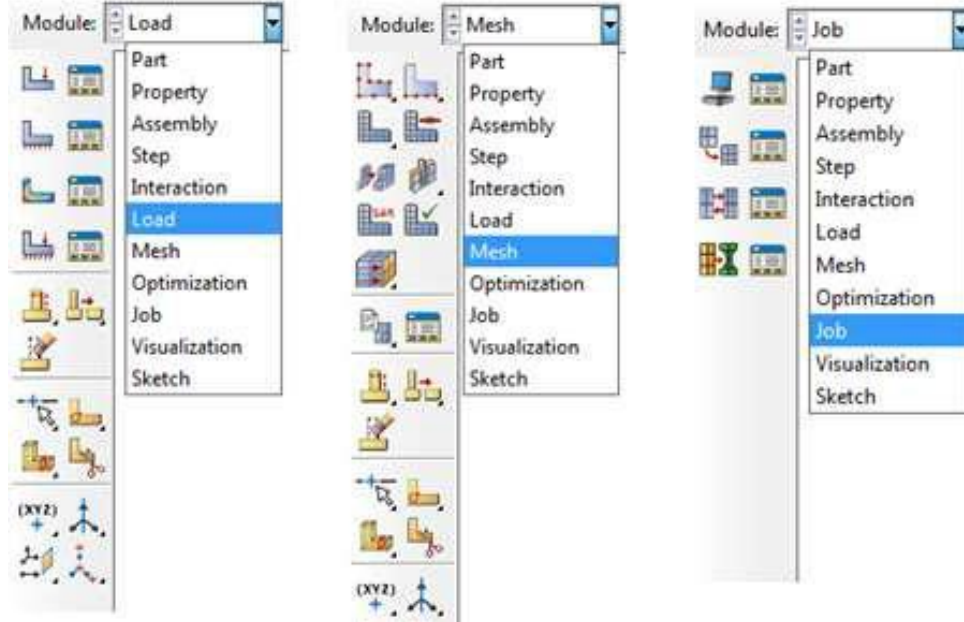
“Assembly” sekmesi yardımıyla “Part” sekmesinde oluşturulan kiriş elemanlar, donatılar, güçlendirme elemanları birleştirilip yeni bir tek part (kısım) haline dönüştürülmüştür. Tek part haline dönüştürerek çelik ile beton arasındaki etkileşim problemi ortadan kaldırılmıştır. Tek part’ın anlamı çelik ile beton arasındaki etkileşim malzeme özelliklerine göre o bölgede değişiklik göstererek ilgili bölgede malzeme beton ise betonun malzeme özelliklerini, çelik ise çeliğin malzeme özellikleri kullanılmaktadır. Bu sayede hem analiz süreleri kısaltılmış hem de analiz süresince programın verdiği etkileşim hataları ortadan kaldırılmıştır.

Step sekmesi yardımıyla “Assembly” ile tek part olan kiriş elemanın analiz tipi Dynamic/Explicit olarak seçilmiştir. Şekil 3.10’da “Property, Assembly ve Step” sekmesi ve bu sekmelerin alt modülleri gösterilmiştir.



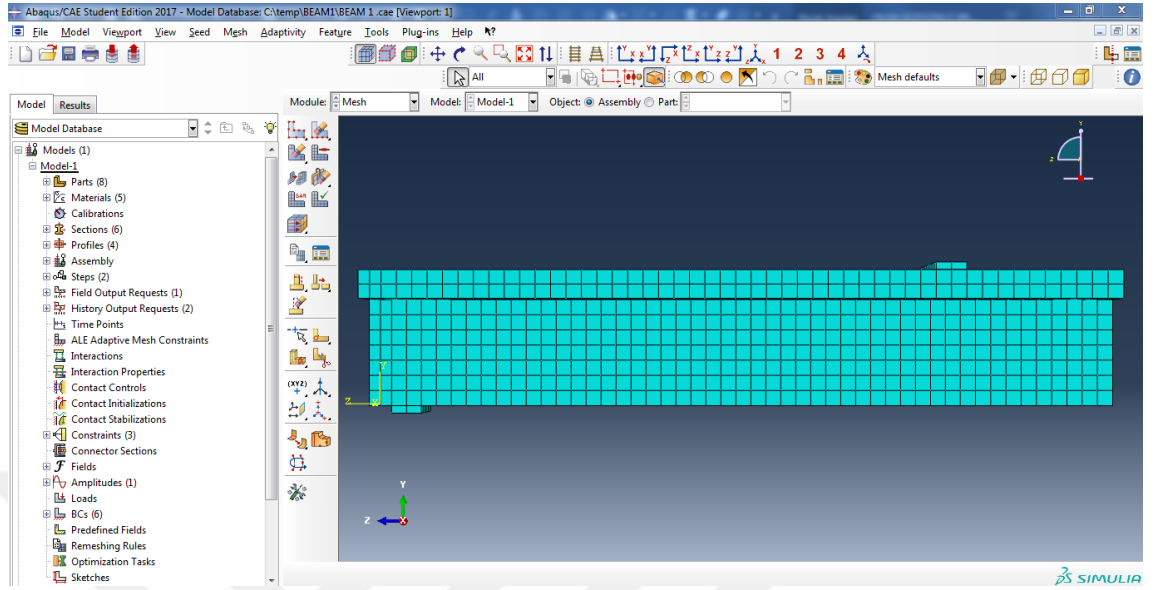
Şekil 3.10. Property, Assembly ve Step sekmesi ve alt modülleri

“Load” sekmesi ve altındaki modüller yardımıyla giriş elemanlarının üzerindeki yükleri tanımlanmış ve mesnetlenmesi yapılmıştır. Yükler ise deney esnasında her bir deneydeki zamana karşı yükleme kayıtları esas alınarak girilmiştir. “Mesh” sekmesi ve altındaki modüller yardımıyla giriş elemanların sonlu eleman ağları oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlara tutarlılıklarına bakılarak çokça mesh boyutu denenmiştir. “Job” sekmesi ve altındaki modüller yardımıyla giriş elemanların analizi yapılmıştır. Şekil 3.11’de sırasıyla “Load, Mesh ve Job” sekmesi ve bu sekmesi alt modülleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Load, Mesh ve Job sekmesi ve alt modülleri

Şekil 3.12’de yukarıda anlatılan sekmeler kullanılarak analize hazır hale getirilmiş örnek bir kiriş eleman gösterilmiştir.



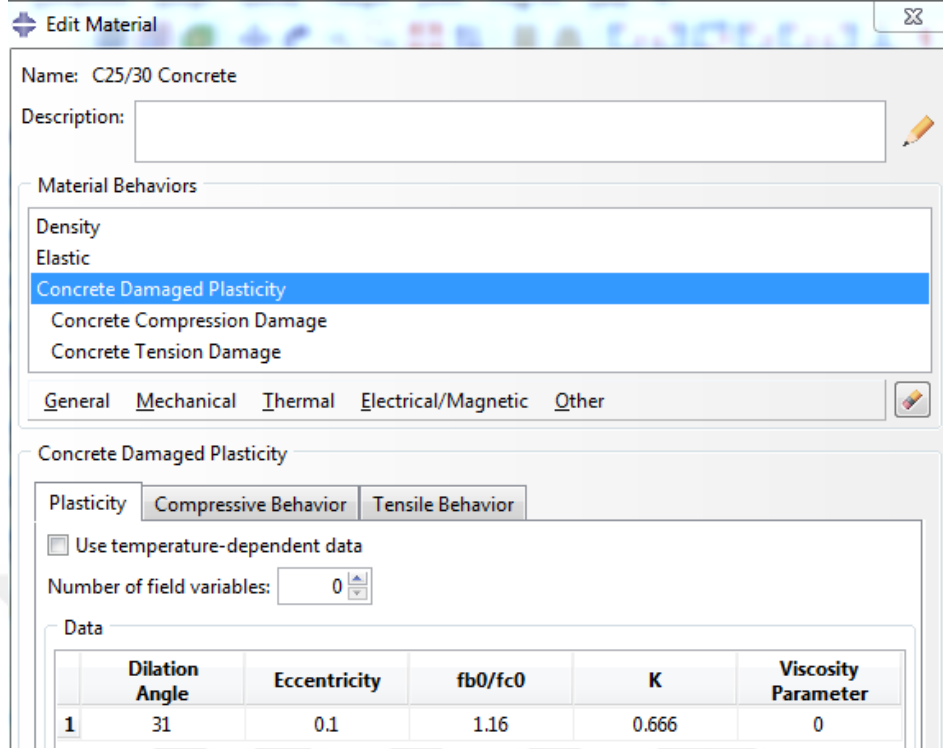
Şekil 3.12. Analize hazır hale getirilmiş örnek bir kiriş

3.5.2. Malzeme davranışı ve CDP (Concrete Damaged Plasticity) modeli

ABAQUS yazılımında betonun plastik davranışını tanımlayan özel bir malzeme modeli olarak CDP (Concrete Damaged Plasticity) bulunmaktadır (Hibbitt vd. 2014). Bu model betonun karmaşık davranışını temsil etmek üzere çekme ve basınç plastisitesi ile elastikiyet kavramlarını kullanır. Ayrıca bu model ABAQUS/Explicit analizlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Explicit analiz deneysel çalışmalara en çok yakınsaklık gösteren analiz tipidir. Bu tez çalışmasında da betonun çekme ve basınç davranışını modellemek için çokça kullanılan CDP model kullanılmıştır.

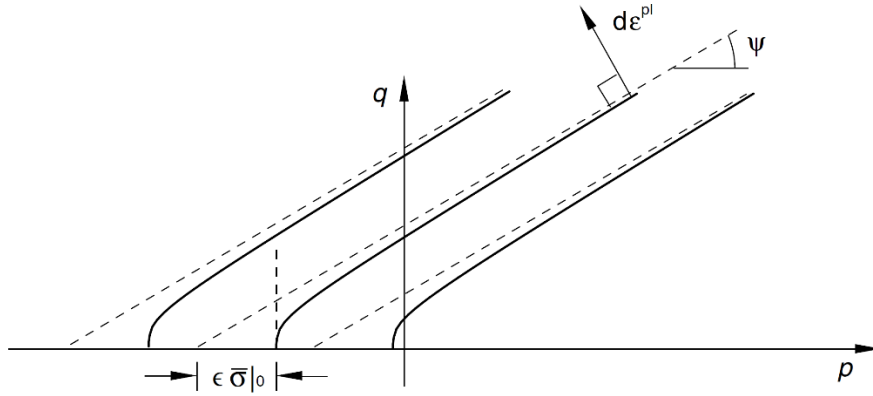
3.5.2.1. Beton

Betonda sıklıkla uygulanan dayanım hipotezlerinden birisi Drucker-Prager hipotezidir. ABAQUS içerisindeki CDP modeli ise Drucker-Prager hipotezinin geliştirilmiş halini kullanır. CDP modeli ile beton kırılması kırılma esnasındaki çatlaklar gözlenebilmektedir. Bu modelde, basınç bölgesindeki ezilmeyi ve çekme bölgesindeki kırılmayı modelleyebilmek için hasar parametresi olarak sayısal değişkenler kullanılmıştır. Bu değişkenler alt başlıklar halinde aşağıda açıklanmıştır. Şekil 3.13’te betonun mekanik özelliğinin girildiği modül gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Betonun mekanik özelliklerinin girilmesi

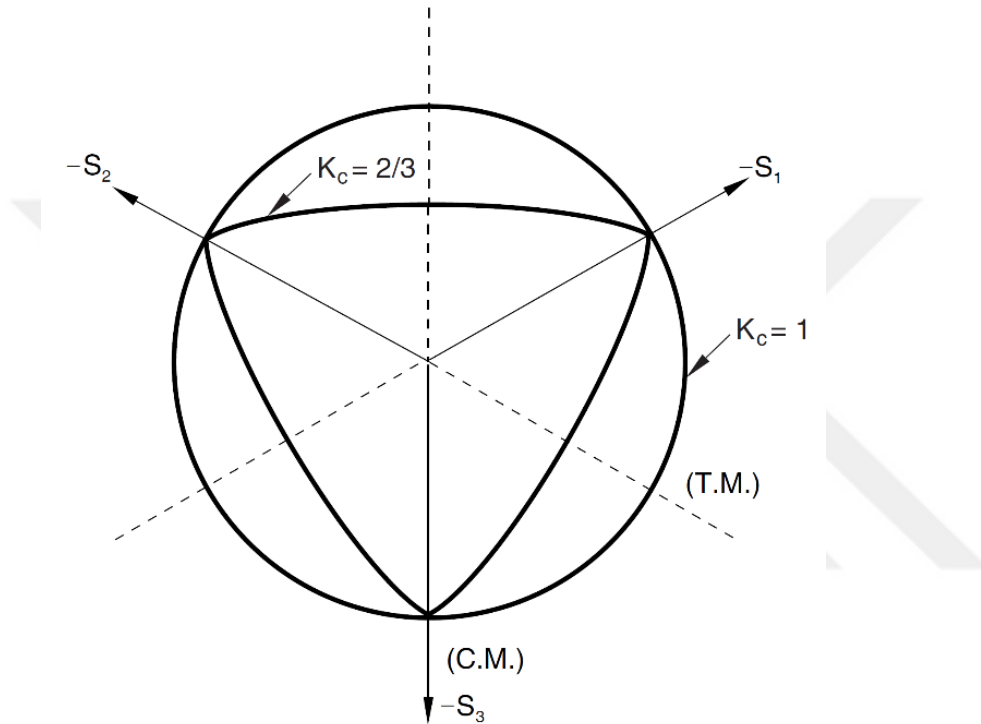
Genişleme açısı (ψ): Genişleme açısı (Dilation angle), yüksek yanal basınçlı p-q düzleminde ölçülen dilataston açısı olarak bilinmektedir. Şekil 3.14'te genişleme açısının gösterilmiştir.



Şekil 3.14. p-q düzleminde genişleme açısı

Eksantristlik (ϵ): Eksantristlik (Eccentricity) betonun çekme dayanımının basınç dayanımına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer deneylerde kullanılan ortalama 25 MPa beton dikkate alındığında 0.1 olarak kullanılmıştır. Bu oran betonun iki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımına oranı olarak da bilinmektedir.

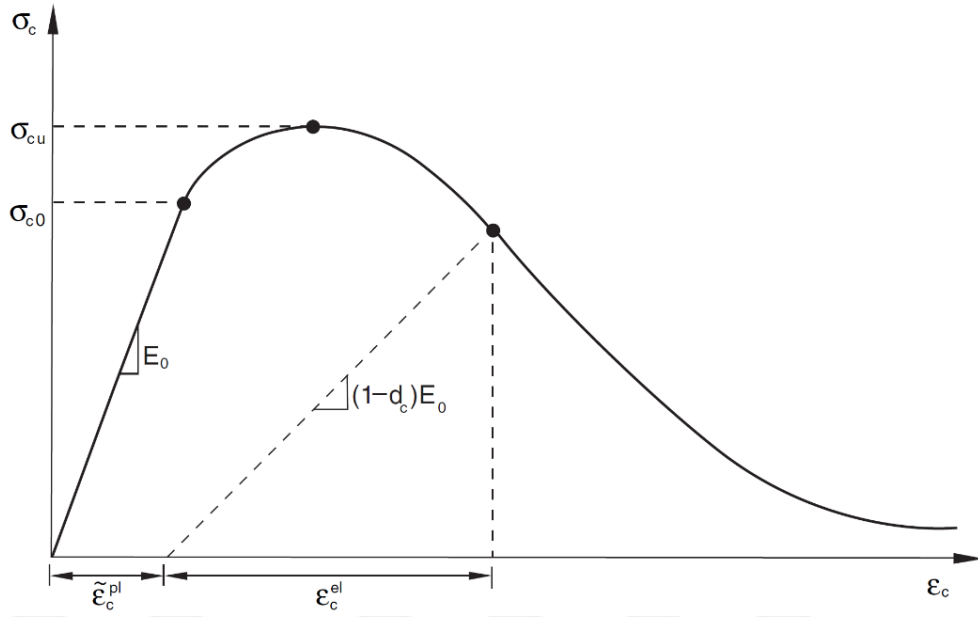
Meridyenler arası uzaklık oranı: CDP modeli Drucker-Prager hipotezinin düzenlenmiş halini kullandığı için bu düzenlemeye göre deviatorik en kesitteki kırılma yüzeyi çember olmak zorunda değildir. Bu düzenleme K_c parametresiyle yapılır. K_c ise deviatorik enine kesitte, hidrostatik aks ile basınç meridyeni arasındaki uzaklığın, hidrostatik aks ile çekme meridyeni arasındaki uzaklığa olan oranıdır. Bu oran her zaman 0.5'ten büyüktür. Bu oran 1 varsayılırsa, Drucker-Prager hipotezinde olduğu gibi kırılma yüzeyinin deviatorik en kesiti çember halini alır. Çalışmada bu değer 2/3 olacak şekilde kullanılmıştır. Şekil 3.15'te farklı değerlerine karşılık gelen deviatorik düzlemde yüzeyler gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Deviatorik düzlemde yüzeylerin görüntüsü

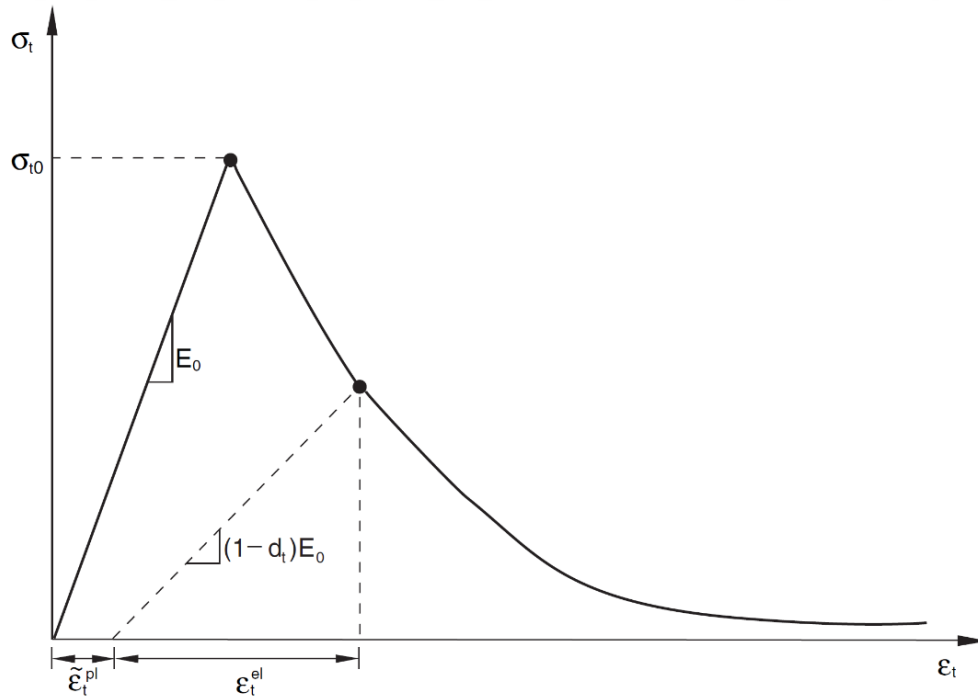
Viskozite parametresi: Viskozite parametresi ABAQUS standart analizlerindeki beton temel eşitliklerinin visko plastik düzenlemesinde kullanılır. ABAQUS/Explicit analizlerde bu parametre ihmal edilebilir ve bu değer çalışmada 0.0 olarak kullanılmıştır.

Betonun basınç davranışı için CDP modeli: Deneylerden elde edilmiş tek eksenli basınç gerilmesi-birim şekil değiştirme değerleri ABAQUS programının CDP malzeme özelliği kullanılarak plastik basınç şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülebilir (Şekil 3.16). Bu dönüşüm işlemiyle ilgili detay bilgi programın kullanıcı el kitabında mevcuttur (Hibbitt vd. 2014).



Şekil 3.16. Basınç etkisi altında CDP beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd. 2014).

Betonun çekme davranışı için CDP modeli: Deneylerden elde edilmiş tek eksenli çekme gerilme şekil değiştirme değerleri, ABAQUS programının CDP mekanik özellikleri kullanılarak plastik çekme şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülebilir (Hibbitt vd. 2014). Şekil 3.17’de bu dönüşüm gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Çekme etkisi altında CDP beton modelinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Hibbitt vd. 2014).

3.5.2.2. Donatı çeliğinin matematiksel modeli

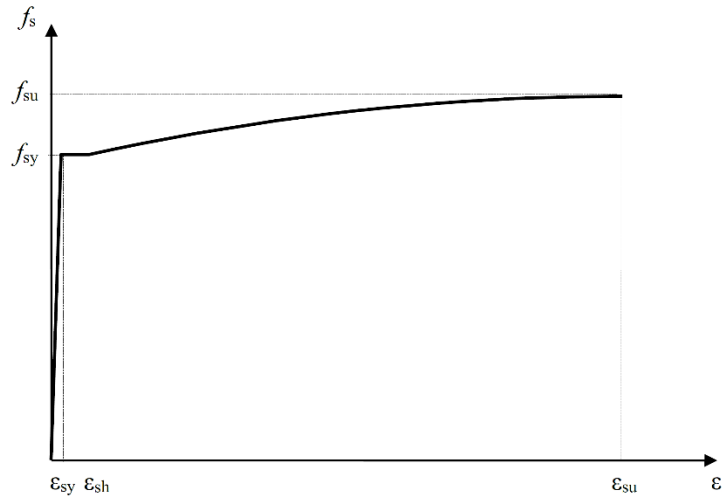
Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere donatı çeliği için elasto-plastik malzeme kabulü yapılmıştır. Doğrusal olmayan yöntemlerle şekil değiştirmeye göre değerlendirmede kullanılmak üzere, donatı çeliği için Denklem (3.1)'deki gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları TBDY2018'e uygun olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.18).

$$\begin{aligned}
 f_s &= E_s \varepsilon_s & (\varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}) \\
 f_s &= f_{sy} & (\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}) \\
 f_s &= f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} & (\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su})
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donatı çeliklerine ait diğer bilgiler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Donatı çeliklerine ait bilgiler

Kalite	f_{sy} (MPa)	ε_{sy}	ε_{sh}	ε_{su}	f_{su} / f_{sy}
S220	220	0.0011	0.011	0.12	1.20
S420	420	0.0021	0.008	0.08	1.15 – 1.35
B420C	420	0.0021	0.008	0.08	1.15 – 1.35
B500C	500	0.0025	0.008	0.08	1.15 – 1.35

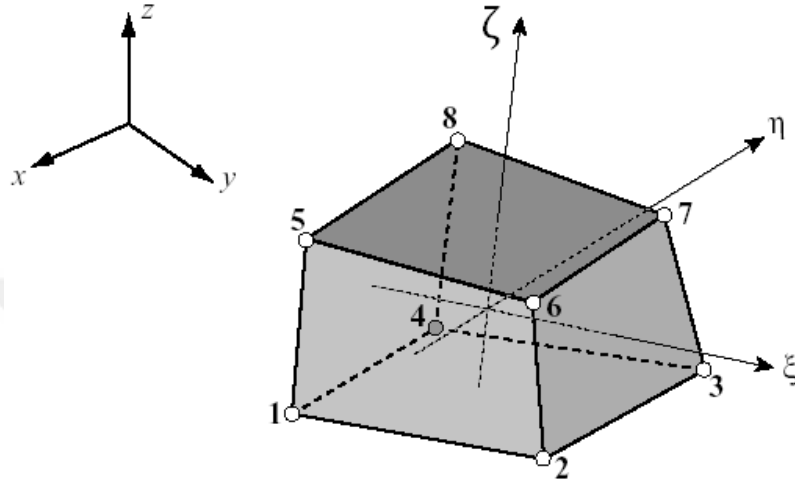


Şekil 3.18. TBDY2018'de donatı çeliğin gerilme - birim şekil değiştirme ilişkisi

Çalışma kapsamında üç farklı çaplı donatı çeliği ile çalışılmıştır. Öncelikle her çaptaki donatının akma dayanımı, kopma dayanımı ve elastisite modülleri referans deneysel çalışmadan alınarak Denklem (3.1) yardımıyla Şekil 3.18'deki grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde donatı çeliğine ait plastik malzeme değerleri ABAQUS programına “Mechanical / Plasticity / Plastic” adımları kullanılarak tanımlanmıştır. Bu modelde bir malzemenin plastik davranışı, akma noktası ve sonrası ile tanımlanmaktadır.

3.5.3. Kullanılan eleman tipi (C3D8R)

Yapılan sonlu eleman analizlerinde üç boyutlu (C3), sekiz noktalı (D8), indirgenmiş (R), sekiz köşeli ve altı yüzeyli (Hexahedron) eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipi, yerel konumları 1-8 olan sekiz köşe düğümünden ve yerel konumları 1-6 olan altı yan yüzeyden oluşmaktadır. Şekil 3.19’da kullanılan eleman tipinin yerel konumları gösterilmiştir.



Şekil 3.19. 8-noktalı hexahedral eleman (C3D8R)

4. BULGULAR

4.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında deneysel çalışması literatürde yer alan T kesitli betonarme kirişlerin analitik olarak incelenmiştir. Deneyde yan yüzeylerine kesme açıklığı boyunca epoxy kullanılarak yapıştırılan çelik levhaların, kirişlerin kesme dayanımına, rijitliğine ve göçme biçimine etkileri araştırılmıştır (Altın vd. 2005).

Betonarme kirişler ABAQUS (Student Edition) sonlu eleman programı ile modellenmiştir. ABAQUS programının 2017 öğrenci sürümü kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metoduyla T kirişlerin doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. ABAQUS hazır programının seçilme nedeni, programda kullanılan sonlu eleman tipleri ve malzeme modellerinin gerçek betonarme eleman davranışına olan uygunluğudur. Bu konuda oldukça başarılı sonuçlar alındığını gösteren çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Programın edinilen sürümünde sınırlı sayıda sonlu eleman kullanımı söz konusudur. Bu nedenle literatürde deneysel çalışmada verilen toplam 11 adet durumun ancak 7 tanesi analitik olarak incelenebilmiştir. Gerek bu nedenle gerekse doğrusal olmayan analiz süresini azaltmak amacıyla tam ortasından simetrik olan kirişlerin yarısı modellemede dikkate alınmıştır. Bu amaçla, kiriş ortasında bulunan simetri özelliğini sağlayacak nitelikteki sınır şartları, analitik modele yansıtılmıştır. Laboratuvar deneylerine göre verilen grafiklere ile doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bilgisayar modellerinin analiz sonuçlarının, T kirişlerin deney sonucunda elde edilen değerlere yaklaşık olarak benzer nitelikte olduklarını göstermek amaçlanmıştır.

4.2. Deney Elemanlarının Tanıtılması

Deneysel çalışmanın, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarlarında yapıldığı anlaşılmaktadır. Yapılan deneylerde, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere dışarıdan farklı çelik levhaların yapıştırılarak güçlendirmedeki etkisi incelenmiştir. Deneyde yapıştırılan çelik levhaların şekilleri, kirişe yapışma alanları ve levha aralıkları gibi birçok değişik parametre bulunmaktadır (Altın vd. 2005).

Epoxy uygulamasından önce laboratuvarın sıcaklık ve nemi, elemanın yüzey sıcaklığı ve nemi ölçülerek yoğuşma noktası belirlenmiştir. Yoğuşma değerinin ISO 8502-4 şartnamesinde belirtilen sınırlar içinde kalması halinde yapıştırma işlemine başlanmıştır. Kiriş yan yüzeylerine ve çelik levhalara 1.5 mm kalınlığında epoxy sürülmüştür. Hazırlanan levhalar kirişlerin kesme açıklığı boyunca yan yüzeylerine kontrollü bir şekilde yapıştırılmıştır. Yapışmanın tüm yüzeylerde tam olarak gerçekleşmesi için özen gösterilmiştir. Yapıştırma işleminden sonra tüm deney elemanları epoxy kürünün tamamlanması için 15 gün süreyle bekletilmiştir. Kürü tamamlanan elemanlar test edilmiştir (Altın vd. 2005).

Kesmeye karşı çelik levhalarla güçlendirilen kirişlerin davranışları ve göçme mekanizmaları gözlenmiştir. Çelik levhaların türlerinin ve kiriş üzerinde kullanımının kirişin davranışına, dayanımına ve sünekliğine etkileri incelenmiştir.

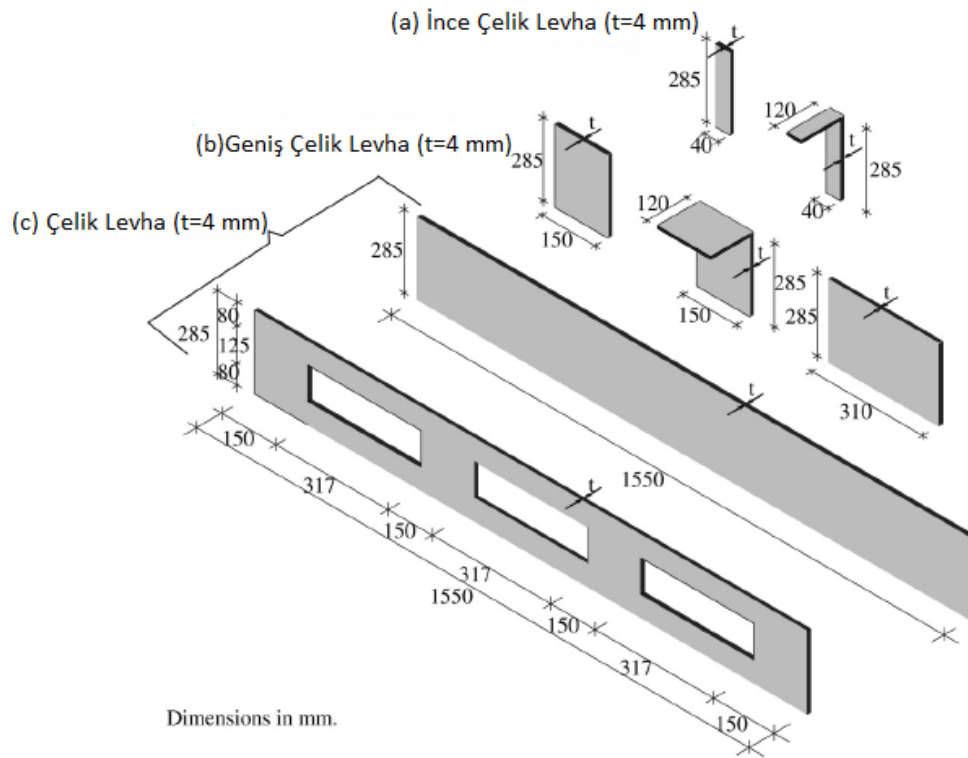
Deney programında toplam 11 adet betonarme T kesitli kiriş elemanı test edilmiştir. T kesitli tablalı betonarme kirişlerin uzunluğu 4000 mm'dir. Kirişlerin tabla genişliği 360 mm, gövde genişliği 120 mm, tabla derinliği 75 mm, kiriş yüksekliği 360 mm'dir. Kullanılan beton ve etriye özellikleri Çizelge 4.1'de, güçlendirmede kullanılan çelik levhaların tipleri Çizelge 4.2'de, çeliklerin özellikleri de Çizelge 4.3'te verilmiştir. Deney elemanlarının donatı şemaları ve ölçüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Tüm deney kirişlerinde mesnetler arası 3800 mm olup hepsinin kesit geometrisi ve boyuna donatılar aynı seçilmiştir. Etriyeler 6 mm çapında donatılardan seçilmiştir. 1 numaralı kirişte etriyeler daha sık, kiriş boyunca 75 mm arayla kullanılmıştır. Diğer 10 kirişte ise daha seyrek olan etriyeler 300 mm arayla kullanılmıştır (Altın vd. 2005).

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının beton ve etriye özellikleri (Altın vd. 2005)

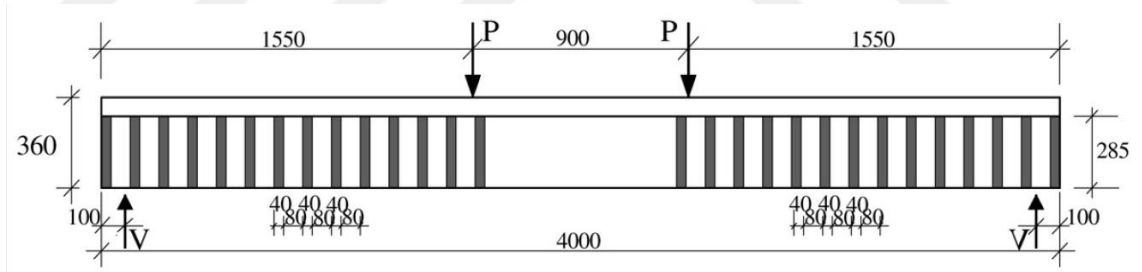
Deney Elemanı No	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Enine Donatı Oranı	Enine Donatı Çap/Aralık
Kiriş-1	25.8	0.00224	Ø6/75
Kiriş-2	27.0	0.00056	Ø6/300
Kiriş-3	27.6	0.00056	Ø6/300
Kiriş-4	27.3	0.00056	Ø6/300
Kiriş-5	26.5	0.00056	Ø6/300
Kiriş-6	26.5	0.00056	Ø6/300
Kiriş-7	25.8	0.00056	Ø6/300
Kiriş-8	25.6	0.00056	Ø6/300
Kiriş-9	26.7	0.00056	Ø6/300
Kiriş-10	26.0	0.00056	Ø6/300
Kiriş-11	26.4	0.00056	Ø6/300

Çizelge 4.2. Deney elemanlarında kullanılan çelik levhalar (Altın vd. 2005)

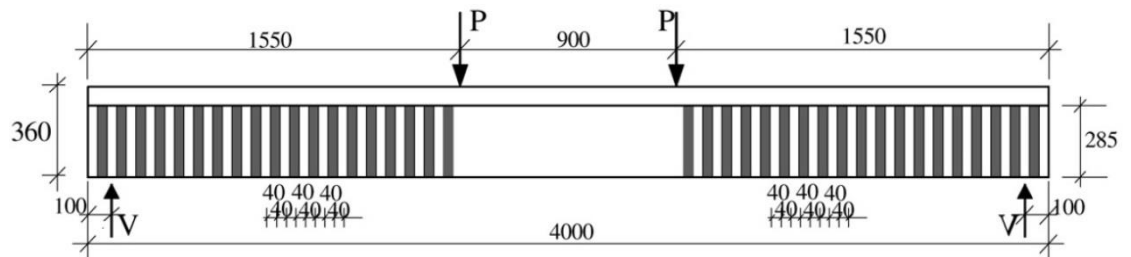
Deney Elemanı No	Çelik Levha Ölçüleri	Çelik Levha Tipleri	Çelik Levha Aralıkları
Kiriş-1	-	-	-
Kiriş-2	-	-	-
Kiriş-3	40×285×40	İnce Çelik Levha (a)	80
Kiriş-4	40×405×40	İnce L Çelik Levha (a)	80
Kiriş-5	40×285×40	İnce Çelik Levha (a)	40
Kiriş-6	150×285×40	Geniş Çelik Plaka (b)	150
Kiriş-7	150×405×40	Geniş L Çelik Levha (b)	150
Kiriş-8	150×285×40	Geniş Çelik Levha (b)	75
Kiriş-9	1550×285×40	Çelik Levha (c)	-
Kiriş-10	310×285×40	Geniş Çelik Levha (b)	-
Kiriş-11	1550x285x40	Boşluklu Çelik Levha (c)	-



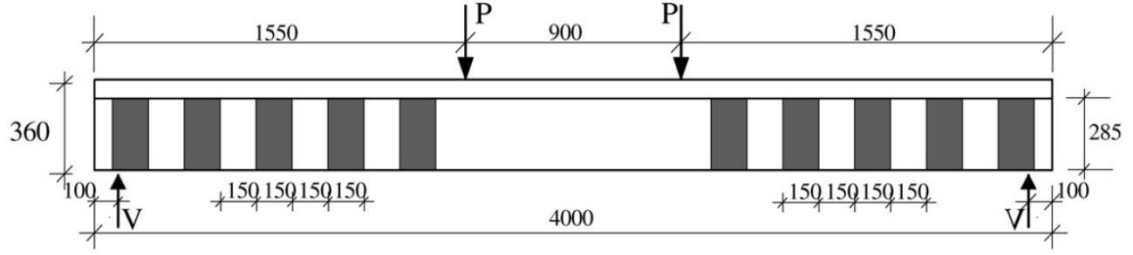
Şekil 4.2. Çelik levhalar (Altın vd. 2005)



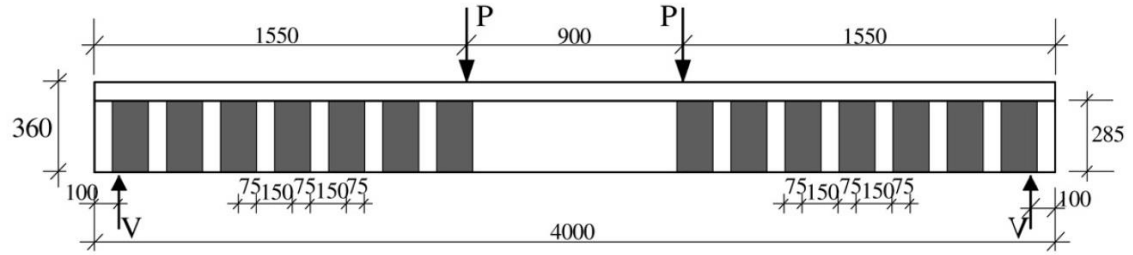
Şekil 4.3. Güçlendirme durumu: Kiriş-3, Kiriş-4 (Altın vd. 2005)



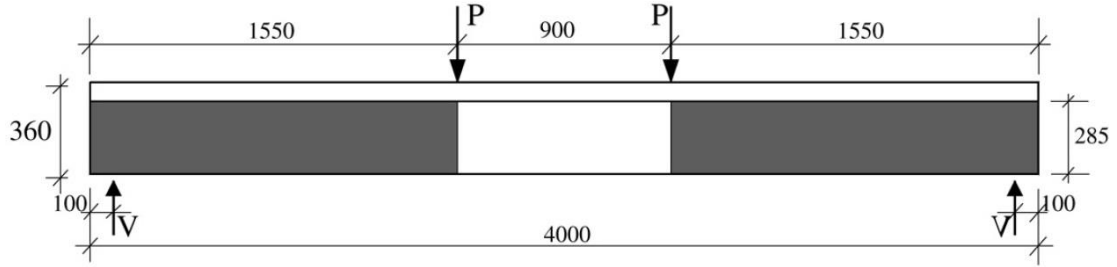
Şekil 4.4. Güçlendirme durumu: Kiriş-5 (Altın vd. 2005)



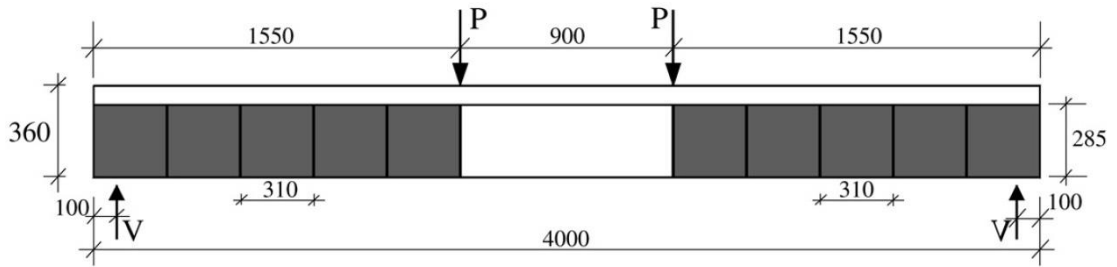
Şekil 4.5. Güçlendirme durumu: Kiriş-6, Kiriş-7 (Altın vd. 2005)



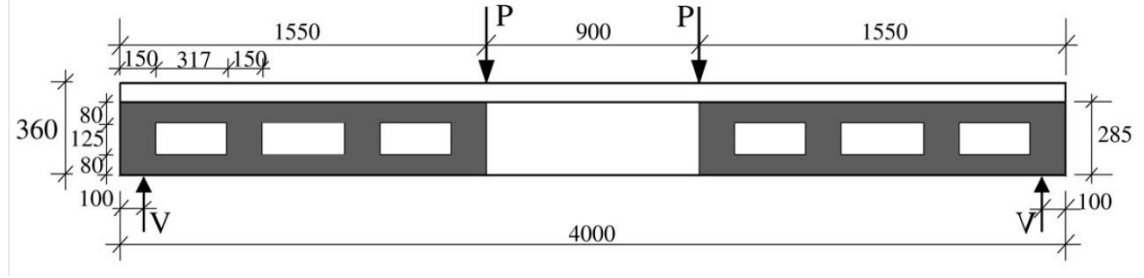
Şekil 4.6. Güçlendirme durumu: Kiriş-8 (Altın vd. 2005)



Şekil 4.7. Güçlendirme durumu: Kiriş-9 (Altın vd. 2005)

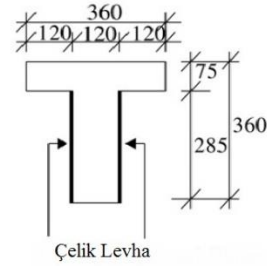


Şekil 4.8. Güçlendirme durumu: Kiriş-10 (Altın vd. 2005)

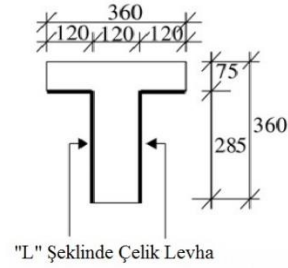


Şekil 4.9. Güçlendirme durumu: Kiriş-11 (Altın vd. 2005)

Yandan görünüş Kiriş 3, 5, 6, 8, 9, 10 ve 11

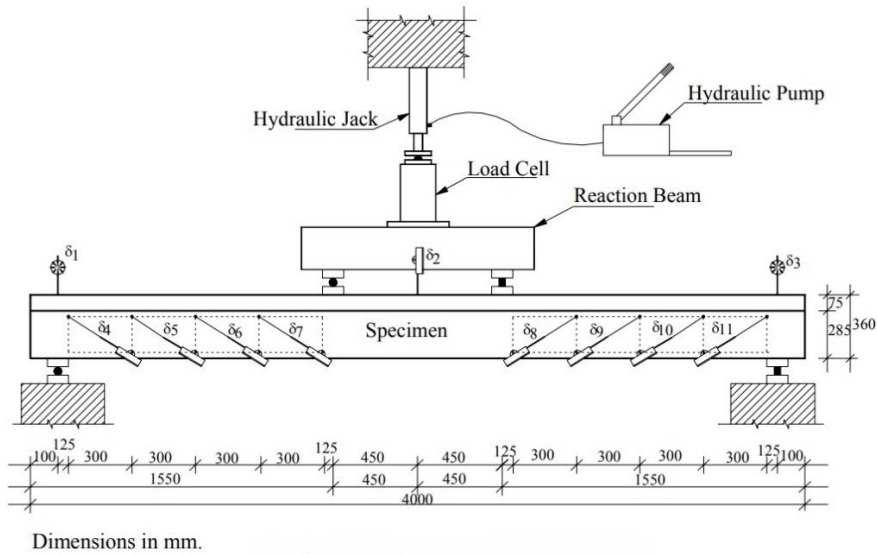


Yandan görünüş Kiriş 4 ve 7



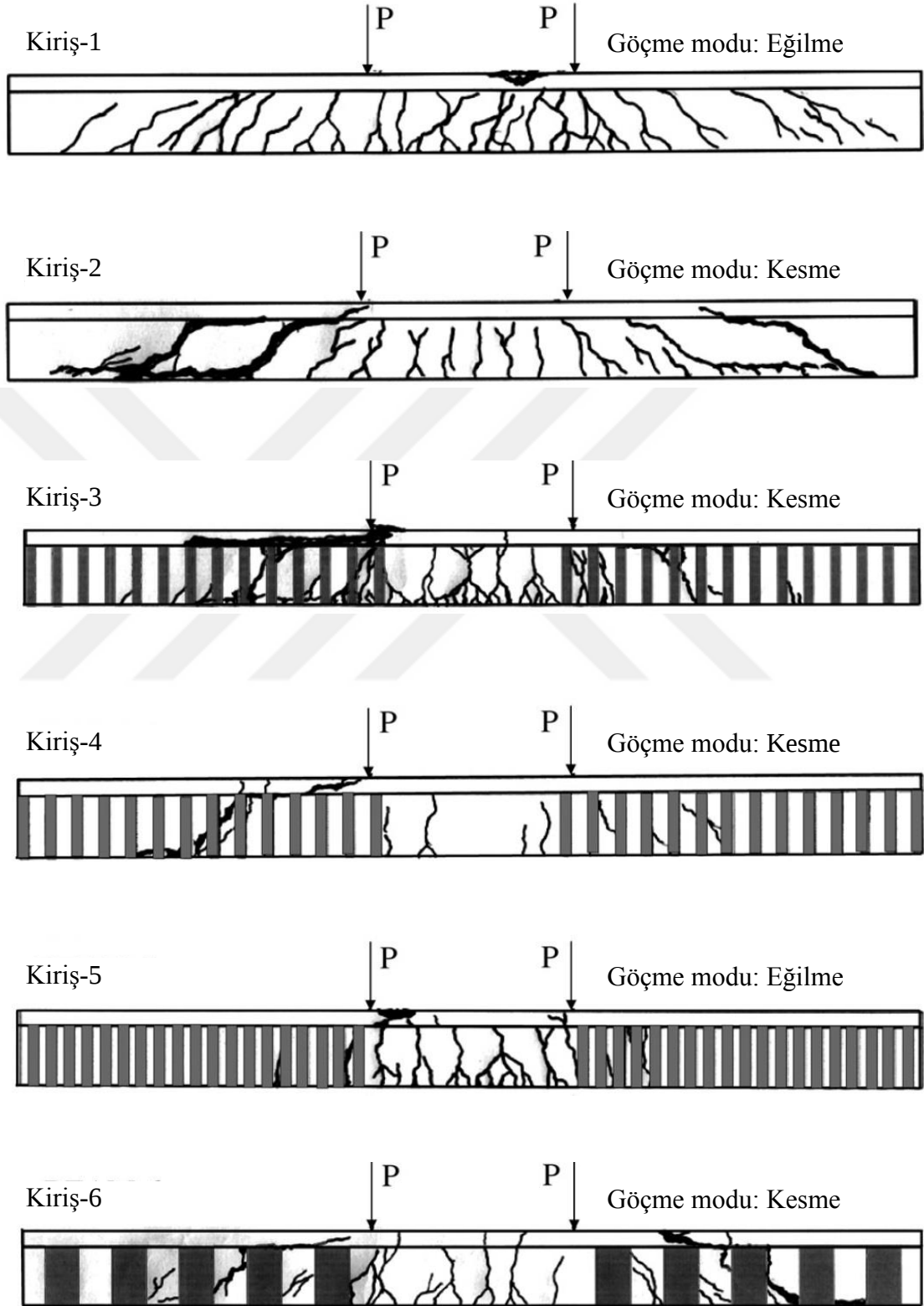
Şekil 4.10. Kirişlerin kesit görünüşü (Altın vd. 2005)

Deney düzeneği ve ölçüm aletlerinin şematik görünüşü Şekil 4.11’de verilmiştir (Altın vd. 2005). Kirişler dört nokta yükleme şartları altında test edilmiştir. Deney kirişinin orta noktasına uygulanan yük deney elemanlarına eşit iki tekil yük halinde etkimektedir. Deney elemanları göçmeye kadar tek düze yükler altında test edilmiştir. Yükleme 600 kN basınç kapasiteli bir hidrolik krika ile yapılp, 300 kN kapasiteli bir yük ölçer ile kontrol edilmiştir. Deney elemanları orta noktasının deplasmanı kiriş üzerine yerleştirilen üç adet LVDT’den (Linear Variable Displacement Transducer) alınan ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır.

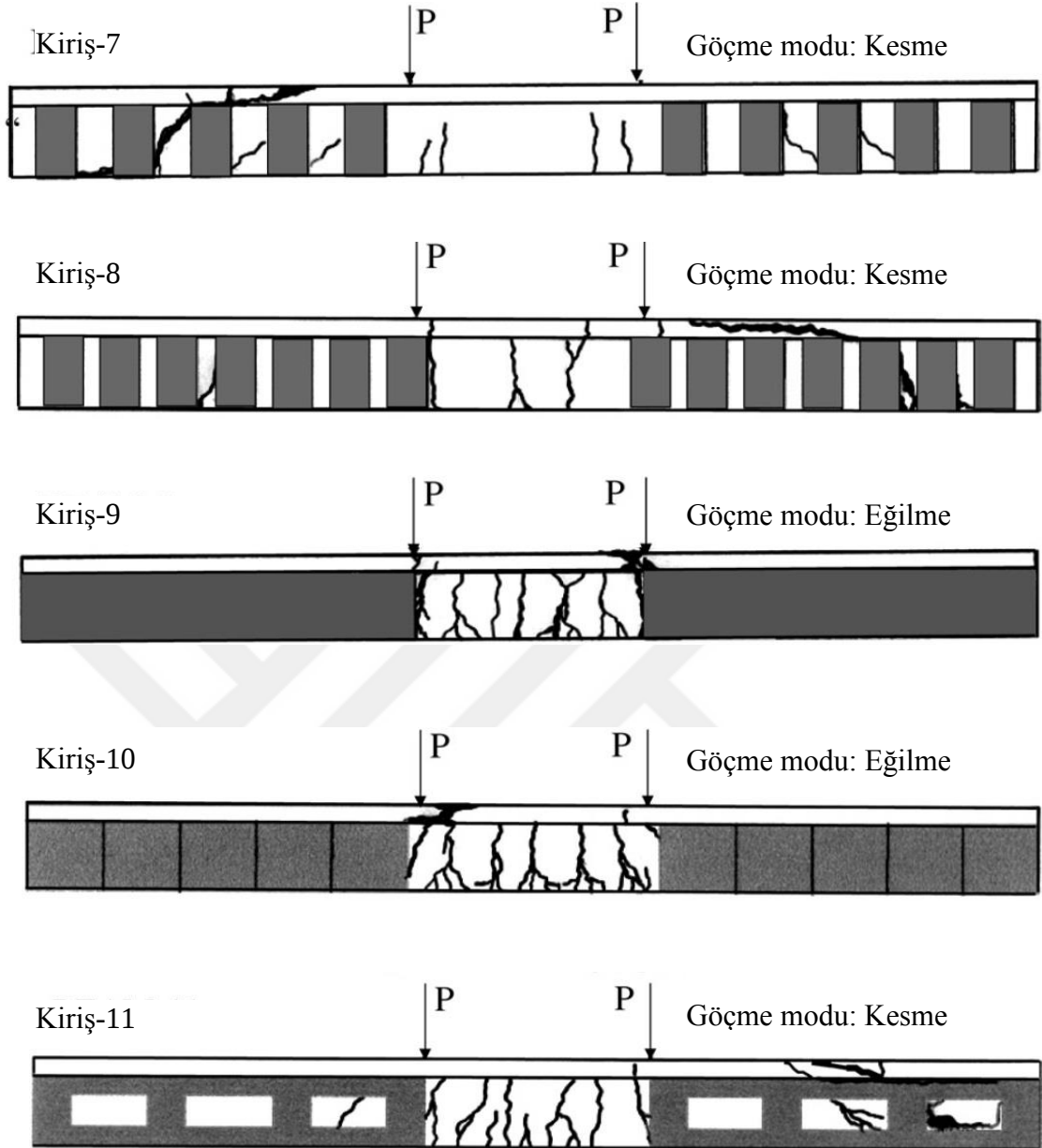


Şekil 4.11. Deney ve ölçüm düzeneği (Altın vd. 2005)

Deneyisel çalışma sonucunda elde edilen kirişlerdeki çatlak gelişiminin ve göçme durumunun Şekil 4.12.a-b'deki gibi olduğu anlaşılmaktadır (Altın vd. 2005).



Şekil 4.12.a) Kiriş 1-6 deney sonucu (Altın vd. 2005)



Şekil 4.12.b) Kiriş 7-11 deney sonucu (Altın vd. 2005)

4.3. Analitik Çalışma

Deney sonuçları mevcut olan kirişlere ait bilgiler Bölüm 4.2’de verilmiştir. Bu kirişler bilgisayar ortamında ABAQUS programı kullanılarak modellenmiştir. Tez çalışmasında ABAQUS 2017 öğrenci sürümü kullanılmıştır. Deney elemanlarının ölçüleri ve özellikleri ABAQUS programında tanımlanırken SI (mm) birim sistemi kullanılmıştır. Programın kendine özgü birim sistemi Şekil 4.13’te gösterilmektedir (Abaqus Tutorials 2019; Simulia Abaqus 2014).

Büyüklik	SI	SI (mm)	US Birim (inch)
Uzunluk	m	mm	in
Kuvvet	N	N	lbf
Kütle	kg	tonne (10^3 kg)	lbf s ² /in
Zaman	s	s	s
Gerilme	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	psi (lbf/in ²)
Enerji	J	mJ (10^{-3} J)	in lbf
Yoğunluk	kg/m ³	tonne/mm ³	lbf s ² /in ⁴

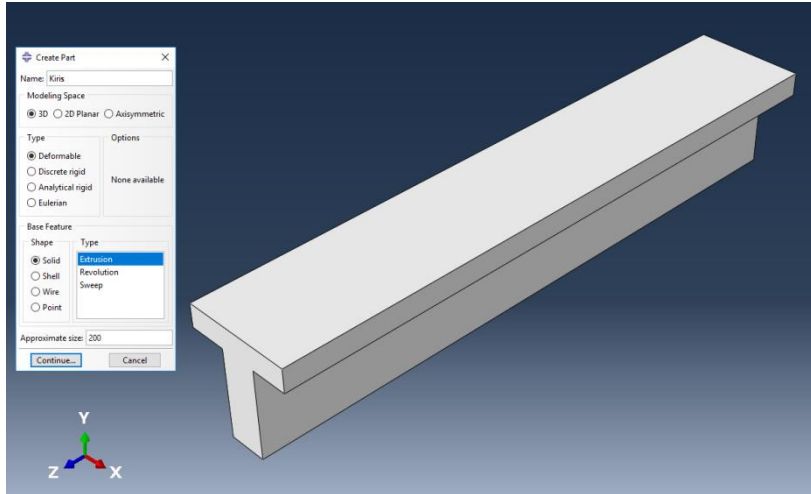
Şekil 4.13. ABAQUS programında kullanılan birimler

Deneyi yapılan kiriş elemanlarının ABAQUS programında analizini yapabilmek için gereken işlem adımlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Modelleneyecek elemanın her bir parçasının geometrik çizimleri yapılır.
- Kullanılan malzeme özelliklerinin tanımlanması yapılır.
- Oluşturulan her bir parça birleştirilerek ana eleman elde edilir.
- Yapılacak analizin tipi ve adımları oluşturulur.
- Tanımlanan elemanın sınır şartları belirlenir.
- Deneyde kullanılan yükler elemana tanımlanır.
- Model için sonlu eleman ağı (mesh) oluşturulur.
- Analiz yapılır ve analiz sonuçları değerlendirilir.

4.3.1. Geometrilerin oluşturulması

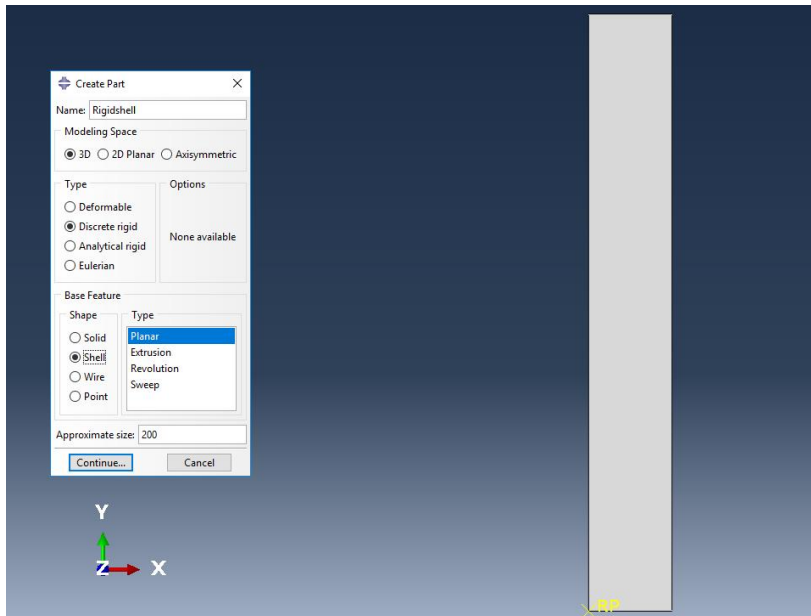
Öncelikle modelleneyecek betonarme kirişin her bir parçasının geometrik çizimlerinin yapılması gerekir. Bu parçalar beton kiriş, donatılar, çelik levhalar ve destek plaka elemanlarıdır. Deneyi yapılan kiriş elemanları simetrik yapıdadır. Simetriden faydalanılarak 4 metre olan kirişlerin yarısı programda tanımlanmıştır. Bu sayede analiz sonuçlarının daha hızlı elde edilmesi amaçlanmıştır. Beton kiriş ve destek plakaları “solid (katı cisim)”, çelik levhalar “rigid shell (rijit kabuk)” ve donatılar “wire (kablo)” eleman olarak tanımlanmıştır. Geometrik çizimlerin yapıldığı bölüm Şekil 4.14-16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.14. ABAQUS beton kiriş geometrisi



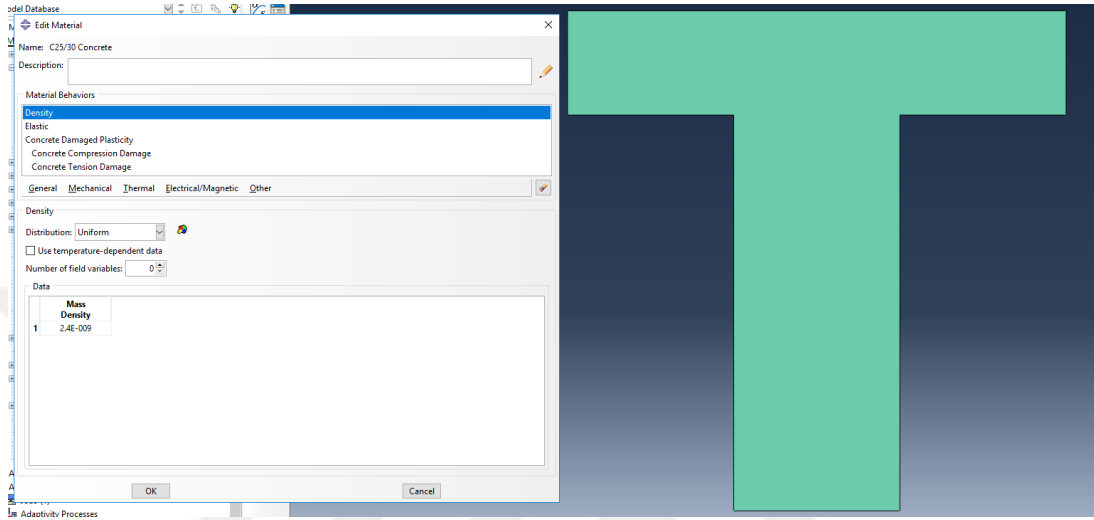
Şekil 4.15. ABAQUS donatı geometrisi



Şekil 4.16. ABAQUS çelik levha geometrisi

4.3.2. Malzeme özelliklerinin tanıtılması

Eleman geometrisinin oluşturulmasından sonra bu elemanların malzeme özelliklerinin tanımlanması yapılır. Kiriş için beton, donatılar için çelik malzemesinin özellikleri tanımlanır (Şekil 4.17). Betonun özellikleri deney çalışmasında Çizelge 4.1’de, çelik özellikleri ise Çizelge 4.3’te verilmiştir. Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra her bir parçaya “Assign Section” komutuyla atama işlemi yapılmaktadır.



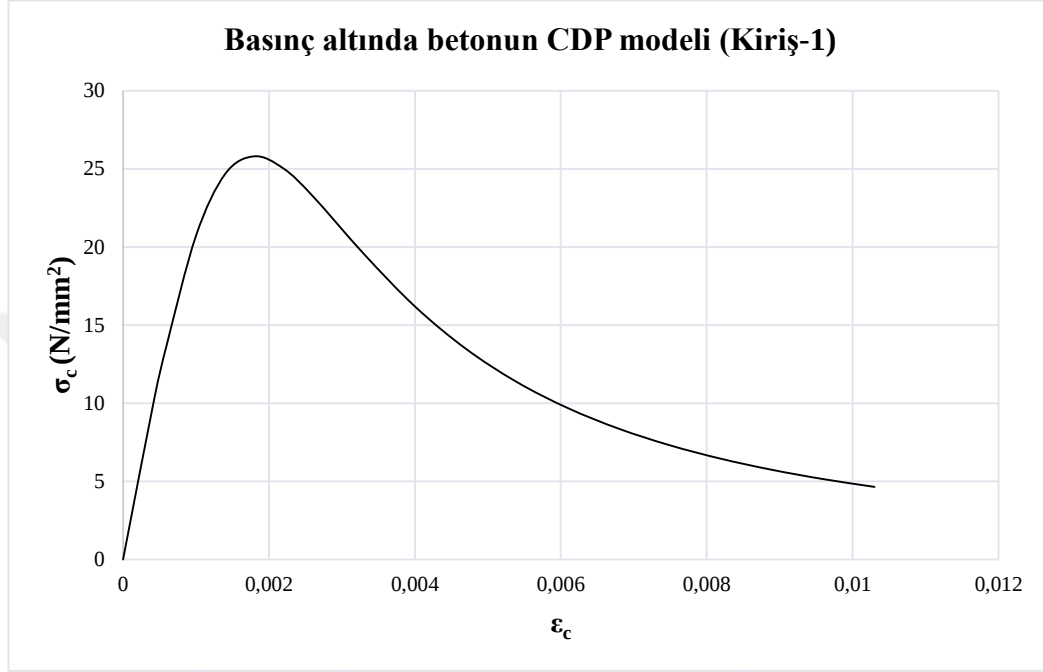
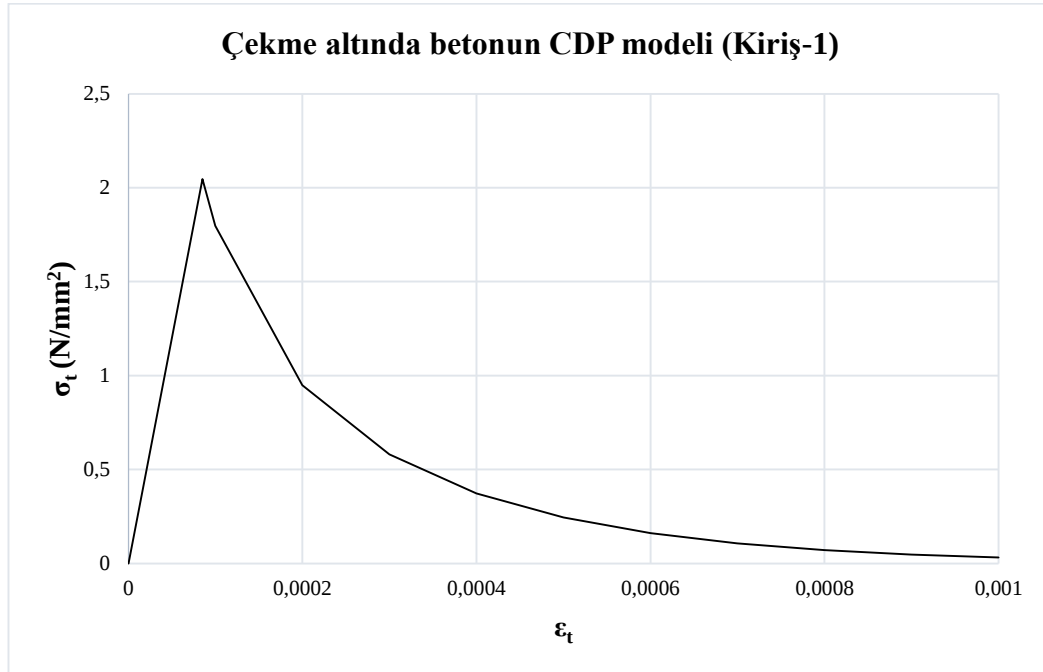
Şekil 4.17. Malzeme özellikleri bölümü

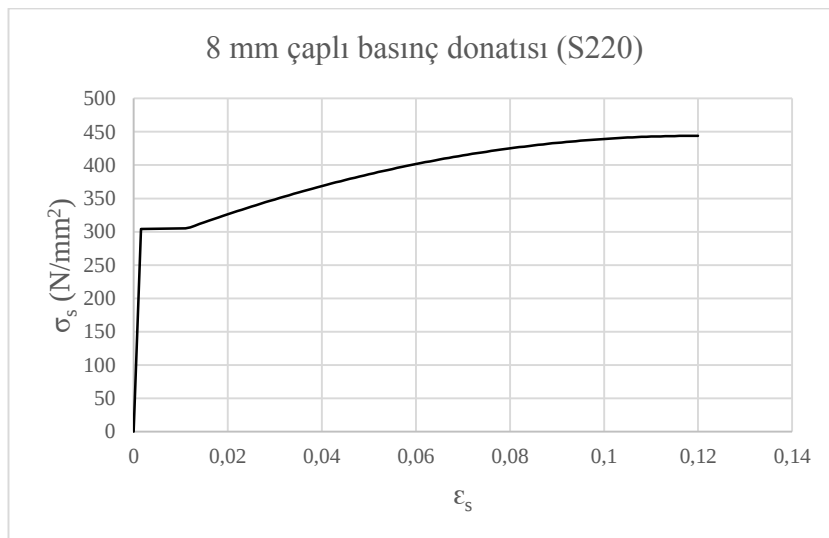
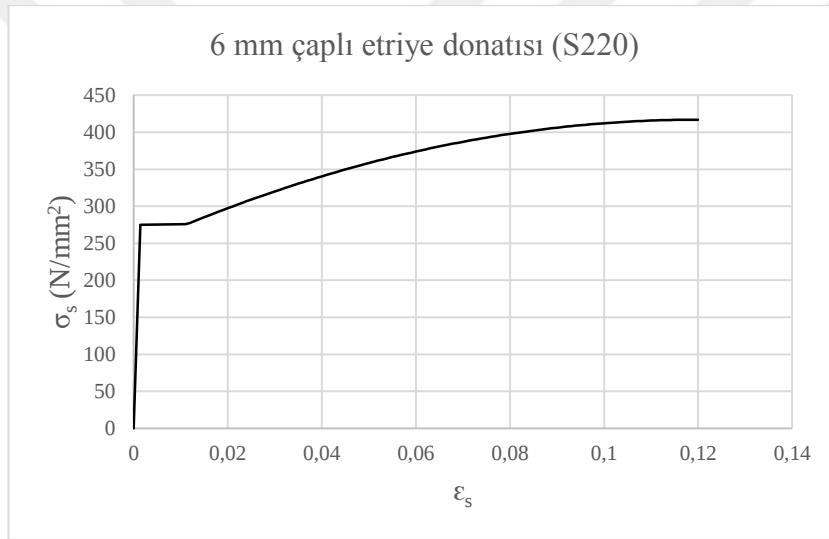
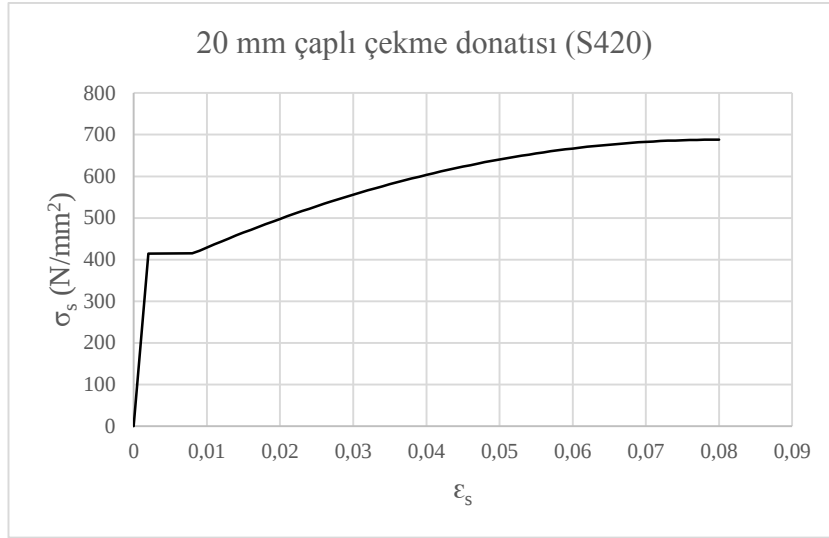
Deneyde kullanılan malzeme özelliklerinin doğruluğu ve programa düzgün girilmesi sonuçların deneye yakın çıkmasında en önemli faktörlerden bir tanesidir. Beton malzemesinin; sargı durumu, numune ebatları, yükleme durumu, basınç mukavemeti vb. özellikleri gerilme-şekil değiştirme eğrisini etkilemektedir. 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 çalışmada betonun malzeme özelliği ve hasar davranışı için ABAQUS programına özgü olarak Concrete Damaged Plasticity (CDP) kullanılmıştır.

CDP donatısız veya donatılı beton için beton hasar plastisite modelidir. Yük durumları etkisinde betona ait doğrusal olmayan analize olanak sağlar. Betonun doğrusal olmayan davranışını basınç ezilmesi ve çekme gerilmesi altında tanımlamaktadır. CDP modeline ait beton için basınç ve çekme gerilmeleri altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.18-19’da gösterilmiştir. Basınç ve çekme gerilmeleri altındaki davranışını kontrol etmek için d_c (basınç hasar) ve d_t (çekme hasar) rijitliği azaltma parametreleri kullanılmaktadır. 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 (Çizelge 4.4). Betonun çekme dayanımı ve elastisite modülü dolaylı olarak elde edilmiştir (Dere ve Koroglu 2017). Bununla birlikte kirişlerde kullanılan donatılara ait TBDY 2018 modeli Şekil 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Hesapta kullanılan CDP parametreleri (Dere ve Koroglu 2017)

Geniştirme açısı	Dış merkezlik	f_{b0}/f_{c0}	K	Vizkozite parametresi
31	0.1	1.16	0.666	0

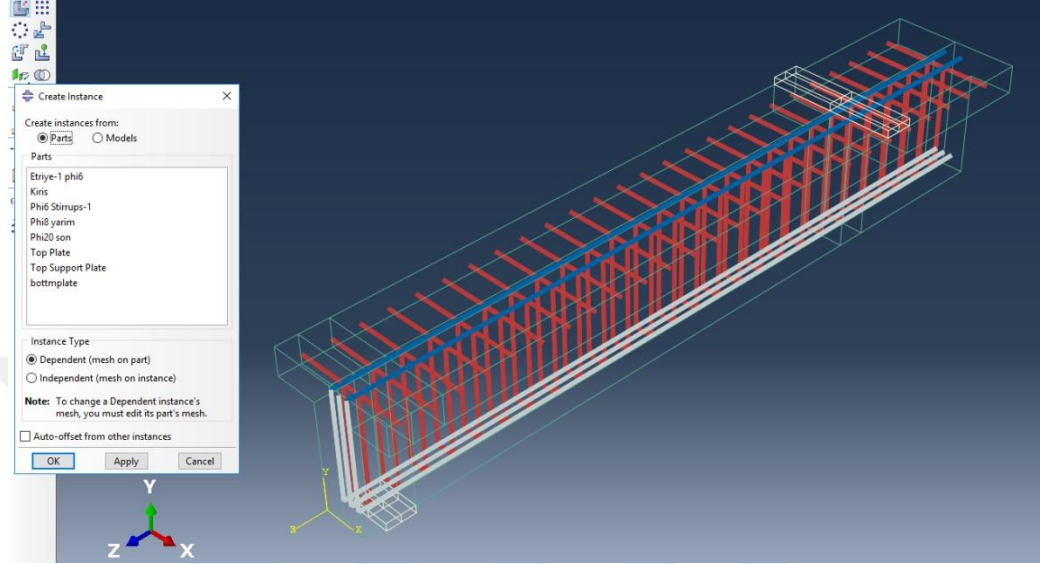
**Şekil 4.18.** Betonun basınç altında CDP modeli (Kiriş-1)**Şekil 4.19.** Betonun çekme altında CDP modeli (Kiriş-1)



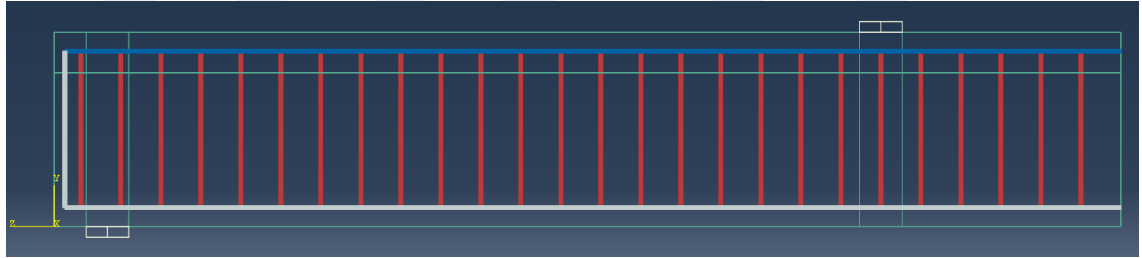
Şekil 4.20. Donatılar için TBDY2018 modeli (TBDY 2018)

4.3.3. Parçaların birleştirilmesi

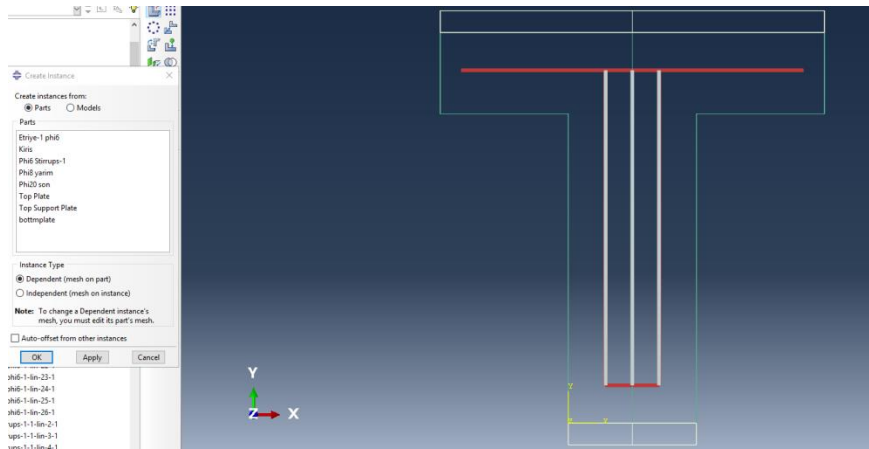
Elemanın oluşturulan her bir geometrik parça “Assembly” başlığındaki “Create Instance” komutunu kullanarak bir araya getirilmiştir. Bu işlemin tamamlanmış hali Kiriş-1 için Şekil 4.21-23’te, Kiriş-6 için Şekil 4.24’te gösterilmiştir.



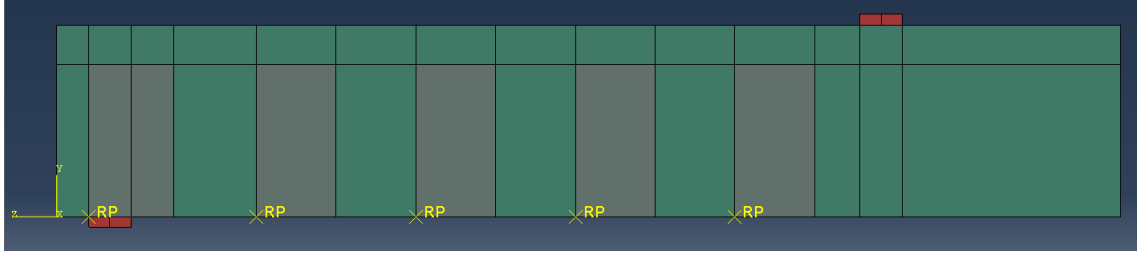
Şekil 4.21. Parçaların birleştirilmesi, 3D görünüş (Kiriş-1)



Şekil 4.22. Parçaların birleştirilmesi, 2D yan görünüş (Kiriş-1)



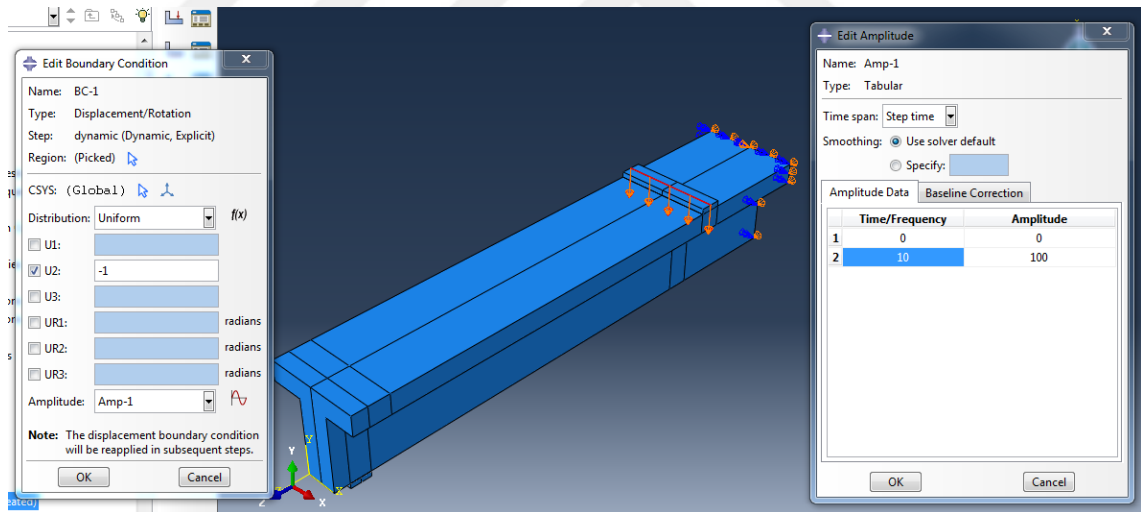
Şekil 4.23. Parçaların birleştirilmesi, 2D kesit görünüş (Kiriş-1)



Şekil 4.24. Parçaların birleştirilmesi, 2D yan görünüş (Kiriş-6)

4.3.4. Analiz tipinin oluşturulması

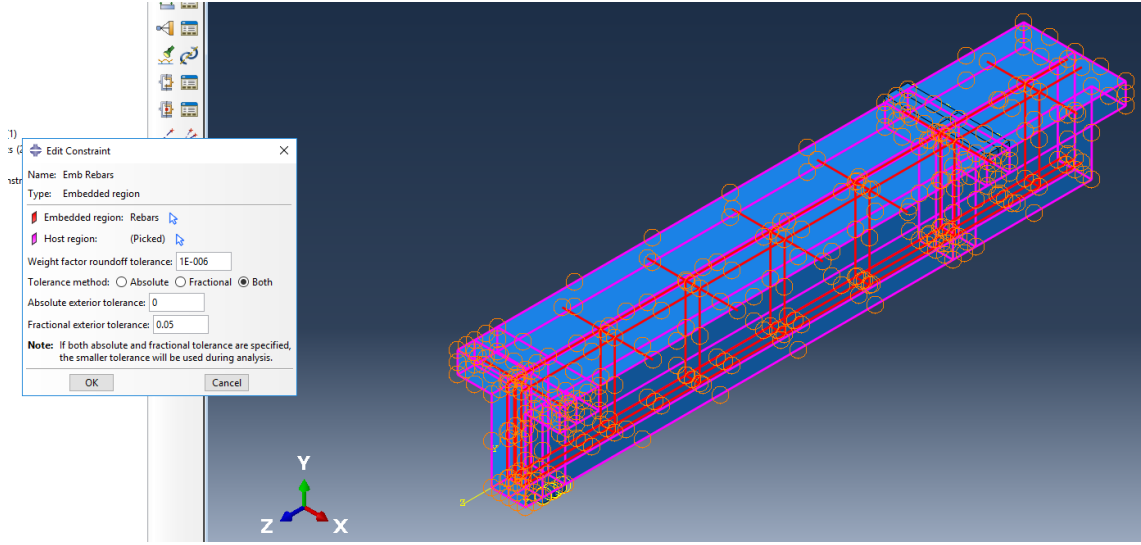
Yapılacak olan analizin adımları ve tipi “Step” bölümü ile yapılmıştır. Bu çalışmada analiz tipi “Dynamic/Explicit” olarak seçilmiştir. Explicit (açık) dinamik simülasyonlar genellikle dinamik olaylardan kaynaklanan olası hasarları öngörmek amacıyla kullanılmaktadır. Analizde kiriş yükleme noktasının 10 sn süre sonunda 100 mm düşey yer değiştirme yapması hedeflenmiştir. Çözüm hassasiyetini arttırmak adına bu süre daha da artırılabilir. “Amplitude” komutu ile yer değiştirmenin adım adım uygulanması sağlanmıştır. Düşey yer değiştirme etkisiyle mesnette oluşan düşey tepki kuvveti ölçülmüş ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri çizilmiştir. Analiz tipinin seçildiği bölüm ve yer değiştirmenin etkisi Şekil 4.25’te verilmiştir.



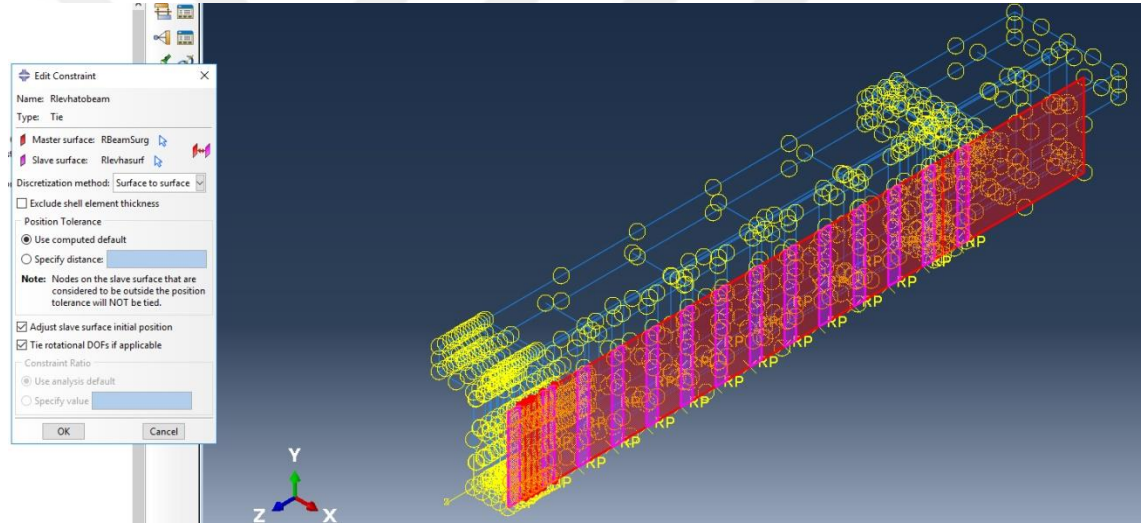
Şekil 4.25. Yükleme durumunun oluşturulması

4.3.5. Parçalar arası etkileşimin tanımlanması

Bu bölümde önceden “Assembly” ile tanımlanan ve bir araya getirelen parçaların birbirleriyle etkileşimi tanımlanır. Bu amaçla programda “Interaction” konutu kullanılır. Beton-donatı, beton-destek plakaları ve beton-çelik levhaların yüzeyleri arasında etkileşim yapılmıştır. Beton-donatı temas yüzeyi “Embedded Region” olarak seçilmiştir. Çelik levhalar ile beton ve beton ile destek plakaları ise “Tie” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.26-27).



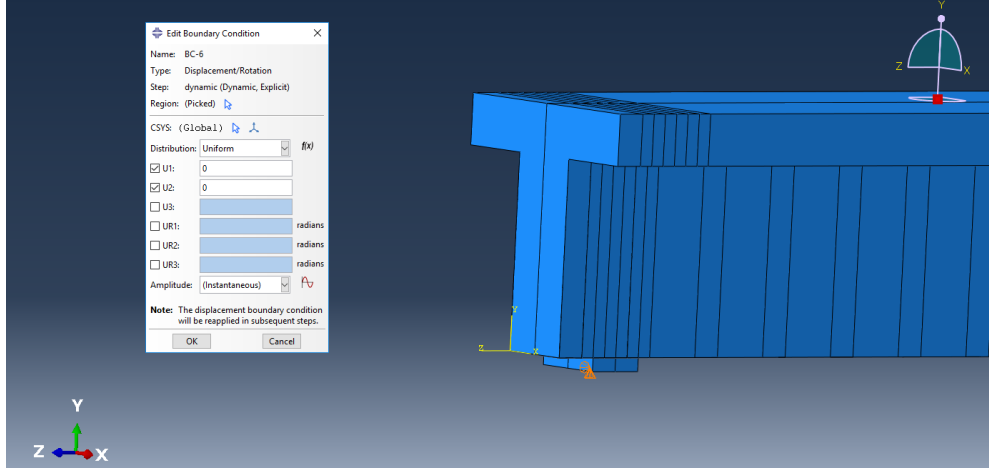
Şekil 4.26. Beton-donatı etkileşiminin tanımlanması



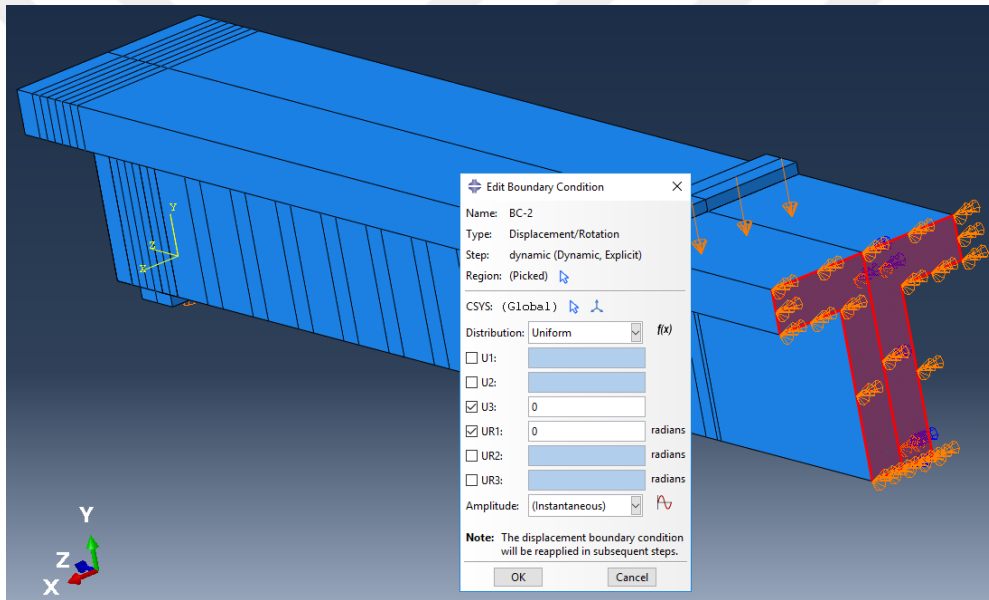
Şekil 4.27. Beton-çelik levha etkileşiminin tanımlanması

4.3.6. Sınır şartlarının tanımlanması

Kiriş elemanlarının sol taraftaki mesnedi hareketli mesnet seçilmiştir. Hareketli mesnet seçilen bölge x ve y yönlerinde tutulu, z yönünde hareket edebilmektedir (Şekil 4.28). Deney elemanı simetriden faydalanılarak yarım olarak tasarlanmıştır. Simetriden dolayı kesilen orta noktadaki sınır şartları, normal kirişin yapabileceği hareketler tanımlanarak uygulanmıştır (Şekil 4.29).



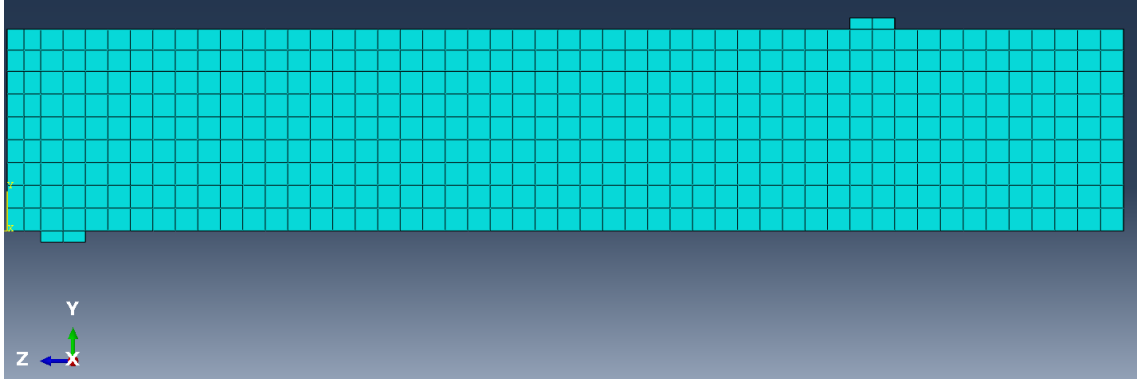
Şekil 4.28. Hareketli mesnedin tanımlanması



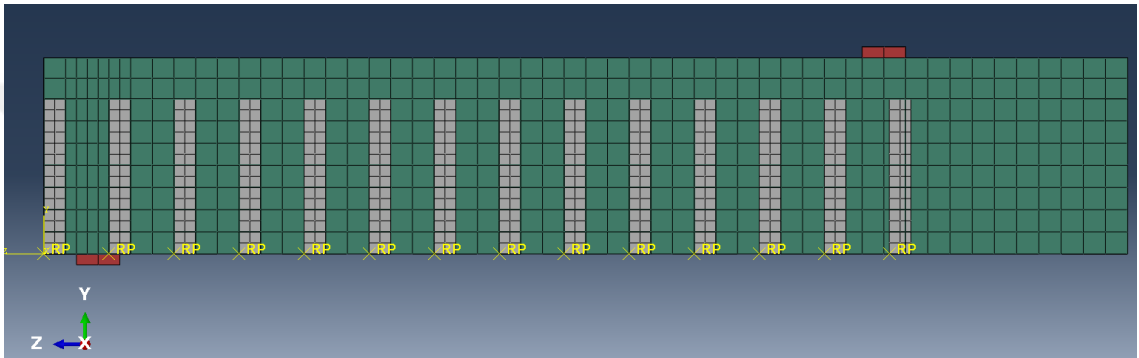
Şekil 4.29. Simetri kesitinin normal davranışı için mesnet tanımlanması

4.3.7. Modele sonlu eleman ağının tanımlanması

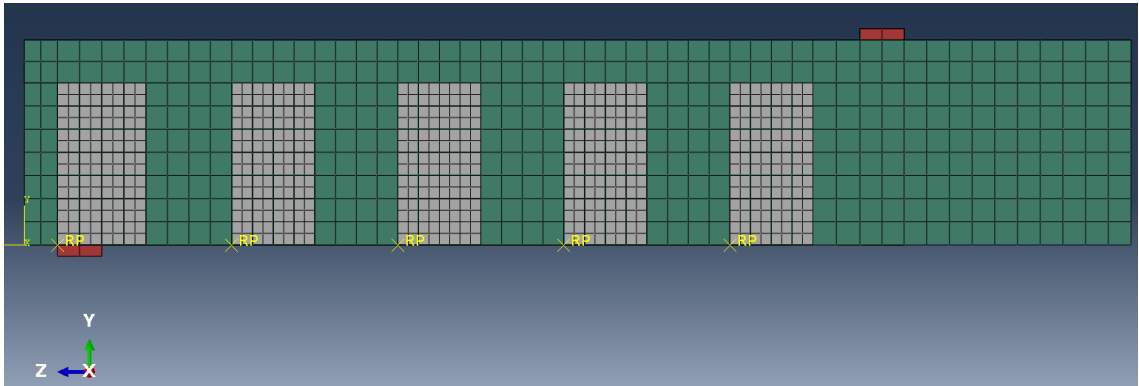
Sonlu elemanlar yönteminin en önemli ve belirgin özelliği olarak cismin sonlu elemanlara bölünmesi işlemi, ABAQUS programında “Mesh” adımıyla sağlanmaktadır. Her bir parça için ayrı ayrı mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözüm hassasiyetini arttırmak için “Seed, Instance, Approximate global size” değerinin mümkün olduğunca küçük seçilmesi önemlidir. Programın öğrenci sürümünün kullanılması nedeniyle düğüm noktası kısıtlaması mevcuttur. Bu durumu da dikkate alarak sonlu eleman ağı olabildiğince hassas oluşturulmuştur. Model geometrisinin karmaşıklığı da sonlu eleman ağının kalitesini etkiler. Düzgün ağ oluşturmak için geometriler “Partition” komutu ile düzenlenmiştir. Sık ağ (mesh) aralığı kullanmak gerçek sonuçlara yaklaştırmakla beraber, çok donanımlı bilgisayar desteği istemektedir. Bu çalışmada kullanılan bilgisayarın yeterliliklerine ait azami sık mesh aralığı tanımlanmıştır (Şekil 4.30-32).



Şekil 4.30. Sonlu eleman ağı (Kiriş-1 ve Kiriş-2)



Şekil 4.31. Sonlu eleman ağı (Kiriş-3)



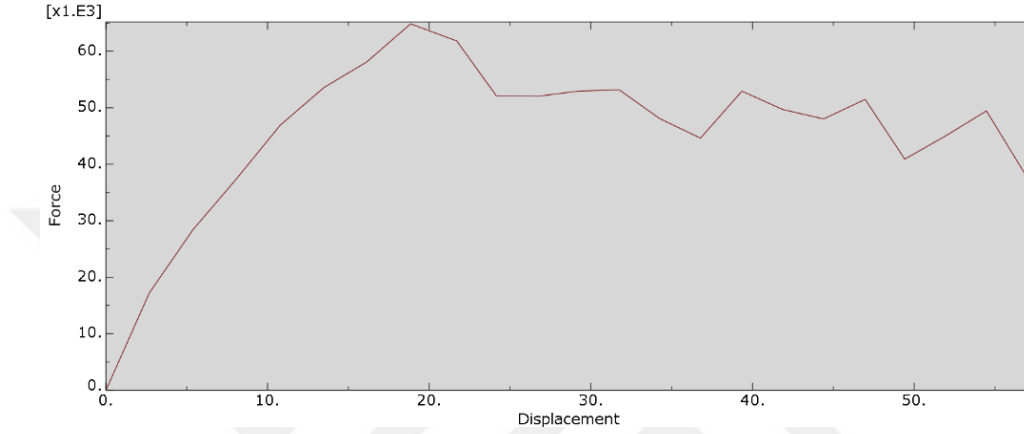
Şekil 4.32. Sonlu eleman ağı (Kiriş-6)

4.3.8. Analizin başlatılması

ABAQUS programında analizin başlatılması “Job” adımı ile yapılmaktadır. “Create Job” komutu ile bir analiz ismi oluşturulmuştur ve “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.

4.3.9. 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 yer değiştirme-zaman grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerden “Create XY Data/Operate on XY Data” komutu kullanılarak yük-düşey yer değiştirme grafiklerine geçilmiştir (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Yük-düşey yer değiştirme grafiği (Kiriş-2)

5. TARTIŞMA

5.1. Giriş

Kirişlerin güçlendirilmesinde birçok yöntem bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında çelik levhaların tablalı kirişler üzerindeki etkinliği analitik olarak araştırılmıştır. Diğer yöntemlere örnek olarak CFRP (Karbon fiber takviyeli plastik) ve GFRP (Cam fiber takviyeli polimer) ile güçlendirme verilebilir. Çalışmada, deneyleri literatürde yer alan kirişler sonlu elemanlar yöntemiyle analitik olarak modellenmiştir.

Teknolojinin gelişmesi ve bilgisayarların daha hızlı olması sayesinde, sonlu elemanlar modelinin daha çok parça (mesh) halinde tanımlanması mümkün olmaktadır. Bu sayede elde edilen sonuçların deney sonucuna daha da yaklaşacağı gözükmemektedir. Deneylerin uzun süresi ve maliyeti sebebiyle bilgisayar modellemenin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada ele alınan betonarme kirişlerin sonlu elemanlar ağı (mesh), analiz programının öğrenci sürümünün kullanılması nedeniyle, sınırlı sayıda düğüm noktasıyla oluşturulabilmiştir. Bu durumun analiz sonuçlarını etkilediği görülmüştür.

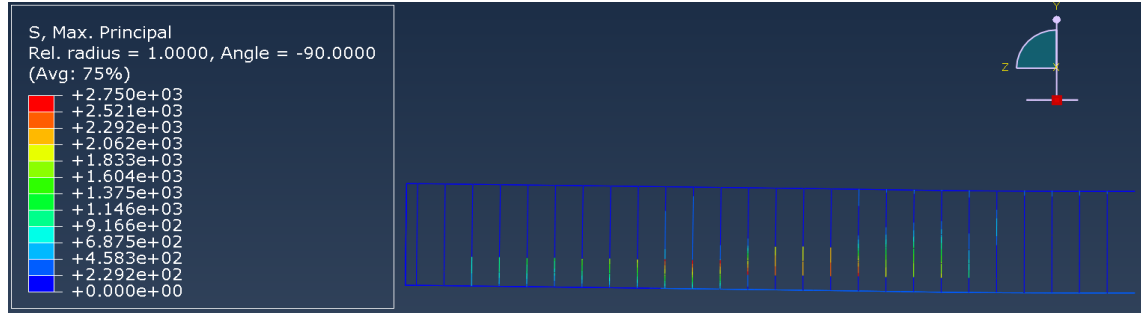
Modelleme çalışması için yapılan ilk denemelerde etriyelerin kiriş içerisindeki etkinliğinin yetersiz kaldığı, bu nedenle sık etriyeli Kiriş-1 modelinde dahi çekme donatısı henüz akamadan kirişin kesmeden göçtüğü gözlenmiştir. Bu durum, yetersiz mesh ağı nedeniyle etriyeler ve beton arasında ideal etkileşimin oluşamaması şeklinde yorumlanmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla Kiriş-1'e ait deney sonuçlarına bakarak etriyenin malzeme özellikleri kalibre edilmiş ve bu şekilde sonuçların öncelikle referans kirişle (Kiriş-1) örtüşmesi hedeflenmiştir. Kalibrasyon amacıyla, analizde kullanılan etriyelerin elastisite modülünün 100 kat ve akma dayanımı 10 kat arttırılmıştır. Boyuna donatılar ve betonla ilgili değerler deneysel çalışmayla (Altın vd. 2005) aynı olacak şekilde bırakılmıştır. Değerler bu şekilde alındığında yapılan hesaplarda deneylere daha yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Daha sonra, Kiriş-1 üzerinde yapılan kalibrasyon katsayıları diğer tüm kirişlere de aynı şekilde uygulanmıştır.

Doğrusal olmayan analiz yapılırken gerçeğe yakın sonuçların elde edilebilmesi için çelik levhaların uygulandığı betonla olan etkileşimini de dikkate almak oldukça önemlidir. Epoxy uygulanarak yapıştırılan çelik levhaların deney esnasında ayrıştığını gösteren bir bulgudan referans makalesinde bahsedilmemesi nedeniyle, bilgisayar modelinde de etkileşim tam rijit olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte ABAQUS programında ayrışma durumunu da gözetmek amacıyla epoxy harcının kohezif özelliğini de modele yansıtmak mümkün olabilmektedir.

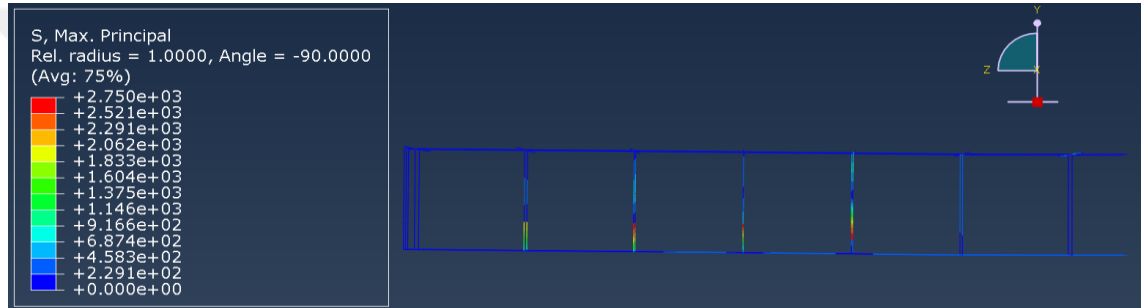
5.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kirişlerde kırılma biçimi Eğilme (Flexure) ve Kesme (Shear) olmak üzere iki şekilde gözlenmiştir. Eğilme tipi göçmede önce çekme donatısı akmakta daha sonra ise beton basınç bölgesi ezilmektedir. Kesme tipi göçme ise iki türlü gerçekleşmektedir. Bunlardan bir tanesi henüz çekme donatısı akamadan kapasiteye kesme kırılması ile ulaşılması, diğeri ise çekme donatısı aktıktan sonra beton basınç bölgesi ezilmeden kapasiteye kesme kırılmasıyla ulaşılmasıdır. Deneysel çalışmaya bakıldığında; Kiriş 1, 5, 9, 10'da eğilme tipi, Kiriş 2'de birinci tip kesme tipi ve Kiriş 3, 4, 6, 7, 8, 11'de ise ikinci kesme tipi kırılmanın gerçekleştiği görülmüştür. Analizde ise bu durumun, uygulanan

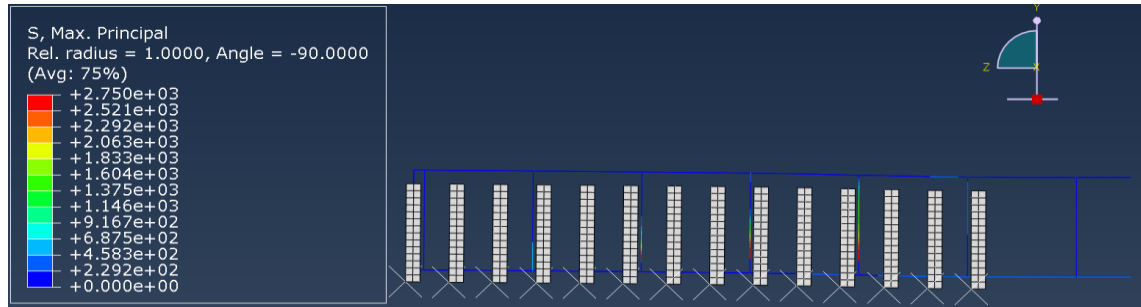
güçlendirme levhalarının çoğunlukla etriyeler üzerine mi yoksa etriyeler arasına mı denk gelmesine göre etkilendiği görülmüştür. Şekil 5.1-7’de levhaların etriyelere göre konumları ve yük kapasitesi anında etriyelerde oluşan normal gerilmeler görülmektedir.



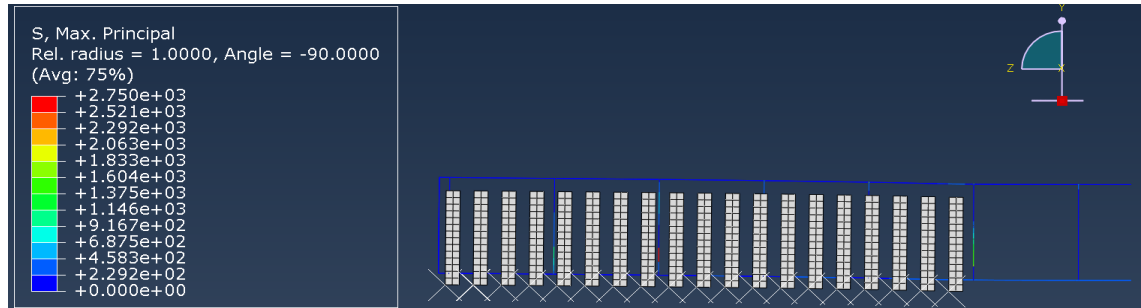
Şekil 5.1. Kapasite anında etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-1)



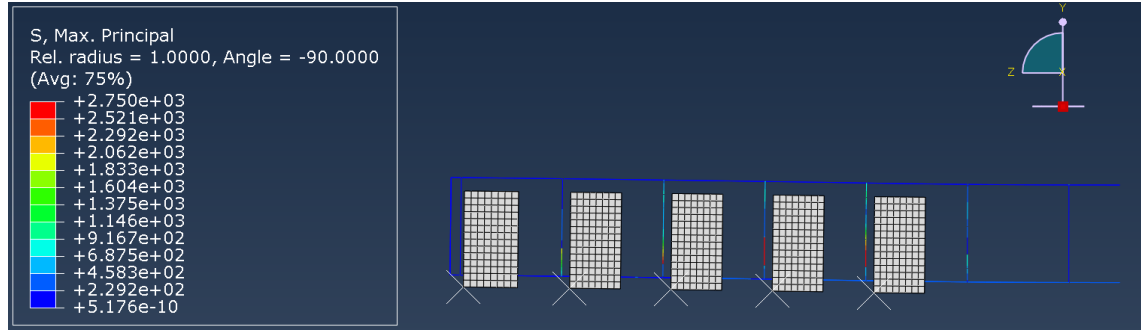
Şekil 5.2. Kapasite anında etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-2)



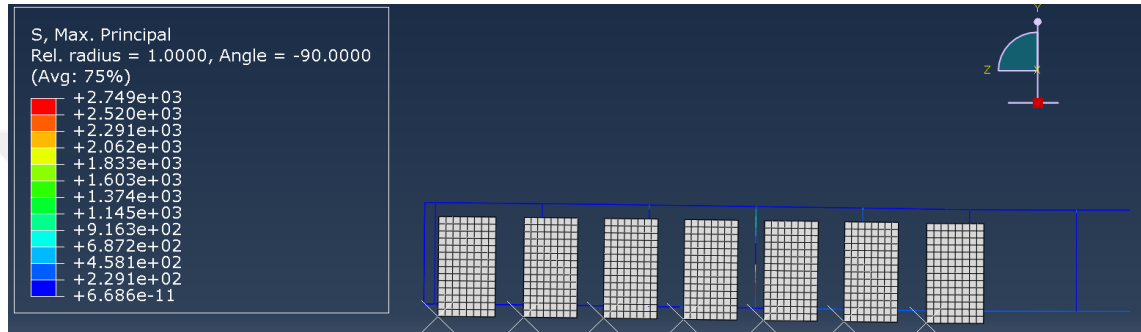
Şekil 5.3. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-3)



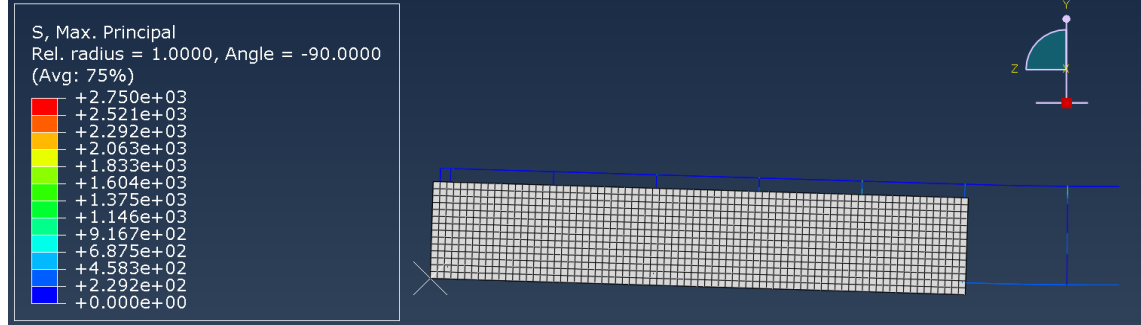
Şekil 5.4. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-5)



Şekil 5.5. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-6)

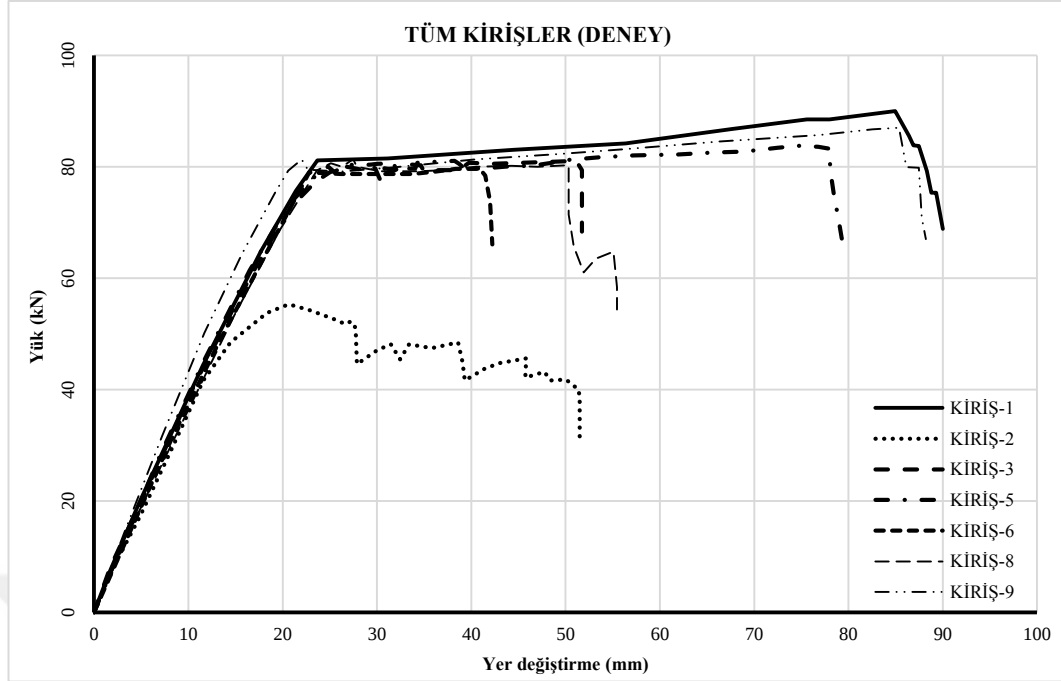


Şekil 5.6. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-8)



Şekil 5.7. Levha konumu ve etriyelerde oluşan normal gerilme dağılımı (Kiriş-9)

DeneySEL ve analitik çalışmalardan elde edilen yük-düşey yer değiştirme grafikleri Şekil 5.8-9'da görülmektedir.



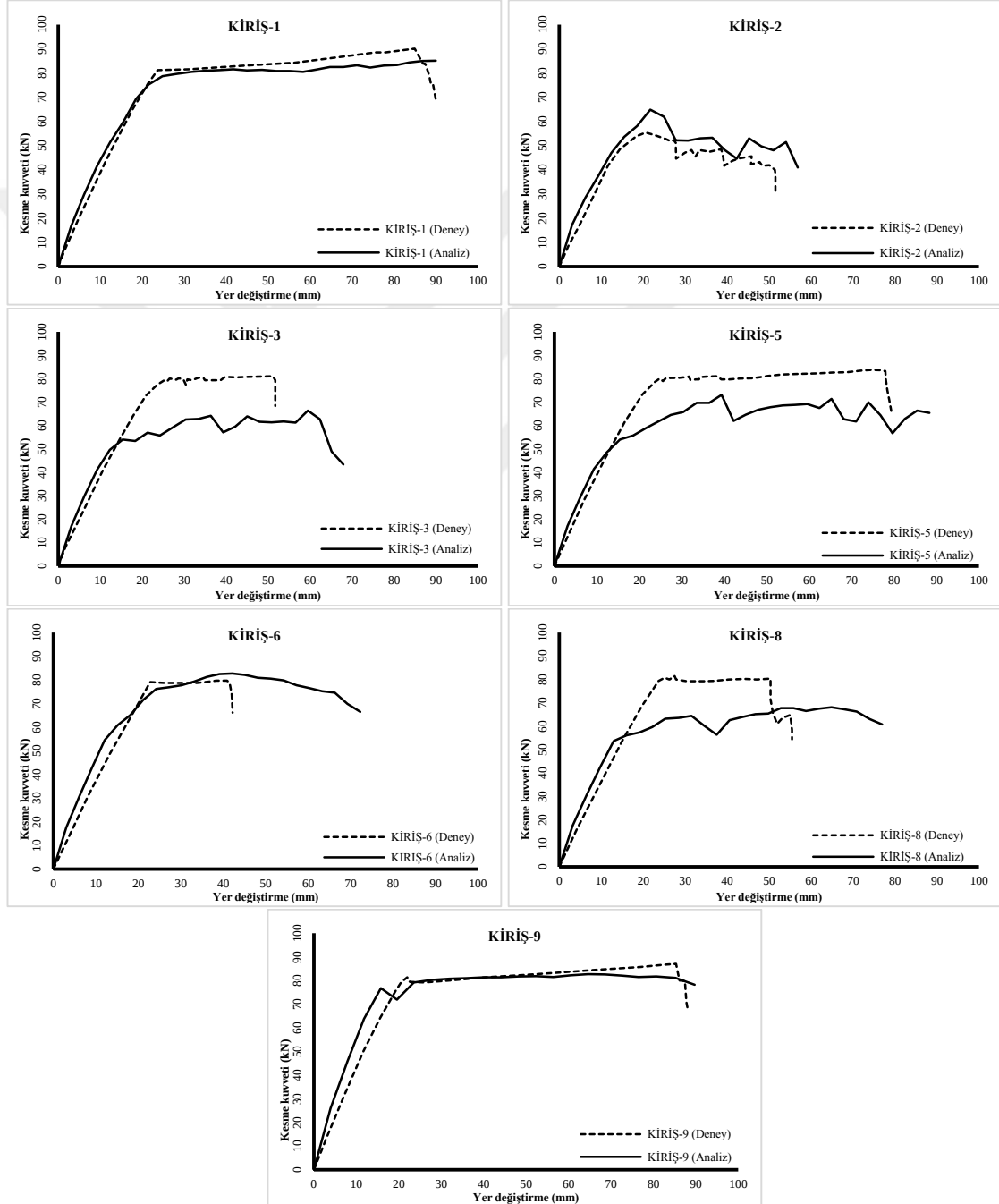
Şekil 5.8. Deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri (Altın vd. 2005)



Şekil 5.9. Bu çalışmada elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri

Şekil 5.8'e bakıldığında Kiriş-2 hariç tüm kirişlerde çekme donatısının aktığı görülmektedir. Dolayısıyla güçlendirme levhalarının kiriş davranışlarında önemli bir iyileştirme yaptığı söylenebilir. Analitik çalışmada elde edilen sonuçların ise güçlendirme levhasının etriyelere denk gelip gelme durumuna göre etkilendiği görülmektedir (Şekil 5.1-7 ve Şekil 5.9). Etriye ve güçlendirme levhasının yoğunlukla üst üste örtüştüğü

durumlarda kirişlerin davranışında beklenen iyileşme görülmemiştir (Kiriş 3, 5 ve 8). Bununla birlikte, levhaların yoğunlukla etriye aralarına denk geldiği ya da tamamen örttüğü durumlarda deneysel çalışmada olduğu gibi çekme donatısı akacak kadar davranışta iyileşme oluşmaktadır (Kiriş 6 ve 9). Kırma açıklığı boyunca oluşan asal gerilmelere herhangi bir levha ya da etriyenin denk gelmemesi halinde kırılma biçimi kırma tipi olmaktadır. Deneysel çalışmadaki etriyelerin levhalara göre olan konumlarındaki belirsizlik nedeniyle bu konuda tam bir kıyaslama yapmak mümkün olmamaktadır. Kesmeye karşı çelik levhalarda güçlendirilen T kesitli betonarme kirişlerin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

6. SONUÇLAR

Mühendislik yapılarının imalatından başlayarak kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği birçok tehdit bulunmaktadır. Bunlara yanlış tasarım, yanlış imalat, deprem, rüzgâr vb. örnekleri verebiliriz. Hasar gören yapıları tekrardan inşa etmek yerine güçlendirme yoluna gitmek maddi ve zaman kayıplarını azaltmak için doğru bir seçenek olabilmektedir. Bu nedenle günümüzde güçlendirme çalışmaları oldukça önem kazanmıştır.

Kirişlerde moment kapasitesi yeterli olmasına rağmen kesme dayanımındaki yetersizlik elemanın gevrek kesme kırılması yapmasına neden olmaktadır. Kesme etkisindeki kırılma ani ve gevrek olur. Bu tür kırılma yapının beklenen taşıma kapasitesine ulaşmasına engel olmaktadır. Doğru tespitler ve hesaplamalarla güçlendirme yapılarak bu tür hasarlar önlenabilir. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde çeşitlik teknikler kullanılmaktadır. Son yıllarda kullanılan tekniklerden bir tanesi de kirişlere dışarıdan çelik levhaların güçlü kimyasallarla yapıştırılmasıdır. Çelik levhaların kolay uygulanabilirliği ve yüksek dayanımı gibi özellikleri güçlendirme projelerinde tercih edilen eleman olmasını sağlamaktadır.

Oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan betonarme eleman ve yapıların çeşitli yükler altında davranışının belirlenmesi, laboratuvar ortamında yapılan model deneylerle mümkün olmaktadır. Ancak deneylerde kullanılan eleman boyutlarının büyüklüğü ve gerçekçi yük verme güçlüğü gibi nedenlerden dolayı bu çalışmaların maliyeti oldukça yüksek olmakta ve uygulamalar uzun zaman alabilmektedir. Bu sebeple deneyi yapılamayan bazı ara durumların bilgisayar ortamında sayısal olarak incelenmesinde büyük fayda vardır. Aynı zamanda bu tür çalışmalar hazır bilgisayar programların kapsamının anlaşılabilmesi için de önemlidir. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan sayısal modelin oluşturulma tekniğinden de oldukça etkilenmektedir. Yapı mekaniğinde, gerçek davranışa uyan ideal analitik modelleme tekniklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılacak olan çalışmalar gereklidir.

Güçlendirmenin uygulanabilmesi ve geliştirilebilmesi için güçlendirmede kullanılacak malzemelerin özelliklerinin ve davranışlarının çok iyi kavranması gerekmektedir. Betonarme yapı elemanlarının yükler etkisindeki doğrusal olmayan (non-linear) davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneyler, sayısal yöntemler ve bilgisayar simülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Literatür araştırmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışının gerçeğe çok yakın olarak modellenebildiği birçok kişi tarafından başarıyla gösterilmiştir. Bilgisayar kapasitelerindeki artış sayesinde programlar daha hızlı doğrusal olmayan çözüm yapmaya başlamıştır. Bu sayede deneylerden elde edilen sonuçlara yakın değerler bilgisayar sonuçlarında da gözlenmektedir.

Bu tez çalışmasında, deneysel çalışması literatürde yer alan T kesitli betonarme kirişlerin bilgisayar ortamında doğrusal olmayan sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin kesme etkisine karşı çelik levhalarla güçlendirme durumlarına göre elde edilen sonuçlar dayanım, rijitlik, deplasman ve çatlak gelişimi yönünden karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Böylece, bilgisayar modelinin doğruluğu kontrol edilmiş ve kullanılan modelleme tekniği idealize edilmiştir.

Çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişler için düşünülen analitik çalışma ABAQUS (Student Edition) sonlu eleman programıyla gerçekleştirilmiştir. ABAQUS hazır programının seçilme nedeni, programda kullanılan sonlu eleman tipleri ve malzeme modellerinin gerçek betonarme eleman davranışına olan uygunluğudur. Bu konuda oldukça başarılı sonuçlar alındığını gösteren çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Programın edinilen sürümünde sınırlı sayıda sonlu eleman kullanımı söz konusudur. Bu nedenle literatürde deneysel çalışmada verilen toplam 11 adet durumun ancak 7 tanesi analitik olarak incelenebilmiştir. Gerek bu nedenle gerekse doğrusal olmayan analiz süresini azaltmak amacıyla tam ortasından simetrik olan kirişlerin yarısı modellemede dikkate alınmıştır. Bu amaçla, kiriş ortasında bulunan simetri özelliğini sağlayacak nitelikteki sınır şartları, analitik modele yansıtılmıştır.

Analitik modelde levhaların etriyelere göre konumları ve yük kapasitesi anında etriyelerde oluşan normal gerilmeler Şekil 5.1-7’de gösterilmeye çalışılmıştır. Kapasite anında kiriş yüzeyinde oluşan asal gerilmelerin dağılımına bakıldığında ise (Şekil 5.10-16), kesme açıklığı boyunca oluşan asal gerilmelere herhangi bir levha ya da etriyenin denk gelmemesi halinde kırılma biçimi kesme tipi olmaktadır. Deneysel çalışmadaki etriyelerin levhalara göre olan konumlarındaki belirsizlik nedeniyle bu konuda tam bir yorum yapmak mümkün olmamaktadır.

Deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen yük-düşey yer değiştirme grafikleri Şekil 5.8-9’da görülmektedir. Şekil 5.8’e bakıldığında Kiriş-2 hariç tüm kirişlerde çekme donatısının aktığı görülmektedir. Dolayısıyla güçlendirme levhalarının kiriş davranışlarında önemli bir iyileştirme yaptığı söylenebilir. Analitik çalışmada elde edilen sonuçların ise güçlendirme levhasının etriyelere denk gelip gelmeme durumuna göre etkilendiği görülmektedir (Şekil 5.1-7 ve Şekil 5.9). Kesme açıklığı boyunca oluşan asal gerilmelere herhangi bir levha ya da etriyenin denk gelmemesi halinde kırılma biçimi doğrudan kesme tipi olmaktadır. Deneysel çalışmadaki etriyelerin levhalara göre olan konumlarındaki belirsizlik nedeniyle bu konuda tam bir kıyaslama yapmak mümkün olmamaktadır.

Deneyleri daha önce yapılmış olan kirişlere ait grafikler, doğrusal olmayan analizden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.10). Grafikler yorumlandığında başlangıç eğimlerinin birbirine uygun olduğu, çekme donatısının aktığı durumlarda yük kapasite değerlerinin uyduğu görülmüştür. Bu çalışmada ele alınan betonarme kirişlerin sonlu elemanlar ağı (mesh), analiz programının öğrenci sürümünün kullanılması nedeniyle, sınırlı sayıda düğüm noktasıyla oluşturulabilmiştir. Sonlu eleman ağının iyileştirilmesiyle analiz sonuçlarının daha da iyi sonuç verebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, kullanılan kalibrasyon çerçevesinde deneysel ve analitik olarak elde edilen yük – yer değiştirme grafiklerinin kabul edilebilir seviyelerde birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Kirişler kesmeye karşı güçlendirilirken henüz tasarım aşamasındayken bilgisayar destekli yöntemin kullanılabileceği kanısına varılmıştır.

7. KAYNAKLAR

- ABAQUS Tutorials, Online Documentation Dassault Systemes Simulia User Assistance 2019. Dassault Systemes.
- Altın, S., Anıl, Ö. ve Kara, M.E. 2005. Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates. *Engineering Structural*, 27: 781-791.
- Altın S., Anıl Ö. ve Gökten Y. 2004. Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde bir kelepçe uygulaması. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 19: 415-422.
- Altın, S., Tankut, T., Anıl, Ö. ve Demirel, Y. 2003. Response of Reinforced Concrete Beams with Clamps Applied Externally: An Experimental Study. Elsevier Science, *Engineering Structures*, 25(6):1217-1229.
- Cılız, İ. M. 2007. Düşük dayanımlı betonla üretilmiş T kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 126 s.
- Dere, Y. ve Koroglu, M.K. 2017. Nonlinear FE Modeling of Reinforced Concrete. International Journal of Structural and Civil Engineering Research. *Engineering Structures*, 6(1): 71-74.
- Demir, A., Naci, Ç., Öztürk, H. ve Sümer, Y. 2016. Nonlinear finite element study on the improvement of shear capacity in reinforced concrete T-Section beams by an alternative diagonal shear reinforcement. *Engineering Structures*, 120: 158-165.
- Dündar, B. 2008. Kesme yönünden yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilerek kesme kapasitelerinin artırılması, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 75 s.
- Ersoy, U. 2002. Yapıların onarım ve güçlendirilmesinde ODTÜ yaklaşımı deneysel araştırmalar ve uygulama, Prof. Dr. Kemal Özden'i Anma Semineri, Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi Alanında Gelişmeler Bildiriler Kitabı, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1-31, İstanbul.
- Ersoy, U., ve Özcebe, G. 2004. Betonarme temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap. II. Baskı, Evrim Yayınevi, 816, İstanbul.
- Hibbitt, H., Karlsson, B., Sorensen P. ve Baglin, N.K. 2014. ABAQUS analysis users manual version 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Kantar, E. 2009. CFRP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 241 s.
- Karahan, S. 2008. Betonarme kirişlerin çelik levhalar ile güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 101 s.
- Keleş, M. 2005. Betonarme krişlerde açılı CFRP şeritlerin kesmeye katkısı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 113 s.

- Özbek, E. 2008. T kesitli betonarme kirişlerin kesme-eğilmeye karşı güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 200 s.
- Öztürk, H. 2016. Betonarme kısa kirişlerde kesme dayanımının çapraz kesme donatıları ile iyileştirilmesi. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 229 s.
- Swamy, R.N., Jones, R., ve Charif, A. 1989. The effect of external plate reinforcement on the strengthening of structurally damaged RC beams. *The Institution of Structural Engineers*, 67: 45-54.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- TS500-2000. 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Uysal, A. 2006. Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 92 s.
- Yazgı, Z. 2007. Dikdörtgen kesitli basit mesnetlenmiş kirişlerin eğilme yönünden karbon ve cam liflerle güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 62 s.

ÖZGEÇMİŞ

Okan DÜZGÜNLÜ
okanduzgunlu@hotmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2011-2015	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Serbest Mühendis 2016-Devam ediyor	Antalya
---------------------------------------	---------