
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

UPE VE IPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ NONLİNEER SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Erkan Okay MUTLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

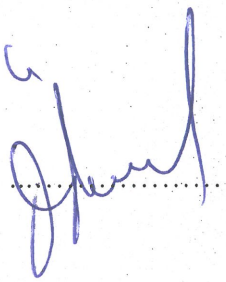
MAYIS 2019

Erkan Okay Mutlu tarafından hazırlanan "UPE VE IPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ NONLİNEER SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

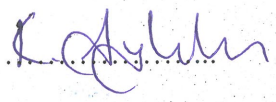
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

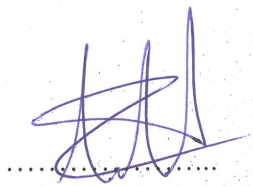
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Cem YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 16/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

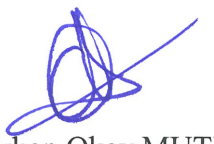
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Erkan Okay MUTLU

16/05/2019

UPE VE IPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ NONLİNEER SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Erkan Okay MUTLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Çelik kirişler aynı anda eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisinde kalan yapısal elemanlardır. Bu türdeki çelik kirişler için yanal çarpılarak burkulma göçme modu en fazla risk yaratan ve istenmeyen göçme mekanizmalarının başında gelmektedir. Çelik kirişler atalet momentlerinin yüksek olduğu yönde eğilme momenti etkisi altında eğilme deformasyonu yaparken aynı anda düzlem dısında yatay deplasman ve burulma deformasyonları da aynı yükleme etkisinde çok daha düşük bir kapasite düzetinde oluşabilmektedir. İnce cıdarlı narin çelik kiriş elemanlarında yanal burulmalı burkulma göçme mekanizması istenmeyen, aniden meydana gelen bir stabilite bozulması olup, bu konuda yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar son derece sınırlı sayıdadır. Yapılan literatür taraması sonucunda çelik yapılarda yangın olarak kullanılan IPE ve UPE türü profiller için yanal burulmalı burkulma stabilite bozulması için yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmış kapsamlı bir nümerik çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle nümerik bir çalışma planlanmış ve çalışma kapsamında 9 adet IPE160 ve 9 adet UPE80 konsol kiriş deney elemanının ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve ne ölçüde başarılı analiz sonuçları elde edilebildiği yorumlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada her örnek için özdeğer burkulma analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda mod şekilleri elde edilmiştir ve elastik kritik burkulma yükü hesaplanmıştır. İlk aşamadan elde edilen sonuçlarla bir geometrik kusur belirlenerek ikinci aşamanın başlangıç modeli belirlenmiştir. İkinci aşamada, geometrik ve malzeme nonlineerliği kullanılarak nonlineer risk analizi yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen sonlu elemanlar analizi prosedürünün, deneysel sounçlar ile ne ölçüde uyumlu sonuçlar verebildiği incelenmiştir. Deneysel çalışma ve nümerik analiz sonucunda elde edilen taşıma gücü, düşey deplasman ve burulma rotasyon açısı değerleri karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Nümerik analiz sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri ve deneysel sonuçlar arasında çok daha büyük bir oranda benzeşim elde edilmiş ve aralarında ortlama %0.66 fark olduğu hesaplanmıştır. Nümerik analiz sonucunda elde edilen düşey deplasman ve burulma açısı değerleri, deneysel değerlerden sırasıyla ortalama %11.03 ve %47.5 değerlerinde farklı elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91130
Anahtar Kelimeler : Yanal burulmalı burkulma, IPE profil, UPE Profil, konsol kiriş, ABAQUS
Sayfa Adedi : 83
Danışman : Prof. Dr. Özgür ANIL

LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF CANTILEVER IPE AND UPE STEEL BEAMS WITH NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS

(M. Sc. Thesis)

Erkan Okay MUTLU

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

Steel beams are structural elements that are simultaneously under axial force and bending moment. For this type of steel beams, the lateral torsional buckling failure mode is one of the most risky and unwanted collapse mechanisms. While the steel beams bend under the effect of bending moment in the direction of high moment of inertia, horizontal displacement and torsional deformations at the same time can occur at a lower capacity level under the same loading effect. In the thin-walled slender steel beam elements, the lateral torsion buckling collapse mechanism is an undesirable, sudden deterioration of stability, and experimental and numerical studies on this subject are extremely limited. As a result of the literature review, it has been observed that there is no comprehensive numerical study, which is validated by comparing the experimental results for lateral torsional buckling stability deterioration for IPE and UPE type profiles which are widely used in steel structures. For this reason, a numerical study was planned and a numerical analysis of 9 IPE160 and 9 UPE80 cantilever beam test elements were made by using ABAQUS finite element program. Numerical results were compared with experimental results and the results of successful analysis were interpreted. Finite element analysis was performed in two stages. In the first stage, eigenvalue buckling analysis was performed for each sample. The mode shapes were obtained and the elastic critical buckling load was calculated. A geometric imperfection was determined with the results obtained from the first stage and the initial condition of the second stage was determined. In the second stage, nonlinear riks analysis was performed by using geometric and material non-linearity. In this study, the results of the proposed finite element analysis procedure compared with the experimental results. As a result of experimental study and numerical analysis, the critical buckling load, vertical displacement and maximum torsion rotation angle values were computed and interpreted. A great similarity was obtained between the critical load values obtained from the numerical analysis results and the experimental results and an average difference of 0.66% was calculated. The vertical displacement and torsional angle values obtained from the numerical analysis are different from the experimental values by 11.03% and 47.5%.

Science Code : 91130
Key Words : Lateral torsional buckling, IPE profile, UPE profile, cantilever beam, ABAQUS
Page Number : 83
Supervisor : Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez çalışmam sürecinde kıymetli zamanını ayıran, bilgi ve tecrübesiyle her türlü desteği sağlayan, değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Özgür ANIL'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın şekillenmesinde yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Hüseyin Erdem EROĞLU'na, tez çalışmam süresince verdiği destekten ötürü Sayın Arş. Gör. Dr. Tolga YILMAZ hocama, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim süre zarfında bana büyük yardımları dokunan Sayın Arş. Gör. Anıl ÖZDEMİR ve Arş. Gör. Coşkun ÇAKMAK'a canı gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

3. YANAL BURULMALI BURKULMA 7

4. ANALİTİK MODELİN OLUŞTURULMASI 9

4.1. Deney Düzeneği 9

4.2. Eleman Tipi ve Numuneler 10

4.3. Kesit Özellikleri 12

4.4. Malzeme Özellikleri 13

4.5. Sonlu Elemanlar Ağı 13

4.6. Mesnet Şartları 14

4.7. Yükleme Noktaları 14

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 15

5.1. Genel Bilgiler ve Uygulanan Prosedür 15

6. ANALİZ SONUÇLARI 17

6.1. 1 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 17

6.2. 2 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 19

6.3. 3 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 22

Sayfa

6.4. 4 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 25
6.5. 5 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 28
6.6. 6 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 31
6.7. 7 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 34
6.8. 8 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 37
6.9. 9 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar 40
6.10. 10 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 43
6.11. 11 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 46
6.12. 12 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 48
6.13. 13 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 51
6.14. 14 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 53
6.15. 15 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 56
6.16. 16 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 58
6.17. 17 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar 61
6.18. 18 numaralı (UPE80) Numune için Sonuçlar 63
7. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ 67
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 77
KAYNAKLAR 81
ÖZGEÇMİŞ 83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan numuneler 11

Çizelge 4.2. Deneyde kullanılan numuneler 12

Çizelge 4.3. Malzeme özellikleri 13

Çizelge 5.1. Sonlu elemanlar modellerinde kullanılan eleman sayıları ve serbestlik dereceleri 16

Çizelge 7.1. Deney adımı ve Eş Nümerik adım karşılaştırması 69

Çizelge 7.2. Nümerik analiz Kritik Yük için sonuçlar..... 70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Kullanılan sonlu eleman 11

Şekil 4.2. Deney numunelerinin geometrik özellikleri 12

Şekil 4.3. Oluşturulan sonlu elemanlar ağı 13

Şekil 4.4. Mesnetlenme durumu 14

Şekil 4.5. Yükleme noktaları 14

Şekil 5.1. Analiz prosedürü..... 15

Şekil 6.1. 1.nolu numune için hakim mod şekli..... 17

Şekil 6.2. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 18

Şekil 6.3. 1 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 18

Şekil 6.4. 1 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler..... 19

Şekil 6.5. 2.nolu numune için hakim mod şekli..... 20

Şekil 6.6. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 20

Şekil 6.7. 2 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 21

Şekil 6.8. 2 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler..... 22

Şekil 6.9. 3.nolu numune için hakim mod şekli..... 23

Şekil 6.10. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 23

Şekil 6.11. 3 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 24

Şekil 6.12. 3 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler..... 25

Şekil 6.13. 4.nolu numune için hakim mod şekli..... 26

Şekil 6.14. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 26

Şekil 6.15. 4 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 27

Şekil 6.16. 4 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler..... 28

Şekil 6.17. 5.nolu numune için hakim mod şekli..... 29

Şekil 6.18. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 29

Şekil 6.19. 5 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 30

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.20. 5 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 31

Şekil 6.21. 6.nolu numune için hakim mod şekli..... 32

Şekil 6.22. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 32

Şekil 6.23. 6 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 33

Şekil 6.24. 6 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 34

Şekil 6.25. 7.nolu numune için hakim mod şekli..... 35

Şekil 6.26. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 35

Şekil 6.27. 7 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 36

Şekil 6.28. 7 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 37

Şekil 6.29. 8.nolu numune için hakim mod şekli..... 38

Şekil 6.30. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 38

Şekil 6.31. 8 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 39

Şekil 6.32. 8 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 40

Şekil 6.33. 9.nolu numune için hakim mod şekli..... 41

Şekil 6.34. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 41

Şekil 6.35. 9 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 42

Şekil 6.36. 9 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 43

Şekil 6.37. 10.nolu numune için hakim mod şekli..... 43

Şekil 6.38. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 44

Şekil 6.39. 10 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 45

Şekil 6.40. 10 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 45

Şekil 6.41. 11.nolu numune için hakim mod şekli..... 46

Şekil 6.42. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 47

Şekil 6.43. 11 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 47

Şekil 6.44. 11 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 48

Şekil 6.45. 12.nolu numune için hakim mod şekli..... 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.46. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 49
Şekil 6.47. 12 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 50
Şekil 6.48. 12 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 50
Şekil 6.49. 13.nolu numune için hakim mod şekli..... 51
Şekil 6.50. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 52
Şekil 6.51. 13 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 52
Şekil 6.52. 13 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 53
Şekil 6.53. 14.nolu numune için hakim mod şekli..... 53
Şekil 6.54. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 54
Şekil 6.55. 14 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 55
Şekil 6.56. 14 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 55
Şekil 6.57. 15.nolu numune için hakim mod şekli..... 56
Şekil 6.58. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 57
Şekil 6.59. 15 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 57
Şekil 6.60. 15 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 58
Şekil 6.61. 16.nolu numune için hakim mod şekli..... 58
Şekil 6.62. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 59
Şekil 6.63. 16 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 60
Şekil 6.64. 16 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 60
Şekil 6.65. 17.nolu numune için hakim mod şekli..... 61
Şekil 6.66. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 62
Şekil 6.67. nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 62
Şekil 6.68. 17 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 63
Şekil 6.69. 18.nolu numune için hakim mod şekli..... 63
Şekil 6.70. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları 64
Şekil 6.71. 18 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği 65

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.72. 18 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler 65

Şekil 7.1. IPE profil üst başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)..... 71

Şekil 7.2. IPE profil alt başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses) 71

Şekil 7.3. IPE profil kayma merkezi yüklemeleri akma bölgesi (Von misses) 72

Şekil 7.4. UPE profil üst başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses) 72

Şekil 7.5. UPE profil alt başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)..... 72

Şekil 7.6. UPE profil kayma merkezi yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)..... 73

Şekil 7.7. I Profiller için deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması 74

Şekil 7.8. UPE Profiller için deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması 75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Deney düzeneği 10

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
kN	kiloNewton
m	Metre
mm	Milimetre
N	Newton
u_1	Yatay yer değiştirme
u_2	Düşey yer değiştirme
W_{xx}	Kesitin x eksenine göre elastik mukavemet momenti
W_{yy}	Kesitin y eksenine göre elastik mukavemet momenti
ε	Birim şekil değiştirme
σ_u	Malzemenin kopma gerilmesi
σ_y	Malzemenin akma gerilmesi
Φ	Burulma Açısı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
A	Kesit Alanı
cm	Santimetre
C_w	Çarpılma Katsayısı
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
h	Kesit yüksekliği
h_i	Kesitin başlık harici yüksekliği
I_x	x eksenine göre atalet momenti
I_y	y eksenine göre atalet momenti
I_η	η eksenine göre atalet momenti
I_ξ	ξ eksenine göre atalet momenti
J	Kesitin kutupsal atalet momenti

Kısaltmalar	Açıklamalar
L	Kiriş boyu
M	Moment
M_x	Kuvvetli eksen etrafındaki eğilme momenti
M_y	Zayıf eksen etrafındaki eğilme momenti
M_z	Burulma momenti
M_ζ	Burulmuş kesitteki etrafındaki burulma momenti
M_η	Burulmuş kesitte zayıf eksen eğilme momenti
M_ξ	Burulmuş kesitte kuvvetli eksen eğilme momenti
P	Kirişin ucuna etki eden tekil yük
Pel	Özdeğer analizinden bulunan elastik burkulma yükü
Pcr	ABAQUS analizi limit yük değeri
Pex	Deney sonucu ulaşılan yük değeri
Paqex	ABAQUS deney sonucuna eş en yakın yük değeri
P_{kr}	Kritik yanal burulmalı burkulma yükü
r	Kesitin köşe açısı
tf	Kesitin başlık kalınlığı
tw	Kesitin gövde kalınlığı

1. GİRİŞ

Bu çalışmada bir stabilite problemi olan çelik yapı elemanlarının yanal burulmalı burkulma durumu incelenmiştir. İnceleme esnasında daha önceden yapılmış deneysel çalışmaların verilerinin nümerik olarak sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmış ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma, konu ile ilgili gerekli ve detaylı literatür incelemesiyle başlamaktadır. Bu literatür araştırması baz alınarak bir sonlu elemanlar yazılımı ile sistem modellenmiş ve yapılan modellemeye dair bilgiler verilmiştir. Hemen ardından modellemede kullanılan analiz yöntemleri ve sonuçları paylaşılmıştır. Çalışmada deneysel veriler ve buna karşılık gelen sonlu elemanlar analizi sonuçları kıyaslanmıştır. Deney düzeneğinin ölçüm sınırlarına ulaşması nedeniyle böyle bir yöntem izlenmesi gerekmiştir. Sonrasında ABAQUS yazılımıyla analiz bu sonuçların ötesine taşınmıştır. Kritik yük değerleri elde edilmiş , sonuçlar yorumlanmıştır.

Literatürde benzer çalışmalar incelenmiş ve IPE ve UPE konsol kirişler ile ilgili böyle bir numerik analiz çalışması yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmayı gerçekleştirmek amacıyla tez çalışmasına yön belirlenmiştir. Çalışmada konsol kirişlerin yükleme altındaki davranışı, yükleme noktası çubuk boyu profil tipi gibi değişkenlere bağlı olarak incelenmiştir. Dolayısıyla, bu çalışma kritik yükün yükleme noktası çubuk boyu ve profil tipine göre değişimini incelemek amacını gütmektedir.

Çalışmada Gazi üniversitesi yapı laboratuvarında yapılmış olan IPE ve UPE konsol kiriş profillerinin artan bir yükleme altında yüke bağlı konsol ucu yer değiştirmelerinin ve profillerin belirli noktalarda açı değişimlerinin ölçülmesi ile elde edilen sonuçlar derlenmiştir. Aynı sistem ABAQUS yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir [5]. Lineer ve nonlineer analizler yapılarak deneyle eş noktalardan elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Sonlu elemanlar çözümü için iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir. İlk aşamada öz değer burkulma analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda belli bir geometrik ön kusura karar verilmiştir. Ardından bir nonlineer riks analizi yapılarak kritik yük bulunmuştur. Deney

sonuçlarının alındığı noktalara karşılık gelen noktalarda yazılımdan da aynı okumalar yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yanal burulmalı burkulma konusunda literatür geneli tarandığında birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu bölümde daha önce yapılan bu çalışmalar incelenmiştir.

Ahnlen (2013) Bu çalışmada lineer burulmalı burkulma analizi yapabilen dört bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Yükleme noktasının etkisi değerlendirilmiştir. Kullanılan yazılımların, kullandıkları yöntem bakımından farklılıkları ortaya konmuştur [1].

Andrade A. (2007) Tek simetri eksenli değişken kesitli ince cidarlı I kirişlerin yanal burkulmalı burulma hali kabuk sonlu elemanlar ve 1 boyutlu elemanlar ile incelenmiştir. Genel olarak kısa kirişler hariç sonuçların benzer olduğu görülmüştür [2].

Dahmani L. (2015) Bu çalışmada, eksantrik yüklü U profillerin yanal burkulmalı burulma durumu incelenmiştir. Çalışmada Eurocode 3 ile uyumlu yeni bir tasarım yöntemi denenmiştir. Düzeltilen tasarım yönteminin, Sonlu Elemanlar simülasyonlarından elde edilen kirişlerin yanal burulma burkulma yükünün %0.5'inden bile daha az bir şekilde eksik tahmin edilmesine yol açabileceği sonucuna varılmıştır [4].

De'nan (2017) Yapılan bu çalışmada gövdelerinde boşluk bulunan ve bulunmayan I kirişlerinin yanal burulmalı burkulma davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışmada birkaç farklı çeşit boşluk şekli ve büyüklüğü değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları bu değişkenlerden etkilenmektedir. Bu çalışma sonunda optimum bir değişken değeri tespit etmişlerdir. Burkulma momenti boşluk ebatlarının büyümesiyle azalmıştır. Çalışmada özdeğer burkulma analizi yapılmış ve LUSAS isimli sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır [6].

Kabir, I (2016) Bu çalışmada kaynaklı geniş başlıklı kirişlerin yanal burulmalı burkulması incelenmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar analizi nonlineer olarak gerçekleştirilmiştir. ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Analiz sonuçlarının daha önce yapılan deneysel sonuçlarla büyük oranda uyuştuğu gözlenmiştir [8].

Özbaşaran H. (2013) Bu çalışmada I kirişlerin yanal burulmalı burkulma değeri çeşitli yükleme noktalarıyla hesaplanmış ve burkulma momentleri ABAQUS yazılımı ile yapılan

analizlerle kıyaslanarak raporlanmıştır. Kirişin narinliğini azaltmanın yanal burulmalı burkulma dayanımını artıracağı tespit edilmiştir [12].

Snijder B. (2018) Çalışma, lineer olmayan sonlu eleman analizlerinde kullanılması için geometrik kusur oranlarıyla ilgilidir [13].

Vales J. (2017) Çalışmada sonlu eleman modeli kabuk elemanlar ve katı elemanlar ile modellenmiştir. ABAQUS yazılımında kabuk elemanlar, Ansys yazılımında ise katı modelleme yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırılmış, avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur [17].

Yılmaz T. (2016) Bu çalışmada basit mesnetli IPE ve IPN kirişlerin kritik yanal burulmalı burkulma yükünün uygun denklemlerle çözülmesi hedeflenmiştir. Çalışma analitik ve parametrik bir incelemedir. Çalışmada ayrıca narinliğin ve yükün etkime noktasının etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonu ile sonuçlar birbiriyle uyum içerisindedir [18].

Degenhardt R. Çalışmasında kabuk elemanların quasi-statik ve dinamik yükler altındaki burkulma ve ileri burkulma analizlerini gerçekleştirmiştir. Özdeğer analizi ile geometrik kusurları tanımlamış Newton-Raphson methodu ile nonlineer analiz yaparak sonuca ulaşmıştır [19].

Mohebkhah A. (2016) çalışmasında narin kesitlerin nonlineer analizini sonlu elemanlar metodu ile yanal burulmalı burkulması üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Nonlineer analiz için riks methodu kullanmıştır. Geometrik kusurları Özdeğer analizi sonrasında modele yansıtmıştır [20].

Novoselac S., Bir çubuk elemanın burkulma ve ileri burkulma analizlerini gerçekleştirmiştir. ABAQUS yazılımı kullanmış, gemotrik kusur tanımlamış, riks analizi ile sonuca ulaşmıştır [21].

Mohri F. (2008) Çalışmada bir sonlu elemanlar yazılımı ola ABAQUS programı kullanılmıştır. Analitik sonuçları nümerik sonuçlar ile karşılaştırmıştır. İki aşamalı bir analiz yapmıştır. İlk aşamada kiriş geometrisi kusurlu bir hale getirilmiştir. İkinci aşamada yatay yükler altındaki kirişin davranışı incelenmiştir [22].

Kabir I. (2016) bu çalışmada geniş başlıklı kaynaklı kirişlerin yanal burulmalı burkulma durumunu incelemiştir. Çalışmasında ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış, özdeğer burkulma analizi yaparak modele bir miktar geometrik ön kusur tanımlamıştır. Ayrıca bu çalışmada artık gerilmeler modellenerek, artık gerilmelerin etkisi de dikkate alınmıştır [23].

3. YANAL BURULMALI BURKULMA

Çelik yapı sistemleri genellikle narin sistemlerdir. Bu sebeple yapı stabilitesi oldukça önemlidir. Burkulma problemi bu tür sistemlerde ani göçmelere sebep olabilmektedir. Burkulma kavramı temel olarak elamanın rijitliği ile ilgilidir. Yanal burulmalı burkulma, eğilmeli burulmalı burkulmanın bir modudur. Elemanın kesitinin gövde kesitinde bir bozulma olmaksızın dönerek yana doğruda hareket etmesi halini ifade eder (Mohri, 2008). Narinliği fazla olan kesitler kesit kapasitesine ulaşmadan burkulabilirler. Uzun konsol kirişler, kısa olanlara kıyasla daha küçük yüklerde burkulabilir (Trahair, 1983). Eşit uzunluktaki kirişlerin narin kesitli olanları daha küçük yükler altında burkulabilir.

Kısaca özetlendiğinde yanal burulmalı burkulma mekanizmasına etki eden parametreler; kayma modülü, elastisite modülü gibi malzeme özellikleri, Burulma ve çarpılma sabiti gibi kesit özellikleri, kirişin uzunluğu, mesnet koşulları, yükün etkitildiği yer ve yükün tipi denilir (Bradford, 1997). Bunların haricinde kirişin kapasitesini azaltabilecek diğer parametreler; plastik malzeme özellikleri, malzeme iç kusurları, üretim kaynaklı artık gerilmeler, kirişin yerel burkulmaya uğraması, geometrik kusurlar olarak sayılır (Lee, 1994).

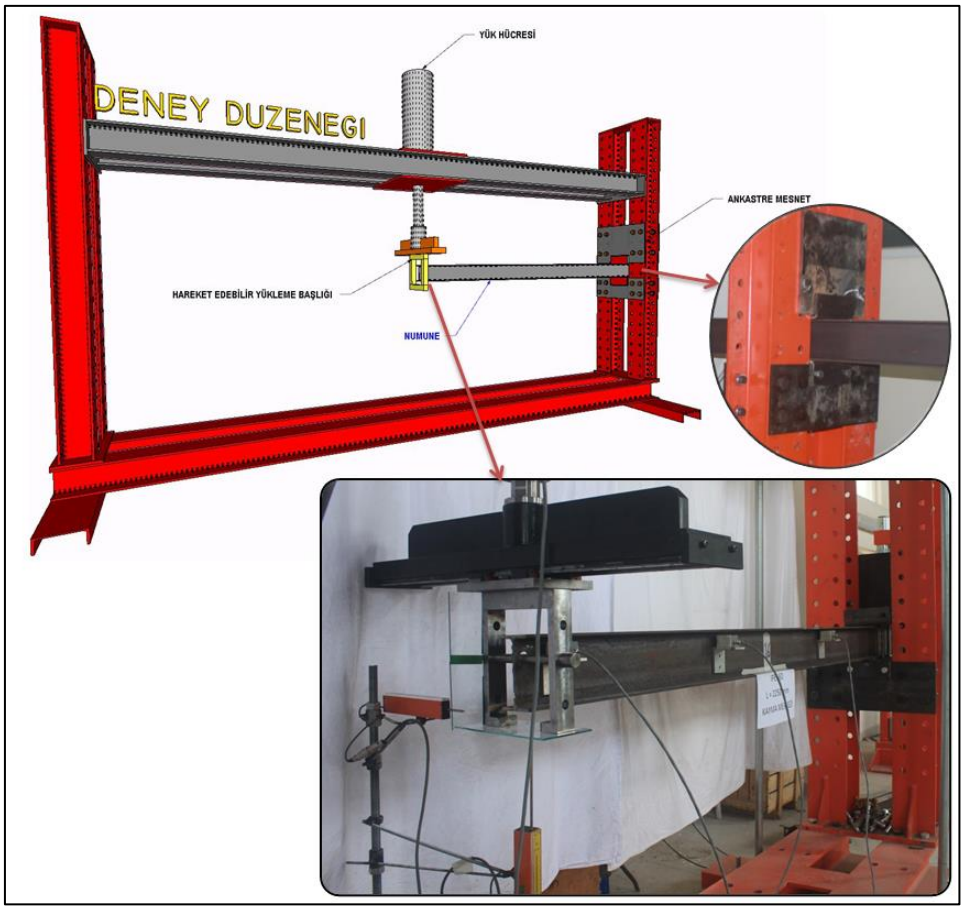
Çelik bir yapıda kiriş daha etkin kullanılmak üzere kuvvetli ekseni eğilme momentinin büyük olduğu yönde yerleştirilir (Özbaşaran 2015). Yükün belirli bir değeri aşmasıyla kesit zayıf eğilme ekseninde burularak burkulur.

4. ANALİTİK MODELİN OLUŞTURULMASI

Deneysel çalışmalar Gazi üniversitesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 9 adet IPE160 ve 9 adet UPE80 profil üç farklı boy ve üç farklı yükleme noktası için toplamda 18 adet numune test edilmiştir. Tüm bu numuneler bilgisayar ortamında gerçeğe en yakın şekilde modellenmiştir.

4.1. Deney Düzeneği

Deney düzeneği çelik bir çerçeve sistem, yapılan yüklemeyi kaydedebilmek için bir yük hücresi ve hidrolik pompadan oluşmaktadır. Ayrıca yatay ve düşey deplasmanların ölçülebilmesi için lvdt cihazları, kirişin dönme açılarının elde edilebilmesini sağlayan ivmeölçerler ve sensörlerden gelen verilerin sayısal olarak kaydedilebilmesini sağlayan data logger ve bilgisayar sistemi kullanılmıştır. Deney düzeneği şekil 4.1'de gösterilmiştir. Hidrolik pompa sayesinde yükleme adım adım yapılmıştır. Yükleme başlığı kirişin konsol olan ucuna serbestçe hareket edebilme kabiliyeti sağlamaktadır. Yük hücresi sabit olmadığından konsol olan uç tüm doğrultularda serbesttir. Yükün etki ettiği nokta dönme serbestliklerine izin verecek şekilde ayarlanmıştır.



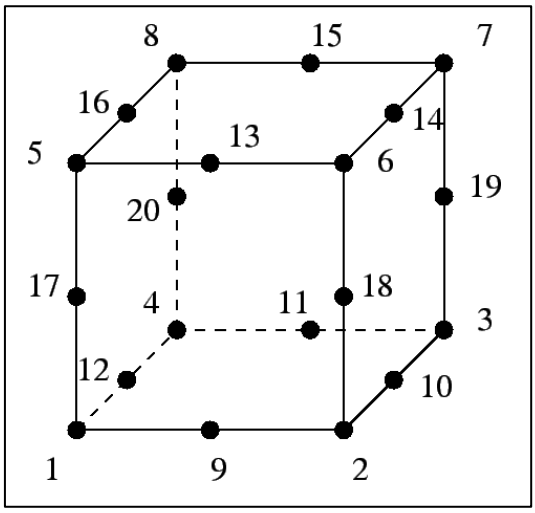
Resim 4.1. Deney düzeneği

4.2. Eleman Tipi ve Numuneler

Deneylerde kullanılan numuneler Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. İki profil tipi için 2750mm, 2500mm ve 2250mm olmak üzere üç farklı yükleme noktası için toplamda 18 model oluşturulmuştur. ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile modellerken genel amaçlı kuardatik tuğla eleman kullanılmıştır. Bu sayede kesitin geometrisi birebir modellenebilmiştir. Kesitin oval kısımları modele dahil edilmiştir. Shell tipi elemanlar ile yaklaşım yapılmasından kaçınılmıştır. Kullanılan eleman tipi şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan numuneler

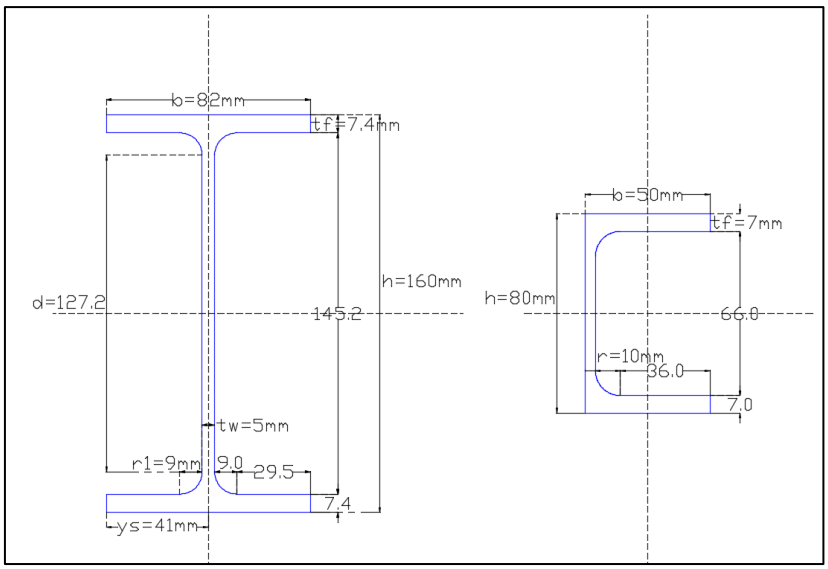
Numune Numarası	Konsol Uzunluğu	Profil	Yükleme Noktası
1	2750	IPE160	Üst Başlık
2	2500	IPE160	Üst Başlık
3	2250	IPE160	Üst Başlık
4	2750	IPE160	Alt Başlık
5	2500	IPE160	Alt Başlık
6	2250	IPE160	Alt Başlık
7	2750	IPE160	Gövde
8	2500	IPE160	Gövde
9	2250	IPE160	Gövde
10	2750	UPE80	Üst Başlık
11	2500	UPE80	Üst Başlık
12	2250	UPE80	Üst Başlık
13	2750	UPE80	Alt Başlık
14	2500	UPE80	Alt Başlık
15	2250	UPE80	Alt Başlık
16	2750	UPE80	Gövde
17	2500	UPE80	Gövde
18	2250	UPE80	Gövde



Şekil 4.1. Kullanılan sonlu eleman

4.3. Kesit Özellikleri

Numunelerin geometrik özellikleri şekil 4.3'de gösterilmiştir. Çizelge 4.2'de iki kesit tipi içinde kesit özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deney numunelerinin geometrik özellikleri

Çizelge 4.2. Deneyde kullanılan numuneler

UPE80 Geometrik Özellikler	Kesit Özellikleri	
h = 80 mm	Y ekseni	X Ekseni
b = 50 mm	I_y = 1.07E+6 mm4	I_z = 2.55E+5 mm4
t_f = 7 mm	W_y = 2.68E+4 mm3	W_{z1} = 7984 mm3
t_w = 4 mm		W_{z2} = 1.40E+4 mm3
r = 10 mm	$W_{y,pl}$ = 3.12E+4 mm3	$W_{z,pl}$ = 1.43E+4 mm3
y_s = 18.2 mm	i_y = 32.6 mm	i_z = 15.9 mm
y_m = 37.1 mm	S_y = 1.56E+4 mm3	
d = 46 mm	Çarpılma ve Burulma	
A = 1010 mm^2	I_w = 2.21E+8 mm6	I_t = 1.47E+4 mm4
A_L = 0.34342 $m^2.m^{-1}$	i_w = 9 mm	i_{pc} = 36.3 mm
IPE160 Geometrik Özellikler	Kesit Özellikleri	
h = 160 mm	Y ekseni	X Ekseni
b = 82 mm	I_y = 8.69E+6 mm4	I_z = 6.83E+5 mm4
t_f = 7.4 mm	W_{y1} = 1.09E+5 mm3	W_{z1} = 1.67E+4 mm3
t_w = 5 mm	$W_{y,pl}$ = 1.24E+5 mm3	$W_{z,pl}$ = 2.61E+4 mm3
r_1 = 9 mm	i_y = 65.80 mm	i_z = 18.40 mm
y_s = 41 mm	S_y = 6.19E+4 mm3	S_z = 1.30E+4 mm3
d = 127.2 mm	Çarpılma ve Burulma	
A = 2010 mm2	I_w = 3.96E+9 mm6	I_t = 3.58E+4 mm4
A_L = 0.62 m2.m-1	i_w = 20.50 mm	i_{pc} = 68.30 mm

4.4. Malzeme Özellikleri

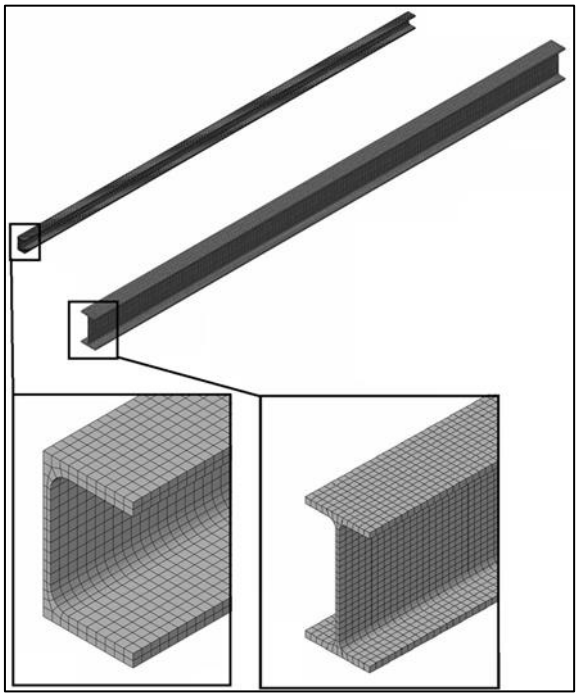
Modellerde kullanılan malzeme özellikleri çizelge 4.3'de gösterilmiştir. ABAQUS modeli oluşturulurken nonlineer analiz için bilineer malzeme modeli kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Malzeme özellikleri

IPE160		UPE80	
Akma Dayanımı(MPa)	310	Akma Dayanımı(MPa)	425
Kopma Dayanımı (MPa)	430	Kopma Dayanımı (MPa)	590
Elastisite Modülü (GPa)	152	Elastisite Modülü (GPa)	171

4.5. Sonlu Elemanlar Ağı

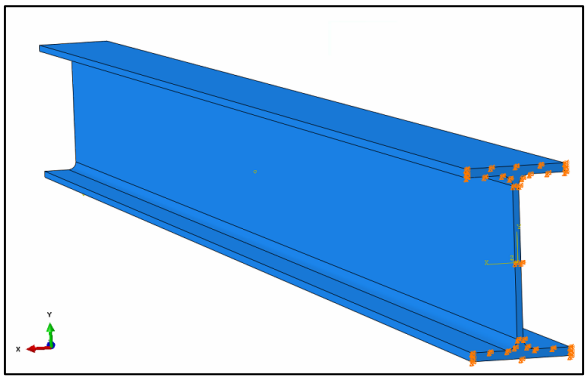
Sonlu eleman modeli oluşturulurken uygun ağ belirlenmiş, ağ geometrisi test edilmiştir. Hassasiyet arttırabilmek için oluşturulan ağ geometrisi Trahair'in de makalesinde dikkat çektiği gibi olabildiğince simetrik ve küçük tutulmuştur (1983). Tüm numuneler için özdeş ağ oluşturulmuştur. Şekil 4.4'de iki eleman kesiti içinde oluşturulan ağ görülebilir.



Şekil 4.3. Oluşturulan sonlu elemanlar ağı

4.6. Mesnet Şartları

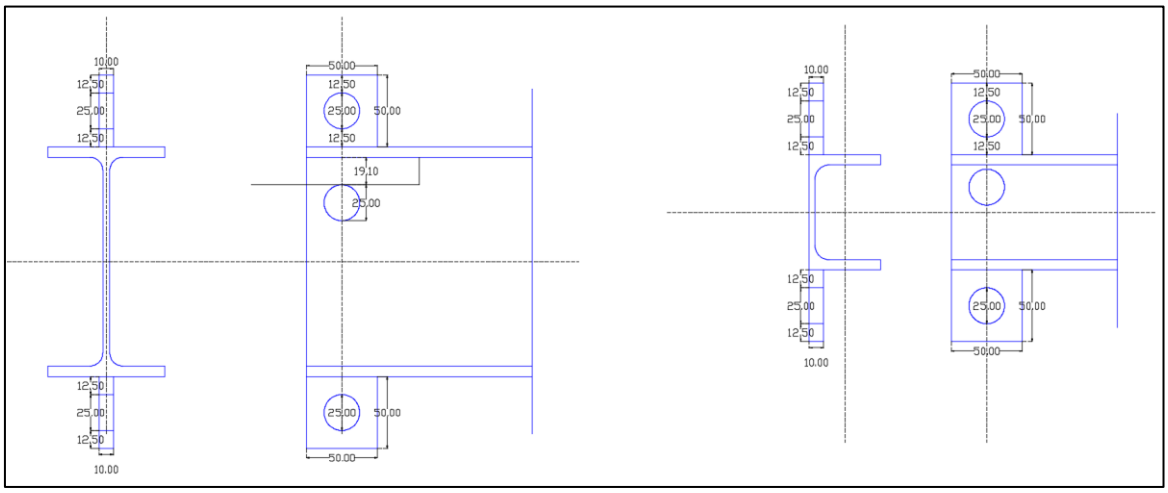
Mesnet şartları seçilirken eleman tipi göz önünde bulundurulmuş, kirişin bir ucu 3 doğrultuda harekete karşı tutulmuştur. Kullanılan eleman tipi rotasyonlardan bağımsızdır. Bu sebeple rotasyonlarla ilgili mir sınır şartı verilmemiştir. Şekil 4,4'de mesnet noktaları gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Mesnetlenme durumu

4.7. Yükleme Noktaları

Yükleme noktaları deney düzeneğinde olduğu gibi üst başlık, alt başlık ve gövde olmak ayrı ayrı düğüm noktalarına yapılmıştır. Şekil 4,6'da iki tip kesit içinde yükleme noktaları gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Yükleme noktaları

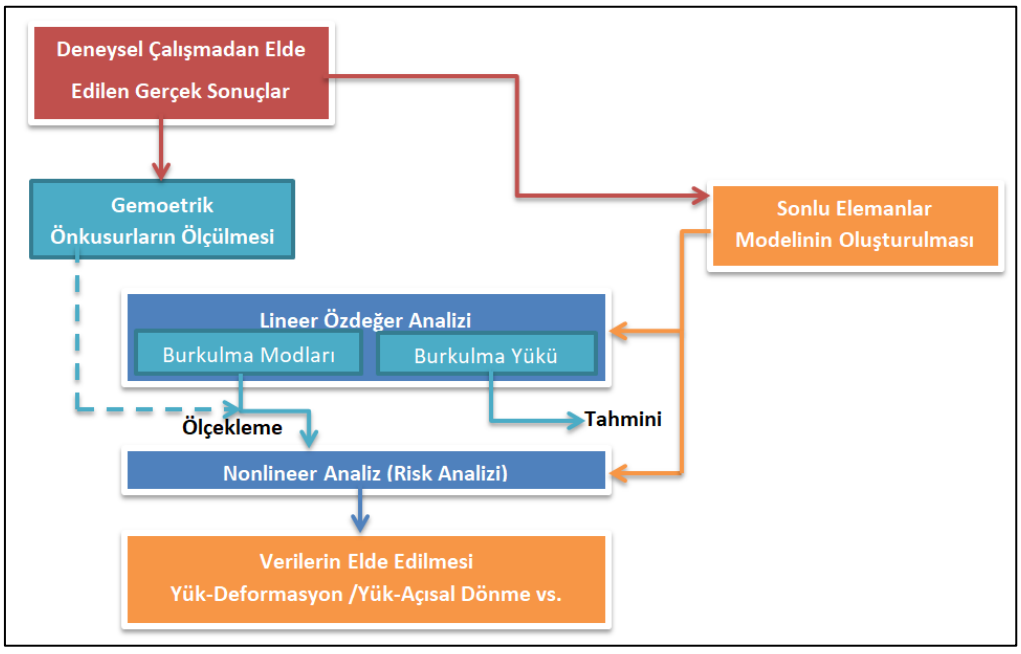
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

5.1. Genel Bilgiler ve Uygulanan Prosedür

Oluşturulan Sonlu analiz modeline uygulanan çözüm yöntemi şekil 5,1'de gösterilmiştir. Bu prosedür Degenhardt R. [19] prosedürü ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Model iki farklı analize tabi tutulmuştur. İlk olarak Özdeğer burkulma analizi gerçekleştirilmiş ardından riks analizi yapılmıştır.

Özdeğer burkulma analizi için öncelikle deneysel çalışmada profilin yaptığı hareket doğrultusu belirlenmiştir. Özdeğer burkulma analizinde malzeme özellikleri lineer tanımlanmıştır. Bu analiz 3 mod için ayarlanmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda profilin almış olduğu şekil, analitik çalışmanın hakim modu kabul edilerek bu mod bir ölçekleme ile beraber ikinci modelin şeklini belirlemede ve yaklaşık olarak burkulma yükünü belirlemede kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Analiz prosedürü

Riks analizinde geometrik nonlinearlik uygulanmış, nonlineer malzeme özellikleri modele dahil edilmiştir.

Yapılan çalışma 128gb ram, 40 çekirdekli işlemcisi olan bir bilgisayar sayesinde eleman sayısı oldukça fazla olmasına rağmen hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Eleman sayıları, düğüm noktası sayıları ve toplam serbestlik derecesi Çizelge 5,1'de gösterilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda deneysel çalışmada ölçüm yapılan noktalara karşılık gelen analitik modelin düğüm noktalarından her numune için bir adet düşey yer değiştirme sonucu ve bir adet yatay yer değiştirme sonucu yüke bağı olarak elde edilmiştir. Bunun dışında deneysel çalışmada olduğu gibi belirli noktalar için açısal dönmeler düğüm noktası yer değiştirmesinden hareketle bulunmuştur.

Ayrıca malzemenin akma noktasını aşan bölgeleri kritik yük adımı için grafiksel olarak çalışma içerisinde gösterilmiştir.

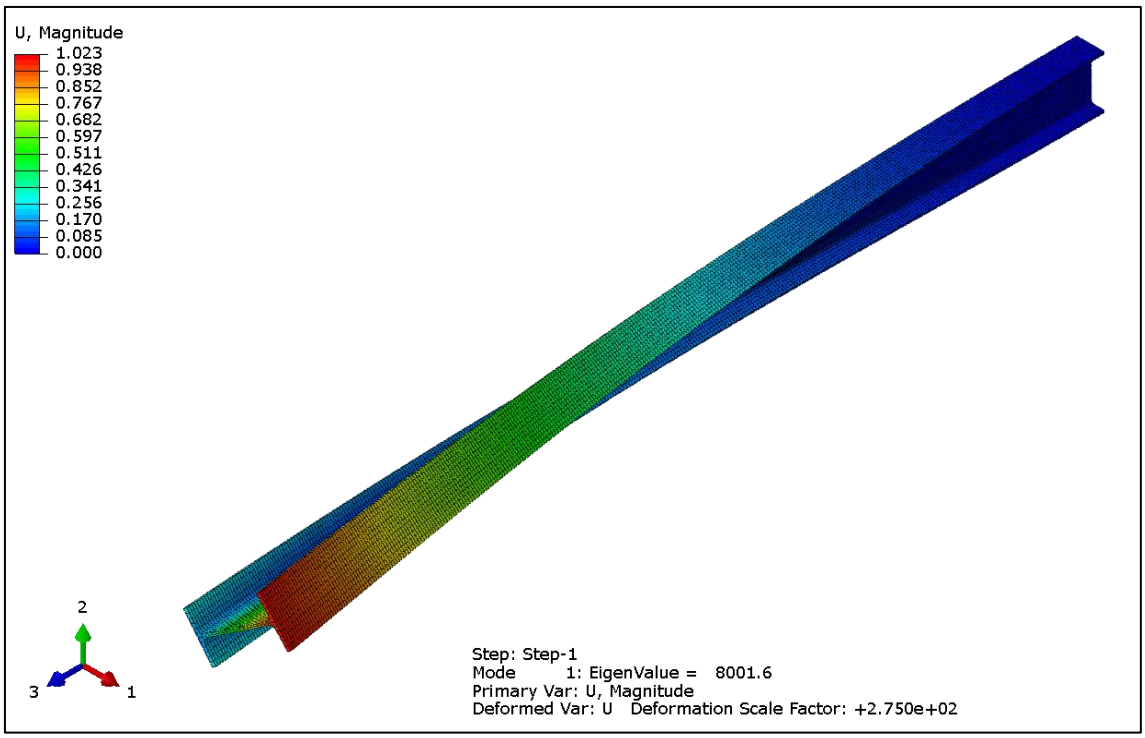
Çizelge 5.1. Sonlu elemanlar modellerinde kullanılan eleman sayıları ve serbestlik dereceleri

	IPE160 Profiller için			UPE80 Profiller için		
Eleman Uzunluğu (mm)	2250	2500	2750	2250	2500	2750
Eleman sayısı	17536	19520	21440	29700	33000	36300
Node Sayısı	107141	119231	130931	168571	187271	205971
Toplam serbestlik derecesi	321423	357693	392793	505713	561813	617913

6. ANALİZ SONUÇLARI

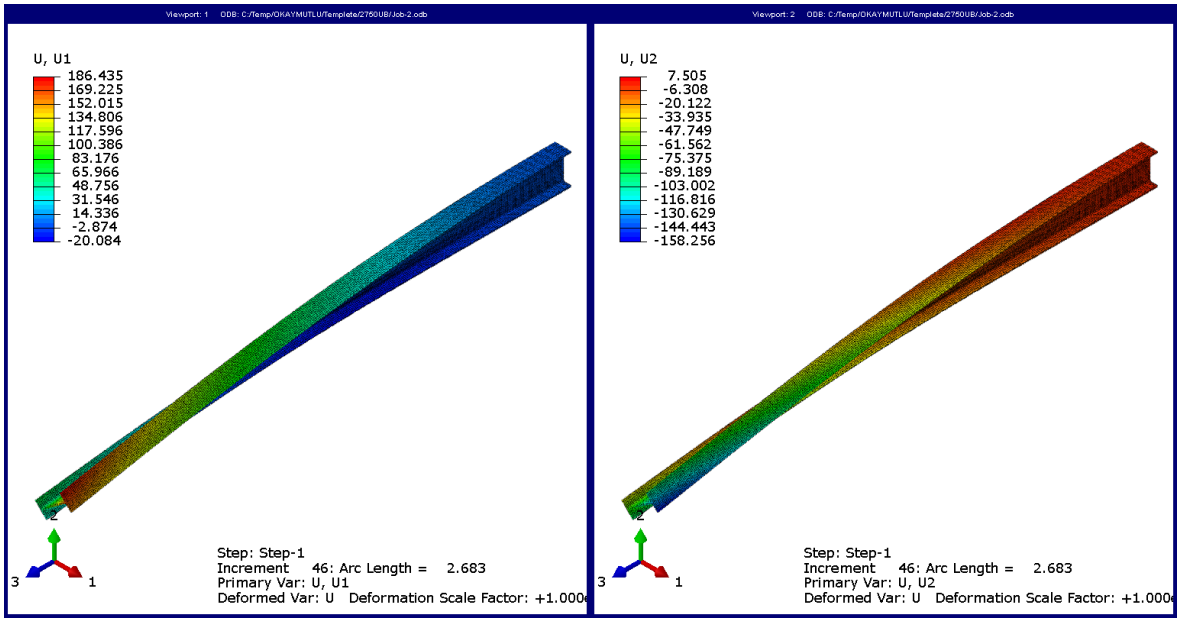
6.1. 1 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2750mm uzunluğundadır. IPE160'lik profil üst başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil 6,1'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 8001.6N olarak bulunmuştur.



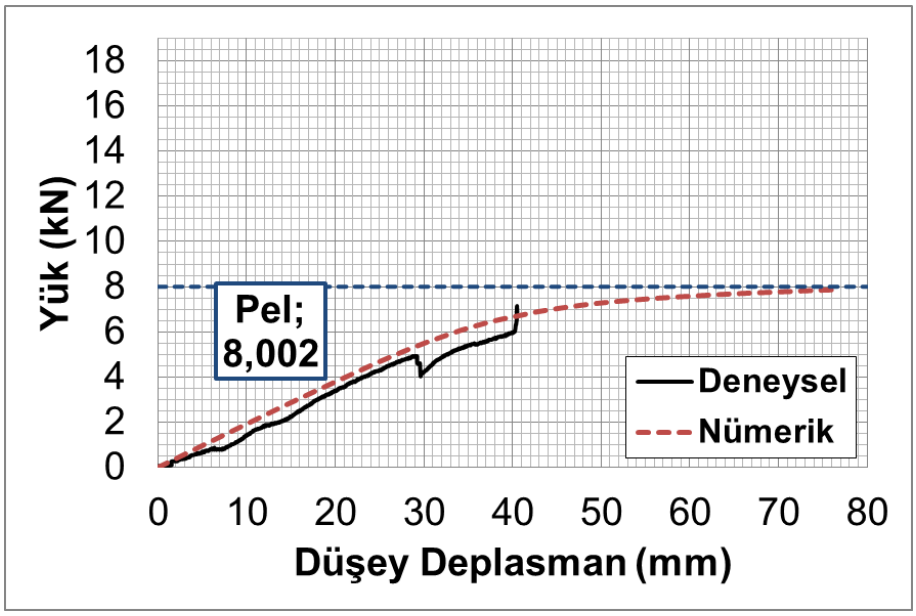
Şekil 6.1. 1.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 8124,75N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 46 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6,2'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

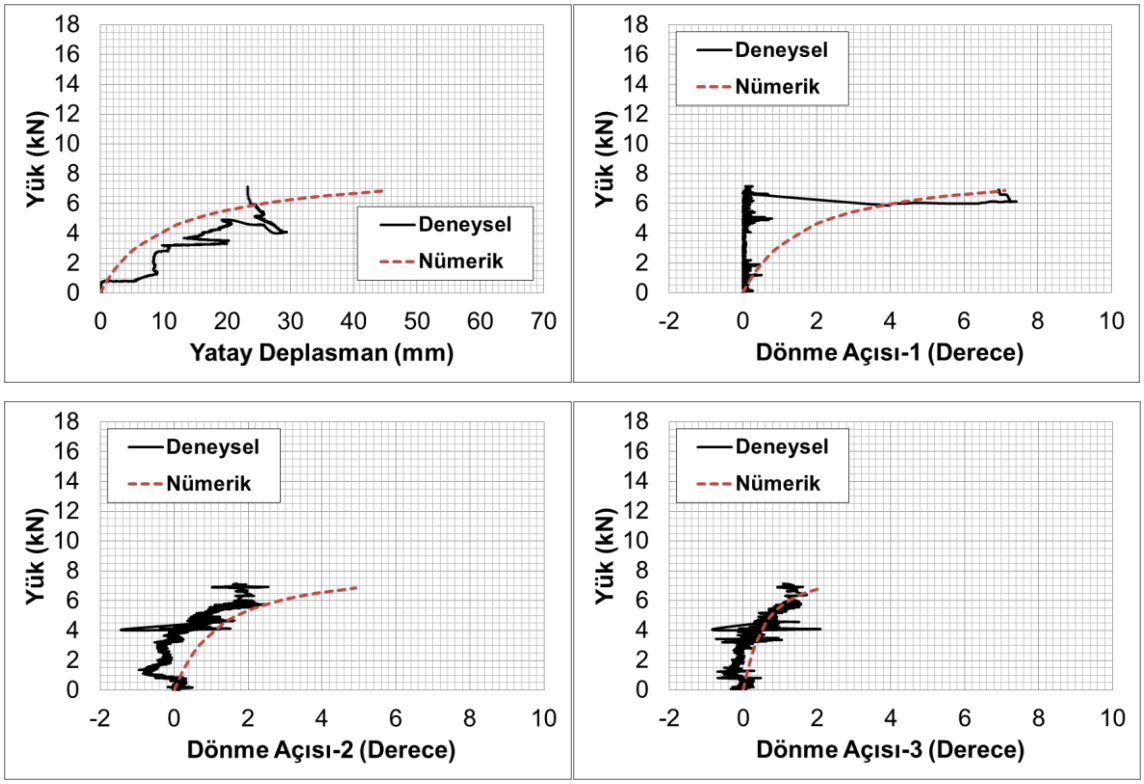


Şekil 6.2. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,3'te yük düşey deplasman, Şekil 6.4'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



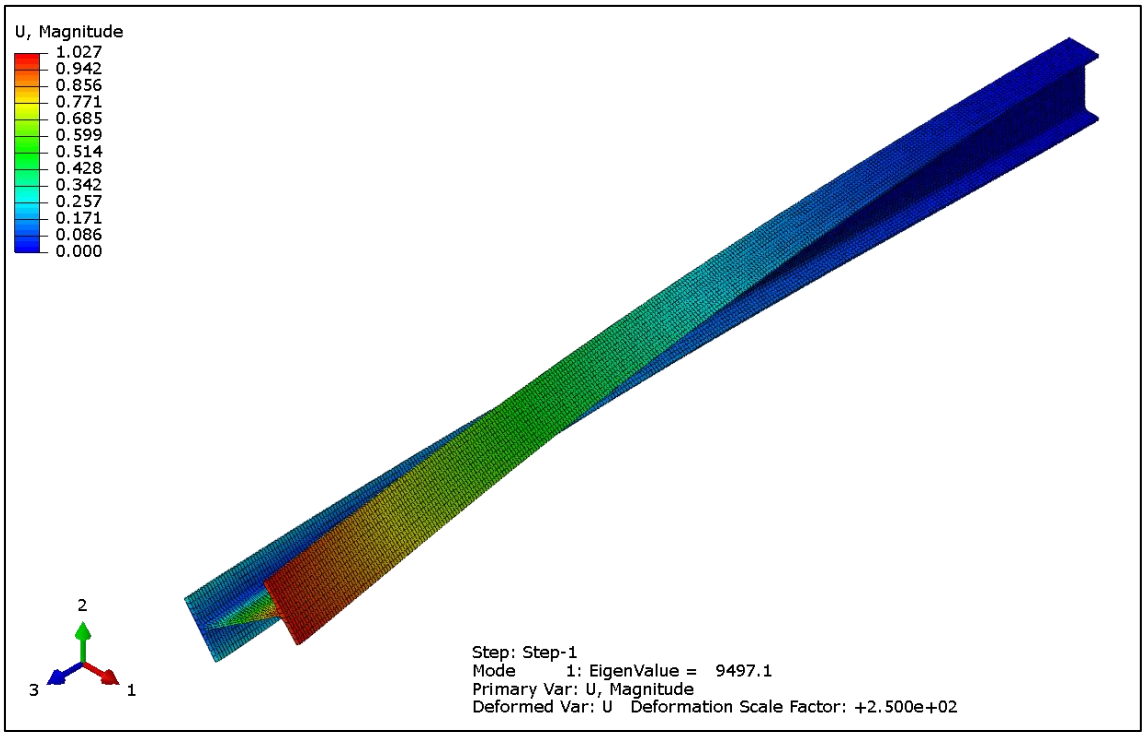
Şekil 6.3. 1 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.4. 1 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

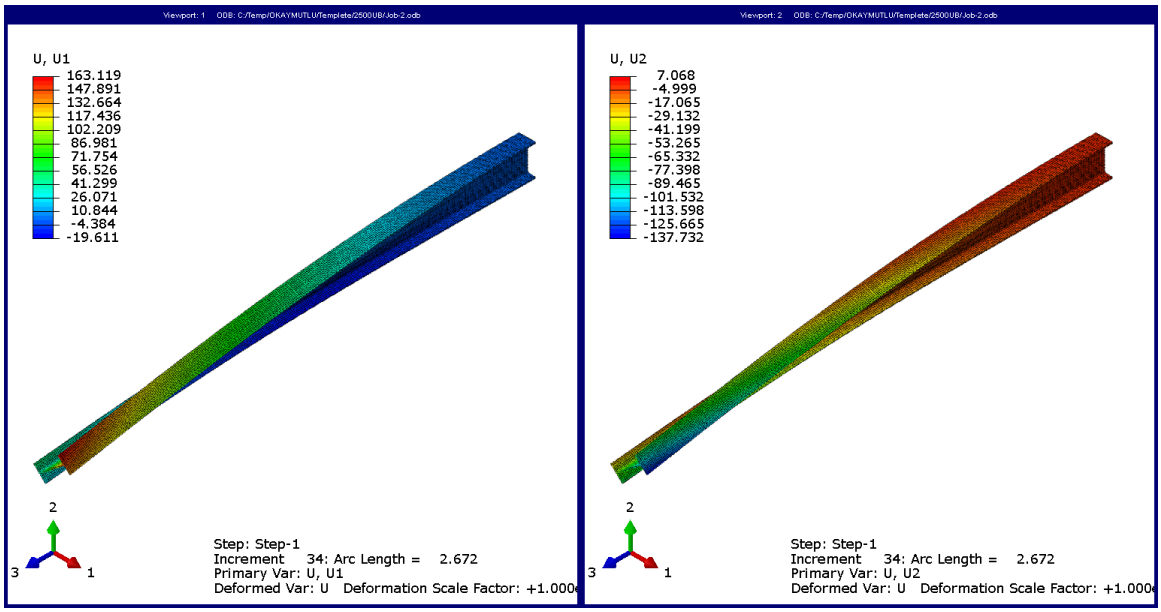
6.2. 2 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2500 mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin üst başlığından yükleme yapılmıştır. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6,5'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 9497,1 N olarak bulunmuştur.



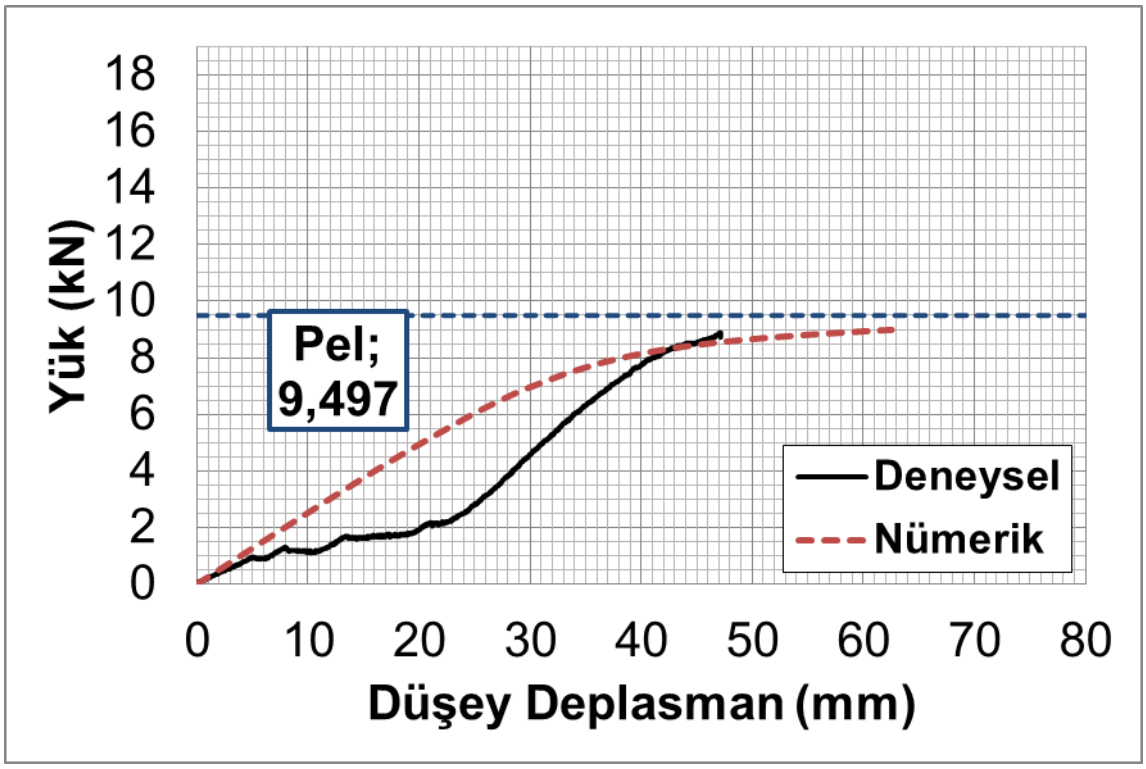
Şekil 6.5. 2.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 9357,32N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 34 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6,6'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

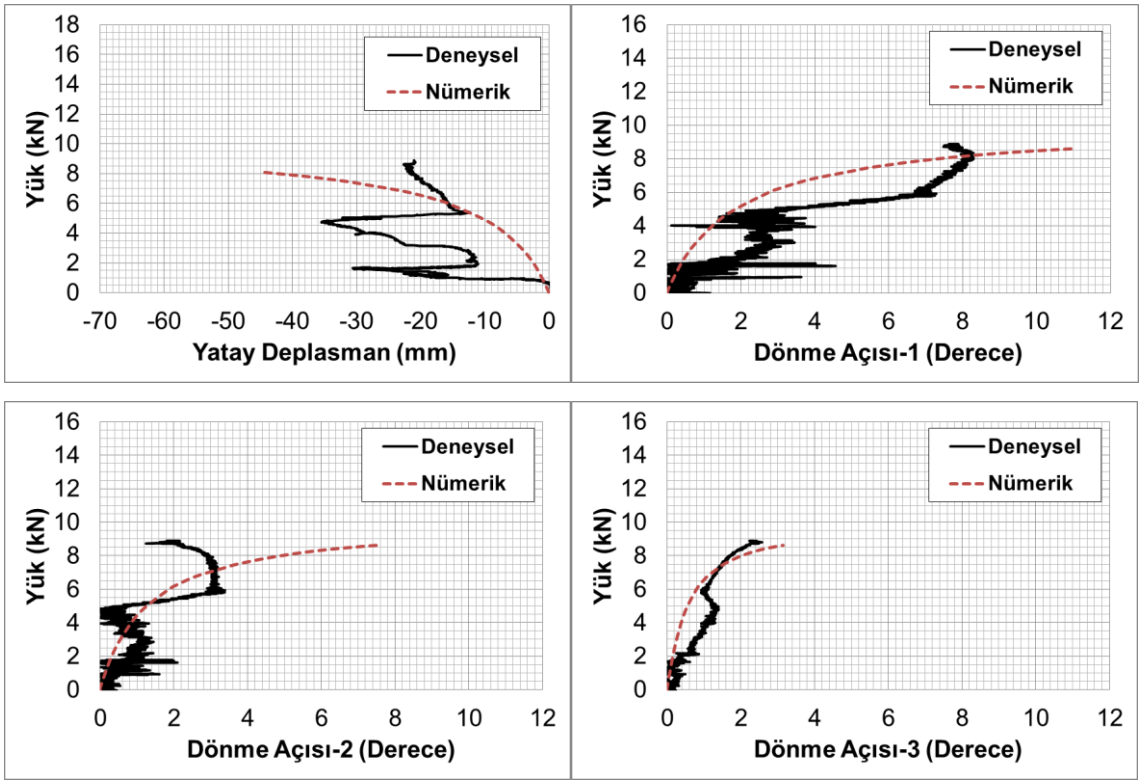


Şekil 6.6. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6.7'de yük düşey deplasman, Şekil 6.8'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



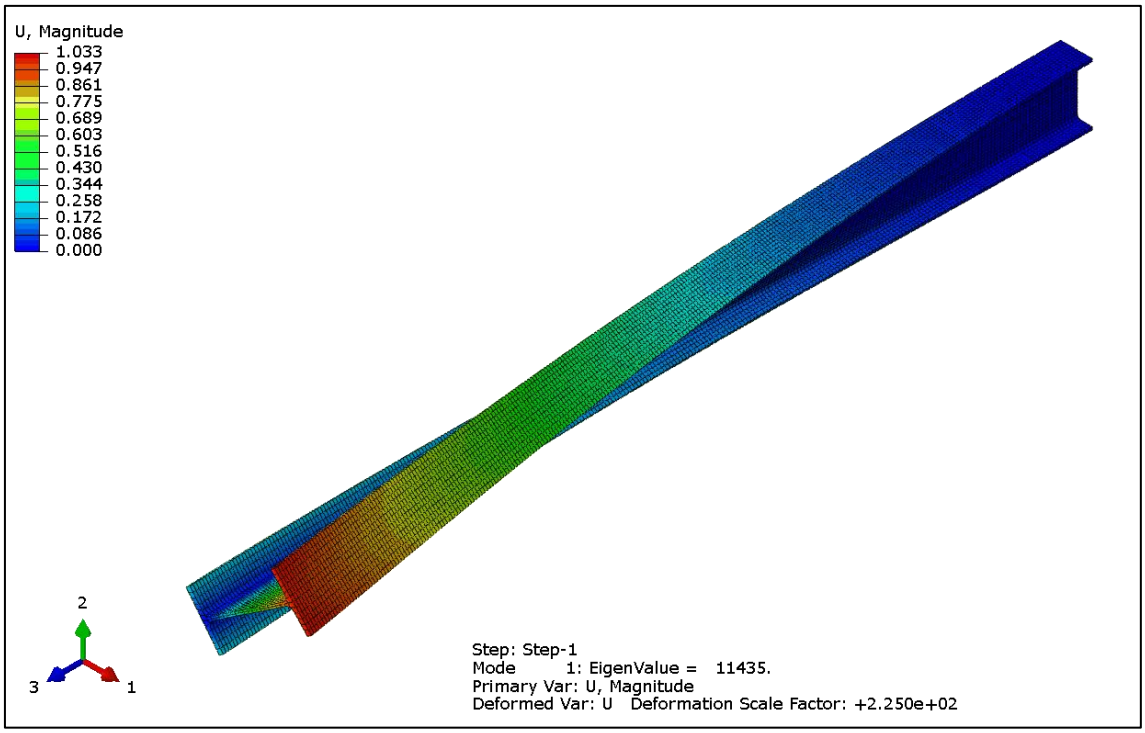
Şekil 6.7. 2 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.8. 2 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

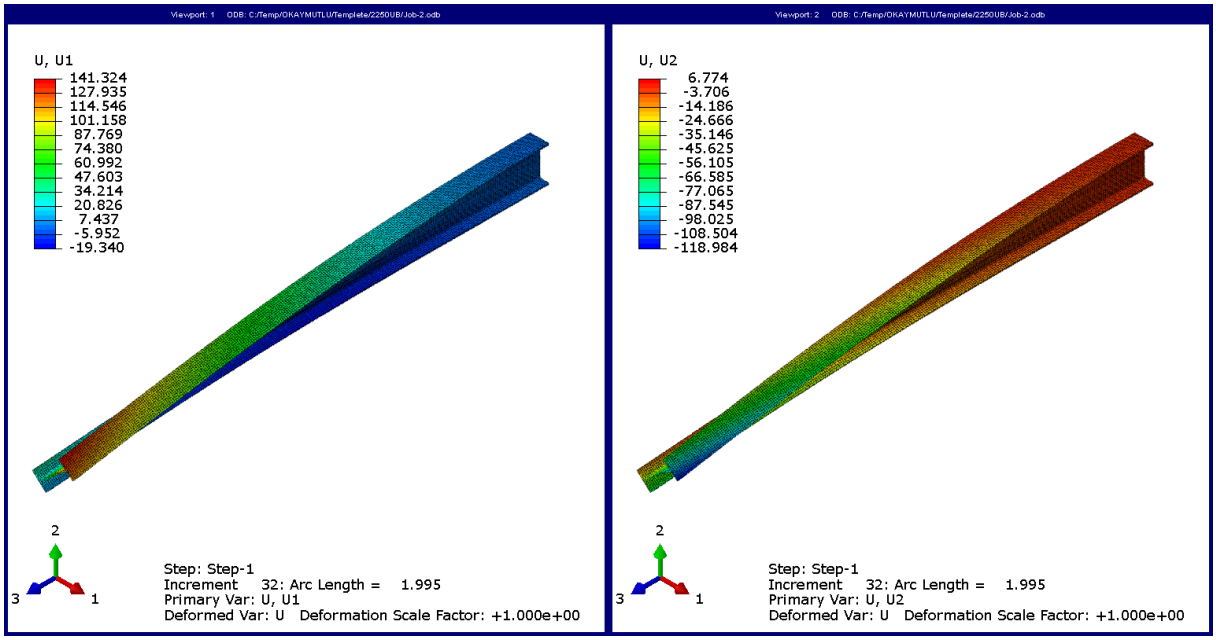
6.3. 3 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2250mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin üst başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.9'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 11435N olarak bulunmuştur.



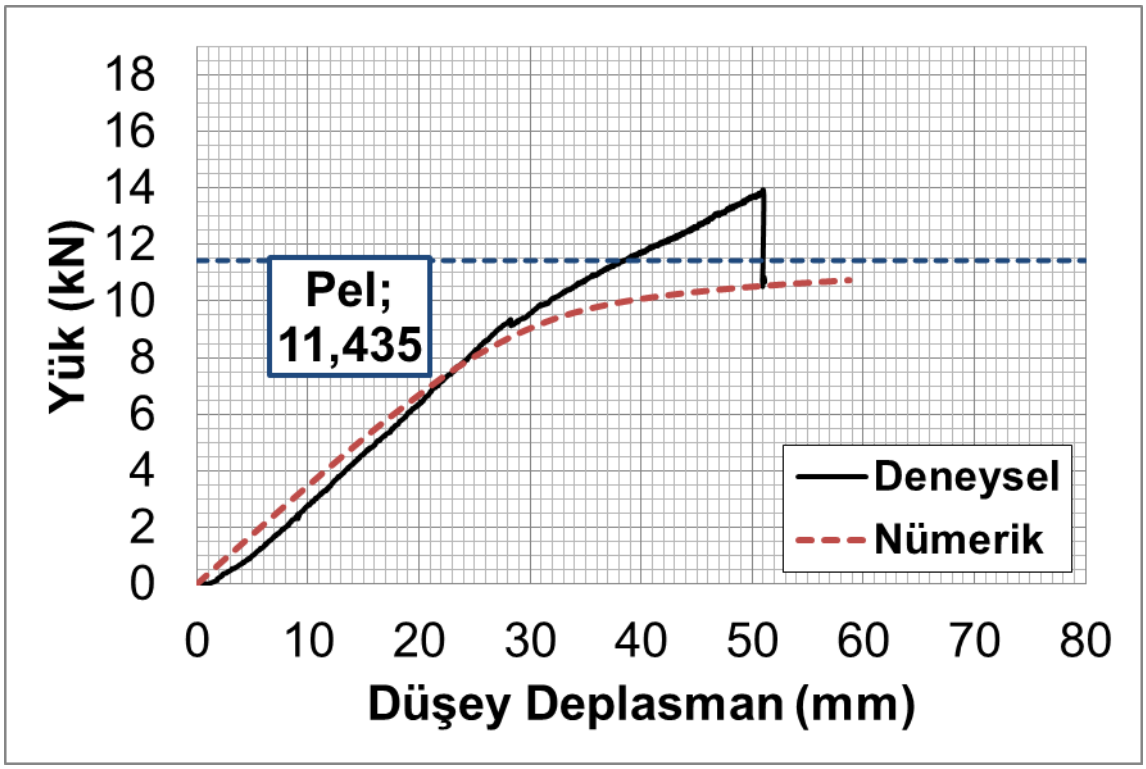
Şekil 6.9. 3.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 11024,3N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 32nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.10'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

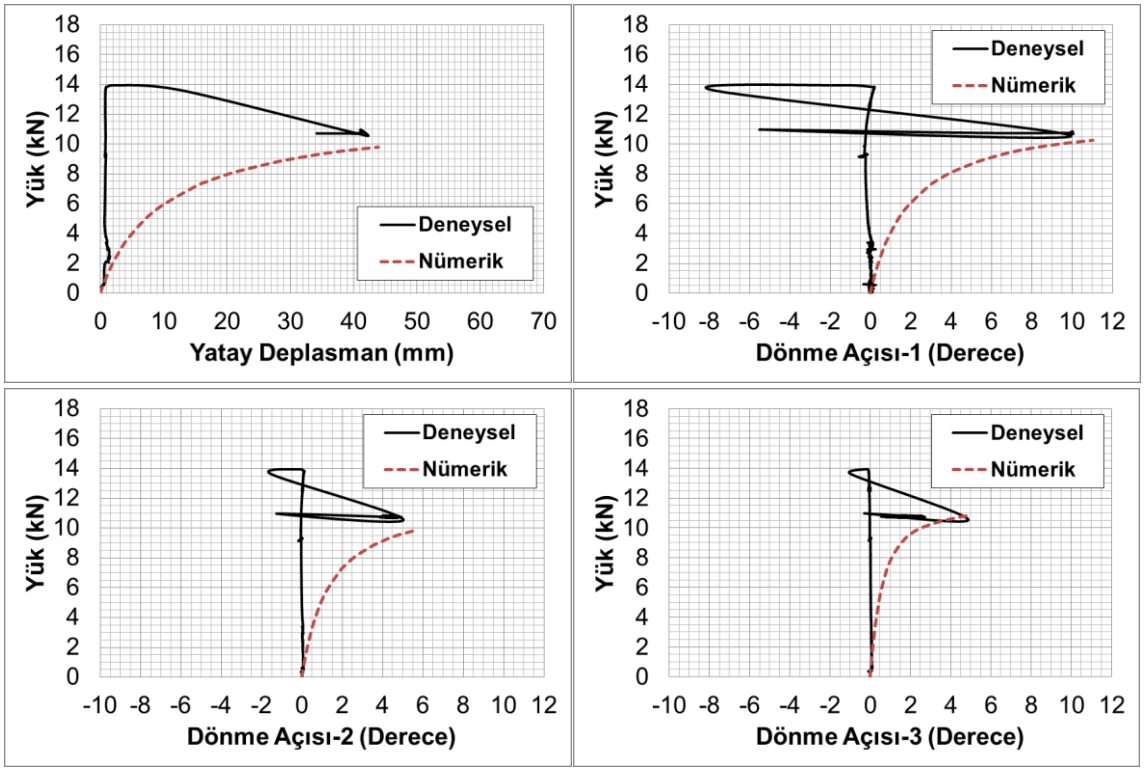


Şekil 6.10. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,11'te yük düşey deplasman, Şekil 6.12'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



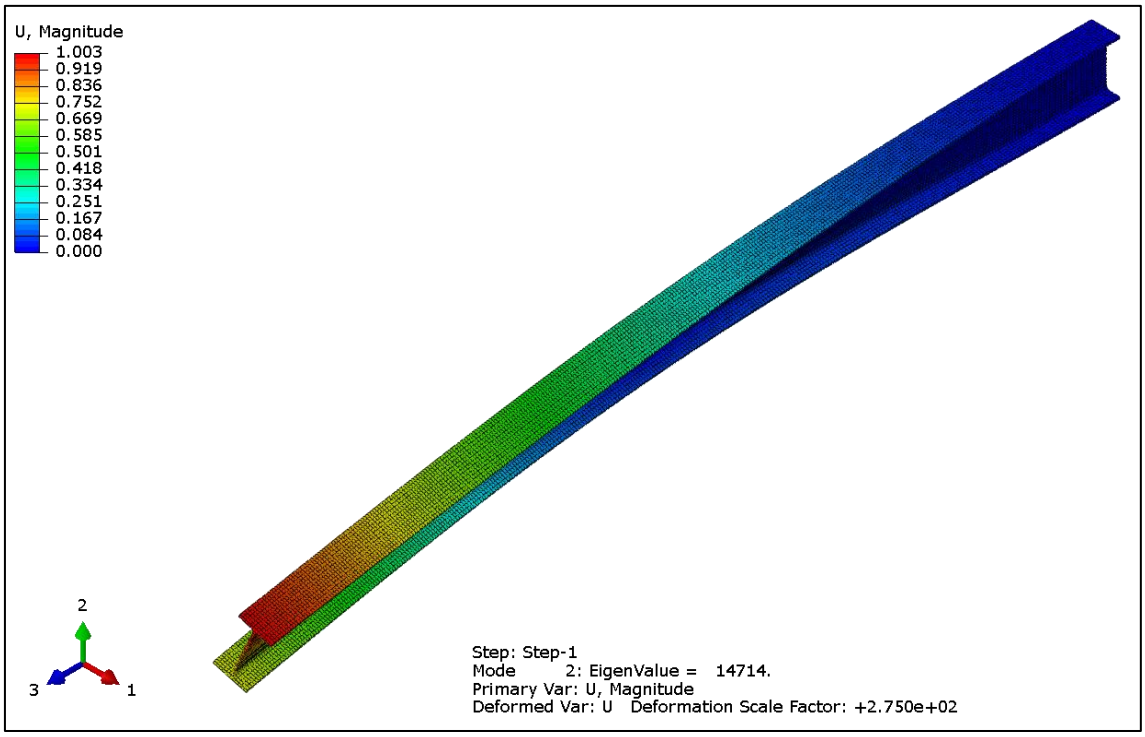
Şekil 6.11. 3 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.12. 3 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

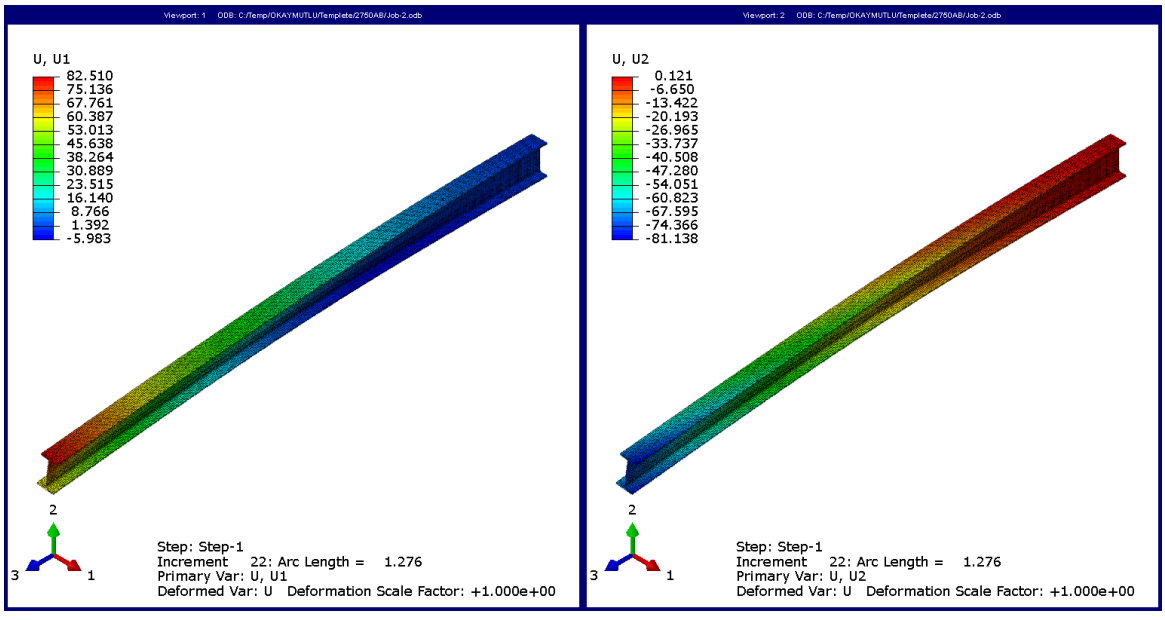
6.4. 4 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2750mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin alt başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.13'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 14714N olarak bulunmuştur.



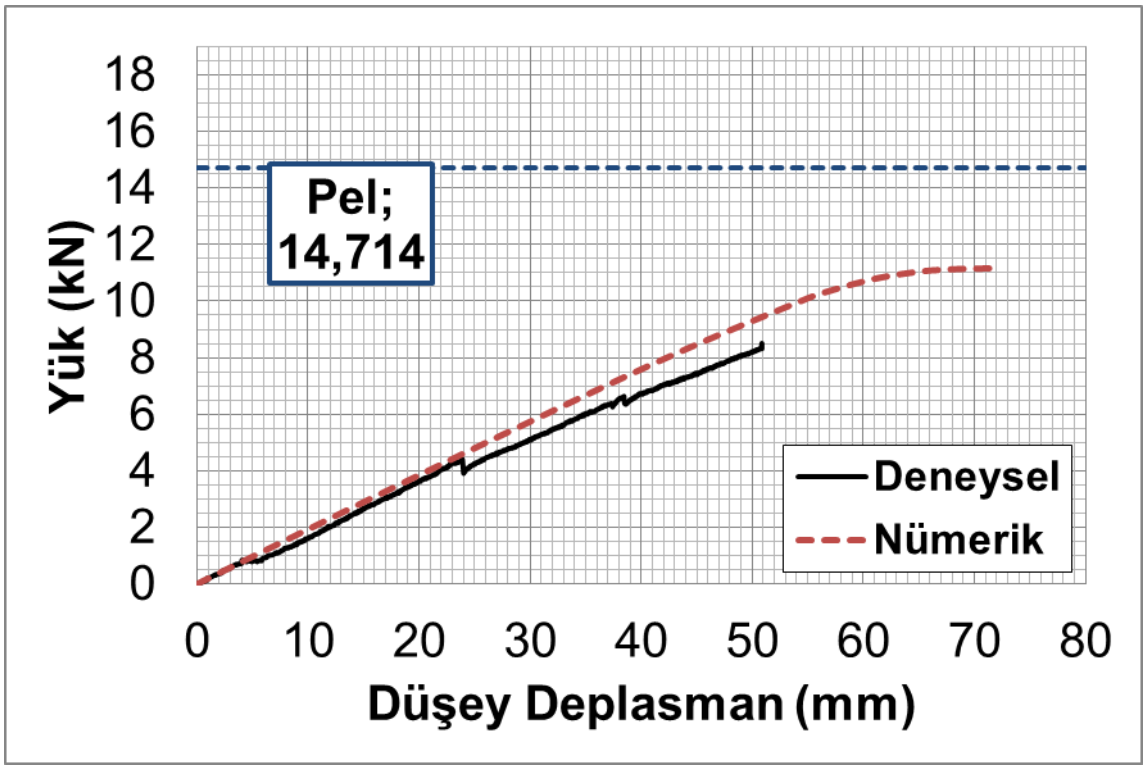
Şekil 6.13. 4.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 11159,5N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 22 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.14'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

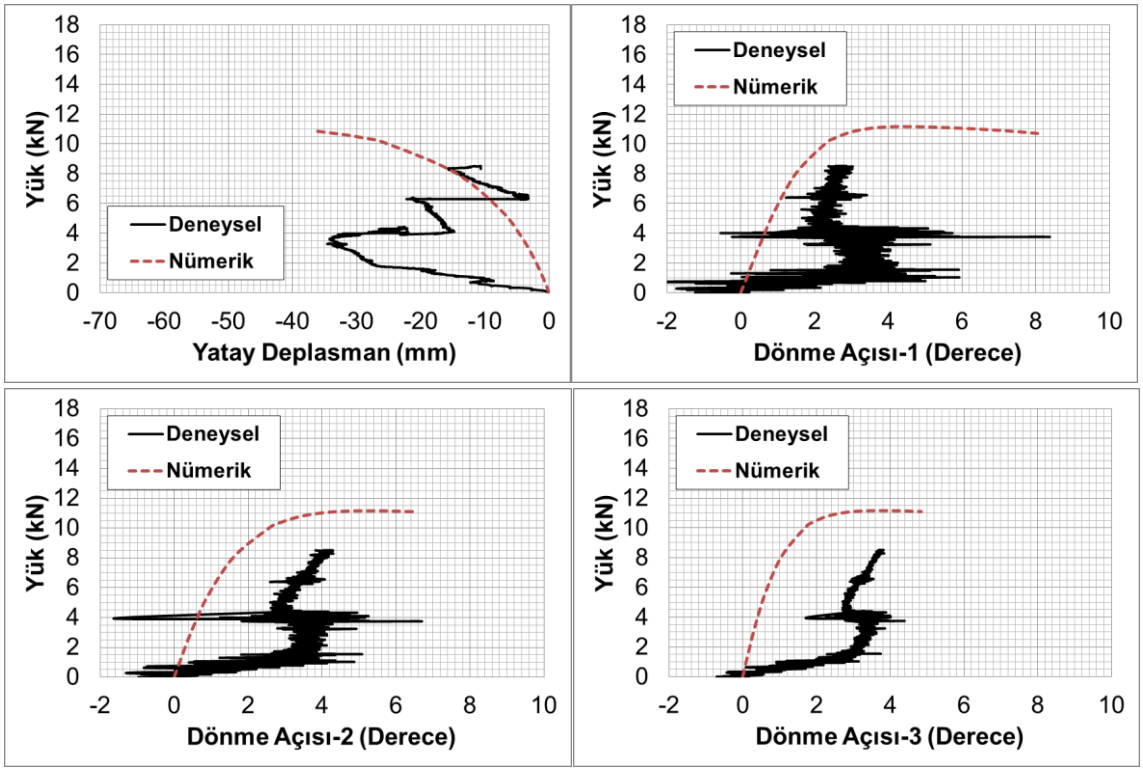


Şekil 6.14. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,15'te yük düşey deplasman, Şekil 6.16'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



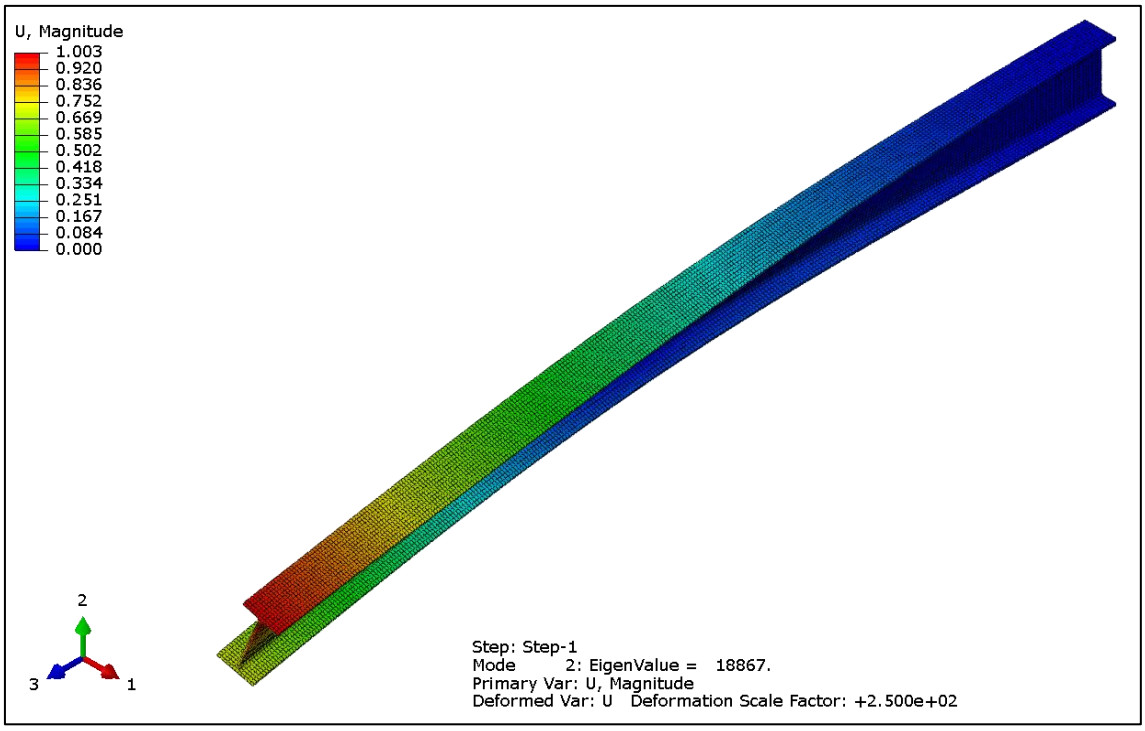
Şekil 6.15. 4 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.16. 4 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

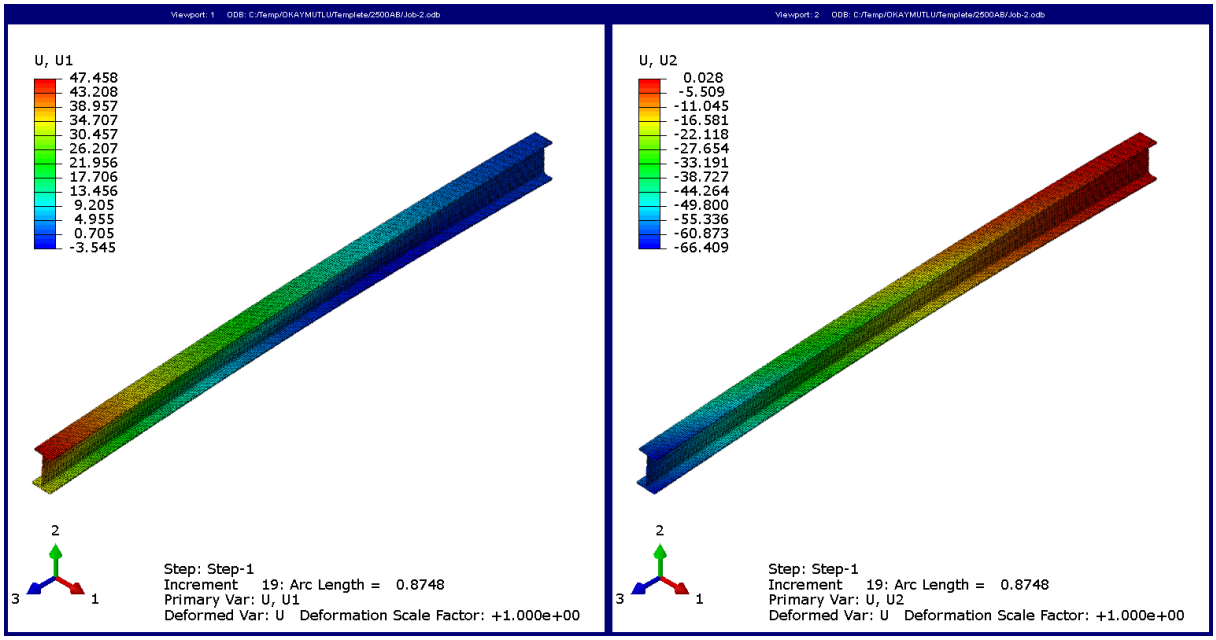
6.5. 5 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2500mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin alt başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.17'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 18867N olarak bulunmuştur.



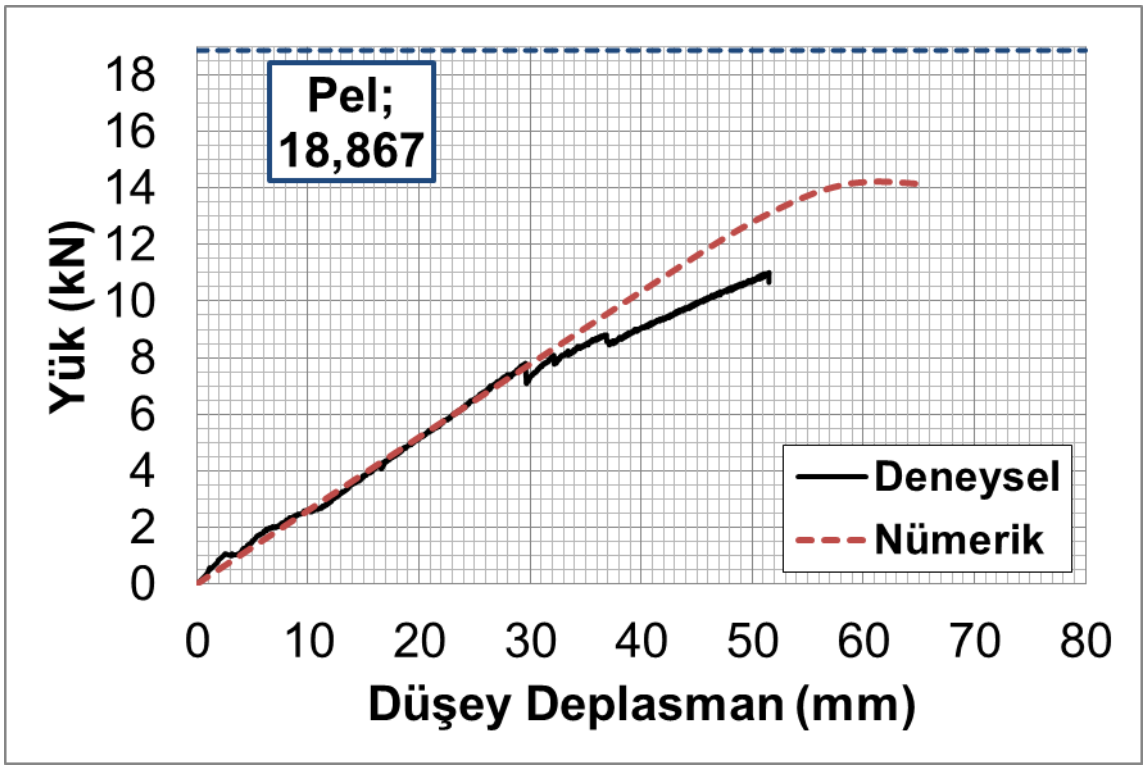
Şekil 6.17. 5.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 14222,3N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 19nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.18'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

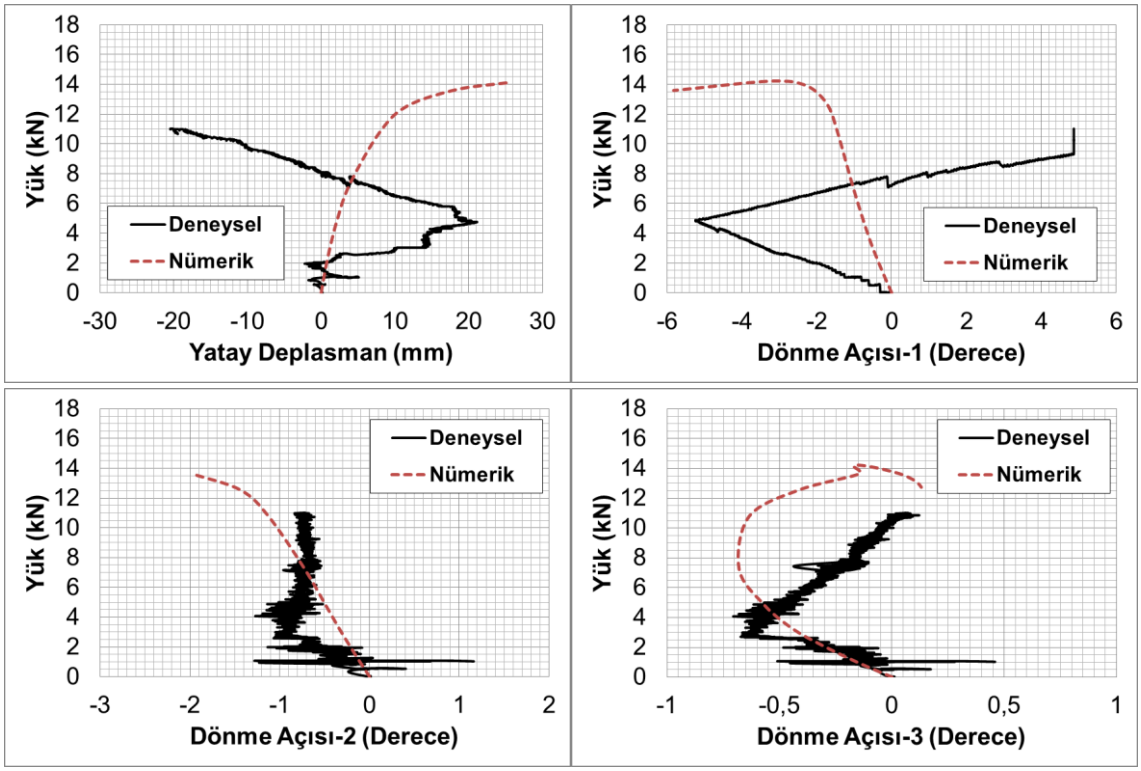


Şekil 6.18. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,19'te yük düşey deplasman, Şekil 6.20'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



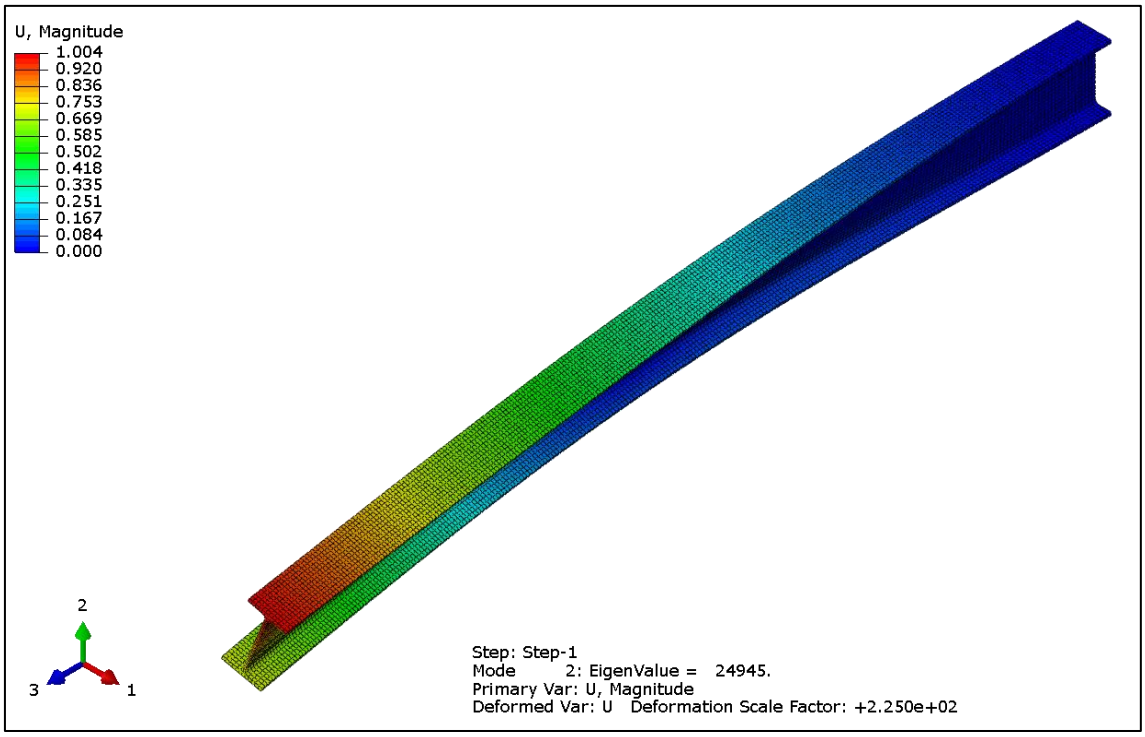
Şekil 6.19. 5 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.20. 5 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

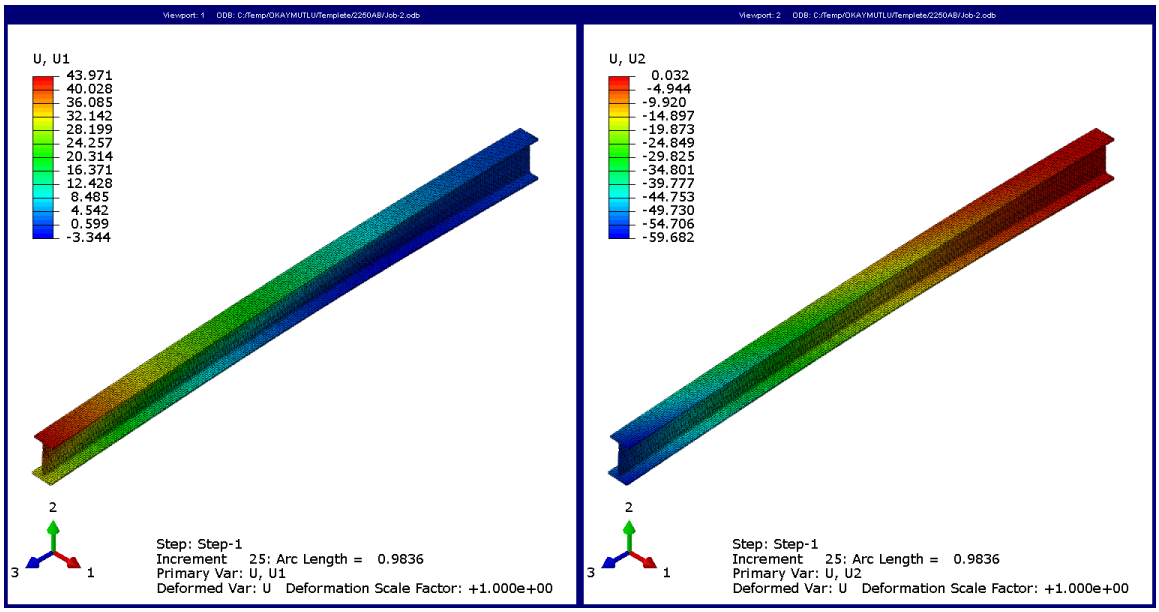
6.6. 6 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2250mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin alt başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.21'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 24945N olarak bulunmuştur.



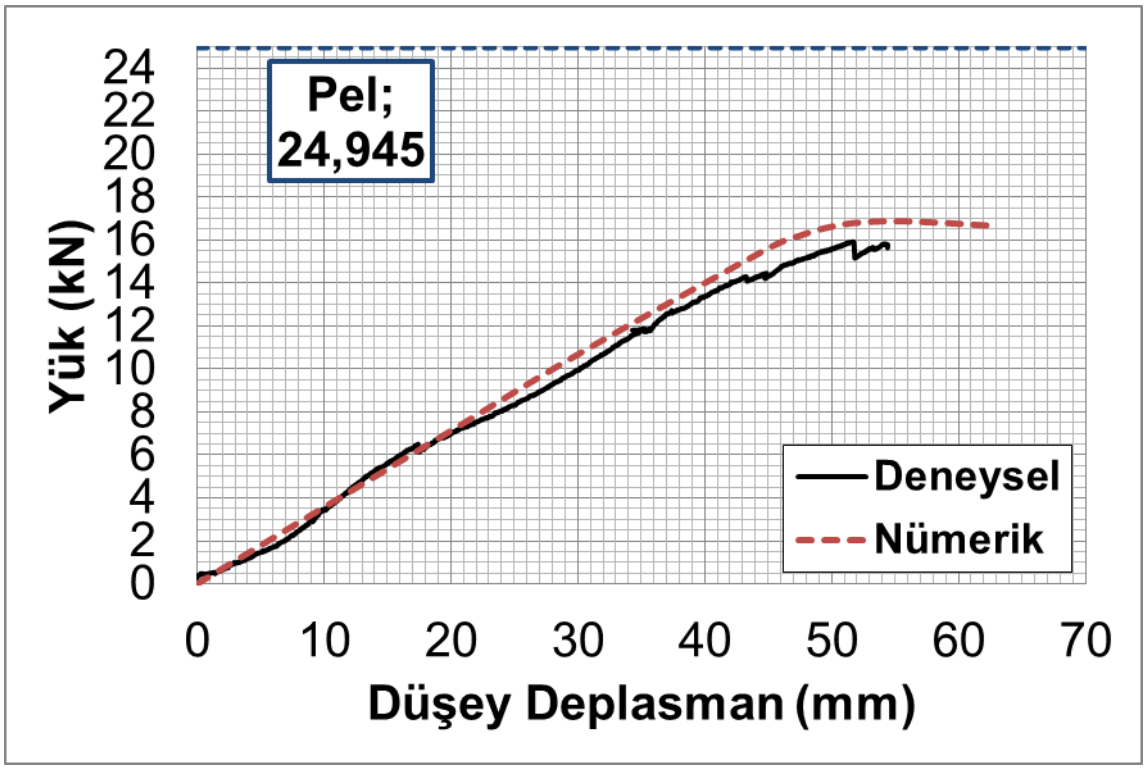
Şekil 6.21. 6.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 16878,1N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 25 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.22'dede ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

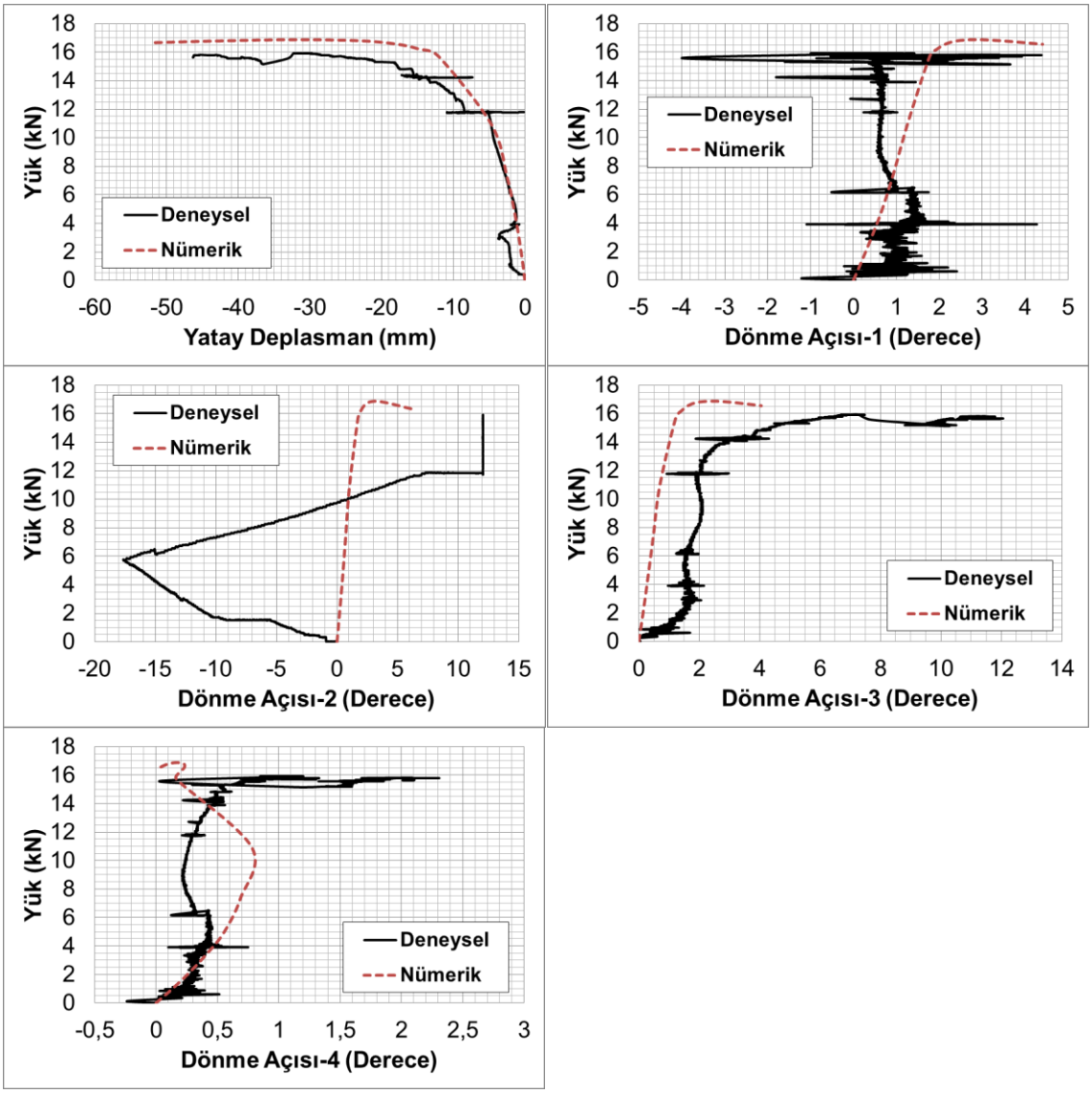


Şekil 6.22. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,23'te yük düşey deplasman, Şekil 6.24'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



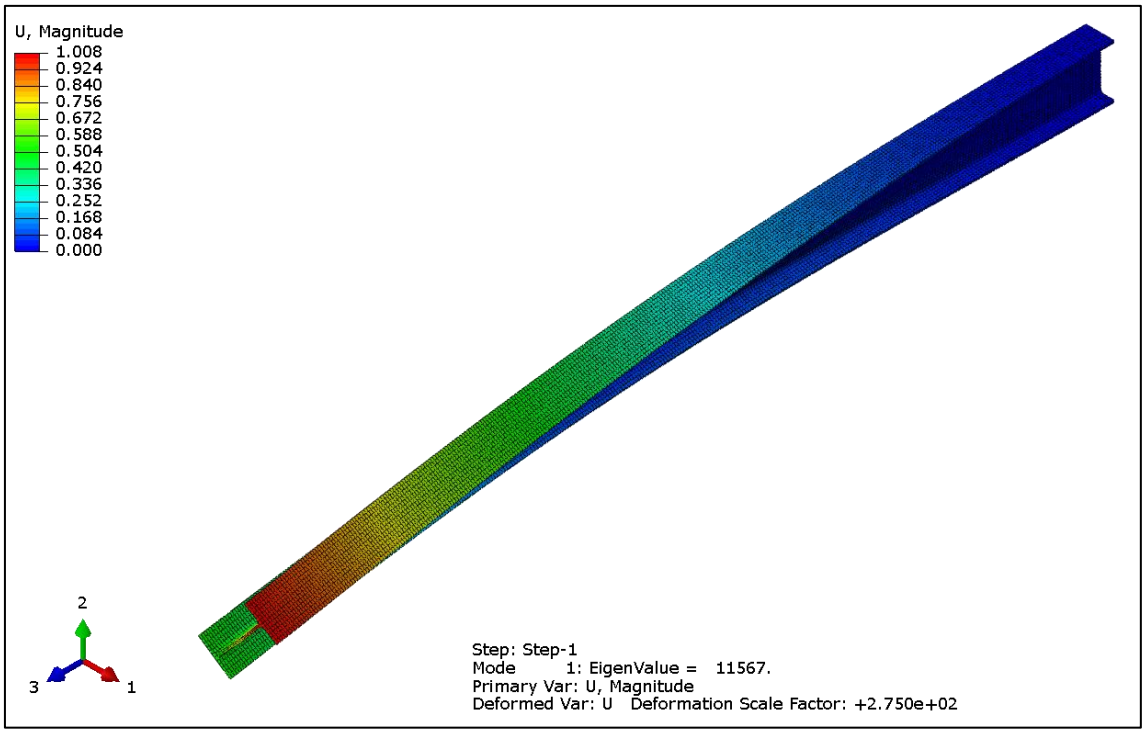
Şekil 6.23. 6 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.24. 6 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

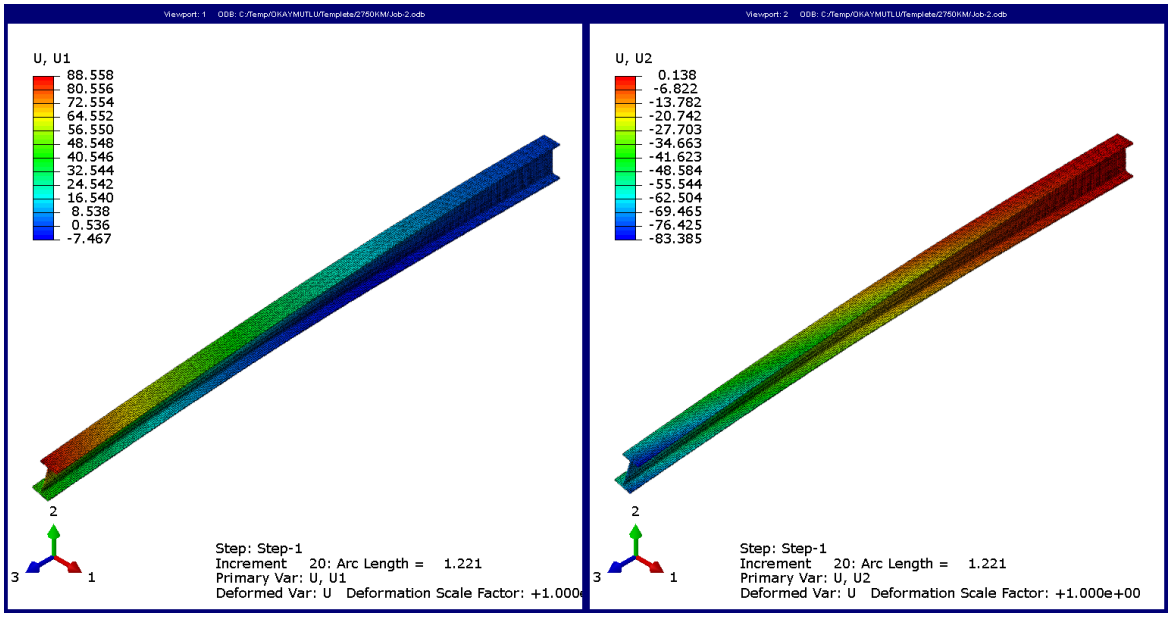
6.7. 7 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2750mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin kayma merkezinden yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.25 de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 11567N olarak bulunmuştur.



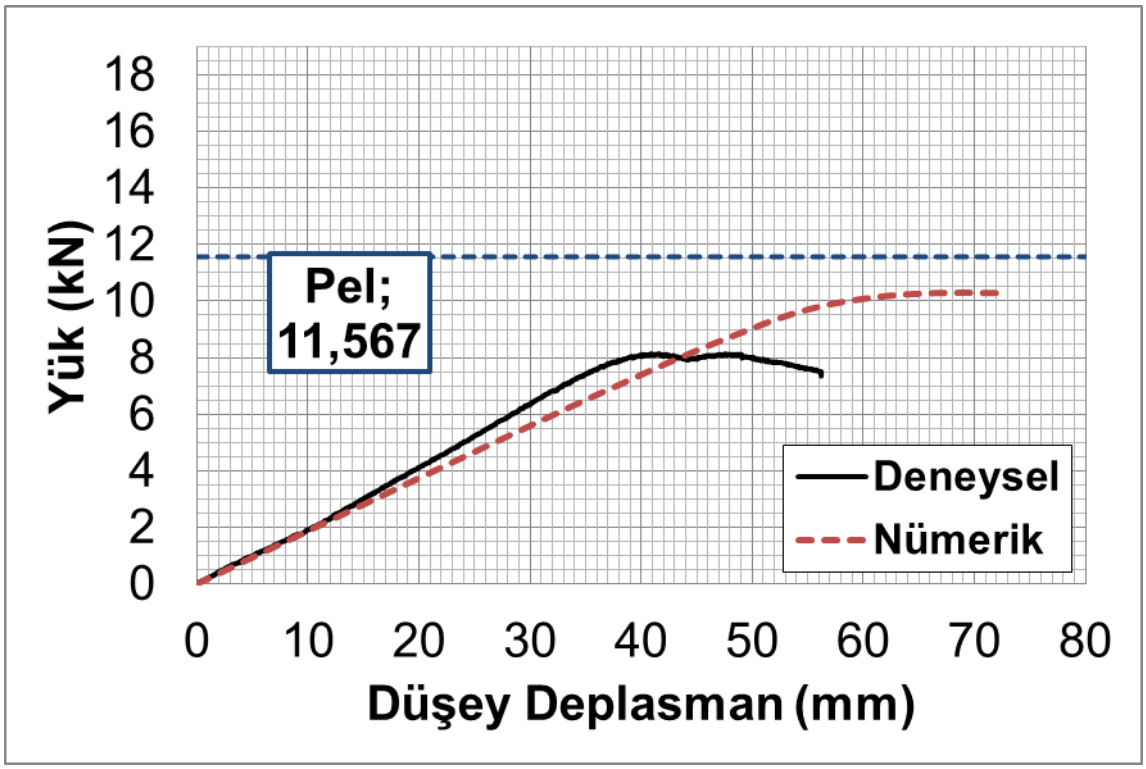
Şekil 6.25. 7.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 10297,3N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 20 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.26'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

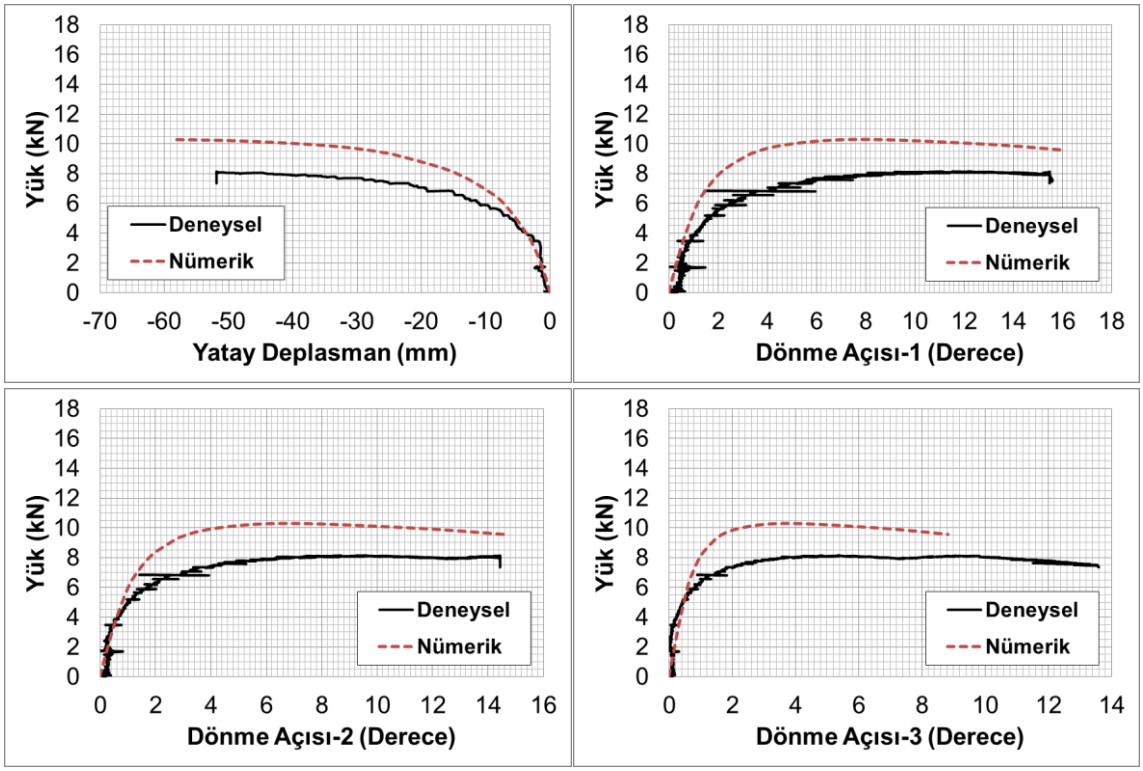


Şekil 6.26. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,27'te yük düşey deplasman, Şekil 6.28'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



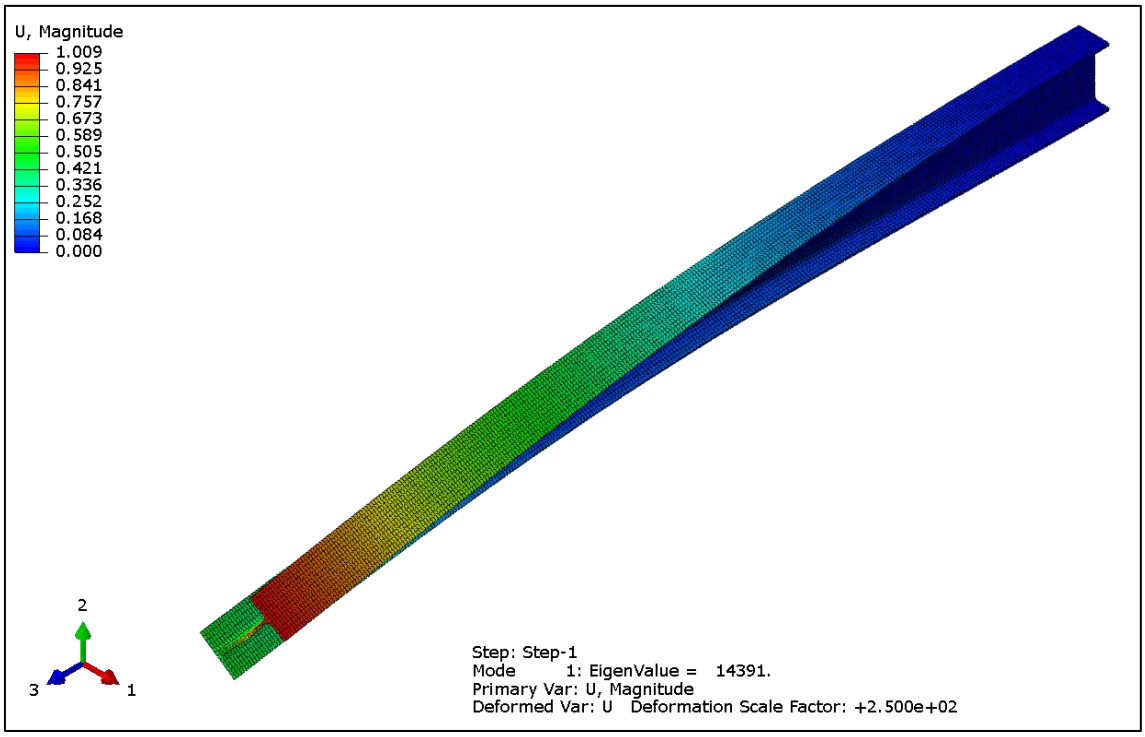
Şekil 6.27. 7 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.28. 7 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

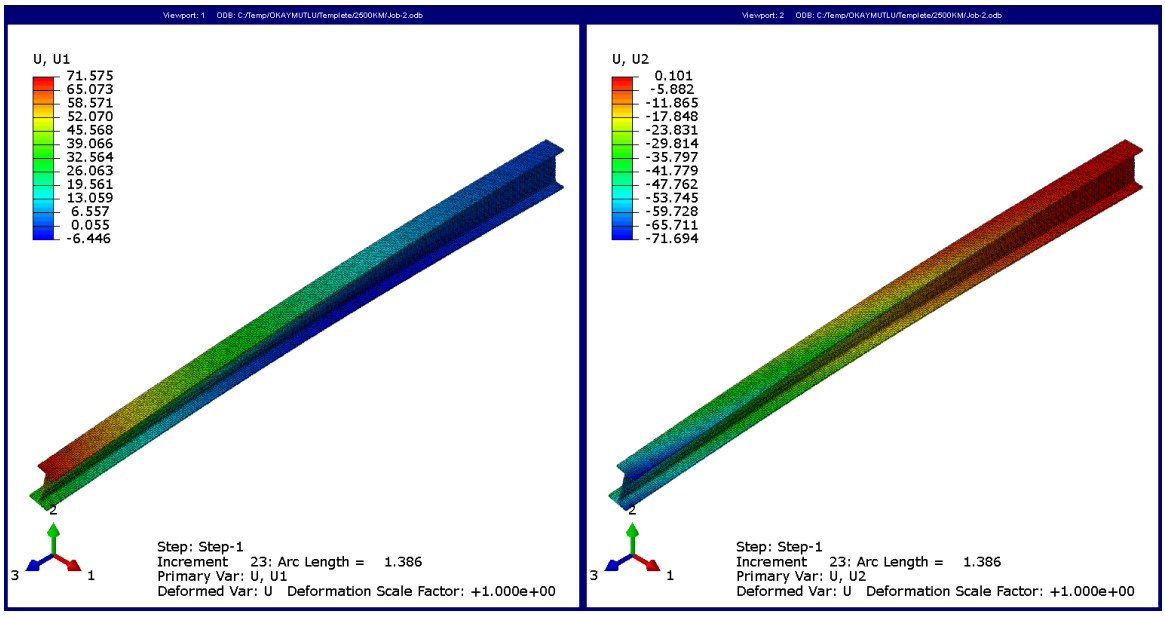
6.8. 8 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2500 mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin kayma merkezinden yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.29'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 14391N olarak bulunmuştur.



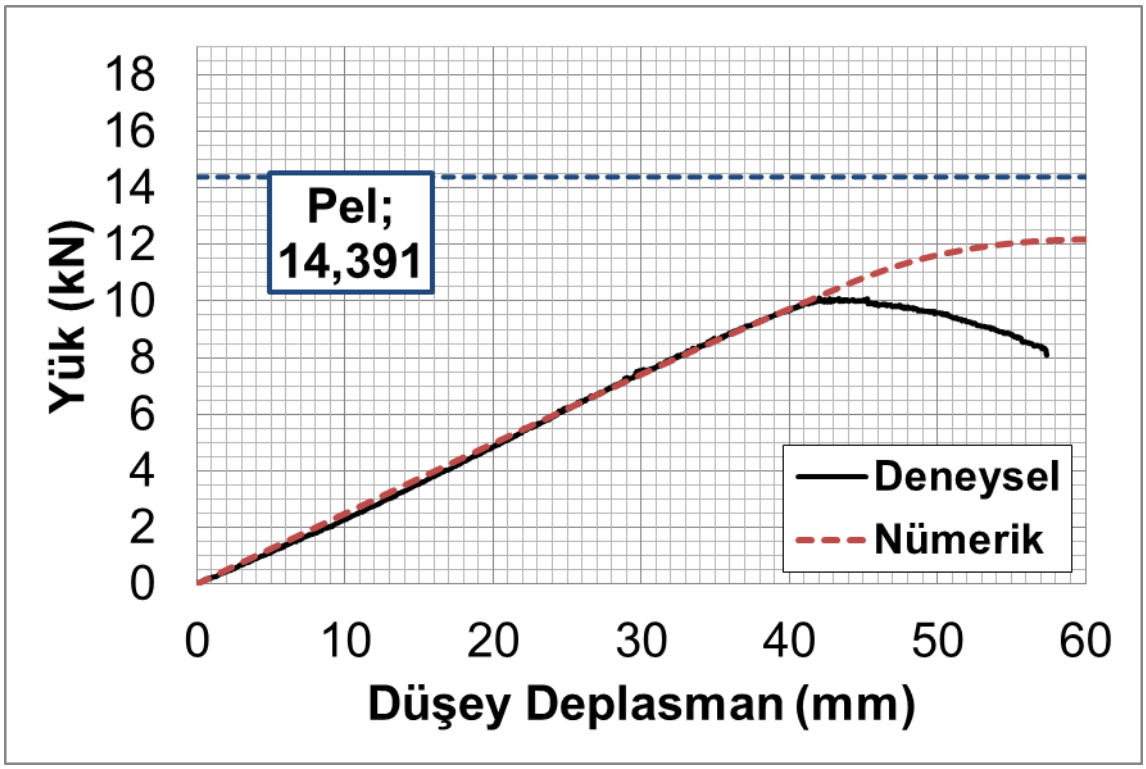
Şekil 6.29. 8.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 12178,0N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 30 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.30'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

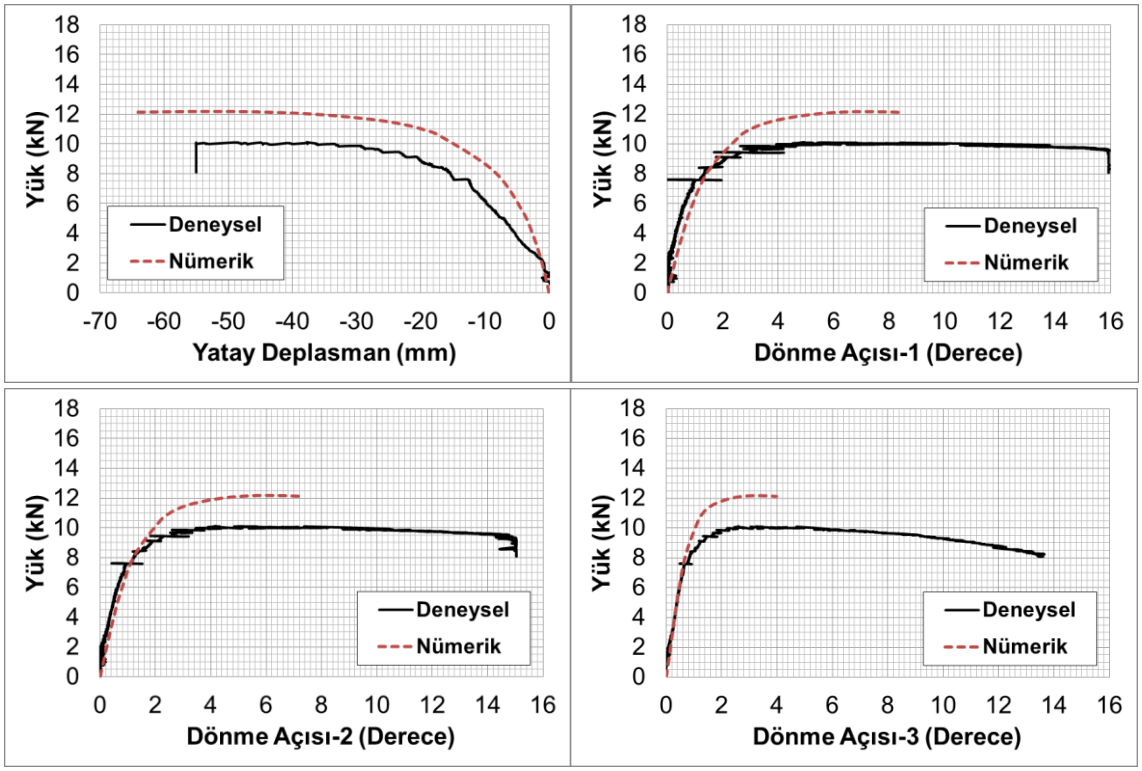


Şekil 6.30. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,31'te yük düşey deplasman, Şekil 6.32'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



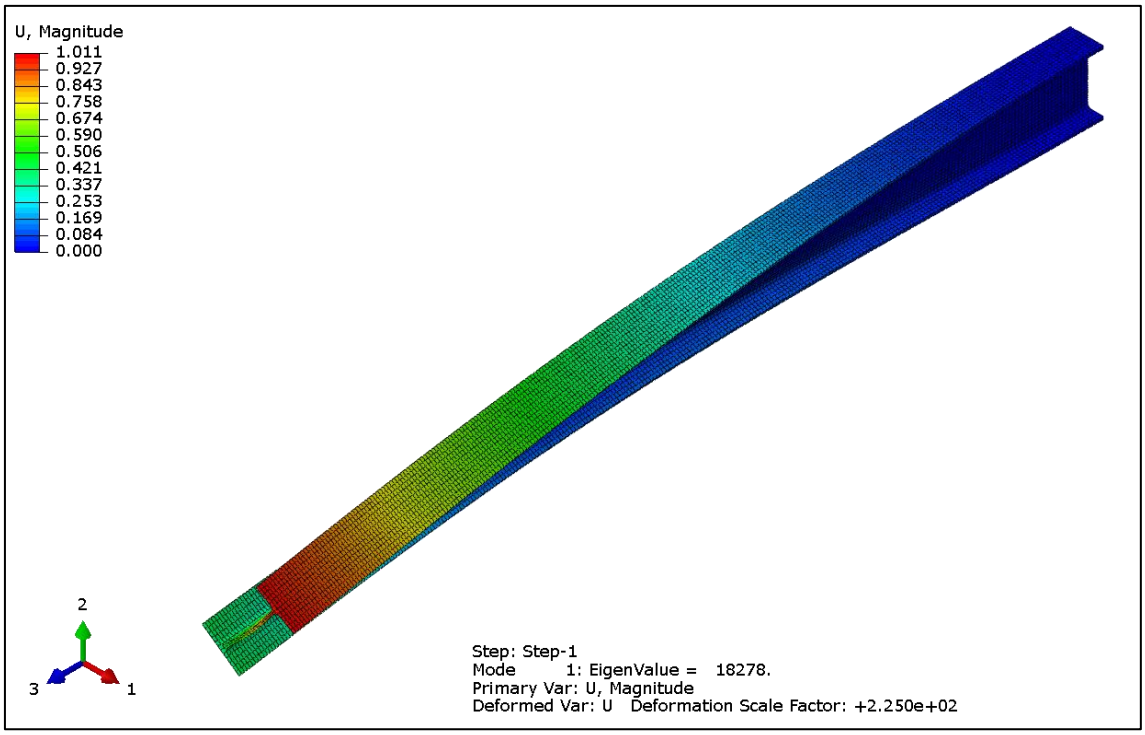
Şekil 6.31. 8 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.32. 8 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

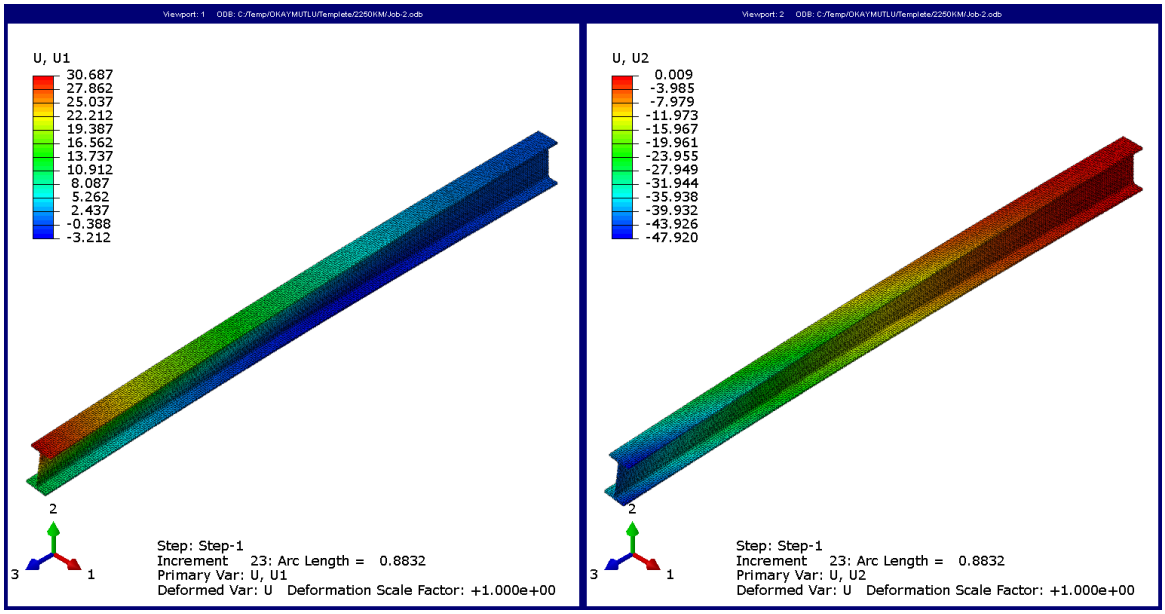
6.9. 9 Numaralı (IPE160) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2250 mm uzunluğundadır. IPE160'lik profilin kayma merkezinden yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.33'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 18278N olarak bulunmuştur.



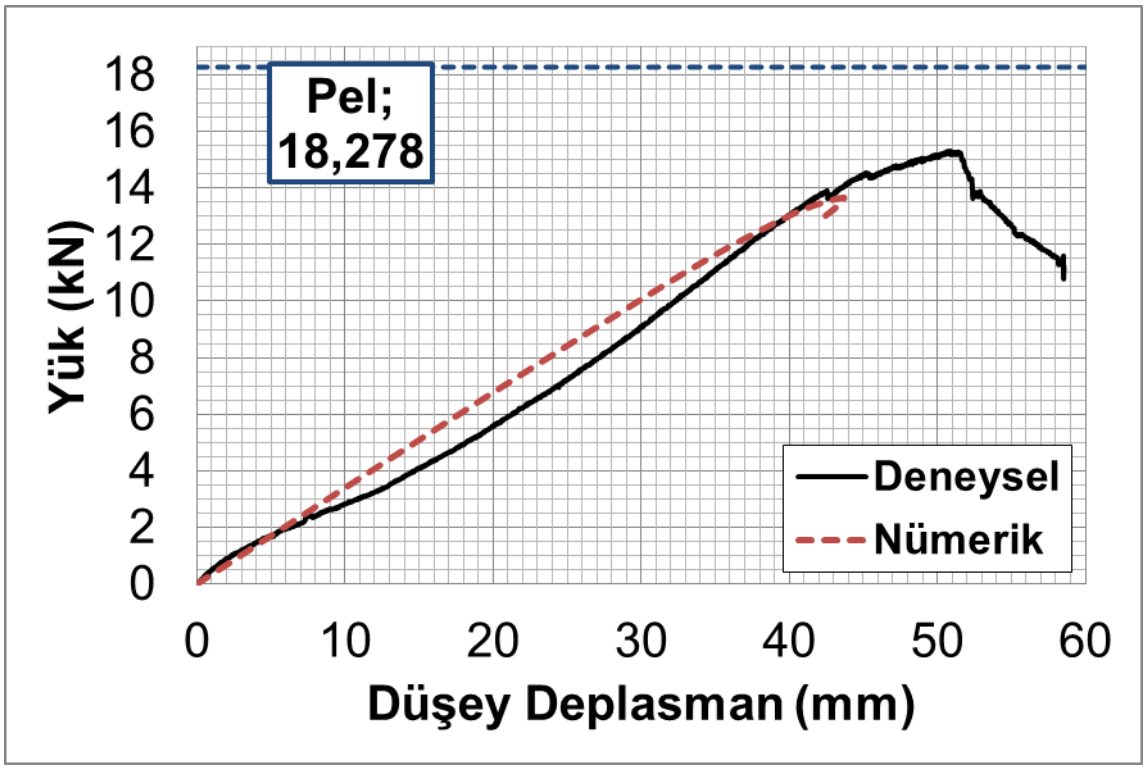
Şekil 6.33. 9.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 13659,7N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 23 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.34'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

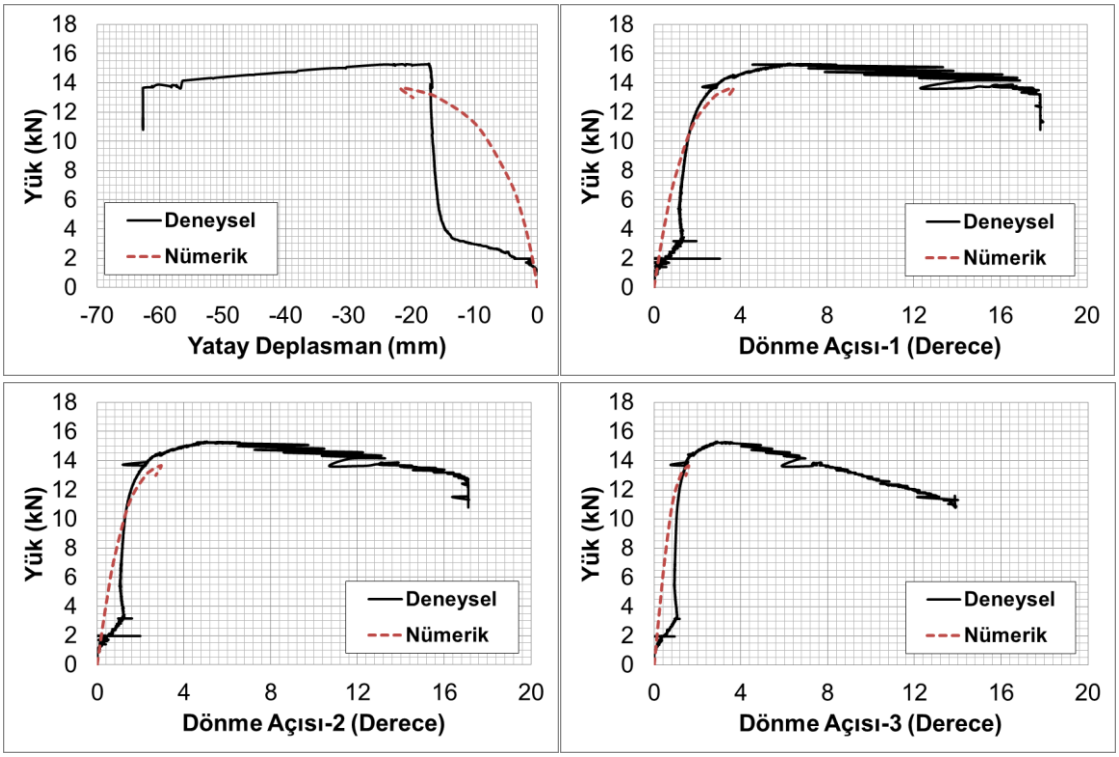


Şekil 6.34. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,35'te yük düşey deplasman, Şekil 6.36'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



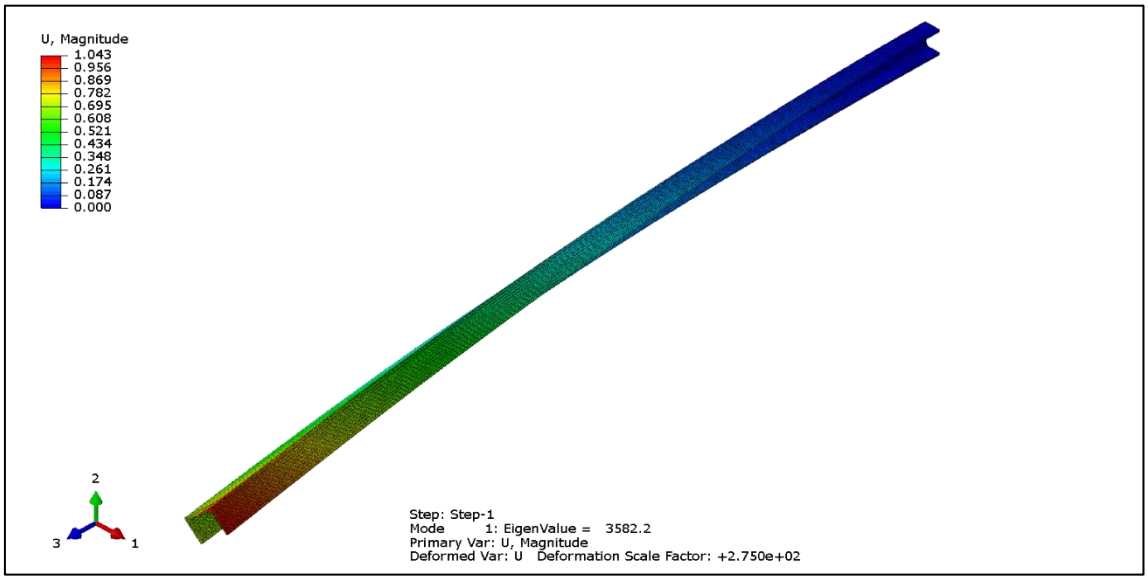
Şekil 6.35. 9 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.36. 9 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

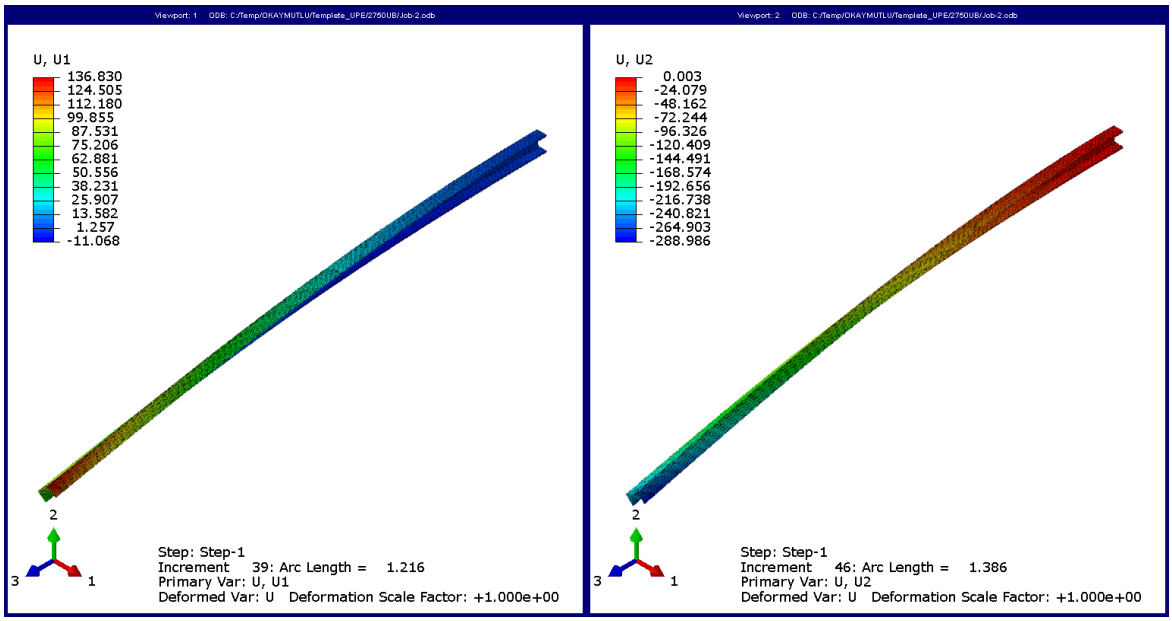
6.10. 10 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2750mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil üst başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.37'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 3582.2N olarak bulunmuştur.



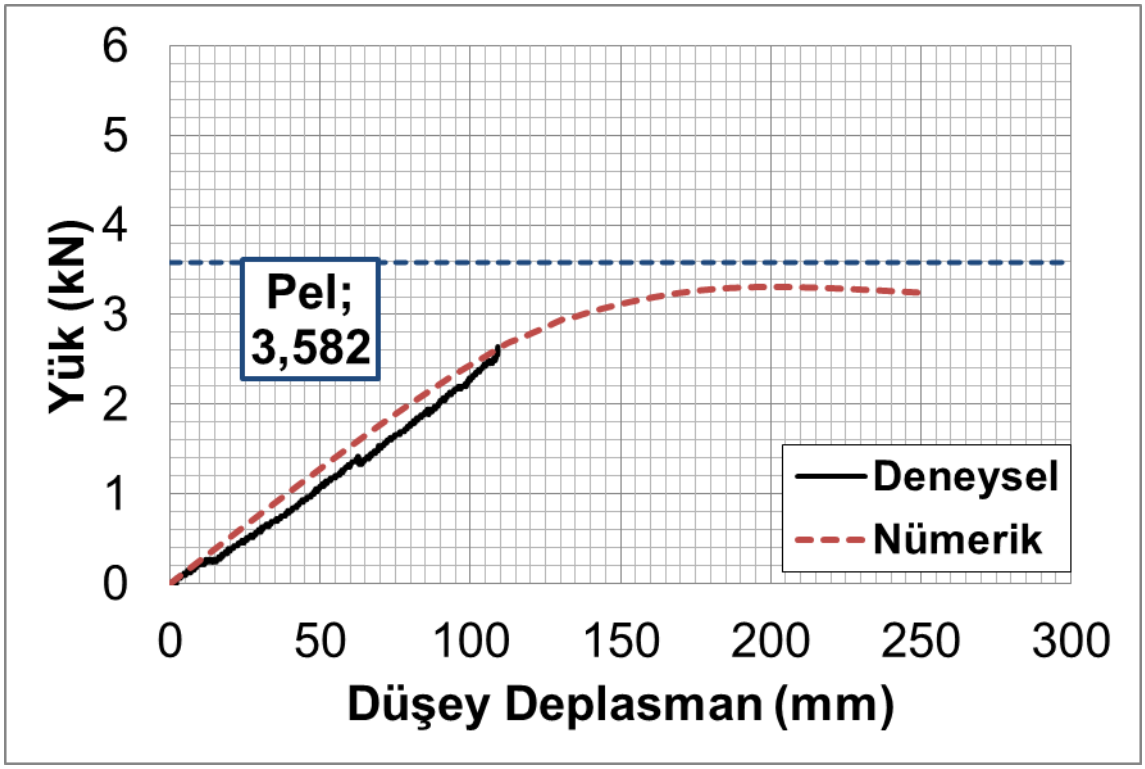
Şekil 6.37. 10.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 3309,85N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 39 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.38'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

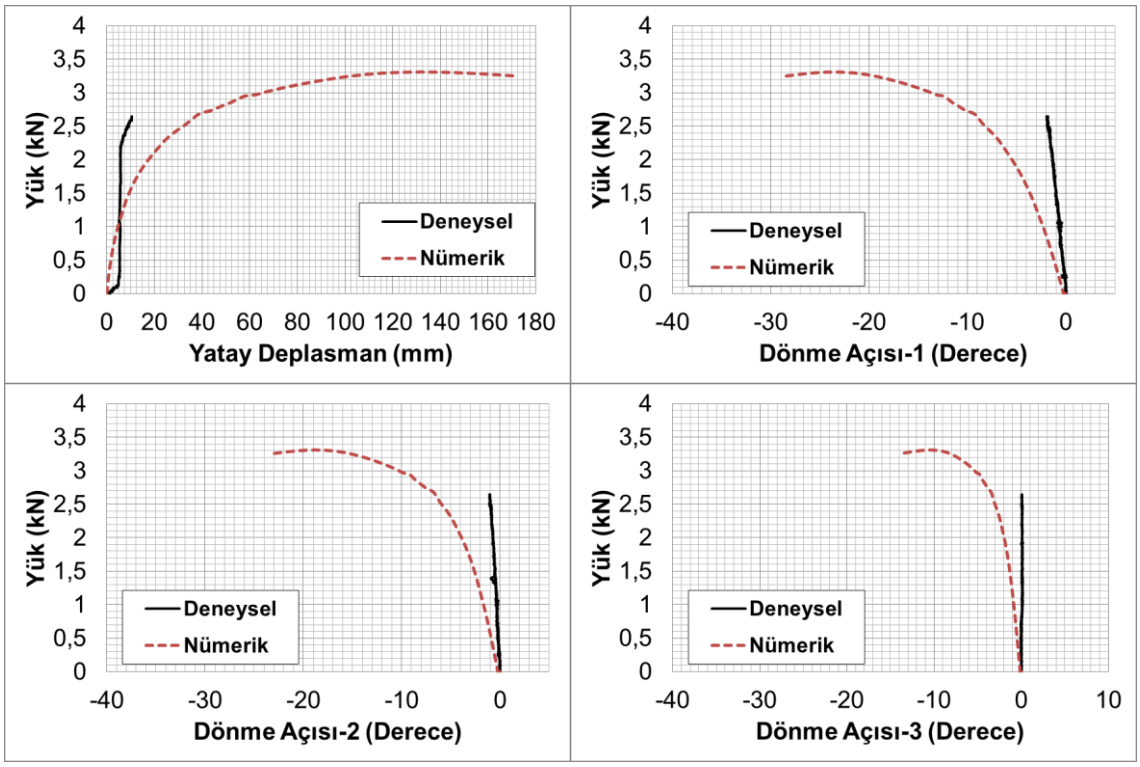


Şekil 6.38. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,39'te yük düşey deplasman, Şekil 6.40'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



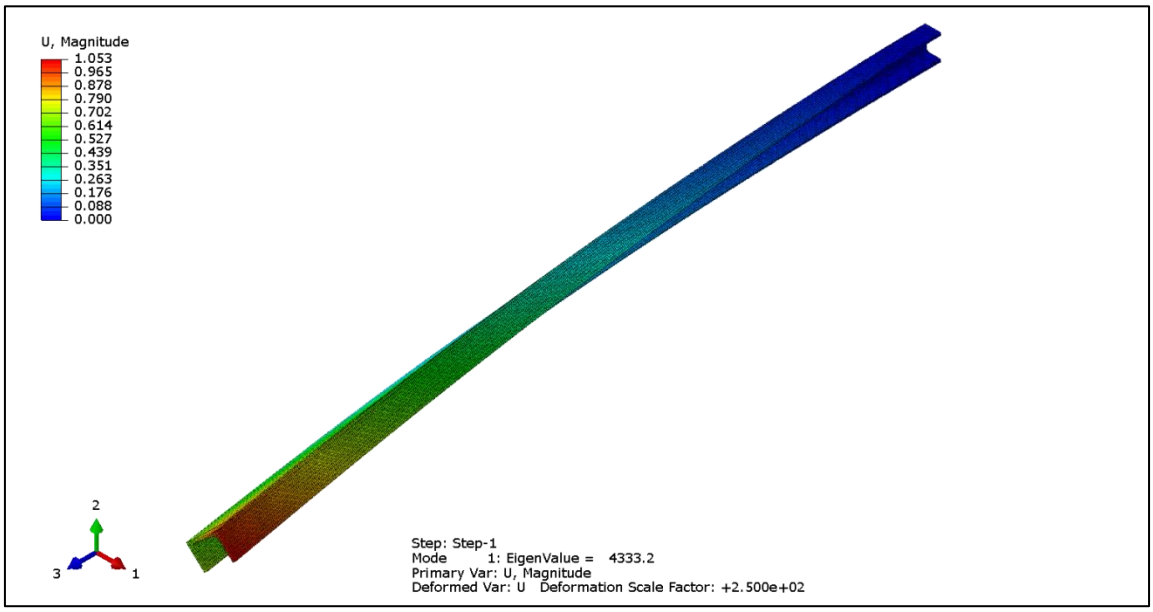
Şekil 6.399. 10 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.40. 10 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

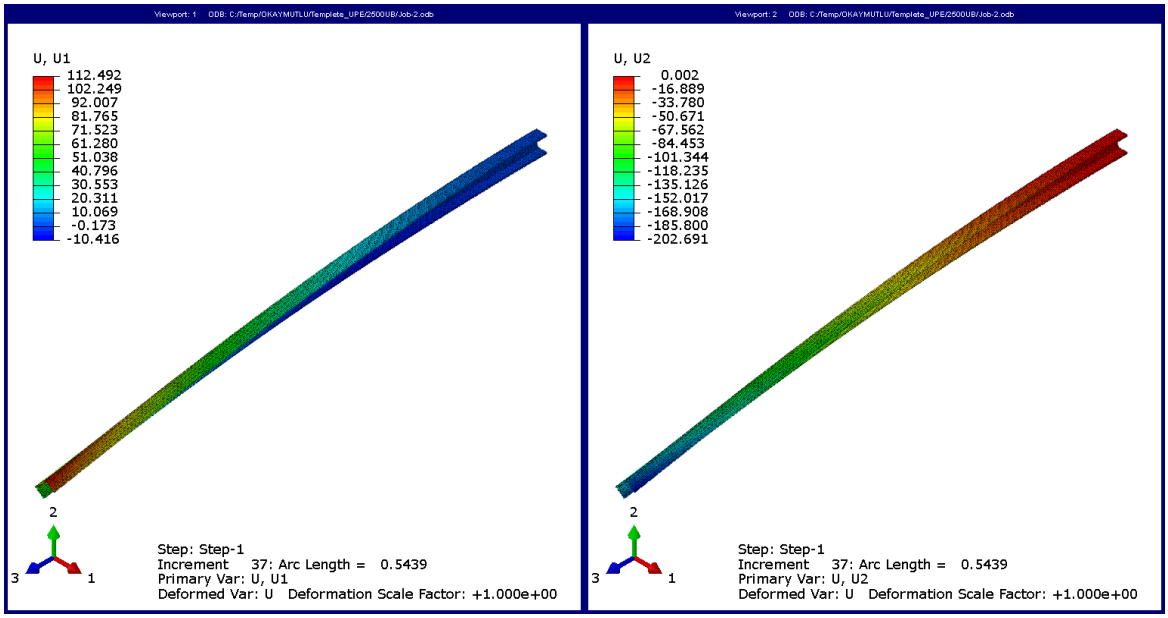
6.11. 11 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2500mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil üst başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.41'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 4333,2N olarak bulunmuştur.



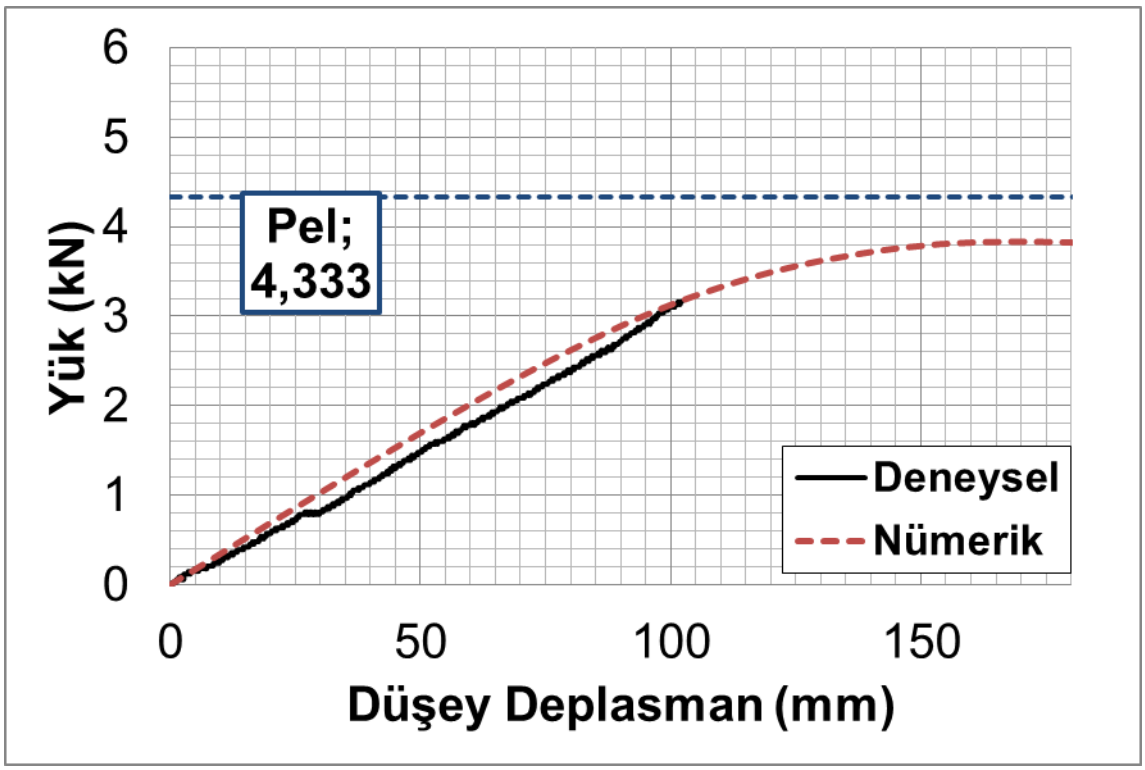
Şekil 6.41. 11.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 3883,92N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 37 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.42'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

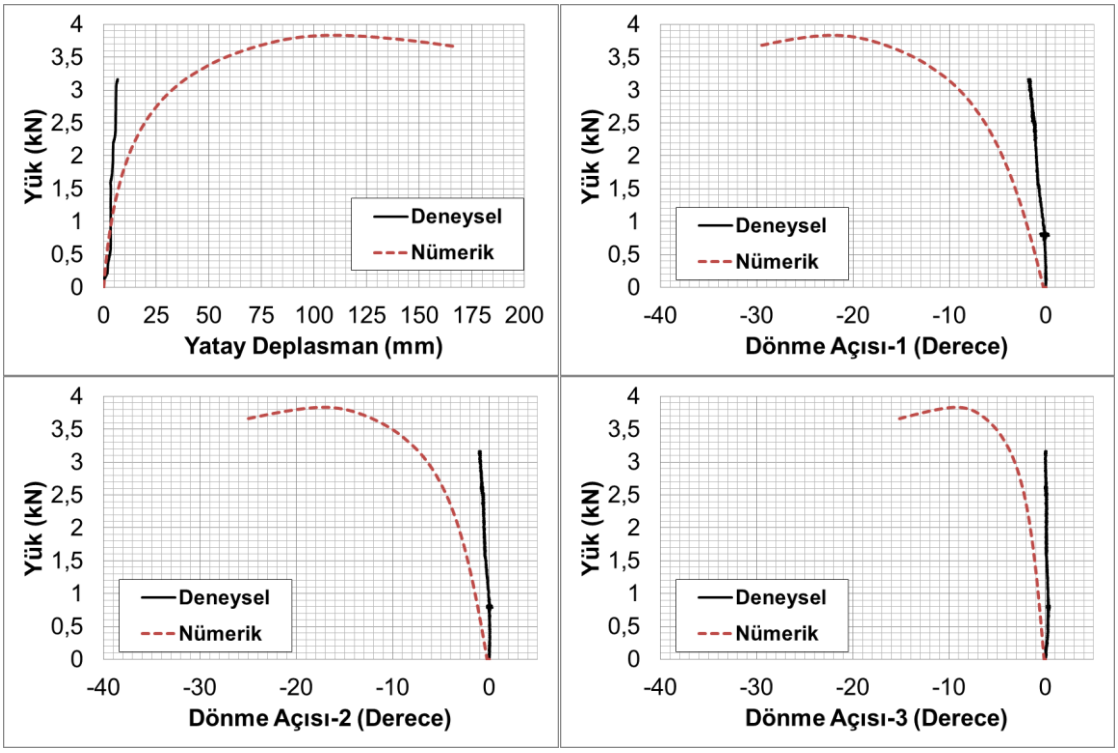


Şekil 6.42. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,43'te yük düşey deplasman, Şekil 6.44'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



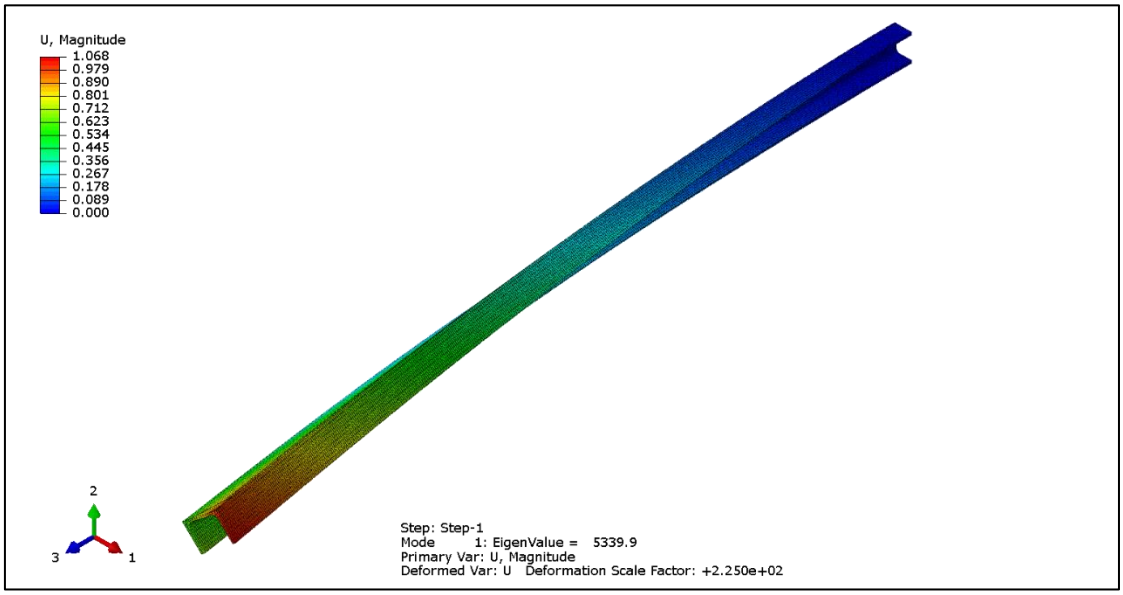
Şekil 6.43. 11 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.44. 11 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

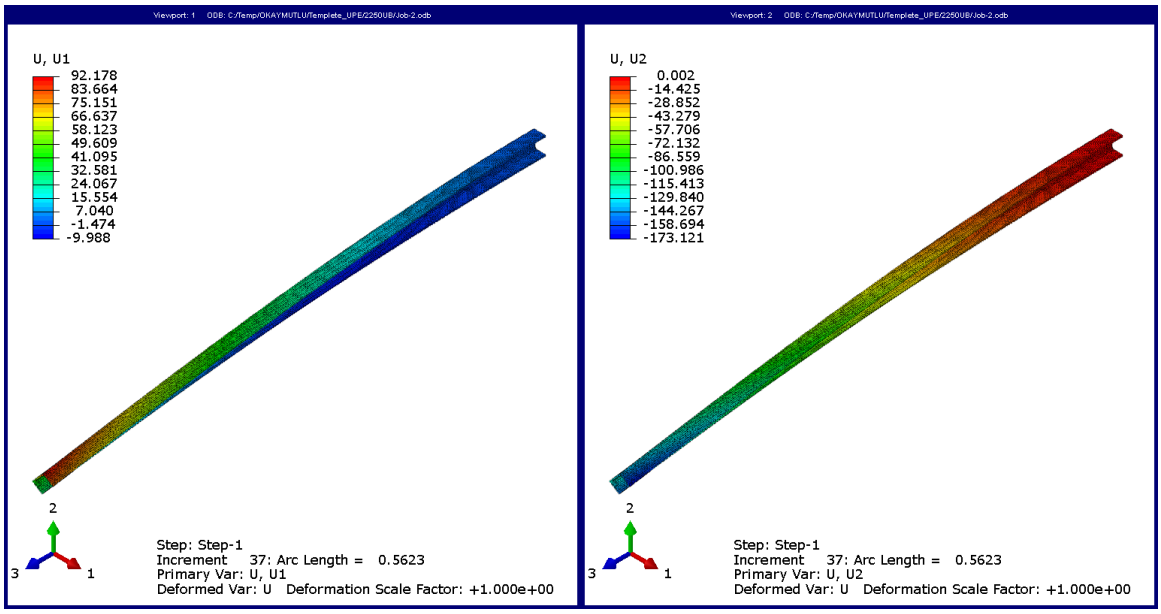
6.12. 12 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2250mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil üst başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.45'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 5339.9N olarak bulunmuştur.



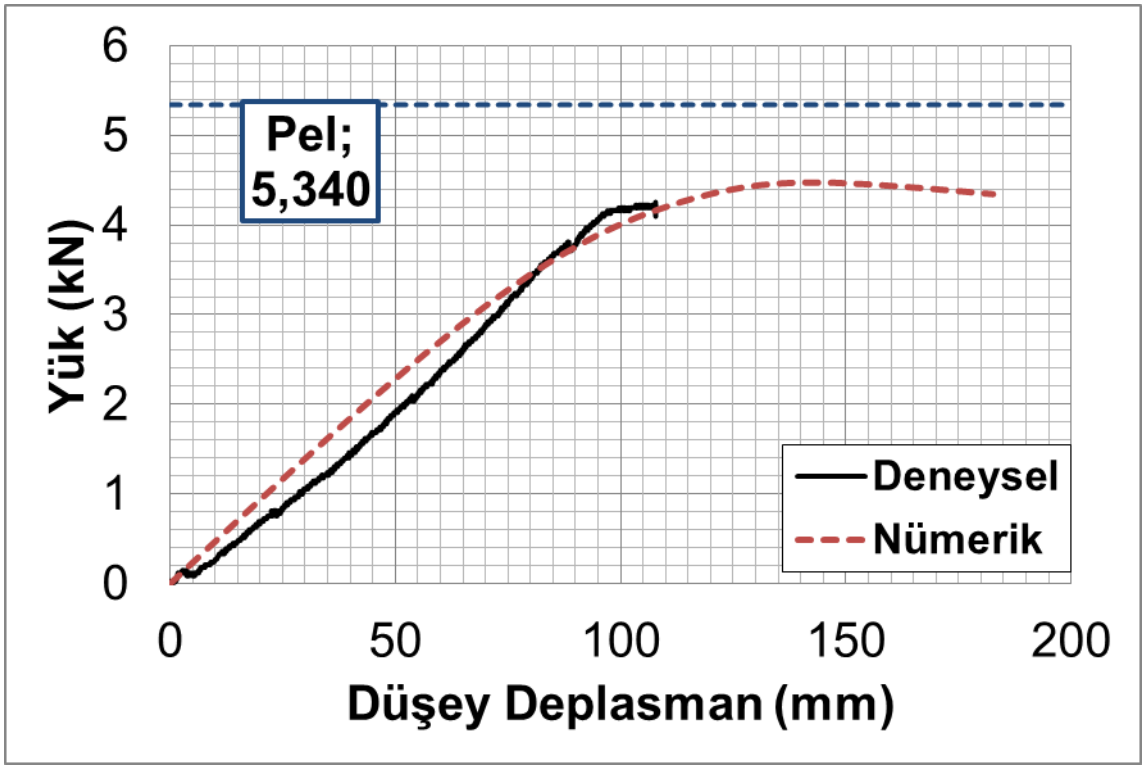
Şekil 6.45. 12.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 4473,9N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 37 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.46'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

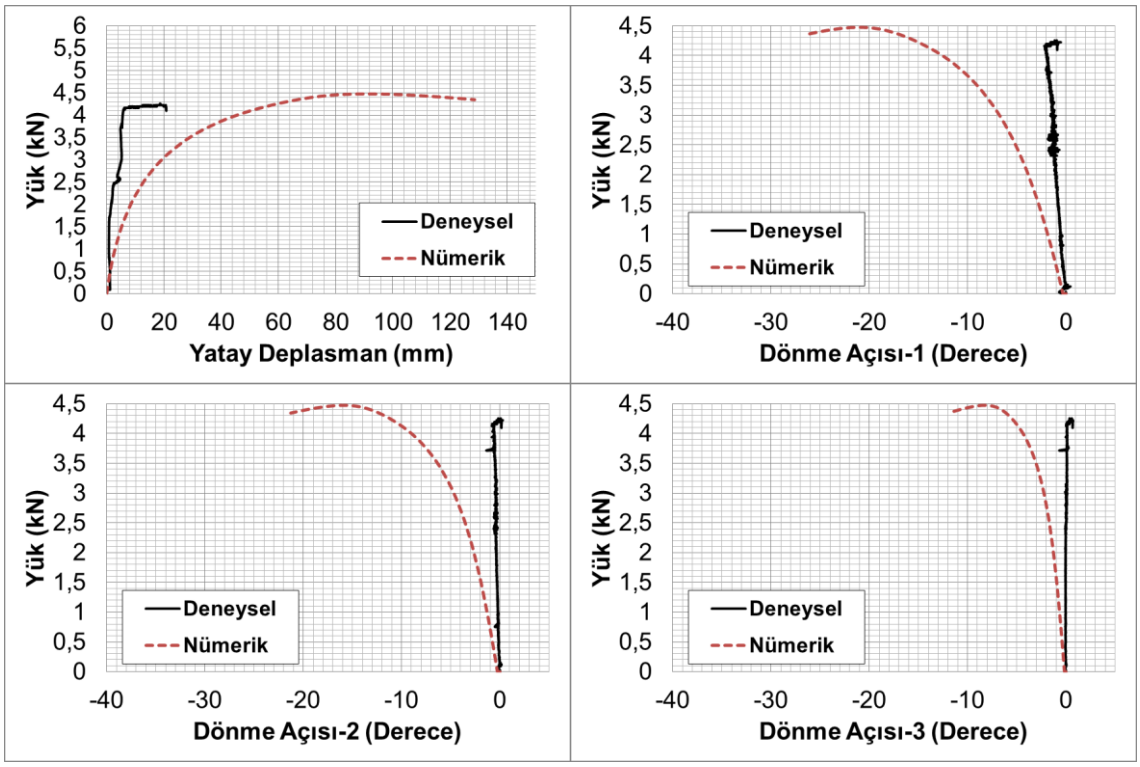


Şekil 6.46. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,47'te yük düşey deplasman, Şekil 6.48'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



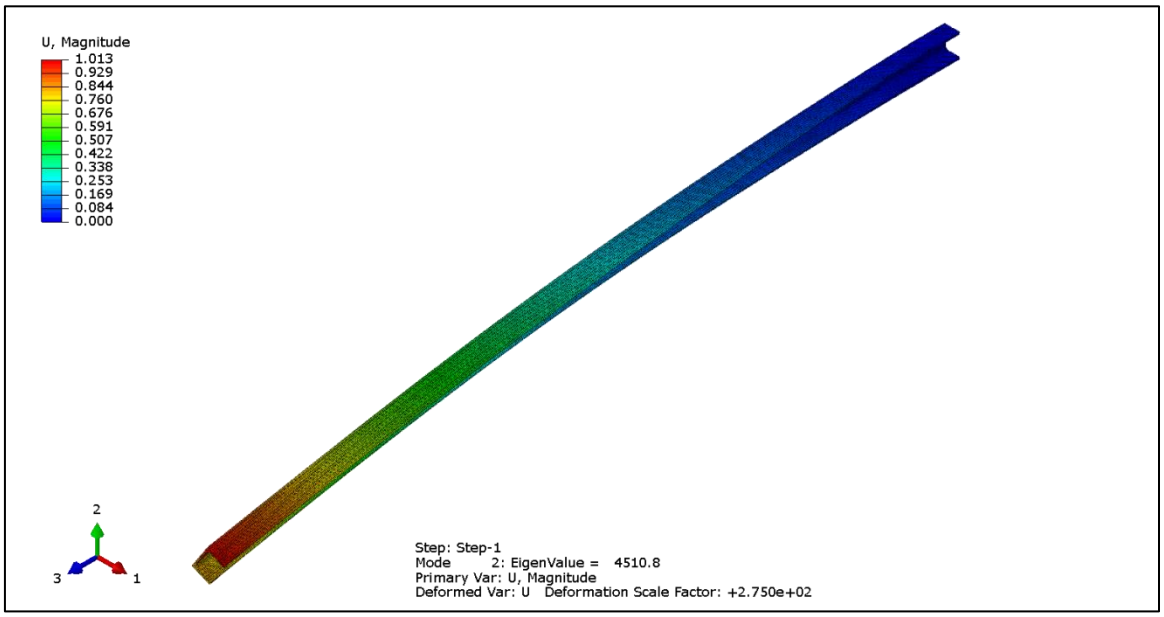
Şekil 6.47. 12 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.48. 12 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

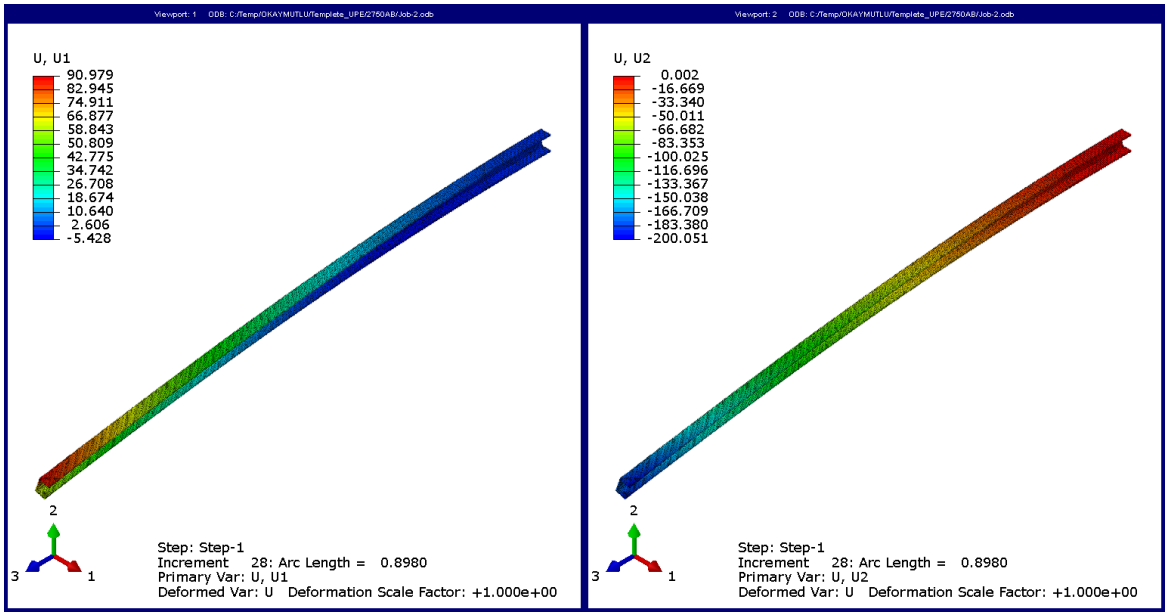
6.13. 13 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2750mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil alt başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.49'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 4510,8N olarak bulunmuştur.



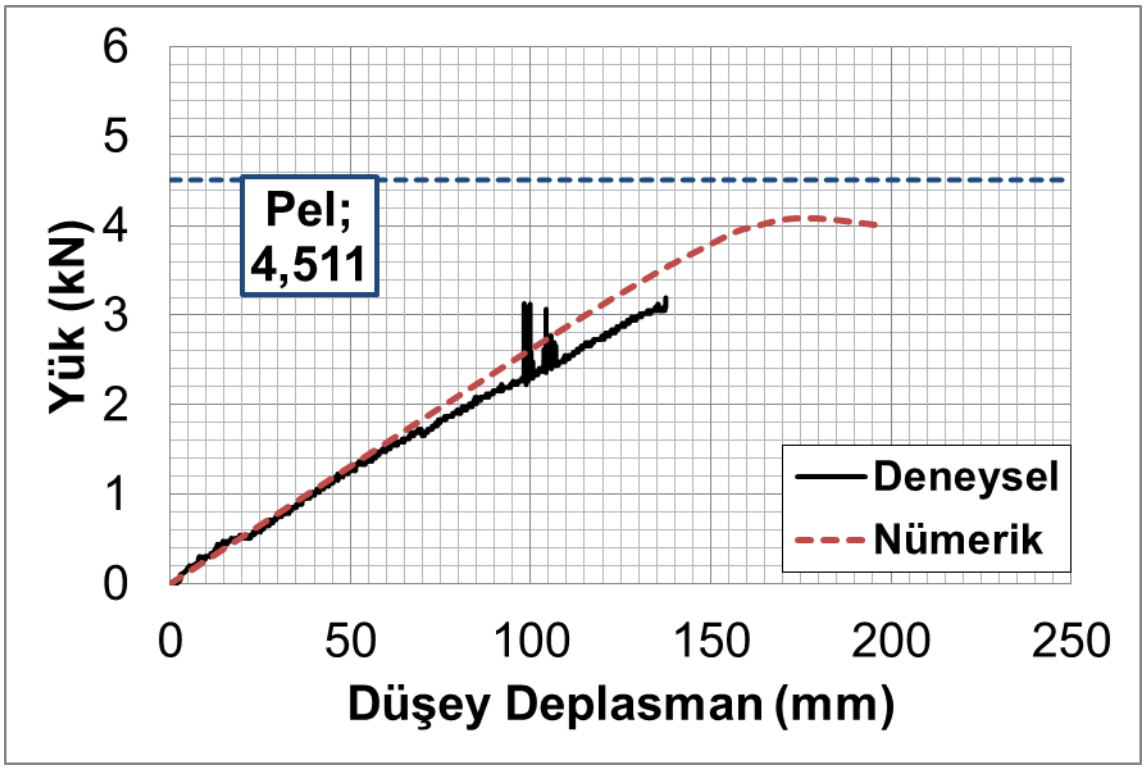
Şekil 6.49. 13.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 4085,24N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 28 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.50'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

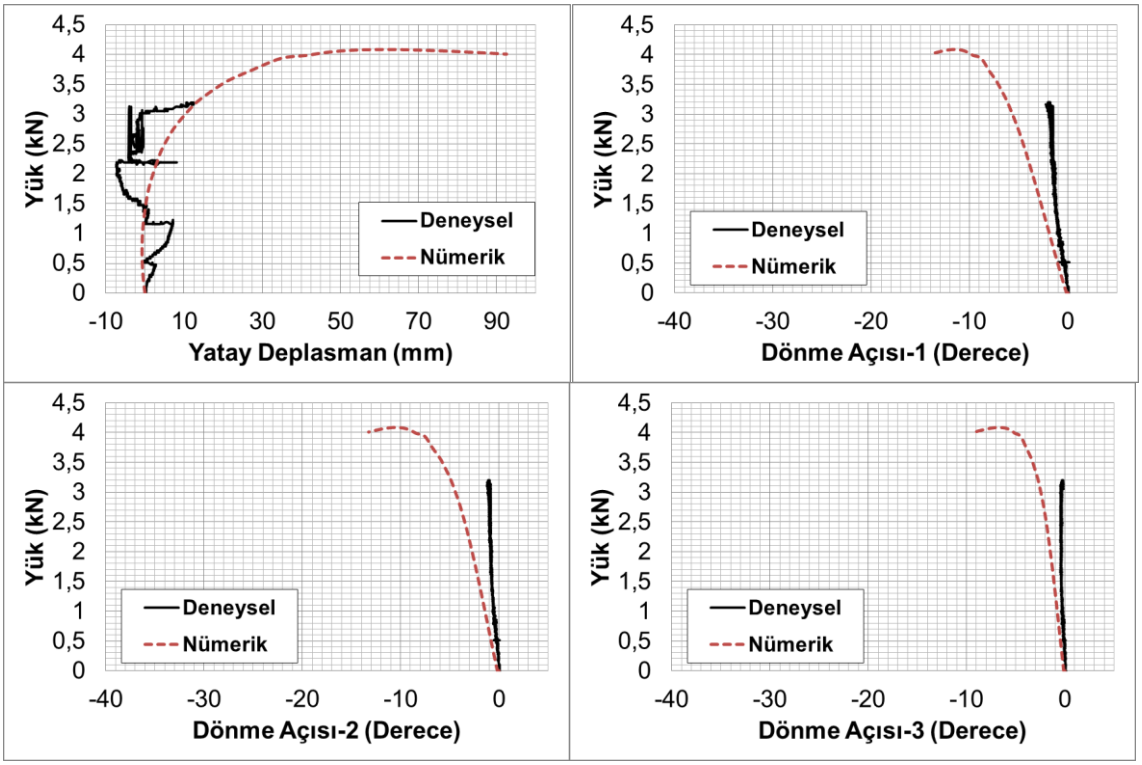


Şekil 6.50. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,51'te yük düşey deplasman, Şekil 6.52'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



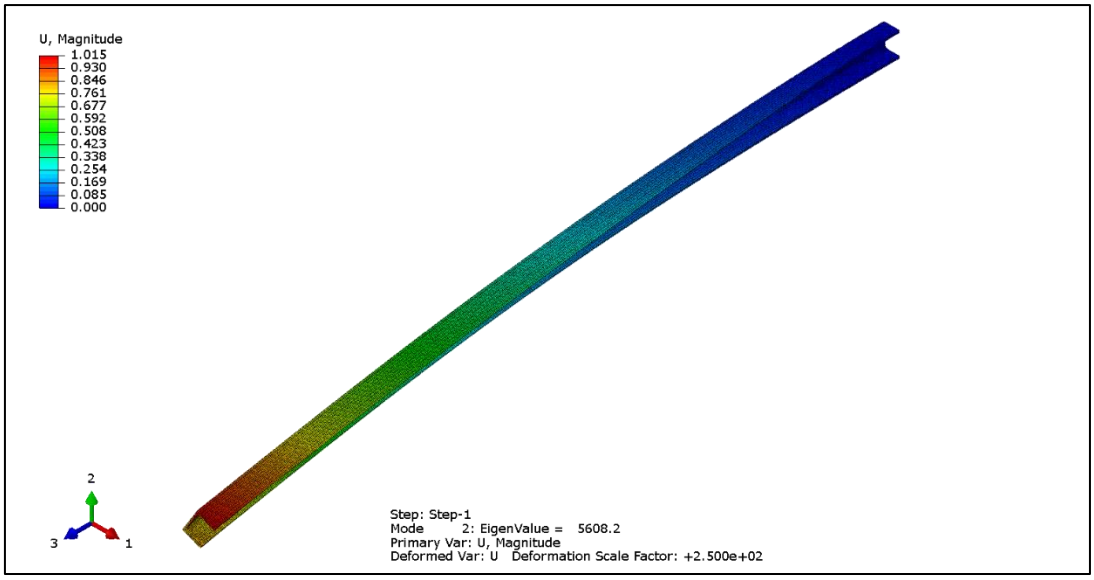
Şekil 6.51. 13 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.52. 13 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

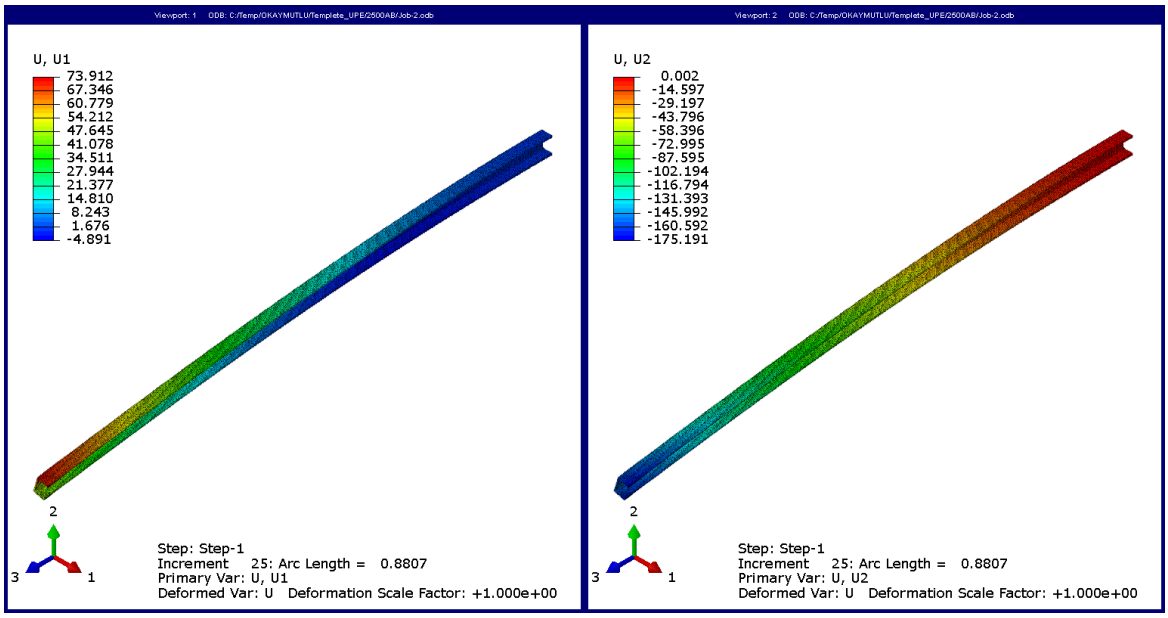
6.14. 14 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2500mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil alt başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.53 de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 5608,2N olarak bulunmuştur.



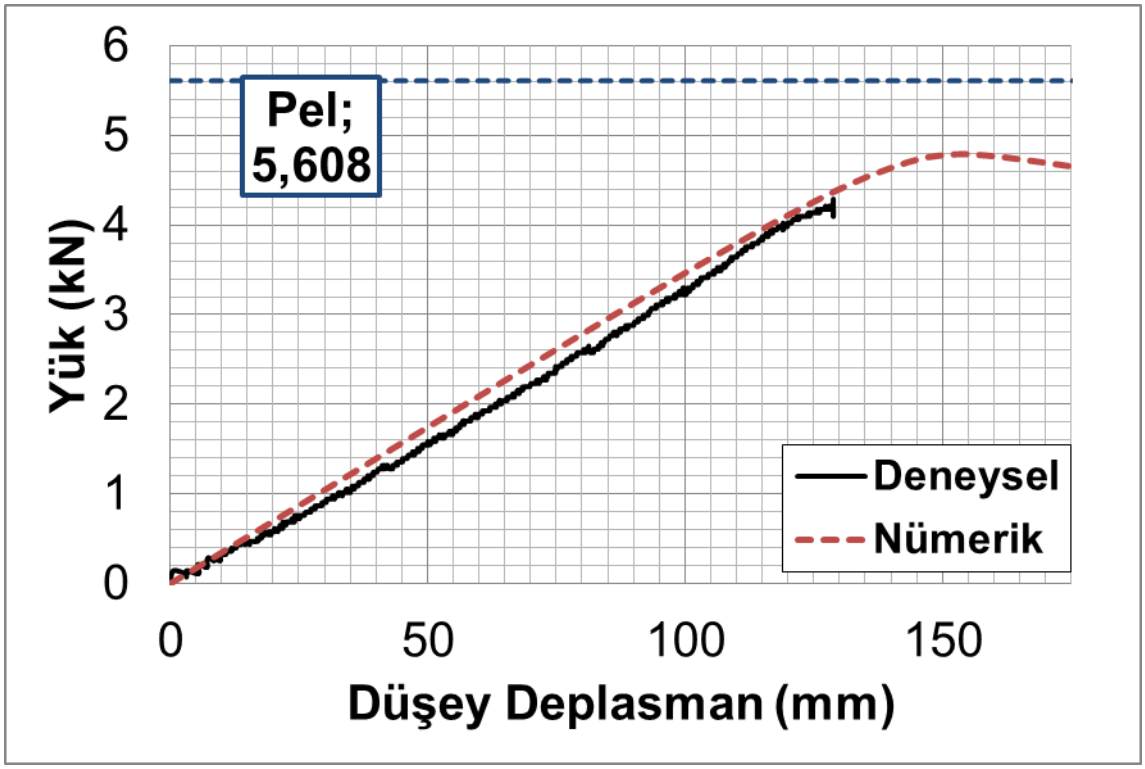
Şekil 6.53. 14.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 4789,33N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 25 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.54'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

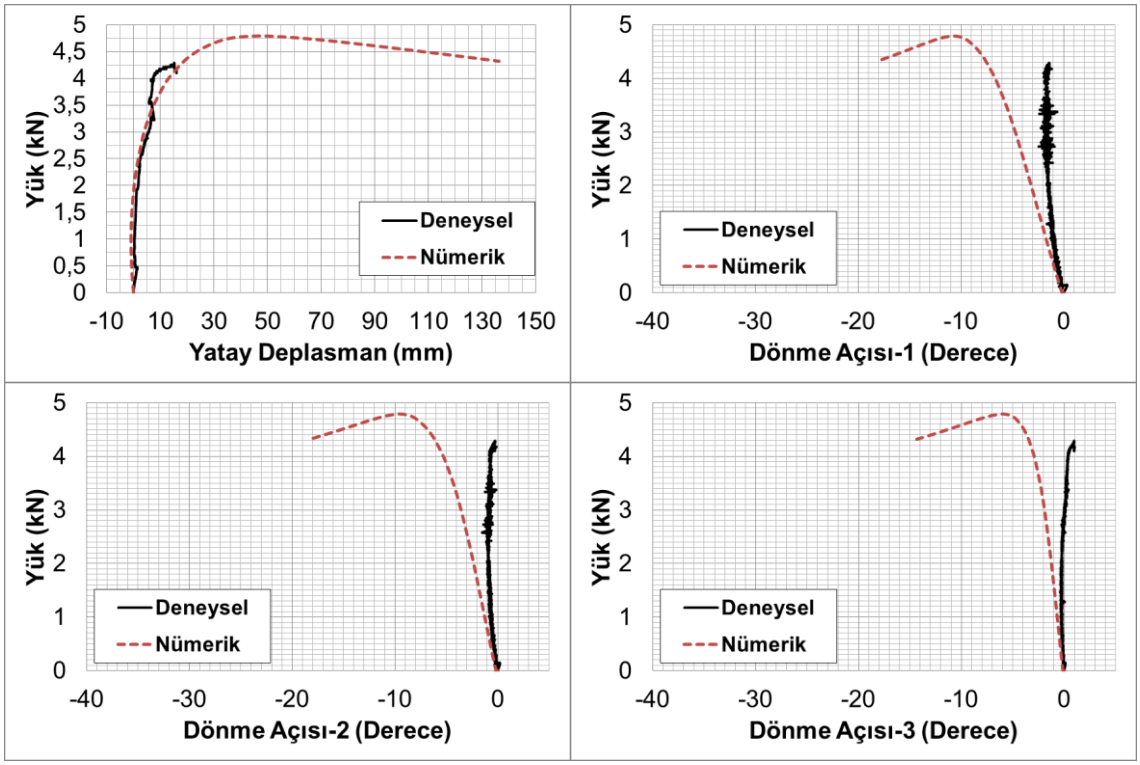


Şekil 6.54. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,55'te yük düşey deplasman, Şekil 6.56'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



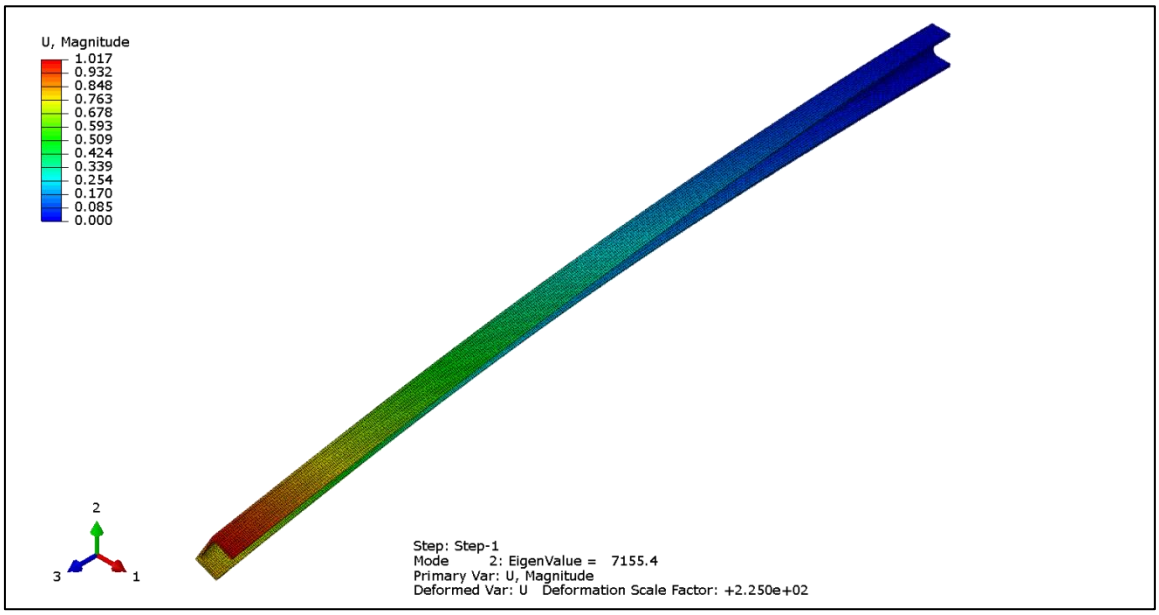
Şekil 6.55. 14 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.56. 14 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

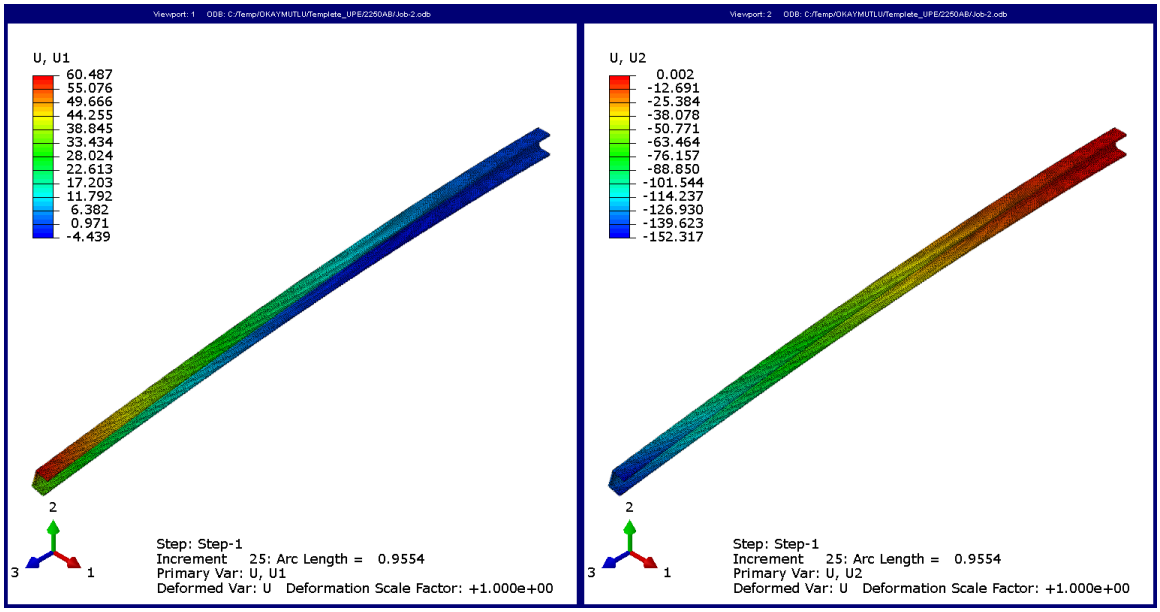
6.15. 15 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2250mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil alt başlıktan yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.57'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 7155.4N olarak bulunmuştur.



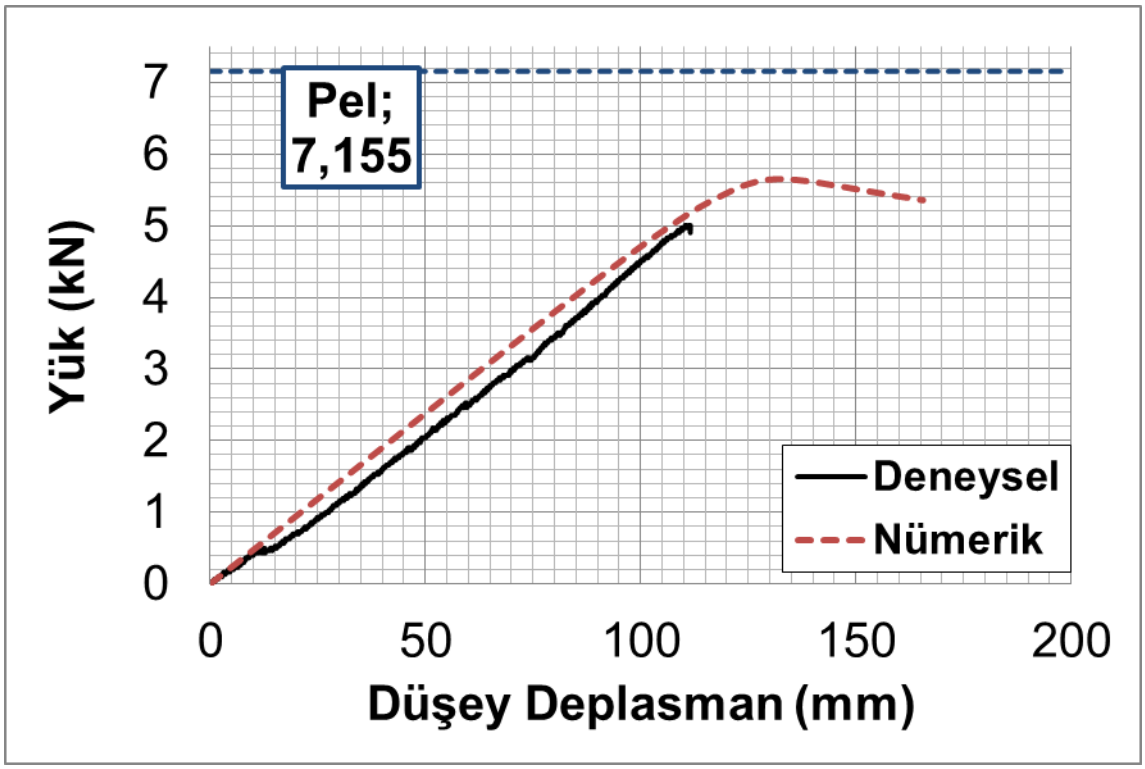
Şekil 6.57. 15.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 5650,92N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 25 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.58'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

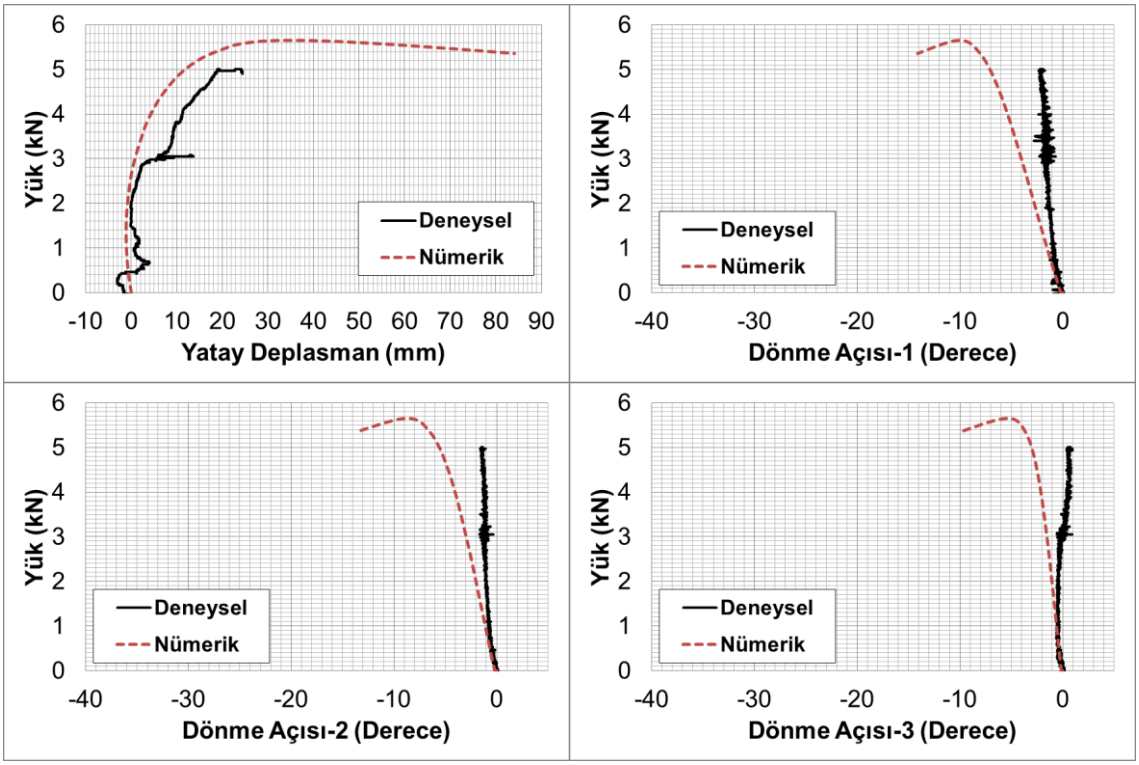


Şekil 6.58. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,59'te yük düşey deplasman, Şekil 6.60'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



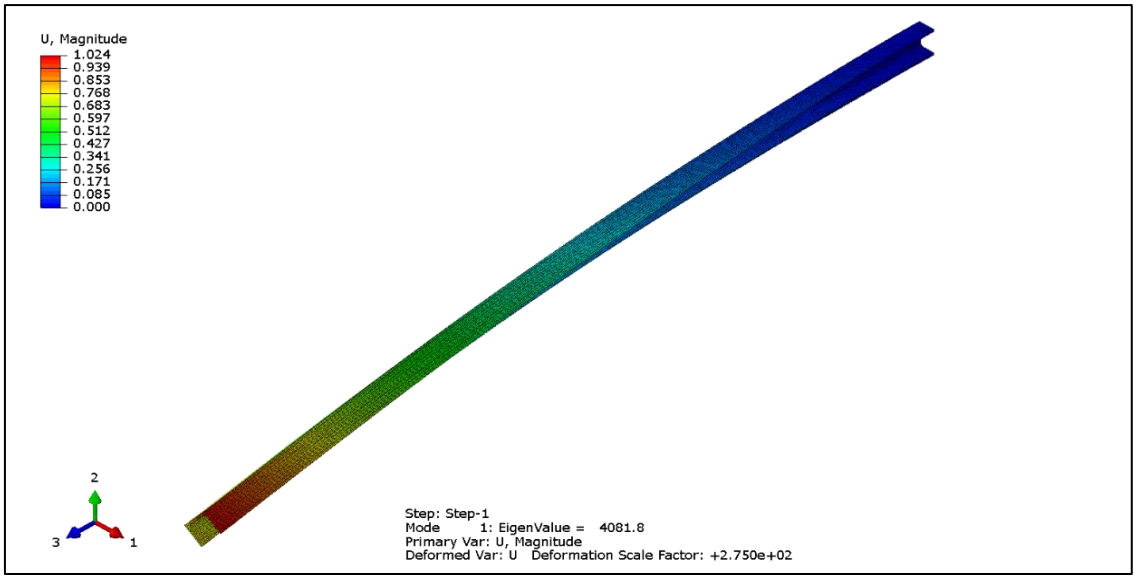
Şekil 6.59. 15 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.60. 15 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

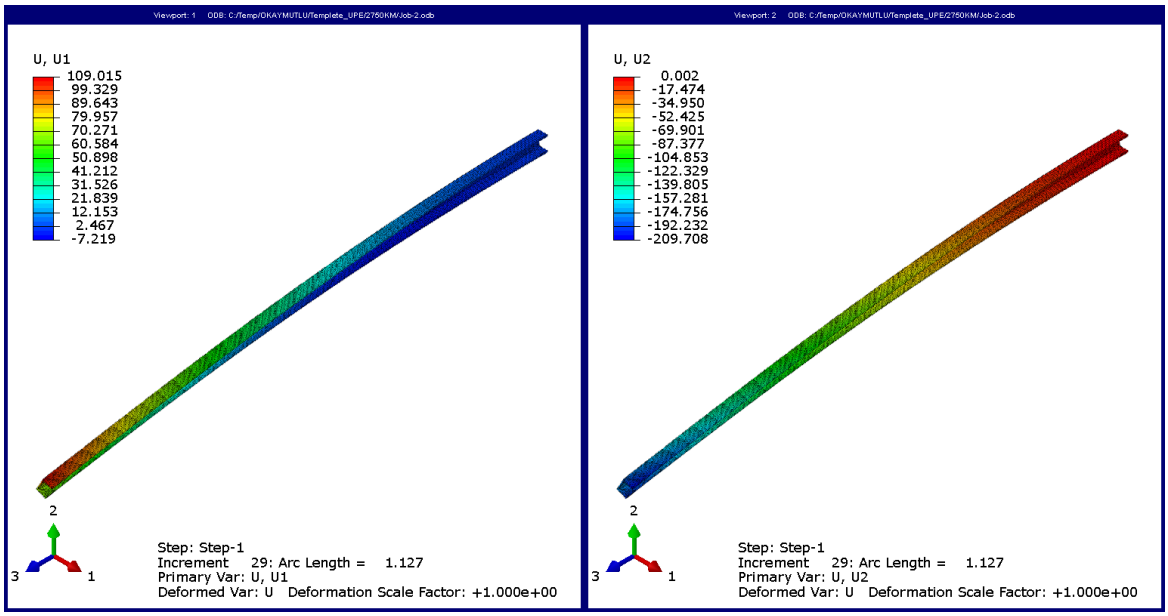
6.16. 16 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2750mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil kayma merkezinden yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.61'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 4081,8N olarak bulunmuştur.



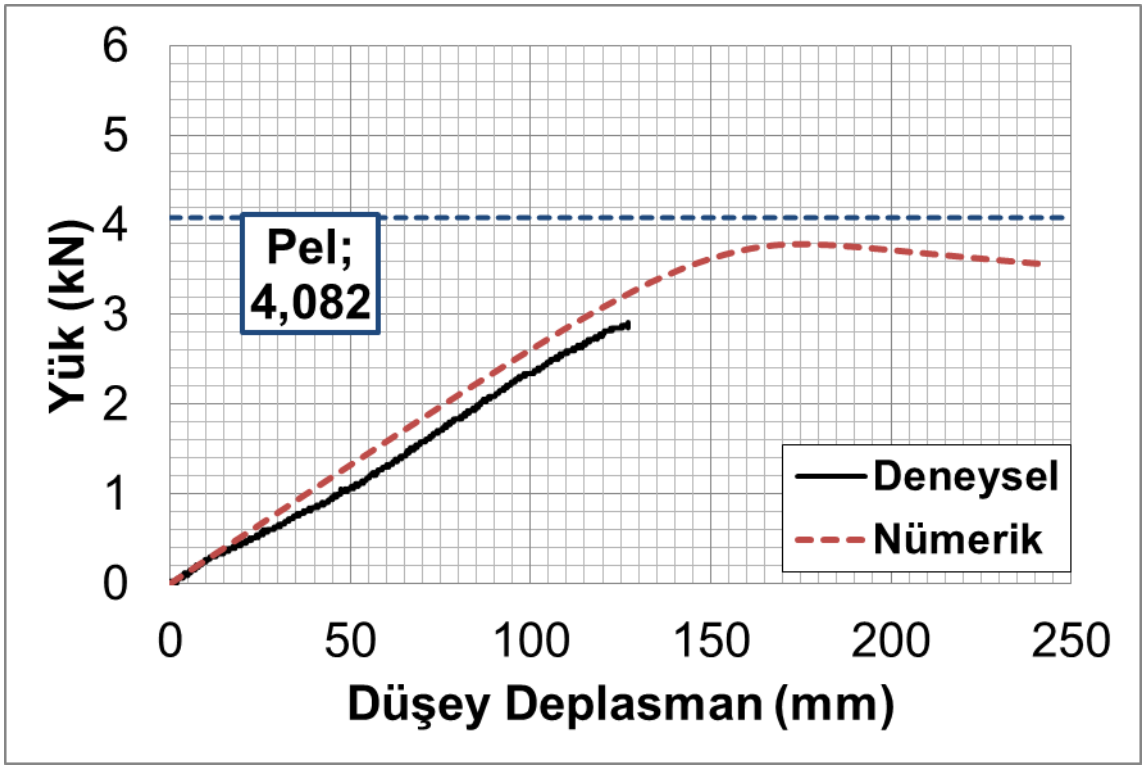
Şekil 6.61. 16.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 3786,55N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 29 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.62'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

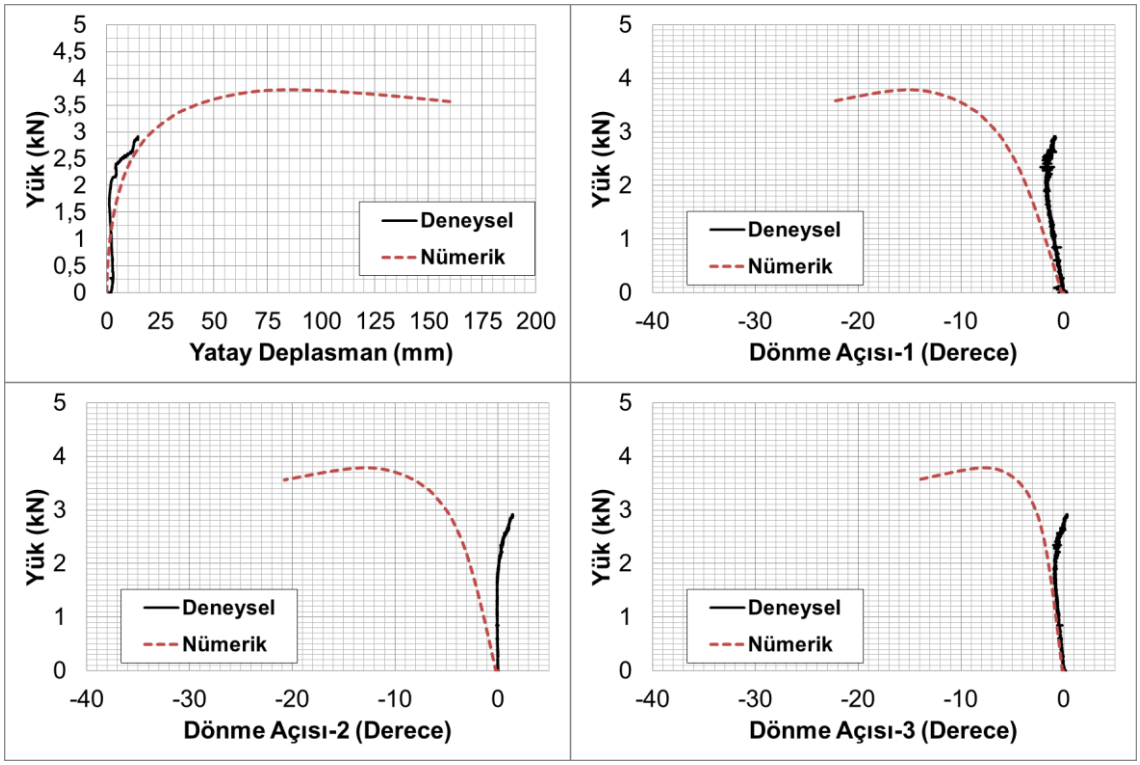


Şekil 6.62. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,63'te yük düşey deplasman, Şekil 6.64'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



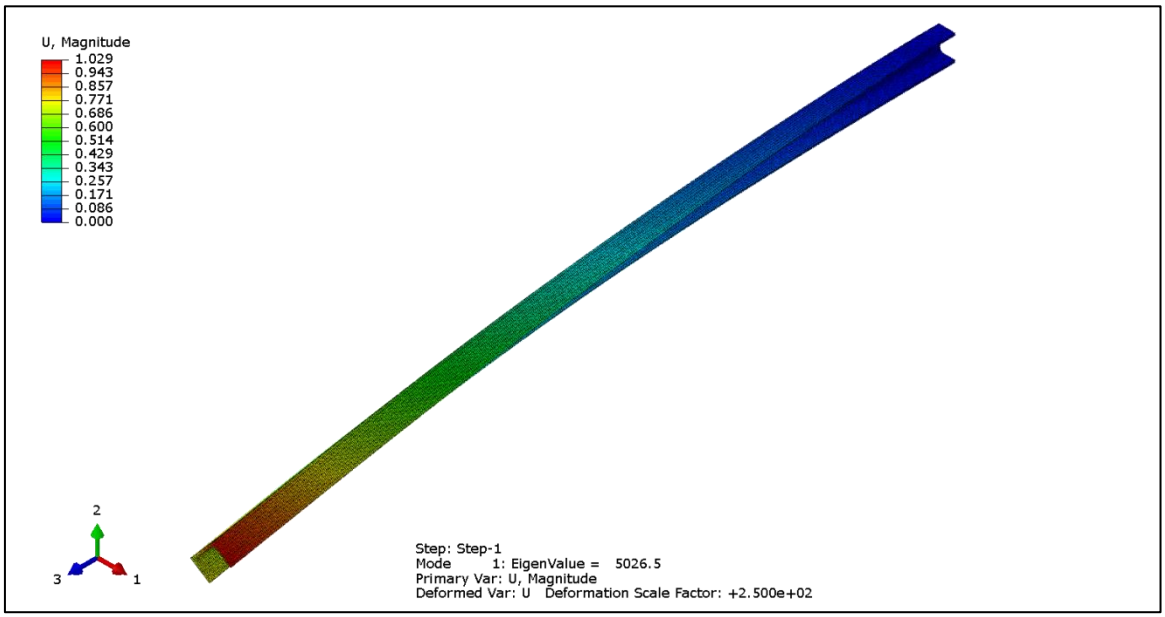
Şekil 6.63. 16 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.64. 16 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

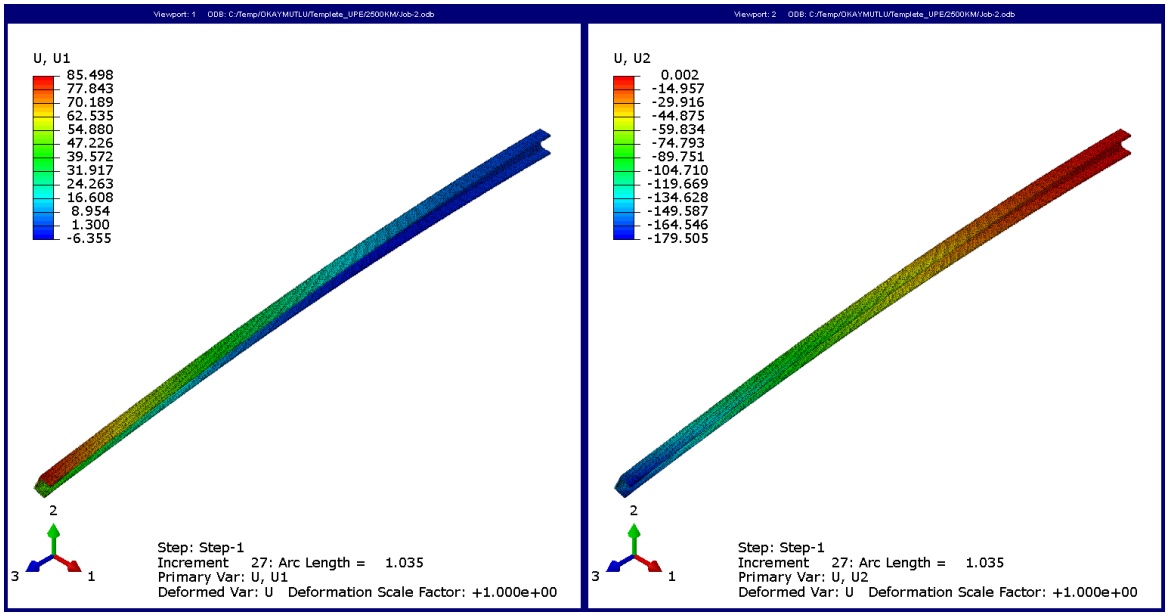
6.17. 17 Numaralı (UPE80) Numune İçin Sonuçlar

Numune 2500mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil kayma merkezinden yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.65'de görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 5026,5N olarak bulunmuştur.



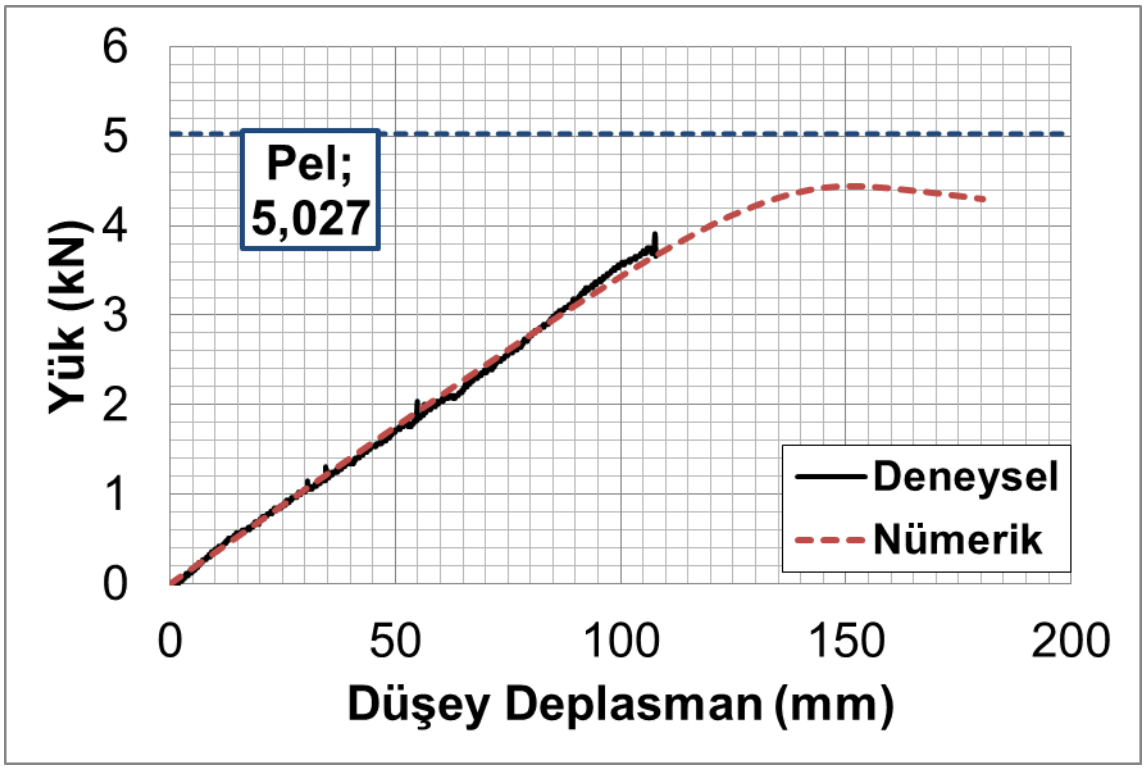
Şekil 6.65. 17.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 4441,38N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 27 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.66'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

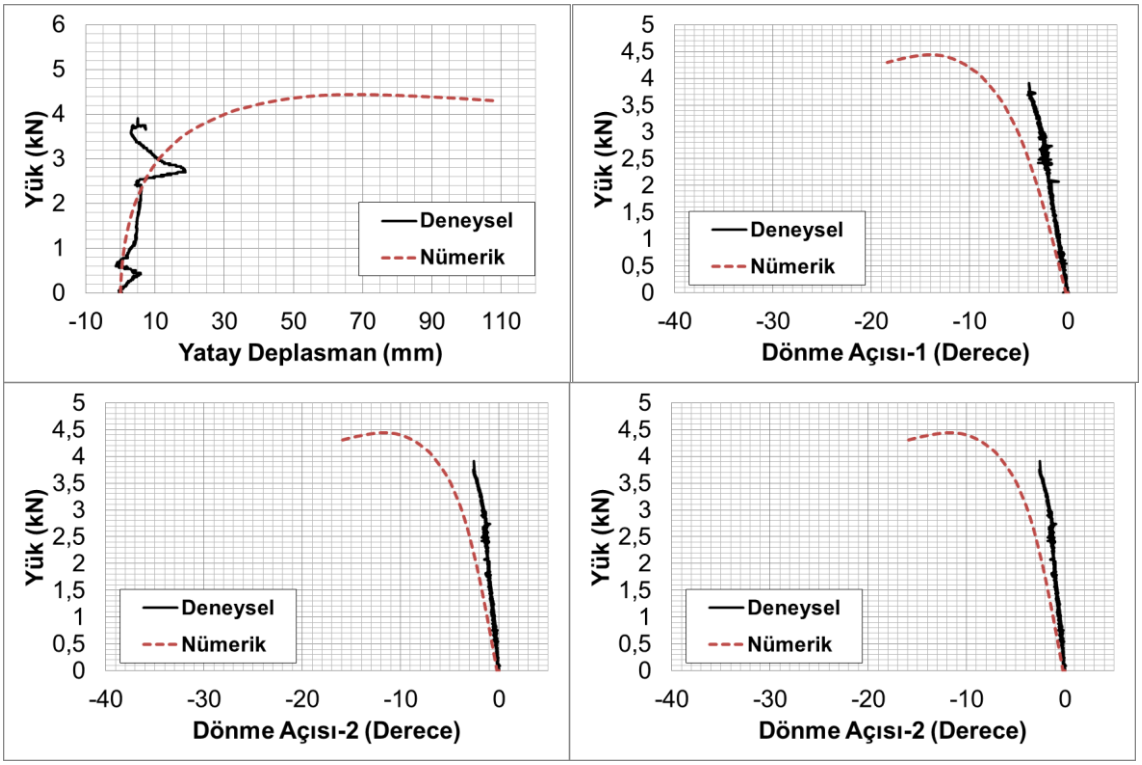


Şekil 6.66. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,67'te yük düşey deplasman, Şekil 6.68'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



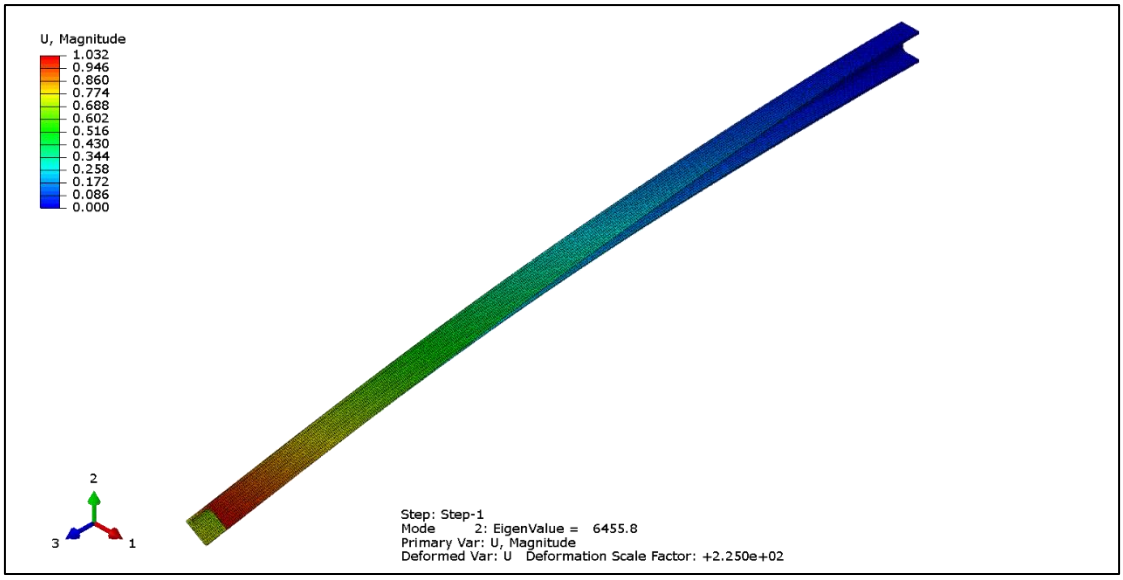
Şekil 6.67. nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.68. 17 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

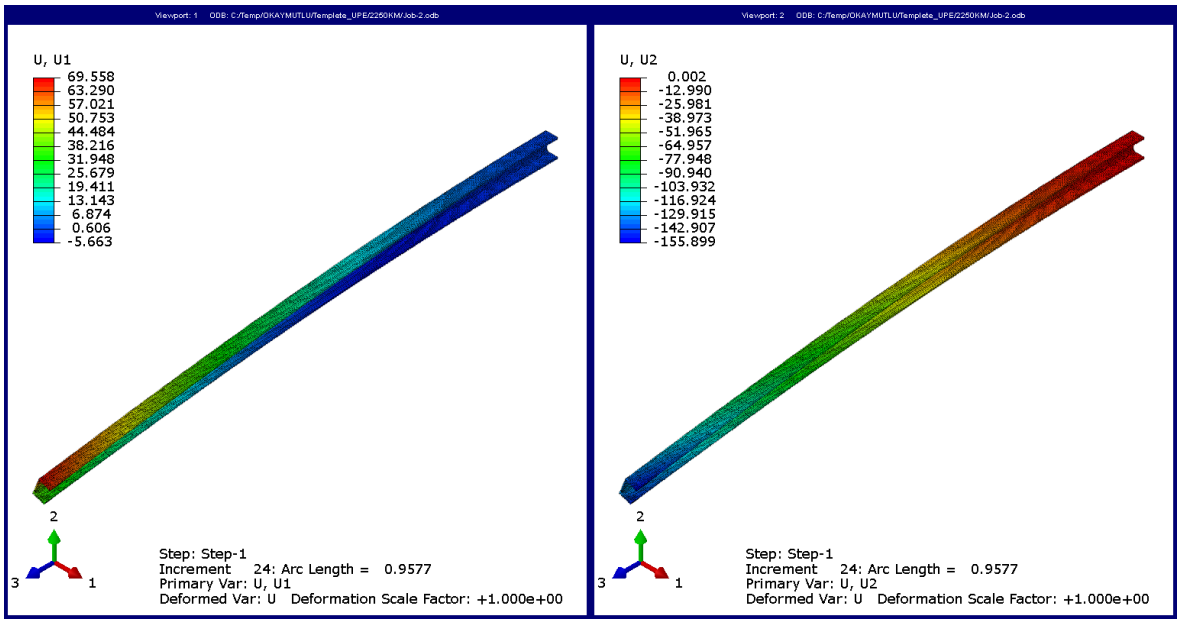
6.18. 18 numaralı (UPE80) Numune için Sonuçlar

Numune 2250mm uzunluğundadır. UPE80'lik profil kayma merkezinden yüklenmiştir. Özdeğer analizine göre elde edilen hakim modu gösterir, mod şekli aşağıda şekil.6.69'da görülmektedir. Bu sonuca göre kritik yük değeri 6455,8N olarak bulunmuştur.



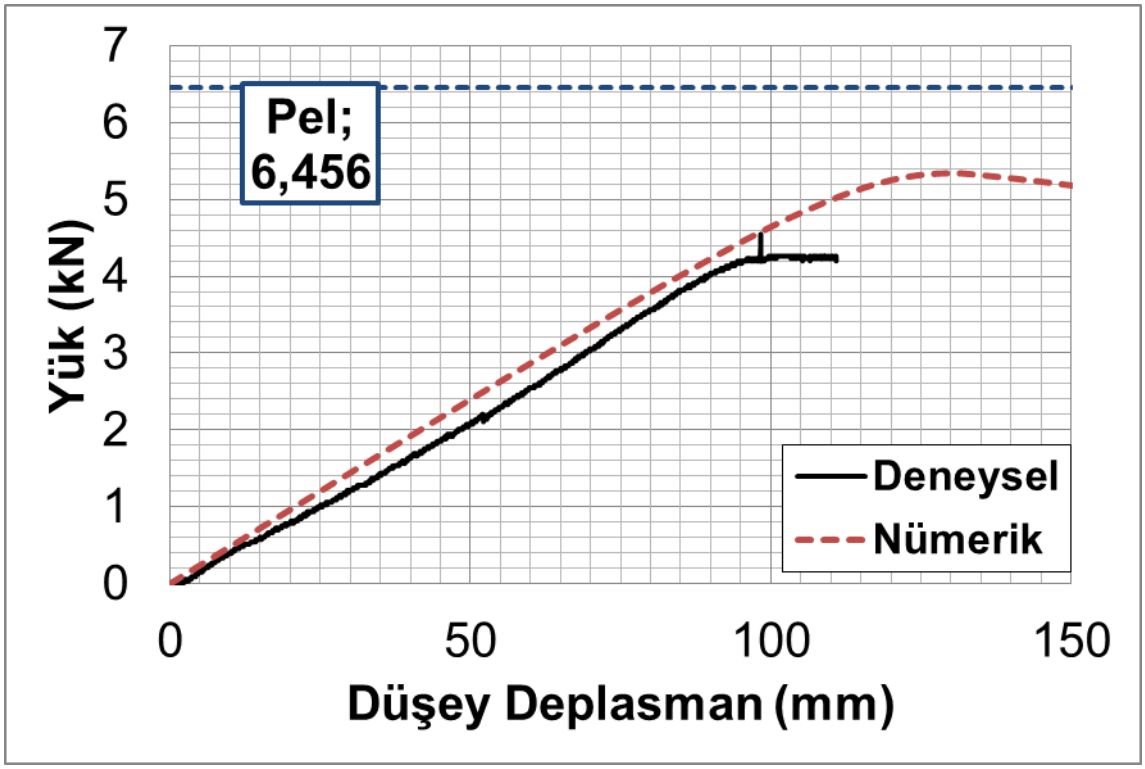
Şekil 6.69. 18.nolu numune için hakim mod şekli

Riks analizi sonucunda kritik yük değeri 5340,25N olarak bulunmuştur. Kritik yük değerine 24 nolu adımda ulaşılmıştır. Şekil 6.70'de ise Kritik yüklemenin olduğu adım için yer değiştirmeler gösterilmiştir.

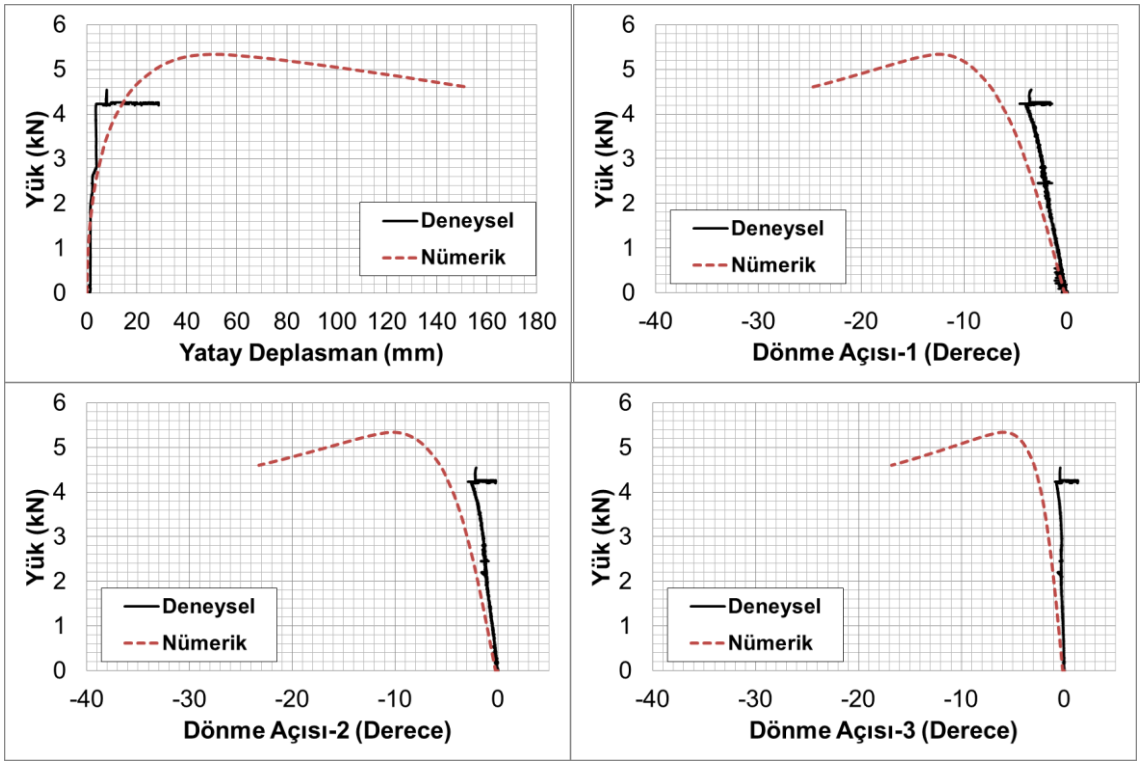


Şekil 6.70. Kritik yük adımı için U1 ve U2 Deformasyonları

Şekil 6,71'te yük düşey deplasman, Şekil 6.72'te yük yatay deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kirişin dönme açıları deneysel çalışmada olduğu gibi numerik çalışmada da benzer şekilde aynı noktalardan elde edilip karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.71. 18 nolu numune için Yük-Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 6.72. 18 nolu numune için Yük-Yatay Deplasman Grafiği ve açısal dönmeler

7. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney düzeneğinin deplasman limitlerine ulaşması ile deneyler sonlandırılmıştır. Deneylerde yükleme el ile hidrolik pompa kullanılarak yapılmıştır. El ile yüklemelerde darbe etkisi sebebi grafiklerde bazı sıçrama noktaları oluşmuştur. Deney adımı seçilirken bu durum göz önünde bulundurularak karşılaştırma adımı belirlenmiştir. Belirlenen bu adımlara denk gelen nümerik adım seçilmiş ve deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma deneysel sonuçların ve nümerik sonuçların oldukça tutarlı olduğunu göstermiştir. Nümerik analizde kullanılan malzeme modeli analiz süresi gözönünde bulundurularak lineerleştirilmiştir. Malzeme modelinde yapılan bu kabül analiz sonuçları değerlendirildiğinde ortaya çıkan bir miktar farklılığa etkisi olduğu düşünülmektedir.

Deneysel numunelerin ulaştığı yük değerleri için nümerik sonuçlar Çizelge 7,1'de toplu olarak olarak gösterilmiştir. Çizelgede deney sonuçlarından bir yük değeri seçilmiş, ABAQUS sonuçlarından bu yüke en yakın yük seçilerek bu adım eş deney adımı olarak adlandırılmıştır. Bu iki sonuç arasında farkın oldukça düşük olduğu çizeldeki fark miktarı ile gösterilmiştir. Ayrıca bu yük adımı için yatay, düşey deplasman miktarları milimetre cinsinden ve yüzdelik olarak tabloda gösterilmiştir. Aynı şekilde konsol ucunda açısal dönme değerleri, farkları ve farkların yüzdelik ifadesi gösterilmiştir.

IPE 160 üst başlık yüklemeleri değerlendirildiğinde 1 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme 2.86˚ farklı olarak bulunmuştur. Bu fark yüzde olarak ifade edildiğinde %40.7'lık bir farka takabül etmektedir. Aynı numune için düşey deplasman %11.6, yatay deplasman %8.5 farklı bulunmuştur. Sonuçlar kritik yük ve deney yükü arasındaki küçük farklılık da göz önünde bulundurulduğunda gayet yeterli görünmektedir. 2 nolu numunede açısal dönme farkı 4˚ kadar olmuştur. Bu fark %59.2 farklılığa tekabül etmektedir. Bu numune için yatay deplasman %0.087, düşey deplasman %26.7 farklı bulunmuştur. 3 nolu numunede düşey deplasman %15.05, yatay deplasman %28.23, açı %9.86 farklı bulunmuştur.

IPE 160 alt başlık yüklemeleri değerlendirildiğinde 4 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %39.75 düşey deplasman %12.48 yatay deplasman %3.99 farklı bulunmuştur. 5 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %8.29, düşey deplasman %1,81yatay deplasman %35.674 farklı bulunmuştur. 6 nolu numune için konsol ucunda

açısal dönme %44.24, düşey deplasman %10.40 yatay deplasman %52.50 farklı bulunmuştur.

IPE 160 kayma merkezi yüklemeleri değerlendirildiğinde 7 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %59.50, düşey deplasman %12.68 yatay deplasman 38.01 farklı bulunmuştur. 8 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %7.02, düşey deplasman %1.02, yatay deplasman %44.96 farklı bulunmuştur. 9 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %17.19, düşey deplasman %0.92, yatay deplasman %2.47 farklı bulunmuştur.

UPE 80 üst başlık yüklemeleri değerlendirildiğinde 10 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %72.64, düşey deplasman %14.12, yatay deplasman %45.32 farklı bulunmuştur. 11 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %77.76, düşey deplasman %14.72, yatay deplasman %40.18 farklı bulunmuştur. 12 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %71.85, düşey deplasman %21.09 yatay deplasman %85.03 farklı bulunmuştur.

UPE 80 alt başlık merkezi yüklemeleri değerlendirildiğinde 13 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %69.71, düşey deplasman %8.70 yatay deplasman %12.42 farklı bulunmuştur. 14 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %54.52, düşey deplasman %10.35, yatay deplasman %67.05 farklı bulunmuştur. 15 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %45.67, düşey deplasman %14.70 yatay deplasman %89.09 farklı bulunmuştur.

UPE 80 kayma merkezi yüklemeleri değerlendirildiğinde 16 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %77.68, düşey deplasman %10.08, yatay deplasman %21.65 farklı bulunmuştur. 17 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %43.57, düşey deplasman %1.08, yatay deplasman %19.86 farklı bulunmuştur. 18 nolu numune için konsol ucunda açısal dönme %56.21, düşey deplasman %11.05 yatay deplasman %1.52 farklı bulunmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde IPE profillerde oralama açısal dönme farkı 1.39˚,UPE profillerde ise 2.77˚ gibi çok küçük farklılıklara tekabül etmektedir. Benzer şekilde IPE profillerde düşey deplasman ortalama 4.2mm, yatay deplasman ortalama 5.4mm farklı

bulunmuştur. UPE profillerde düşey deplasman ortalama 8.5mm, yatay deplasman ortalama 2.43mm farklı bulunmuştur. Bu farklar oldukça küçük değerler olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.1. Deney adımı ve Eş Nümerik adım karşılaştırması

NUMUNELER		DENEY ADIMI Pex	ABAQUS EŞ DENEY ADIMI Paqex	FARK (kN)	FARK (%)	DENEY ADIMI	ABAQUS EŞ DENEY ADIMI	Düşey Dep. Farkı (mm)	FARK (%)
1	2750mm Üst Başlık	6,084	6,034	0,051	0,831	29,952	33,886	3,934	11,610
2	2500mm Üst Başlık	6,014	6,012	0,002	0,039	33,913	24,858	9,055	26,700
3	2250mm Üst Başlık	10,557	10,253	0,304	2,882	50,933	43,268	7,665	15,050
4	2750mm Alt Başlık	8,065	8,077	0,012	0,150	48,809	42,720	6,089	12,476
5	2500mm Alt Başlık	7,240	7,259	0,019	0,257	27,491	27,998	0,507	1,812
6	2250mm Alt Başlık	15,690	15,713	0,023	0,146	50,577	45,318	5,260	10,399
7	2750mm Kayma M.	6,746	6,730	0,016	0,239	31,656	36,251	4,595	12,675
8	2500mm Kayma M.	8,153	8,183	0,030	0,366	32,908	33,246	0,338	1,016
9	2250mm Kayma M.	13,247	13,257	0,010	0,076	40,657	41,033	0,377	0,918
10	2750mm Üst Başlık	1,571	1,580	0,009	0,579	72,189	61,999	10,190	14,116
11	2500mm Üst Başlık	1,300	1,309	0,009	0,652	44,876	38,272	6,604	14,716
12	2250mm Üst Başlık	1,622	1,605	0,017	1,044	43,848	34,600	9,248	21,091
13	2750mm Alt Başlık	3,197	3,254	0,057	1,763	137,524	125,554	11,970	8,704
14	2500mm Alt Başlık	2,195	2,182	0,012	0,568	69,844	62,618	7,227	10,347
15	2250mm Alt Başlık	1,866	1,861	0,004	0,240	45,858	39,117	6,741	14,699
16	2750mm Kayma M.	2,756	2,764	0,008	0,293	118,283	106,365	11,918	10,075
17	2500mm Kayma M.	3,087	3,070	0,017	0,542	87,758	88,712	0,954	1,075
18	2250mm Kayma M.	4,263	4,317	0,054	1,248	103,530	92,092	11,438	11,048

NUMUNELER		DENEY ADIMI	ABAQUS EŞ DENEY ADIMI	Yatay Dep. Farkı (mm)	Yatay Dep. Farkı (%)	DENEY 1 NOLU SENSOR	ABAQUS 1 NOLU SENSOR	Açı Farkı (derece)	Açı Farkı (%)
1	2750mm Üst Başlık	28,516	26,093	2,424	8,499	7,031	4,170	2,861	40,691
2	2500mm Üst Başlık	15,830	15,816	0,014	0,087	6,747	2,752	3,995	59,217
3	2250mm Üst Başlık	42,192	58,786	16,593	28,227	9,944	11,031	1,087	9,856
4	2750mm Alt Başlık	14,105	14,691	0,586	3,988	2,514	1,515	0,999	39,747
5	2500mm Alt Başlık	5,965	3,837	2,128	35,674	1,142	1,048	0,095	8,292
6	2250mm Alt Başlık	25,377	12,054	13,323	52,501	0,967	1,734	0,767	44,236
7	2750mm Kayma M.	15,000	9,299	5,701	38,008	3,508	1,421	2,087	59,504
8	2500mm Kayma M.	15,678	8,630	7,048	44,957	1,368	1,471	0,103	7,017
9	2250mm Kayma M.	16,982	17,412	0,430	2,472	2,472	2,985	0,513	17,191
10	2750mm Üst Başlık	5,666	10,361	4,695	45,317	1,068	3,904	2,836	72,641
11	2500mm Üst Başlık	3,298	5,512	2,215	40,180	0,606	2,726	2,120	77,760
12	2250mm Üst Başlık	0,868	5,800	4,932	85,032	0,838	2,977	2,139	71,853
13	2750mm Alt Başlık	12,443	14,208	1,765	12,420	1,908	6,300	4,392	69,712
14	2500mm Alt Başlık	1,985	0,654	1,331	67,047	1,562	3,433	1,872	54,516
15	2250mm Alt Başlık	0,104	0,957	0,852	89,086	1,411	2,597	1,186	45,665
16	2750mm Kayma M.	12,492	15,944	3,452	21,649	1,257	5,632	4,375	77,681
17	2500mm Kayma M.	9,523	11,883	2,360	19,863	2,966	5,257	2,291	43,578
18	2250mm Kayma M.	15,318	15,086	0,233	1,518	2,895	6,611	3,716	56,212

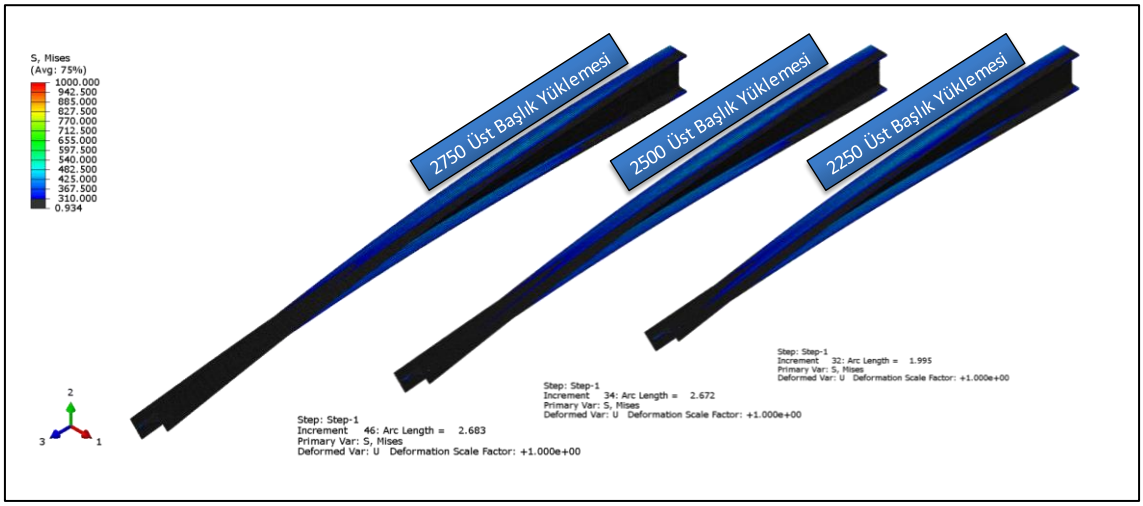
ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı sayesinde nümerik analiz deney sınırlarının ötesine taşınabilmiştir. Bu sonuçlar göçme mekanizmasının oluştuğu adıma kadar devam ettirilmiştir. Bu sayede kritik yük değerleri bulunmuş, sonuçlar kıyaslanabilmiştir. Çizelge 7,2'de kritik yük değeri için nümerik analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tüm sonuçlar görsel olarak şekil 7.7'de ve 7.8'de gösterilmiştir. Burada yeşil renk ile gösterilen profil yüklenem öncesini ifade etmektedir. Özdeğer burkulma analizinden bulunan sonuç Pel olarak ifade edilmiştir. Deney sonucu ile nümerik analizi kıyaslamak için siyah ve pembe renkli profiller kullanılmıştır. Burada siyah profil deneysel çalışma içerisinden seçilen Pex yüklemesine karşılık gelmektedir. Nümerik analizde Pex değerine en yakın sonuçlu nümerik analiz adımını pembe profil temsil etmektedir. Pembe profil için yük değeri Paqex terimi ile ifade edilmiştir. Nümerik analiz devam ettirildiğinde ise mavi renkli profilin konumuna ulaşılmaktadır. Mavi renkli profilin yükü Pcr terimi ile ifade edilmiştir. Nümerik analiz sonucunda yanal burulmalı burkulma göçme durumu için profilin taşıyabildiği en büyük yük değeri bu değerdir.

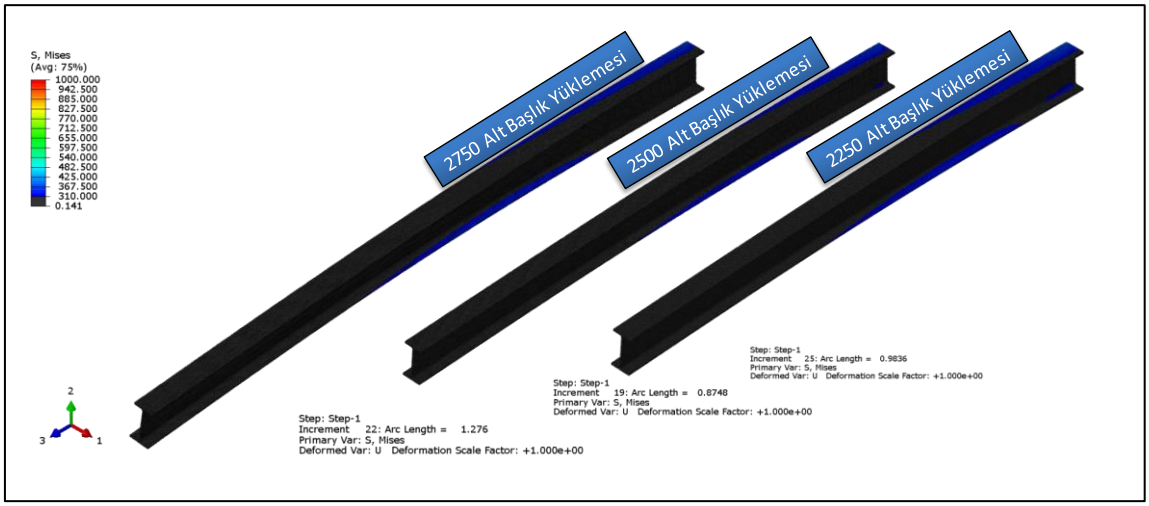
Çizelge 7.2. Nümerik analiz Kritik Yük için sonuçlar

NUMUNELER		ABAQUS Pcr	ABAQUS Düşey Deplasman (mm)	ABAQUS Yatay Deplasman (mm)	1.Nolu Sensör Açısı
1	2750mm Üst Başlık	8,125	118,502	160,030	23,617
2	2500mm Üst Başlık	9,357	106,860	146,241	23,241
3	2250mm Üst Başlık	11,024	88,992	125,261	21,846
4	2750mm Alt Başlık	11,160	71,480	57,694	4,380
5	2500mm Alt Başlık	14,222	60,782	32,541	2,938
6	2250mm Alt Başlık	16,878	54,456	30,071	2,796
7	2750mm Kayma M.	10,297	69,589	66,102	8,070
8	2500mm Kayma M.	12,178	60,388	52,366	7,148
9	2250mm Kayma M.	13,660	43,705	21,792	3,663
10	2750mm Üst Başlık	3,310	202,004	133,776	23,742
11	2500mm Üst Başlık	3,834	168,854	109,442	22,143
12	2250mm Üst Başlık	4,474	141,049	89,449	20,760
13	2750mm Alt Başlık	4,085	175,294	59,674	11,377
14	2500mm Alt Başlık	4,789	152,636	45,029	10,546
15	2250mm Alt Başlık	5,651	131,536	33,570	9,862
16	2750mm Kayma M.	3,787	177,446	88,804	15,412
17	2500mm Kayma M.	4,441	150,740	67,282	13,895
18	2250mm Kayma M.	5,340	129,986	51,183	12,434

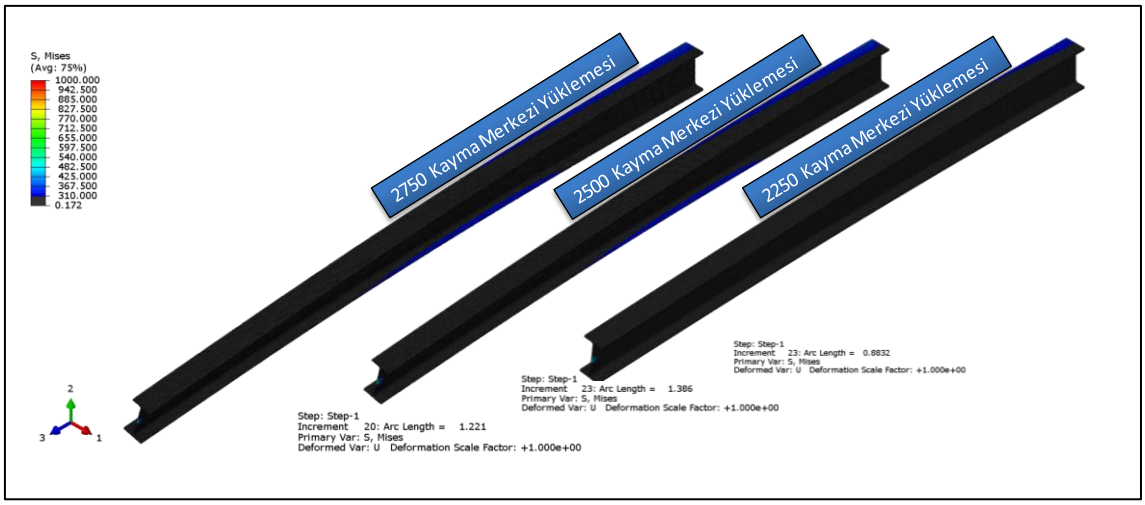
IPE profiller için akma noktasını aşan von-misses gerilme dağılışı üst başlıklar için Şekil 7,1, alt başlık yüklemeleri için Şekil 7,2, kayma merkezi yüklemeleri için Şekil 7,3'de gösterilmiştir. Benzer şekilde UPE profillerin akma noktasını aşan von-misses gerilme dağılışı üst başlıklar için Şekil 7,4, alt başlık yüklemeleri için Şekil 7,5, kayma merkezi yüklemeleri için Şekil 7,6'da gösterilmiştir. Burada özellikle IPE üst başlık yüklemesinde daha rahat görüleceği üzere yükleme yerine bağlı olarak kesitte plastik özellik gösteren bölgeler benzerdir. Bu bölgelerin konsol boyu ile çok fazla değişmeden hemen hemen aynı yerde oluştuğu görülmüştür.



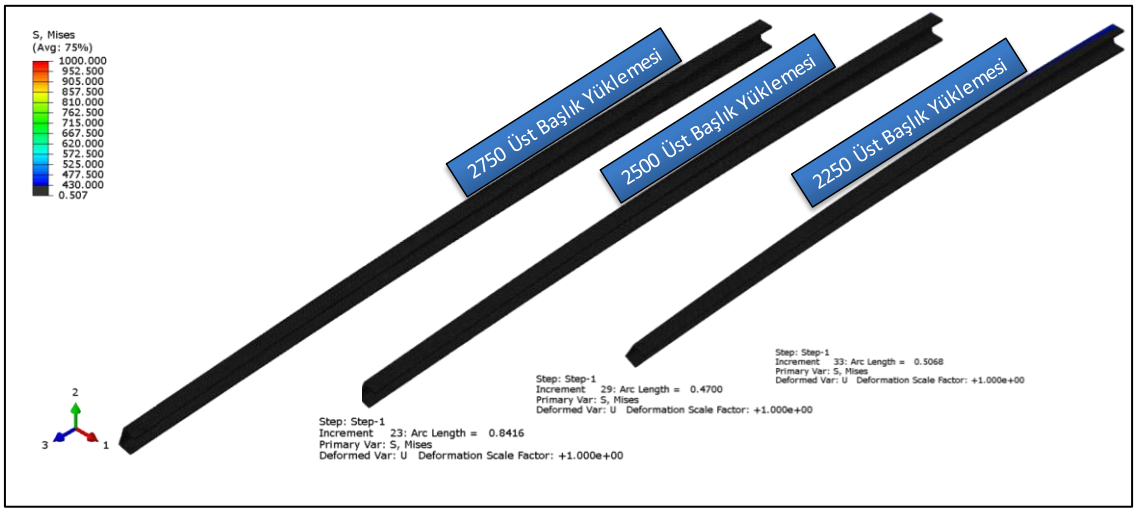
Şekil 7.1. IPE profil üst başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)



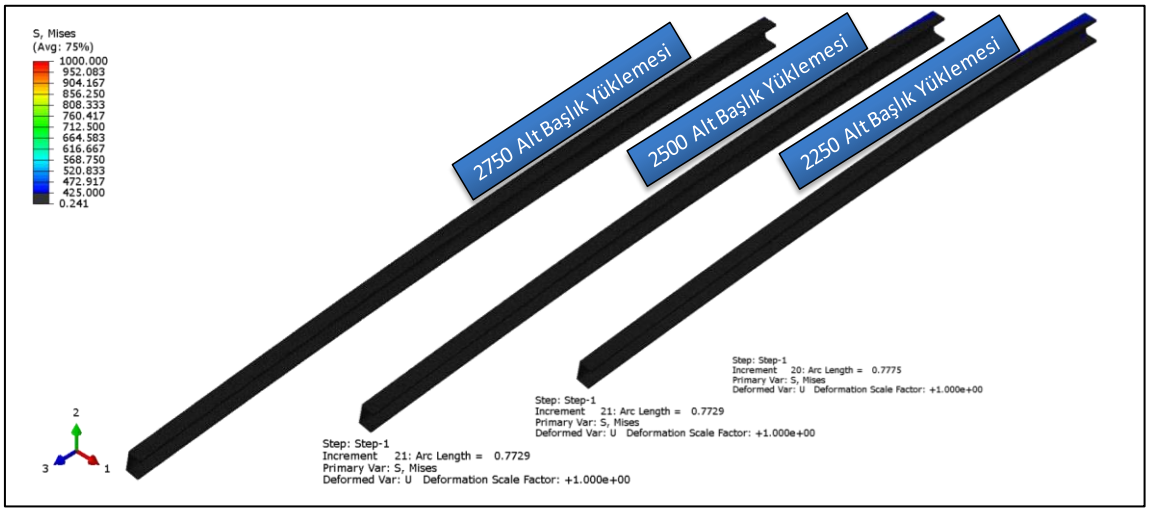
Şekil 7.2. IPE profil alt başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)



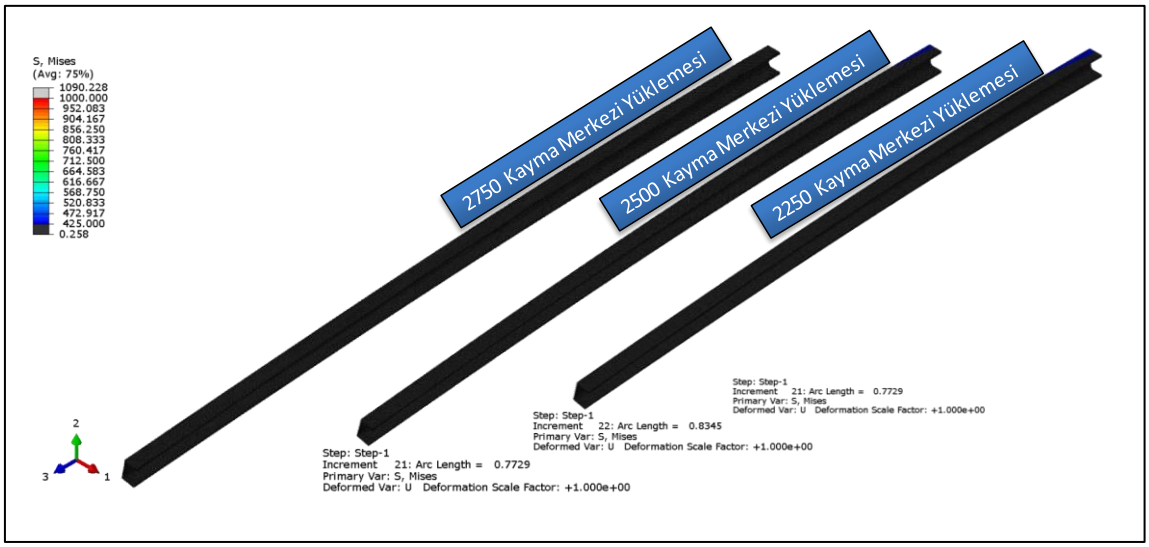
Şekil 7.3. IPE profil kayma merkezi yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)



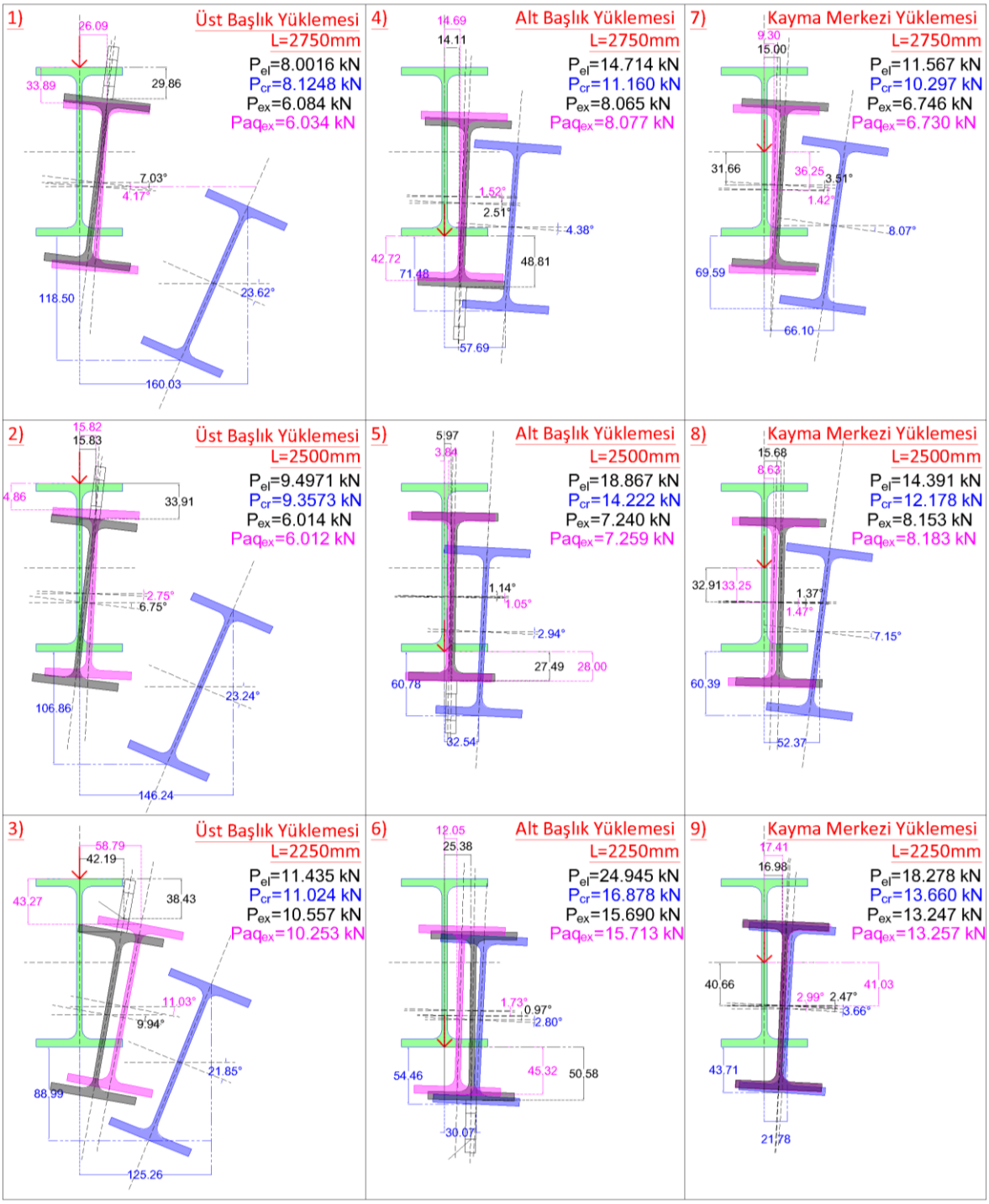
Şekil 7.4. UPE profil üst başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)



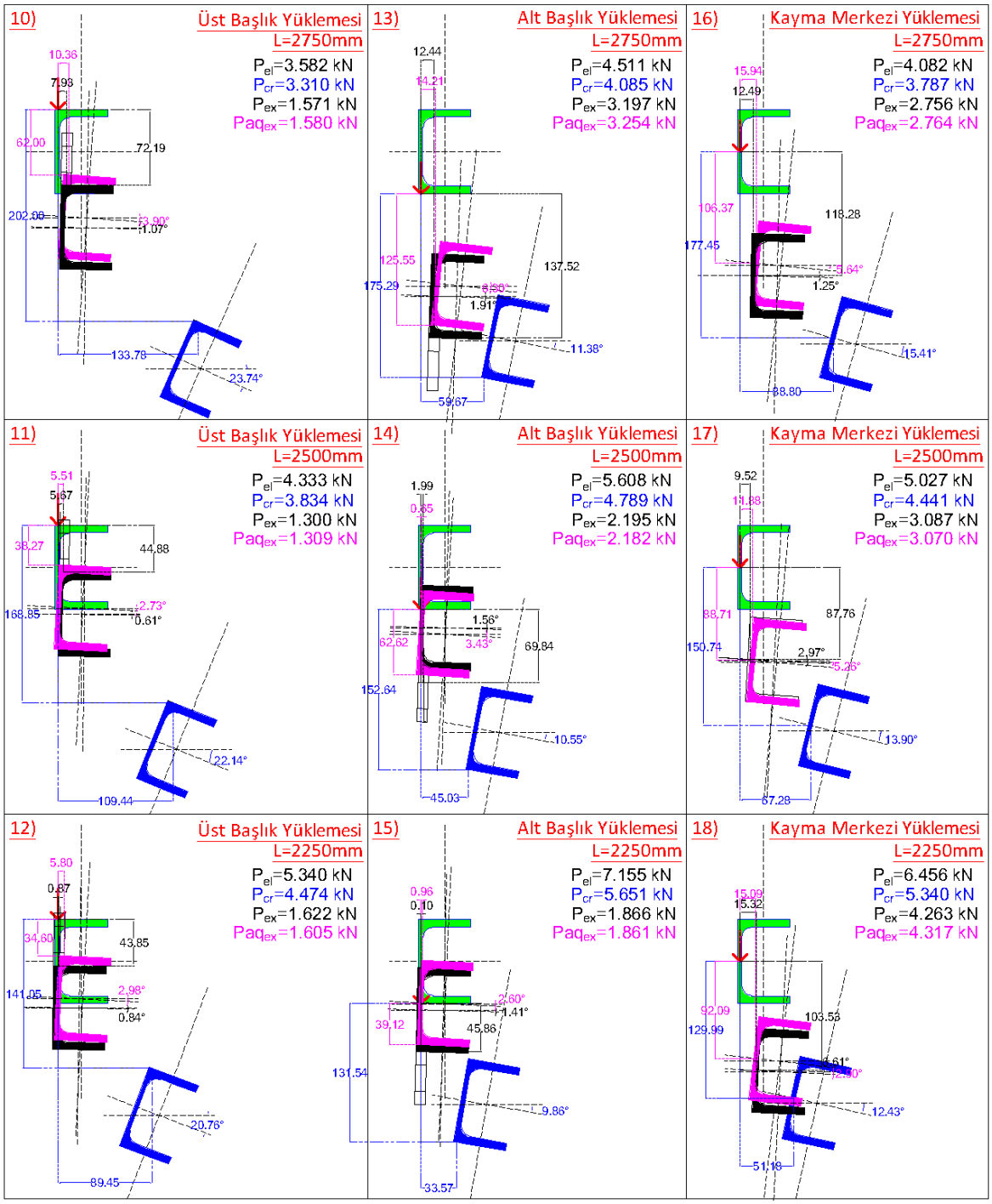
Şekil 7.5. UPE profil alt başlık yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)



Şekil 7.6. UPE profil kayma merkezi yüklemeleri akma bölgesi (Von misses)



Şekil 7.7. I Profiller için deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması



Şekil 7.8. UPE Profiller için deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yürütülen çalışma kapsamında değişik uzunluklara sahip ve kesit üzerinde uygulanan yüklemenin konumu değişim gösteren IPE ve UPE tipinde çelik konsol kirişler yanal burkulmalı burulma göçme mekanizması meydana gelene kadar ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak nümerik analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. 3 farklı uzunlukta konsol kiriş, kesit üzerinde 3 farklı noktadan konsol ucuna uygulanan kesme kuvveti etkisinde yanal burkulmalı burulma göçme mekanizması meydana gelene kadar monotonik artan yükleme etkisinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiş, kirişlerin limit burkulma yükleri, konsol ucu düşey deplasmanları ve maksimum burulma açısı değerleri hespalanarak, deneysel sonuçlar ile kıyaslanmış ve yorumlanmıştır. ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile deneyleri gerçekleştirilen çelik konsol kirişlerin yanal burkulmalı burulma davranışları iki aşamalı bir analiz tekniği kullanılarak nümerik olarak elde edilmiştir. Bu analiz prosedürü çelik konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulma göçme davranışını deneysel sonuçlar ile uyumlu ve gerçekçi bir şekilde elde edilebilmesi için bu çalışma kapsamında önerilmiş ve uygulanmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

IPE160 ve UPE80 çelik konsol kirişlerin boyları kısaldıkça konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin önemli oranda arttığı, konsol kirişlerin uç noktalarına uygulanan kesme kuvveti etkisi ile meydana gelen düşey deplasmanların ve konsol ucunda ölçülen maksimum burulma açısı değerlerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir.

Çelik konsol kirişlerde en büyük maksimum taşıma gücü değerlerini kesme kuvvetinin IPE ve UPE çelik profilin alt başlığına uygulandığı deney elemanlarında gözlendiği belirlenmiştir. Kesme kuvvetinin IPE çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit üst başlığına uygulandığı deney elemanlarından ortalama %47.5 daha fazla maksimum taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır. Kesme kuvvetinin IPE çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit gövdesine uygulandığı deney elemanlarından ise ortalama %13.7 daha fazla maksimum taşıma gücü değerleri sergilemişlerdir. UPE profillerde ise kesme kuvvetinin konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit

üst başlığına uygulandığı deney elemanlarından ortalama %24.9 daha fazla maksimum taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır. Kesme kuvvetinin IPE çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit gövdesine uygulandığı deney elemanlarından ise ortalama %6.7 daha fazla maksimum taşıma gücü değerleri sergilemişlerdir.

Abaqus sonuçlarında meydana gelen burulma açıları IPE 160 için 2.8˚ ile 23.6˚ arasında değişim göstermiş ve çelik konsol kirişlerin uç noktasında ortalama 10.86˚ gibi oldukça büyük maksimum burulma açısı değerleri meydana gelmiştir. UPE profiller içinse bu aralık 9.86 ˚ ve 23.74˚dir. Ortalaması 15.57˚dir.

Hesaplanan rijitlik değerleri incelendiğinde IPE ve UPE çelik konsol kirişlerin boyları kısaldıkça rijitlik değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir.

Deneysel çalışmada maksimum taşıma gücünde en büyük rijitlik değerleri IPE ve UPE çelik kiriş kesiti üzerinde alt başlıktan yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.

Deney elemanlarına uygulanan kesme kuvveti etkisiyle tüketilen enerji kapasitesi değerleri incelendiğinde IPE ve UPE çelik konsol kiriş boyu azaldıkça enerji tüketim kapasitesi değerlerinin önemli oranlarda arttığı görülmüştür.

Deneysel çalışma kapsamında en büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerini IPE kiriş kesiti üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada IPE çelik kirişlerde daha fazla düşey ve yatay deplasman yaparak, çok daha fazla burulma açısı sergileyen, kesit üzerinde gövdeden yüklenen çelik konsol kiriş deney elamanları daha fazla enerji tüketim kapasitesi sergilemişlerdir.

IPE160 çelik kirişler için karşılaştırılan deney adımı ve eş değer nümerik adım için burkulma yükleri arasında ortalama %0.55 bir fark olduğu hesaplanmıştır. Düşey deplasman, yatay deplasman ve maksimum burulma açısı değerleri arasında ise sırasıyla %10.3, %23.82 ve %31.75 gibi farklar olduğu belirlenmiştir. UPE80 çelik kirişler içinse bu

fark düşey deplasman için %11.86, yatay deplasman için %42.46 ve burulma açısı için %63.29 olarak tespit edilmiştir.

ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen nümerik maksimum düşey deplasman ve maksimum rotasyon açısı değerleri ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın büyük olmasında ABAQUS sonlu eleman yazılımında kullanılan elasto-plastik bi-lineer izotrop malzeme modelinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonlu elemanlar modelinde çelik konsol kirişte limit bir gerilme değerine ulaşıldığında o noktada plastikleşme olduğu ve sabit gerilme altında sadece birim şekil değiştirmenin artış gösterdiği varsayımı ve malzeme modeli kullanılarak analiz yapılmıştır. Ancak gerçekte plastikleşme olması durumunda kiriş kesitindeki liflerde ve kiriş boyunca plastikleşme bölgesinde elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş bu kadar keskin olmamakta, elasto-plastik geçiş bölgesinde davranış farklılık göstermektedir. Malzeme modelindeki bu farklılık düşey deplasman ve rotasyon değerleri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Deneysel ve nümerik deplasman değerleri arasındaki farkın bir diğer nedeninin ise burkulma olayı başladıktan sonra plastikleşme meydana gelmeye başlayıp kiriş üzerinde plastikleşen bölgenin ilerlemesi durumunda burkulma modu değişim gösterebilmekte ve kirişte meydana gelen çarpılma yön değiştirebilmektedir. Plastikleşen bölge bir imperfection (bölgesel kusur) gibi davranış göstererek burkulma modunu değiştirebilmektedir. Rastlantısal olan bu durum nümerik modele aksettirilememiştir.

KAYNAKLAR

1. Ahnlen, M., ve Westlund, J. O. N. A. S. (2013). *Lateral torsional buckling of i-beams.* Master's Thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.

2. Andrade, A., Camotim, D. ve Dinis, P. B. (2007). Lateral-torsional buckling of singly symmetric web-tapered thin-walled I-beams: 1D model vs. shell FEA. *Computers & Structures*, 85(17-18), 1343-1359.

3. Bradford, M.A. ve Ronagh, H.R. (1997). Generalized elastic buckling of restrained i-beams by FEM. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 123(12), 1631-1637.

4. Dahmani, L. ve Drizi, S. (2015). Lateral torsional buckling of an eccentrically loaded channel section beam. *Strength of Materials, 47(6),* 912-916.

5. Dassault Systèmes, ABAQUS manual.

6. De'Nan, F., Nazri, F. M. ve Hashim, N. S. (2017). Finite element analysis on lateral torsional buckling behaviour of i-beam with web opening. *Engineering Heritage Journal*, 1(2).

7. Hancock, G. J. and Trahair, N. S. (1978). Finite element analysis of lateral buckling of continuously restrained beam-columns. *Civil Engineering Trans, Institution of Engineering*, Australia, CE20(2), 120-127.

8. Kabir, I. ve Bhowmick, A. K. (2018). Lateral torsional buckling of welded wide flange beams under constant moment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(9), 766-779.

9. Lee, H., Jung, D.W., Jeong, J. H. ve Im, S. (1994). Finite element analysis of lateral buckling for beam structures. *Computers and Structures*, 53(6), 1357-1371.

10. Mohri, F., Bouzerira, C. ve Potier-Ferry, M. (2008). Lateral buckling of thin-walled beam-column elements under combined axial and bending loads. *Thin Walled Structures*, 46(3), 290-302.

11. Ozbasaran, H., Aydın, R. ve Dogan, M. (2015). An alternative design procedure for lateral-torsional buckling of cantilever i-beams. *Thin-Walled Structures*, 90(2015), 235-242.

12. Ozbasaran, H. (2013). *Analytical and experimental research of lateral torsional buckling of cantilever steel I-beams.* Doctoral Dissertation, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir.

13. Snijder, H., Aa, R. V., Hofmeyer, H. ve Hove, B. V. (2018). Lateral torsional buckling design imperfections for use in non-linear FEA. *Steel Construction*, 11(1), 49-56.

14. Timoshenko, S. P. (1945). Theory of bending, torsion and buckling of thin-walled members of open cross section. *Journal of the Franklin Institute, 239*(4), 249-268.

15. Trahair, N. S. (1983). Lateral buckling of overhanging beams. *Instability and Plastic Collapse of Steel Structures*, London, 503-518.

16. Valeš, J. ve Stan, T. (2017). FEM Modelling of lateral-torsional buckling using shell and solid elements. *Procedia Engineering*, 190, 464-471.

17. Yilmaz, T. ve Kirac, N. (2017). Analytical and parametric investigations on lateral torsional buckling of european IPE and IPN beams. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 695-709.

18. Degenhardt, R., Klein, H., Kling, A., Temmen, H. ve Zimmermann, R. (2002). Buckling and postbuckling analysis of shells under quasi static and dynamic loads. *DLR Institute of Structural Mechanics Lilienthalplatz*, Braunschweig.

19. Mohebkhah, A. ve Azandariani, M. G. (2016). Lateral-torsional buckling resistance of unstiffened slender-web plate girders under moment gradient. *Thin-Walled Structures*, 102, 215-221, doi:10.1016/j.tws.2016.02.001.

20. Novoselac, S., Ergic, T. And Balicevic, P. (2012). Linear and nonlinear buckling and post buckling analysis of a bar with the ınfluence of imperfections. *Tehnicki Vjesnik,Technical Gazette 19*, 695-701.

21. Mohri, F., Bouzerira, C. ve Potier-Ferry, M. (2008). Lateral buckling of thin-walled beam-column elements under combined axial and bending loads. *Thin-Walled Structures*, *46*(3), 290-302, doi:10.1016/j.tws.2007.07.017.

22. Kabir, I. ve Bhowmick, A. K. (2018). Lateral torsional buckling of welded wide flange beams under constant moment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(9), 766–779, doi:10.1139/cjce-2017-0499.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : MUTLU, Erkan Okay

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 27.11.1984, Ankara

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (535) 470 94 82

e-mail : erkanokay.mutlu@gazi.edu.tr

Eğitim

Derecesi	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi / İnşaat Müh.	2010
Lise	Çubuk Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Promer Mühendislik A.Ş.	Proje Mühendisi
2013-2015	Static Studyo Proje Mühendislik	Firma Ortağı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Mutlu, E. O. (2018, 26-29 April). *Experimental and Numerical Investigation of Lateral Torsinal Buckling Behavior of IPE and UPE Steel Beam*. International Congress on Engineering And Life Science, Kastamonu.

Hobiler

--



GAZİ GELECEKTİR..