

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HAFİF ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN TEPE BİRLEŞİM BÖLGESİNİN
SONLU ELEMAN ANALİZLERİ İLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ferhan ÖZTÜRK

**MAYIS 2014
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HAFİF ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN TEPE BİRLEŞİM BÖLGESİNİN
SONLU ELEMAN ANALİZLERİ İLE OPTİMİZASYONU**

Ferhan ÖZTÜRK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.05.2014
Tezin Savunma Tarihi : 30.05.2014**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selim PUL

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Ferhan ÖZTÜRK tarafından hazırlanan

**HAFİF ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN TEPE BİRLEŞİM BÖLGESİNİN
SONLU ELEMAN ANALİZLERİ İLE OPTİMİZASYONU**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 13 / 05/ 2014 gün ve 1553 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr. Metin HÜSEM

Üye : Prof.Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Doç.Dr. Selim PUL

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yaklaşık iki yıldır sürmekte olan, Portekiz’de başlayıp KTÜ’de devam eden ve çeşitli nedenlerle zaman zaman aksayan, zaman zaman ise çok uzun çalışma saatleri ve emek harcanarak nihayet ortaya çıkan bu tezde, inceleme konusunun daha önce ülkemizde bu kadar geniş çapta çalışılmamış ve alanında bir ilk niteliğini taşıyor olmasının önemi, kısıtlı imkanlara rağmen sabır, inanç ve işbirliği sayesinde amaçlanan hedefe ulaşılmış olmasıyla birlikte daha da artmıştır.

Bu hedefe ulaşma yolunda ilk adımı atmam konusunda yol gösterici olan sayın Prof. Dr. Maria Constança Simões Rigueiro’ya, bu yolda yürürken desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve bu tezin oluşmasına en büyük katkıyı sağlayan danışmanım sayın Doç. Dr. Selim PUL’a sonsuz teşekkürlerimi iletmeyi bir borç bilirim.

Dilerim bu çalışma, yolun daha başındaki araştırmacılar için bir rehber olur ve ülkemizde eksikliğini yaşadığımız birçok konudan biri olan hafif çelik yapıların tasarımı ile ilgili gerçekçi ve güncel bir milli şartname oluşmasına katkı sağlar.

Ferhan ÖZTÜRK
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Profiller ile Oluşturulan Çerçeve Sistemlerin Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç.Dr. Selim, PUL’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 09/05/2014

Ferhan ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	1
1.3 Demir-Çelik Üretimi ve Kısa Tarihçesi.....	2
1.3.1. Demir Üretimi.....	2
1.3.2 Çelik Üretimi	3
1.3.2.1. Bessemer-Thomas Fırını.....	4
1.3.2.2. Siemens-Martin Fırını.....	5
1.3.2.3. Bazık Oksijen Fırını.....	6
1.3.2.4. Elektrik Ark Fırını.....	7
1.3.2.5. İndüksiyon Fırını.....	8
1.4. Çelik Ürünleri ve Üretim Yöntemleri.....	10
1.4.1. Sıcak Şekillendirme ile Üretilen Çelik Ürünleri.....	11
1.4.2. Soğuk Şekillendirme ile Üretilen Çelik Ürünleri	12
1.4.2.1. Soğuk Haddelme (Sürekli Formda Şekil Verme)	12
1.4.2.2. Soğuk Bükme (Preste Bükme).....	15
1.4.3. Soğuk Şekillendirmenin Malzemenin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi ..	16
1.5. Hafif Çelik Ürünlerinin Yapılarda Kullanımı.....	17
1.6. Hafif Çelik Yapılar.....	21
1.6.1. Hafif Profillerin Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar.....	25

1.6.1.1	Burkulma	26
1.6.1.2.	Burulma.....	29
1.6.1.3.	Gövde Buruşması.....	30
1.6.1.4.	Süneklik ve Plastik Tasarım.....	31
1.6.1.5.	Birleşimler.....	31
1.6.1.6.	Korozyon.....	31
1.6.1.7.	Yangın.....	32
1.6.1.8.	Sürdürülebilirlik	33
1.7.	Hafif Çelik Yapılarda Analiz ve Tasarım Yöntemleri	33
1.7.1.	Genel Çerçeve Analizi	33
1.7.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz	36
1.7.3.	Deney Destekli Tasarım.....	38
1.8.	Hafif Çelik Yapılarda Düzensizlikler	38
1.8.1.	Düzensizliklerin Gelişmiş Sayısal Simülasyonlara Etkisi	39
1.9.	Hafif Çelik Yapılarda Yerel Burkulma	40
1.10.	Hafif Çelik Profillerle Üretilen Çerçeve Sistemler Üzerinde Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar	41
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	50
2.1.	İnceleme Konusu Hafif Çelik Çerçeve Sistemi ve Tepe Birleşim Bölgesi.....	50
2.2.	Tepe Birleşim Bölgesinin Abaqus Yazılımı ile Modellenmesi.....	51
2.2.1.	Geometrik Modelin Oluşturulması.....	51
2.2.2.	Analiz ve Yükleme Tipinin Seçimi	54
2.2.3.	Sonlu Elemanların Seçimi	55
2.2.4.	Sonlu Eleman Ağ Yapısı	58
2.2.5.	Bulonların Modellenmesi ve Sıkma Etkisinin Uygulanması	59
2.2.5.1.	Anahtar Kullanarak Elle Sıkma Kuvvetinin Deneysel Olarak Belirlenmesi	62
2.2.5.2.	Öngerilme ile Sıkma Kuvvetinin EN 1993-1-8(2003)'e Göre Belirlenmesi	62
2.2.6.	Yüzeyler Arasındaki Temasın Tanımlanması	64
2.2.7.	Malzeme Özellikleri	68
2.2.8.	Sınır Koşulları	70
2.2.9.	Yükleme Tipi, Hızı ve Analiz Süresi	72
2.2.9.1.	Elle Sıkma Kuvveti İçin Yükleme Hızı ve Süresinin Hesaplanması	73
2.2.9.2.	EN1993-1-8'e göre Sıkma Kuvveti İçin Yükleme Hızı ve Süresinin Hesaplanması	73

2.3.	Gerçekleştirilen Analizler.....	74
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	79
3.1.	Birinci Grup Kalibrasyon Analizlerinin Sonuçları.....	79
3.2.	İkinci Grup Kalibrasyon Analizlerinin Sonuçları	79
3.3.	Üçüncü Grup Kalibrasyon Analizlerin Sonuçları	81
3.4.	Dördüncü Grup Analizlerin Sonuçları	84
3.5.	Beşinci Grup Analizlerin Sonuçları	85
3.5.1.	Analiz A3-2	86
3.5.2.	Analiz A3-2R	89
3.5.3.	Analiz A3-2RD.....	91
3.5.4.	Analiz A3-2L1.....	94
3.5.5.	Analiz A3-2L1R.....	97
3.5.6.	Analiz A3-2L1RD	100
3.5.7.	Analiz A3-2L2.....	102
3.5.8.	Analiz A3-2L2R	105
3.5.9.	Analiz A3-2L2RD	108
3.6.	Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	111
3.6.1.	Analiz A3-2, A3-2R ve A3-2RD'nin Karşılaştırılması.....	111
3.6.2.	Analiz A3-2L1, A3-2L1R ve A3-2L1RD'nin Karşılaştırılması	114
3.6.3.	Analiz A3-L2, A3-2L2R ve A3-2L2RD'nin Karşılaştırılması	116
3.6.4.	Analiz A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2'nin Karşılaştırılması	119
3.6.5.	Analiz A3-2R, A3-2L1R ve A3-2L2R'nin Karşılaştırılması	122
3.6.6.	Analiz A3-2RD, A3-2L1RD ve A3-2L2RD'nin Karşılaştırılması	125
3.7.	Altıncı Grup Analiz Sonuçları.....	129
3.7.1.	Analiz A3-2T6.....	129
3.7.2.	Analiz A3-2T8.....	132
3.7.2.	Analiz A3-2T10.....	135
3.8.	Analiz A3-2, A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10'un Karşılaştırılması.....	137
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	142
5.	KAYNAKLAR.....	146
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HAFİF ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN TEPE BİRLEŞİM BÖLGESİNİN SONLU
ELEMEN ANALİZLERİ İLE OPTİMİZASYONU

Ferhan ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Selim PUL
2014, 166 Sayfa

Hafif çelik çerçeve sistemler uygulamada giderek artan bir kullanım alanı bulmaktadır. Ancak, teknik literatürde ve özellikle yerli ve yabancı standartlarda konuyla ilgili mevcut bağlantı, hüküm ve öneriler henüz geleneksel çelik yapılar için geçerli olanlar kadar kesinleşmiş değildir. Dolayısıyla bu çalışmayla, bir hafif çelik çerçeve tepe birleşim bölgesinin farklı tasarımları üzerinde yapılacak sonlu elemanlar analizleriyle optimum birleşim bölgesi tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Dört asıl bölümden oluşan çalışmanın birinci bölümde, demir-çelik malzeme, hafif çelik elemanlar, bu elemanların uygulamadaki kullanım alanları ile analiz ve tasarım yöntemleri kısaca tanıtılmakta, konuyla ilgili daha önce gerçekleştirilen bazı çalışmalar sunulmaktadır. İkinci bölümde, bir hafif çelik çerçeveye ait tepe birleşim bölgesinin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan analizleri Abaqus v6.12 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde, bu analizlerden elde edilen sonuçlar sunularak irdelenmekte, dördüncü bölümde ise çalışmanın tümünden çıkarılan sonuç ve öneriler sunulmaktadır. Bu son bölümü kaynaklar listesi ve öz geçmiş izlemektedir.

Sonuç olarak bu çalışmayla, tepe birleşim bölgesi davranışının birleşim levhası elemanlarında oluşan yerel burkulmalar ve delik geometrilerinin bozulmasına bağlı olduğu, yerel burkulmaların eş zamanlı olarak başladığı modeller yerine profiller arası mesafenin en az, gövde levhasının rijitleştiricili ve üst başlığın dudaklı olduğu tasarımın amaçlanan optimum tasarım olarak kabul edilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik çerçeve, soğuk şekillendirilmiş hafif profiller, Abaqus, optimizasyon.

Master Thesis

SUMMARY

OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT STEEL PORTAL FRAMES
BY FINITE ELEMENT ANALYSES

Ferhan ÖZTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assos. Prof. Selim PUL
2014, 166 Pages

Lightweight portal frames are increasingly being used in practice. However, related formula, provision and suggestions are not as precise as for those of conventional steel structures in technical literature, particularly in national and international standards. Therefore with this study, optimum connection plate design of a lightweight portal frame was aimed at by performing finite element analyses of various connection plate designs. Within the first chapter of this study being composed of four main chapters, iron-steel material, lightweight members, usage of those members as well as analysis and design methods are briefly described, some previous research related to this study are presented. In the second chapter, description of nonlinear finite element analyses of apex connection of a lightweight portal frame were performed by using Abaqus v6.12 software is given. In the third chapter, the results obtained from those analyses are discussed and the last chapter, where the results and suggestions derived from this study were presented, was followed by references and personal background.

As of the results of this study, it is concluded that apex connection behaviour is highly influenced by local buckling of connection plates and excessive deformation of bolt holes. Additionally, the model with the least distance between profiles, stiffened apex plate and lipped compression plate was suggested to be the optimum design, instead of models which local buckling of apex and compression plates occurs simultaneously.

Key Words: Lightweight structures, cold-formed steel profiles, Abaqus, optimization.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Yüksek fırına ait bazı görünüşler	2
Şekil 2.	Bessemer fırını	4
Şekil 3.	Siemens-Martin fırını	5
Şekil 4.	Bazık Oksijen Fırını	6
Şekil 5.	BOF tekniği ile çelik üretim aşamaları	7
Şekil 6.	Elektrikli ark fırınının şematik kesiti	8
Şekil 7.	İndüksiyon fırını	9
Şekil 8.	Demir-Çelik üretiminde işlem aşamaları	10
Şekil 9.	Demir çelik üretiminden çıkan ürünün son ürün haline gelinceye kadar işlem aşamaları	11
Şekil 10.	Sıcak haddeleme tekniği	11
Şekil 11.	Sürekli soğuk şekillendirme (Roll-Forming) işlemi	13
Şekil 12.	Sürekli soğuk şekillendirme silindir ve diskleri	13
Şekil 13.	Sürekli soğuk şekillendirme (Roll-Forming) makinesi	14
Şekil 14.	Sürekli soğuk şekillendirme yöntemi ile üretilen bazı kesit tipleri	14
Şekil 15.	Abkant pres tezgahı ve bükme kalıbı	15
Şekil 16.	Soğuk bükme yöntemi ile üretilen bazı kesitler	15
Şekil 17.	Soğuk şekillendirilmiş bir profilde eğilme artık gerilmelerinin akma dayanımının yüzdesi olarak gösterimi a) Sürekli şekil değiştirmede b) preste bükmede	16
Şekil 18.	Bazı sac panel tipleri	18
Şekil 19.	a) birinci, b) ikinci, c) üçüncü nesil sac panel tipleri	18
Şekil 20.	Sandviç paneller ve kesit görünümü	19
Şekil 21.	Uygulamada en çok kullanılan bazı hafif profil tipleri	20
Şekil 22.	Hafif profil kafes kirişler	20
Şekil 23.	Hafif profil kolon ve kirişler	21
Şekil 24.	Hafif profil duvar elemanları	21
Şekil 25.	Hafif profillerle inşa edilmiş konut türü bir yapı tipi	22
Şekil 26.	Hafif profillerle inşa edilmiş başka bir konut türü yapı	23
Şekil 27.	Hafif profil döşeme sistemleri	23
Şekil 28.	Hafif profillerin endüstriyel yapılarda kullanımı	24
Şekil 29.	Hafif profillerin endüstriyel yapılarda kullanımı	25
Şekil 30.	Hafif profillerin geçici yapılarda kullanımı	25

Şekil 31.	Yerel burkulmuş narin bir kolonda ve dalga boyu	26
Şekil 32.	Hafif profillerde burkulma türleri ve oluştukları dalga boyları	27
Şekil 33.	Eksenel basınç altındaki bir C profilin burkulma modları.....	28
Şekil 34.	a) Eksantrik olarak yüklenmiş bir kiriş ve b) eksenel yüklenmiş bir kolonun burulma şekildeğiştirmeleri	29
Şekil 35.	Bir C ve I profilinin yükleme bölgesi altındaki gövde buruşması.....	30
Şekil 36.	Hafif çelik sistemlerde bazı yangın koruması yöntemleri: a)Profilde, b)Döşemede	32
Şekil 37.	Kesit davranışına göre belirlenen sınıflar	35
Şekil 38.	Bir yapının farklı analiz tiplerine göre yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	36
Şekil 39.	Bir C kesitin yerel (a) ve çarpılmalı burkulması(b ve c)	40
Şekil 40.	Pernes ve Nagy [16] tarafından uygulanan tepe ve köşe birleşim deneyleri	42
Şekil 41.	Elkersh [15] tarafından uygulanan tepe birleşim bölgesi deneyi.....	43
Şekil 42.	Tam ölçekli çerçeveye ait deney düzeneği ve birleşimindeki yerel burkulma	44
Şekil 43.	Lim ve Nethercot [12] tarafından incelenen birleşim bölgeleri.....	44
Şekil 44.	Kolon-kiriş birleşim bölgesinin deney sonucu yanal göçmesi	45
Şekil 45.	Kafes sisteme ait bir bölgenin deney sonrası görünümü	46
Şekil 46.	Geliştirilen hafif profil tipleri ve deney düzeneği.....	46
Şekil 47.	Kolon-kiriş köşe birleşim bölgesi	47
Şekil 48.	Çarpılmalı ve genel burkulma modlarının birlikte gözlemlendiği kolonların deney sonrası durumları.....	48
Şekil 49.	İncelenen kolon-kiriş birleşim bölgesi.....	48
Şekil 50.	Geliştirilen kiriş modeli ve ANSYS modelinden bir görüntü	49
Şekil 51.	Çalışma konusu çerçeve sistemin genel görünümü ve tepe birleşimi detayı.....	50
Şekil 52.	Sigma profil kesiti (ölçüler: mm)	51
Şekil 53.	Tepe birleşim bölgesinin geometrik modeli	52
Şekil 54.	Birleşim levhasının yalın halinin geometrik	53
Şekil 55.	Yarı statik analizde enerji- zaman değişimi.....	54
Şekil 56.	Smooth step yükleme eğrisi (a: uygulanan yük, yerdeğiştirme vb.).....	55
Şekil 57.	Profil ve levhaların modellenmesinde kullanılan SC8R sonlu elemanı	55
Şekil 58.	Birinci mertebe azaltılmış integrasyonlu bir elemanın eğilme davranışı	56
Şekil 59.	Sonlu elemanların birikme yönleri	57
Şekil 60.	Eleman birikme yönünün sonuçlar üzerindeki etkisine bir örnek (%20), a) yüzeye dik, b) yüzeye paralel (Gerilmeler N/m^2 cinsindedir)	57
Şekil 61.	Bulonların modellenmesinde kullanılan C3D8R sonlu elemanı	57
Şekil 62.	Sigma profiller ve birleşim levhası elemanlarında sonlu eleman ağ yapısı.....	58

Şekil 63.	Bulon ve bulon delikleri etrafındaki sonlu eleman ağ yapısı	59
Şekil 64.	Bulonda kesi yapılması ve sıkmanın uygulanması.....	60
Şekil 65.	Eksenel konnektör eleman.....	61
Şekil 66.	Bulon sıkma etkisi ile oluşan gerilme durumu (N/m^2)	61
Şekil 67.	M14 Bulonun elle sıkma ile uyguladığı kuvvetinin belirlenmesi.....	63
Şekil 68.	Yüzeyler arasında etkileşimin şematik ifadesi	65
Şekil 69.	Coulomb kırılma modeli için kayma bölgesi.....	66
Şekil 70.	Bulon temas yüzeyleri; a)bulonda, b)üst başlık levhasında, c)profilde	67
Şekil 71.	Kesitte aralarında temas tanımlanan yüzeyler	67
Şekil 72.	S350GD+Z çeliğine ait gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi	69
Şekil 73.	S275 çeliğine ait gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi	69
Şekil 74.	İzotropik pekleşme modeli	70
Şekil 75.	Yükleme yapılan rijit elemanlar ve yükleme yönü.....	71
Şekil 76.	Kiriş uçlarında mesnet sınır koşullarının uygulanması (Kiriş tipi MPC).....	71
Şekil 77.	Uygulanan yüklemeye hızı eğrisi	72
Şekil 78.	Birleşim levhasının farklı tasarımlarına ilişkin modeller	75
Şekil 79.	Bulon yer ve adetlerinin farklı düzenlenmesine ilişkin modeller	76
Şekil 80.	Profillerin ara mesafesinin değiştirilmesine ilişkin modeller	76
Şekil 81.	Boşluksuz ve 1 mm boşluklu modellerin analiz sonuçları	79
Şekil 82.	Sıkmasız, elle sıkmalı ve öngerilme ile sıkmalı modellerin analiz sonuçları.....	80
Şekil 83.	Bulonun elle sıkıldığı modelde delik çevresinde oluşan gerilmeler (N/m^2).....	80
Şekil 84.	Bulonun öngerilmeli olarak sıkıldığı modelde delik çevresinde oluşan gerilmeler (N/m^2).....	81
Şekil 85.	Sonlu eleman boyutunun küçültülmesi ile ilgili analiz sonuçları.....	82
Şekil 86.	Sonlu eleman boyutlarının küçültülmesinin etkisi	83
Şekil 87.	Farklı cıvata düzenlemesine sahip modellerin analiz sonuçları	84
Şekil 88.	Farklı cıvata düzenlemesinin delik profili şekildeğiştirmesine etkisi.....	85
Şekil 89.	A3-2 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	86
Şekil 90.	A3-2 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları.....	87
Şekil 91.	A3-2 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler	88
Şekil 92.	A3-2 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	88
Şekil 93.	A3-2R analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi.....	89
Şekil 94.	A3-2R kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	90
Şekil 95.	A3-2R kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	91

Şekil 96.	A3-2R kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	91
Şekil 97.	A3-2RD analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	92
Şekil 98.	A3-2RD kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	92
Şekil 99.	A3-2RD kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	93
Şekil 100.	A3-2RD kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	94
Şekil 101.	A3-2L1 analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	95
Şekil 102.	A3-2L1 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	95
Şekil 103.	A3-2L1 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	96
Şekil 104.	A3-2L1 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi.....	97
Şekil 105.	A3-2L1R analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	97
Şekil 106.	A3-2L1R kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları.....	98
Şekil 107.	A3-2L1R kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	99
Şekil 108.	A3-2L1R kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	99
Şekil 109.	A3-2L1RD analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	100
Şekil 110.	A3-2L1RD kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	100
Şekil 111.	A3-2L1RD kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	101
Şekil 112.	A3-2L1RD kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	102
Şekil 113.	A3-2L2 analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	103
Şekil 114.	A3-2L2 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	103
Şekil 115.	A3-2L2 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	104
Şekil 116.	A3-2L2 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi.....	105
Şekil 117.	A3-2L2R analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	105
Şekil 118.	A3-2L2R kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları.....	106
Şekil 119.	A3-2L2R kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	107
Şekil 120.	A3-2L2R kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	107
Şekil 121.	A3-2L2RD analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	108
Şekil 122.	A3-2L2RD kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	109
Şekil 123.	A3-2L2RD kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	110
Şekil 124.	A3-2L2RD kodlu analize ait yük-zaman eğrisi	110

Şekil 125.	Gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2, A3-2R, A3-2RD kodlu analizler için karşılaştırılması	111
Şekil 126.	Üst başlık levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2, A3-2R, A3-2RD kodlu analizler için karşılaştırılması	112
Şekil 127.	Profilde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2, A3-2R, A3-2RD kodlu analizler için karşılaştırılması	112
Şekil 128.	A3-2, A3-2R ve A3-2RD kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri	113
Şekil 129.	Gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L1, A3-2L1R, A3-2L1RD kodlu analizler için karşılaştırılması	114
Şekil 130.	Üst başlık levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L1, A3-2L1R, A3-2L1RD kodlu analizler için karşılaştırılması	115
Şekil 131.	Profilde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L1, A3-2L1R, A3-2L1RD kodlu analizler için karşılaştırılması.....	115
Şekil 132.	A3-2L1, A3-2L1R ve A3-2L1RD analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri....	116
Şekil 133.	Gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD kodlu analizler için karşılaştırılması	117
Şekil 134.	Üst başlık levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD kodlu analizler için karşılaştırılması	117
Şekil 135.	Profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD kodlu analizler için karşılaştırılması.....	118
Şekil 136.	A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	119
Şekil 137.	A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri	119
Şekil 138.	Gövde levhasında oluşan yerel burkulmanın pro filler arası mesafe ile ilişkisi ...	120
Şekil 139.	Üst başlık levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi.....	120
Şekil 140.	Profillerde oluşan yerel burkulmanın pro filler arası mesafe ile ilişkisi.....	121
Şekil 141.	A3-2R, A3-2L1R ve A3-2L2R analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri	122
Şekil 142.	Gövde levhasında oluşan yerel burkulmanın pro filler arası mesafe ile ilişkisi ...	123
Şekil 143.	Üst başlık levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi.....	123
Şekil 144.	Profillerde oluşan yerel burkulma davranışının pro filler arası mesafe ile ilişkisi	124
Şekil 145.	A3-2RD, A3-2L1RD ve A3-2L2RD analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri	125
Şekil 146.	Gövde levhasında oluşan yerel burkulmanın pro filler arası mesafe ile ilişkisi ...	126
Şekil 147.	Üst başlık levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi.....	126
Şekil 148.	Profillerde oluşan yerel burkulma davranışının pro filler arası mesafe ile ilişkisi	127
Şekil 149.	A3-2T6 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi	129
Şekil 150.	A3-2T6 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	130

Şekil 151.	A3-2T6 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	131
Şekil 152.	A3-2T6 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi.....	131
Şekil 153.	A3-2T8 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi.....	132
Şekil 154.	A3-2T8 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	133
Şekil 155.	A3-2T8 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	134
Şekil 156.	A3-2T8 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi.....	134
Şekil 157.	A3-2T8 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi.....	135
Şekil 158.	A3-2T10 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları	135
Şekil 159.	A3-2T10 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları	136
Şekil 160.	A3-2T10 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi.....	137
Şekil 161.	A3-2, A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	138
Şekil 162.	A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlerin gövde levhalarındaki yerel burkulma davranışlarının kalınlıkla ilişkisi	139
Şekil 163.	A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlerin üst başlık levhalarındaki yerel burkulma davranışlarının kalınlıkla ilişkisi	139
Şekil 164.	A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlerin profillerindeki yerel burkulma davranışlarının kalınlıkla ilişkisi.....	140
Şekil 165.	Beşinci ve altıncı grup analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri	141

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Kesitlerde oluşan artık gerilmelerin karşılaştırılması	17
Tablo 2. Çalışmada gerçekleştirilen analizler	78
Tablo 3. Sonlu eleman adedi ile analiz süresi ilişkisi	82
Tablo 4. Analizlerdeki yerel burkulma başlangıçları ve kapasite değerleri	128
Tablo 5. Analizlerdeki yerel burkulma başlangıçları ve kapasite değerleri.....	141

SEMBOLLER DİZİNİ

M_{cr}	: Kritik moment
M_y	: Akma momenti
C	: Kayma merkezinden eksantriklik
P	:Yük
E_w	: Uygulanan dış kuvvetin yaptığı iş
E_I	: İçsel enerji
E_{KE}	: Kinetik enerji
σ	: Gerilme
$F_{p, cd}$: Sıkıştırma kuvveti
f_{ub}	: Bulon kopma dayanımı
A_s	: Bulon gövdesinin kesit alanı
τ	: Kayma gerilmesi
μ	: Sürtünme katsayısı
σ_{nom}	: Nominal gerilme
ϵ_{nom}	: Nominal şekildeğiştirme
$\sigma_{gerçek}$: Gerçek gerilme
$\epsilon_{gerçek}$: Gerçek şekildeğiştirme
$\epsilon_{p, gerçek}$: Plastik gerçek şekildeğiştirme
x	: Yerdeğiştirme
Δt	: Zaman değişimi
v	: Sürat
L_e	: Eleman boyu
c_d	: Dilatasyon dalga hızı
E	: Elastisite modülü
ρ	: Yoğunluk

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda yapısal çelik alanında yaşanan en büyük gelişmelerden biri, soğuk şekillendirilmiş hafif çelik profillerin çerçeve sistemlerde çok geniş ve artan bir hızla kullanılmaya başlanmış olmasıdır. Geleneksel hadde profilleri ile karşılaştırıldıklarında oldukça hafif olan bu profillerle de çok katlı olmayan konut türü yapılar ve bazı hafif endüstriyel yapılar ekonomik olarak inşa edilebilmektedir. Hafif çelik yapılar olarak adlandırılan bu yapılar, yurtdışında 1980'li yıllarda yaygınlaşmışken, Ülkemizde özellikle 1999 Adapazarı Depremi sonrasında artan bir hızla inşa edilmeye başlanmıştır. Hafif çelik profillerin son yıllarda CNC makineler yardımıyla çok daha seri ve ekonomik olarak üretimi sayesinde hafif çelik yapı sistemlerinin daha da yaygınlaşacağı söylenebilir.

1.2. Amaç ve Kapsam

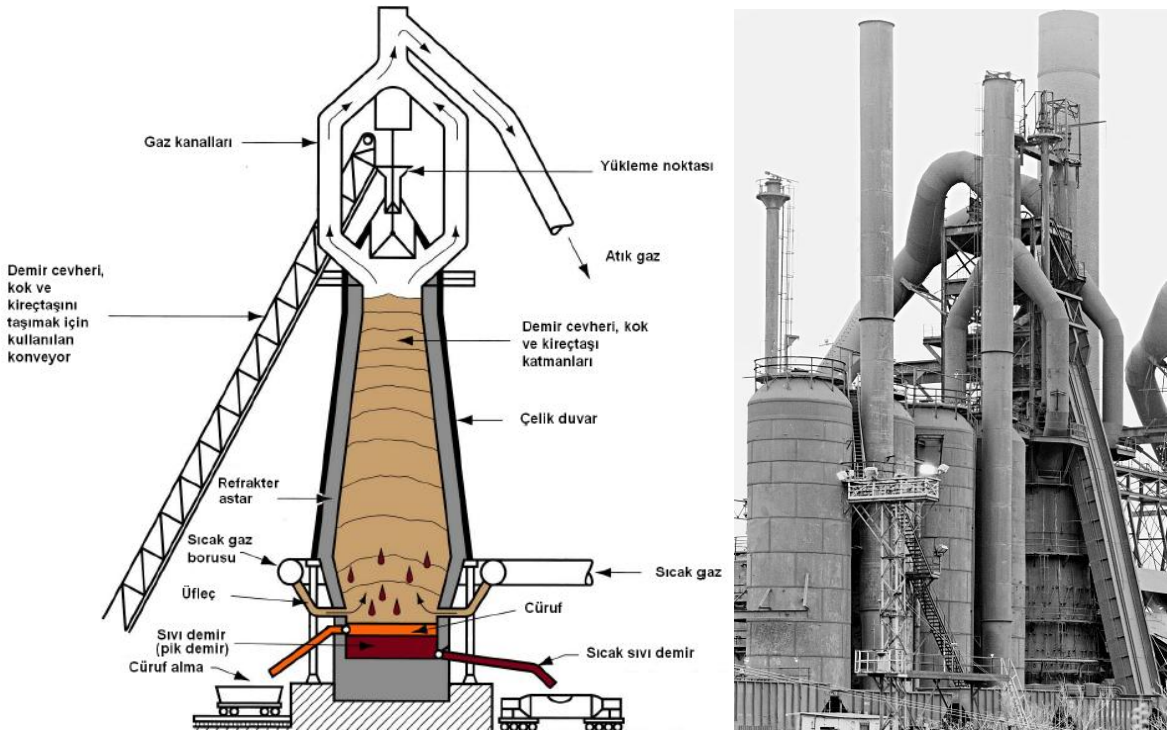
Hafif çelik yapı tekniği uygulamalarında önemli bir payı olan hafif çelik çerçeve sistemlerin, konutlar, endüstriyel ve tarımsal yapıların çeşitlendirilip geliştirilmesine yeni bir yaklaşım getireceği umulmaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı, küçük ve orta büyüklükteki açıklıklara sahip yapılarda kullanılan sistemlerden biri olan hafif çelik çerçevelerin tepe birleşim bölgesinin farklı tasarımları üzerinde yapılacak sonlu elemanlar analizleriyle optimum birleşim bölgesi tasarımının belirlenmesidir. Bu amaçla, öncelikle hafif çelik elemanlar ve uygulamadaki kullanımları üzerinde durulduktan sonra, bir hafif çelik çerçeve sistemin kiriş-kiriş (tepe) birleşim bölgesinin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan analizleri Abaqus v6.12 [1] sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilecektir. Bu analizler ile, birleşim levhası ve kiriş profillerinde düşey yükleme altında oluşacak yerel burkulma başlangıçlarının mümkün olduğunca eşzamanlı oluşmasını sağlayan optimum birleşim levhası tasarımının elde edilmesi hedeflenmektedir. Zira hafif profillerin sektörde giderek yaygınlaşan kullanımına rağmen bu profillerle üretilen taşıyıcı sistemlerin davranışları konusundaki genel bilgi eksikliği ve yönetmeliklerdeki tasarım kurallarının yetersizliği, araştırmacıları bu konuda daha fazla deneysel ve teorik çalışma yapmaya yöneltmektedir.

1.3.Demir-Çelik Üretimi ve Kısa Tarihçesi

Demir, tarihte çok eski devirlerden bu yana bilinmekle beraber, geniş ölçüde üretilmediğinden, günümüzden yaklaşık iki yüzyıl öncesine kadar sadece silah ve basit eşya yapımında kullanılmış, 18. Yüzyılda İngiltere’de “yüksek fırın” yönteminin bulunmasıyla geniş ölçüde “hamdemir” ve “font” (pik) üretimi başlamıştır [2].

1.3.1. Demir Üretimi

Demir üretmek için doğada Hematit (Fe_2O_3), Manyetit (Fe_3O_4), Siderit ($FeCO_3$), Pirit (FeS_2) ve Limonit ($2Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$) şeklinde bulunan ve en az %60 oranında Fe içeren demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı yüksek fırına (Şekil 1) üstten devamlı olarak yüklenirken, fırının alt tarafından da yüksek sıcaklıktaki gazlar fırına üflenir. Böylece yanma ve ergime sağlanmış olur. Yükleme malzemeleri yukarıdan aşağı doğru yavaşça inerken içeri üflenen sıcak gazlar sayesinde fırın sıcaklığı $1650^{\circ}C$ 'ye çıkar. Yüksek fırın, refrakter astarlı bir fırın olup çapı 9-11 m, yüksekliği ise 30-90m'dir [2].



Şekil 1. Yüksek fırına ait bazı görünüm [3].

Yüksek fırına üflenen sıcak gaz içindeki CO demir cevheri ile reaksiyona girmekte ve aşağıdaki basitleştirilmiş tepkime sonucunda sıvı hamdemir elde edilmektedir.



Bu reaksiyon ile açığa çıkan CO₂ kok ile tepkiyerek CO oluşturur:



Yüksek fırının alt kısmında biriken sıvı demir belli aralıklarla alınırken, demirden bazı istenmeyen elemanları ayıklamak için kullanılan kireçtaşı ise yanma sonucunda;



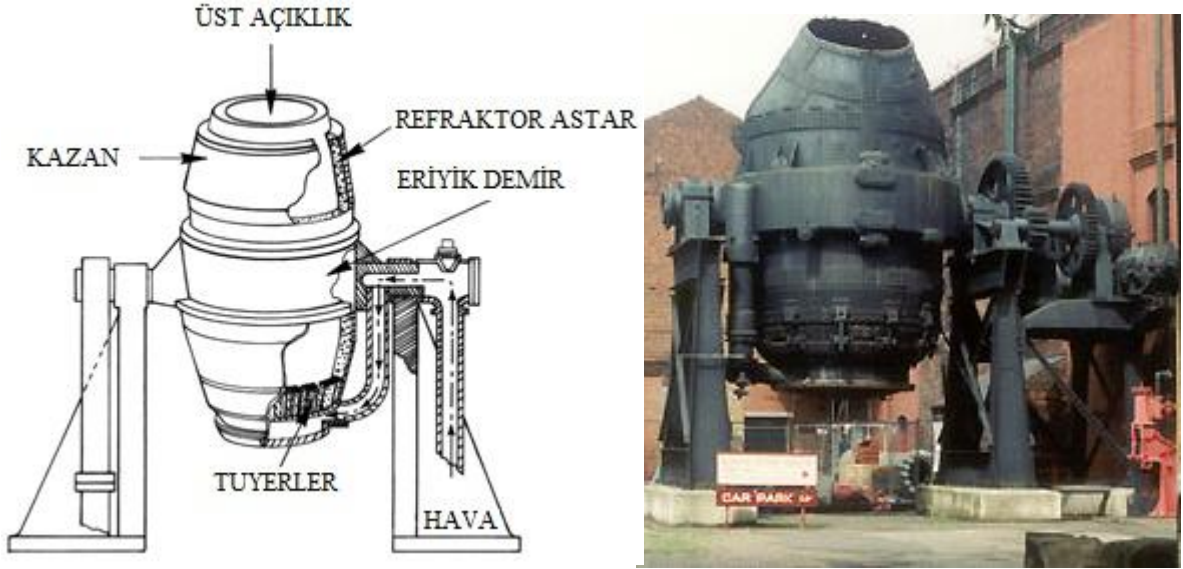
reaksiyonu ile kirece (CaO) dönüşmekte, silika (SiO₂), kükürt (S), alümina (Al₂O₃) gibi safsızlıklarla birleşerek sıvı demirin üzerinde ergiyik cürufu oluşturmaktadır. Bu cüruf da yüksek fırının üst kısmından dışarı alınmaktadır. Yüksek fırından 1 ton demir elde etmek için 2 ton demir cevheri, 1 ton kok, 0.5 ton kireçtaşı ve 3.5 ton gaz olmak üzere toplam 7 ton hammadde kullanılmaktadır.

1.3.2. Çelik Üretimi

Yüksek fırından alınan hamdemir (pik demir) %5 civarında Karbon (C) ile %0.3-1.3 Si, %0.5-2 Mn, %0.1-1 P ve %0.02-0.08 S içerir. Bu derecede yüksek Karbon oranı nedeniyle hamdemir düşük dayanımlıdır, oldukça kırılgandır ve işlenemez. Dolayısıyla hamdemir bu haliyle geniş ölçüde kullanılabilir değildir. Hamdemirdeki yüksek karbon oranının ilave bir işlemle indirgenerek bu malzemenin kullanılabilir olmasını sağlamak gerekir. Bu indirgeme işlemi ile elde edilen yeni malzemeye ise "Çelik" adı verilmektedir. Pik demiri çeliğe dönüştürmek için 1800'lerin ortasından itibaren birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler aşağıdaki başlıklar altında kısaca tanımlanmaktadır.

1.3.2.1. Bessemer-Thomas Fırını

Çelik, ilk olarak 1856 yılında Henry Bessemer tarafından bulunan bir yöntemle üretilmiştir. Bu yöntemde Bessemer konverteri adı verilen, üstü kesik koni biçiminde silindirik bir fırın içine, yüksek fırından sıcak sıvı pik demir (hamdemir) gelmektedir. Konverterin tabanından üflenen basınçlı hava ile yüksek silisli ve az fosforlu sıvı metal, çeliğe dönüşmektedir. Daha sonra konverter eğilerek sıvı çelik kalıplara boşaltılmaktadır. Bessemer fırınına ait görünüm aşağıdaki Şekil 2’de verilmektedir. Ardından, Thomas Gillchrist tarafından 1876 yılında geliştirilen bu yöntem ile elde edilen tüm çeliklere Bessemer-Thomas Çeliği adı verilmiştir.



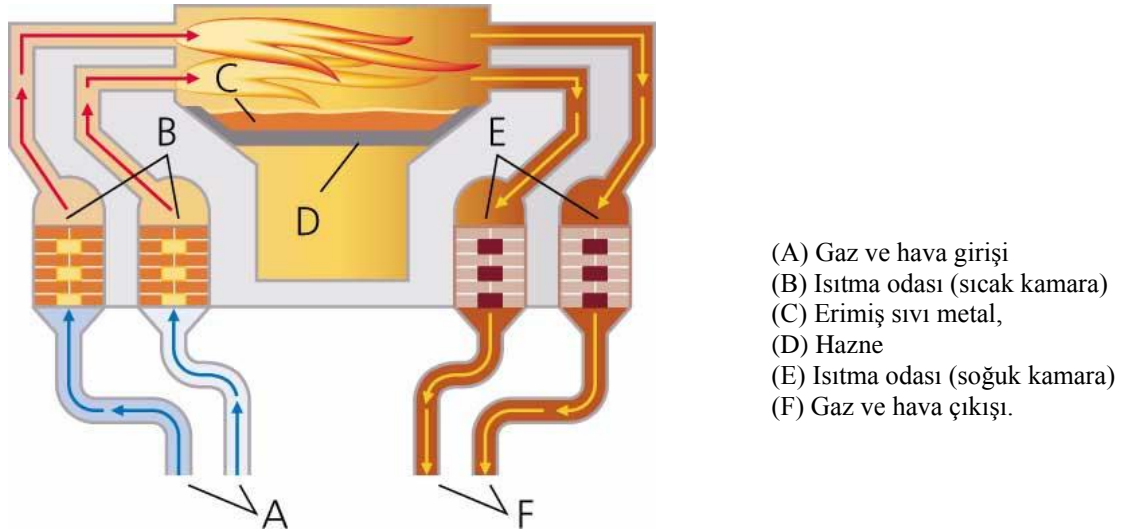
Şekil 2. Bessemer fırını [4].

Bessemer-Thomas yönteminde oksijen, sıvı metalin altından üflenerek eser elementler ve karbon yakılmakta ve böylece yüksek oranda karbon içeren hamdemir çeliğe dönüştürülmektedir. Üretilen çeliğin düşük kalitesi ve oksijen metalurjisine göre yüksek maliyet nedeniyle bu yöntem artık terkedilmiştir.

1.3.2.2. Siemens–Martin Fırını

Bessemer metodunun keşfinden hemen sonra William Siemens, fırın sıcaklığını arttıran sistemi bularak 1860-1870 yılları arasında bu sistemi çelik fırınlarına uygulamıştır. Siemens'ten hemen sonra, Pierre Martin adında bir Fransız pik demiri ve çelik hurdası kullanmak suretiyle Siemens metodunu değiştirmiştir. Uygulamada çelik hurdası, pik demir ve demir cevheri bir arada kullanıldığından teknik, Siemens–Martin Metodu olarak adlandırılmıştır.

Siemens-Martin fırını, sabit veya yana devrilebilir büyük bir yüzey ve küçük banyo derinliğine sahip iki kısımdan oluşur. İçi refrakter tuğlalarla örülü sıcak kamaralarda önceden ısıtılmış gazın, ısıtılmış hava ile yanması sonucu oluşan alev, gerekli ısıyı üretir ve fırın içinde sıcaklık 1700°C 'ye ulaşır. Alevin, hurda, cevher ve hamdemir karışımını yüzeyden itibaren eritmesiyle oluşan sıvı çelik potaya akıtılır. Fırında yanan gazlar bacaya gitmeden önce fırının diğer tarafındaki kamaralardan geçerek bunları da ısıtmaktadır (Şekil 3).



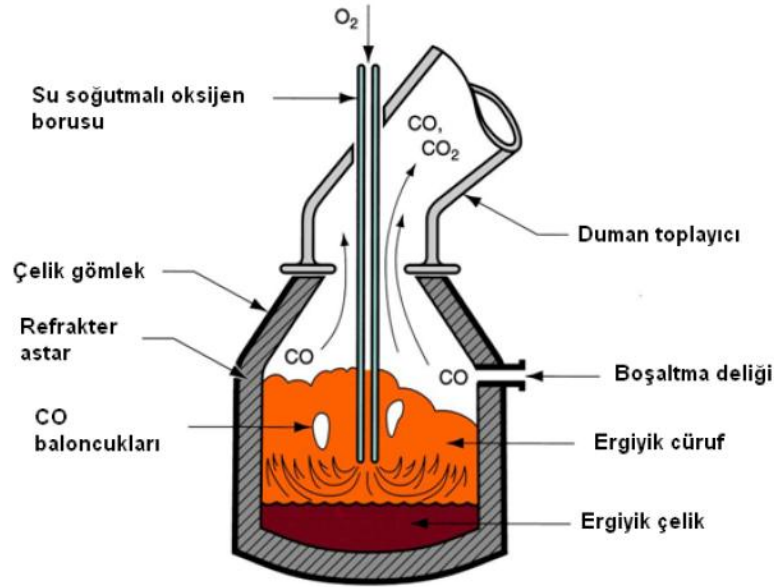
Şekil 3. Siemens-Martin fırını [5].

Bessemer-Thomas yönteminde, endüstriyel üretimin % 5'i veya daha fazlası fire olarak atılmaktaydı. Siemens-Martin yönteminde ise %100'e kadar istenilen her oranda hurda kullanılabilirdi.

Siemens-Martin yönteminde Bessemer-Thomas yöntemine göre daha kaliteli çelik üretilmektedir. Bu yöntemle alaşımlı çelik üretmek de mümkündür ancak, alevin sıvı metalle teması nedeniyle alaşım elemanlarında yanmadan dolayı azalma oluşmaktadır.

1.3.2.3. Bazık Oksijen Fırını

Düşük fosforlu çeliğin elde edilmesi için kullanılan bazık oksijen fırını (BOF, Basic Oxygen Furnace) tekniği, sıvı metal yüzeyine üstten oksijen üflenmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 4).



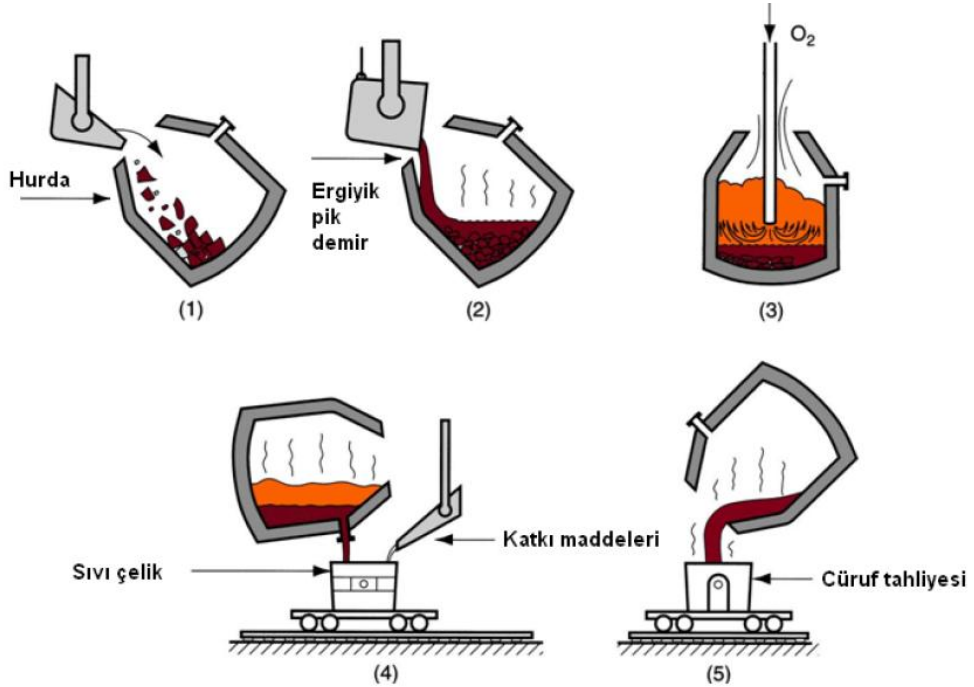
Şekil 4. Bazık Oksijen Fırını

Bazık oksijen fırınlarında genellikle % 70-80 oranında yüksek fırından gelen sıvı metal (sıvı pik), kalan kısmında ise çelik hurdası, kireçtaşı, dolomit ve deoksidantların oluşturduğu karışım kullanılmaktadır. Uygun döküm sıcaklığında istenilen karbon yüzdesine erişmek için konvertere yüklenecek (şarj edilecek) hammaddelerin cinslerinin ve miktarlarının ayarlanması gerekmektedir. Fırın % 100 sıcak metal ile şarj edilmesi ve oksijen ile üflenmesi sonucu, sıcak metal içindeki karbon ve diğer yabancı elemanların oksijen ile birleşerek fazla miktarda ısı meydana getirir ve dökülemeyecek kadar sıcak bir

çelik elde edilir. Bunu önlemek için konvertere soğutucu olarak hurda yüklenir edilir. BOF tekniğinin uygulama aşamaları aşağıdaki Şekil 5'te şematik olarak verilmektedir.

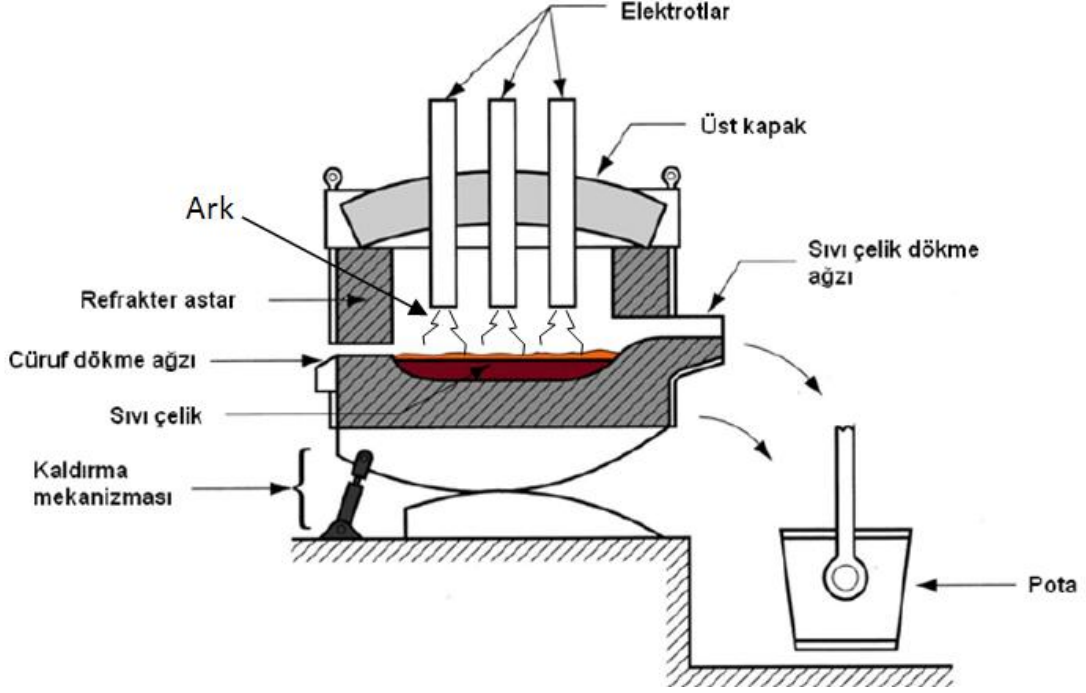
1.3.2.4. Elektrik Ark Fırını

Günümüzde çelik üretiminde kullanılmakta olan iki farklı modern yöntemden biri entegre demir çelik tesislerinde kullanılan BOF, diğeri ise yarı entegre demir çelik tesislerinde kullanılan elektrik ark fırınıdır. Elektrik ark fırını (ocağı) özel alaşımli çeliklerin ve inşaat sektöründe kullanılan sade karbonlu çeliklerin üretiminde kullanılmaktadır. Bazı oksijen fırınlarından farklı olarak, elektrik ark fırınında sıvı pik metal yerine hurda kullanılır. Geleneksel elektrik ark fırınları alternatif akımlı, direkt arklı, 3 elektrotlu, dairesel kesitli gövde ve kapaktan oluşur. Elektrotlar ile haznedeki metal arasında yüksek akım yoğunluğu ile ark meydana gelir ve ark bölgesinde 3200°C 'ye varan yüksek sıcaklık elde edilir. Aşağıda bir elektrik ark fırınının şematik kesiti Şekil 6'da verilmektedir.



- (1) Hurda yüklenmesi (2) Yüksek fırından gelen pik demir yüklenmesi (3) Oksijen üfleme
(4) Sıvı çeliğin alınması ve alaşım elementlerinin ilavesi (5) Cürufun alınması

Şekil 5. BOF tekniği ile çelik üretim aşamaları



Şekil 6. Elektrikli ark fırınının şematik kesiti

Elektrik ark fırını ile çelik üretiminin;

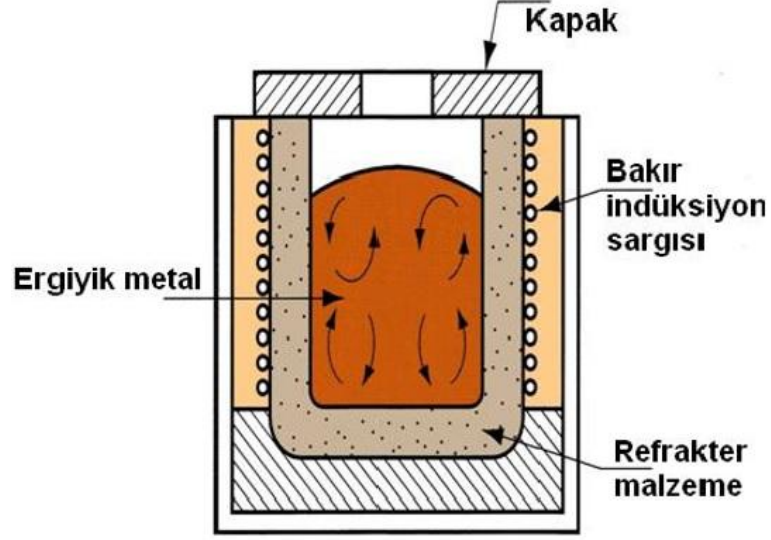
- Çok yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesi,
- Yüksek kaliteli çelik üretebilmesi,
- Sıcaklık kontrolü yapılabilmesi (Gerekirse sabitleme),
- Bileşim kontrolü yapılabilmesi,
- Ergitme süresinin kısa olması,
- Yüksek alaşımlı çelik üretiminin yapılabilmesi,
- Üstün P ve S saflaştırması yapılabilmesi
- Çalışma kolaylığı

şeklinde sıralanabilen birçok üstün yanı bulunmaktadır. Ülkemizde elektrik pahalı olmasına rağmen, çelik üretimimizin %70'i ark ocaklarında gerçekleştirilmektedir.

1.3.2.5. İndüksiyon Fırını

Son yıllarda dünyada indüksiyon fırınlarıyla da çelik üretimi oldukça yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Şekil 7). İndüksiyon fırınlarıyla çelik üretimi ilk olarak

Hindistan'da başlamıştır. İndüksiyon fırınlarında, ergitilecek metal içinde manyetik alan oluşturmak için bir bobinden geçen alternatif akım kullanır. İndüklenen akım, hızla ergime sağlar. Elektromanyetik kuvvet alanı, ayrıca sıvı metalde karıştırma etkisi de oluşturur.



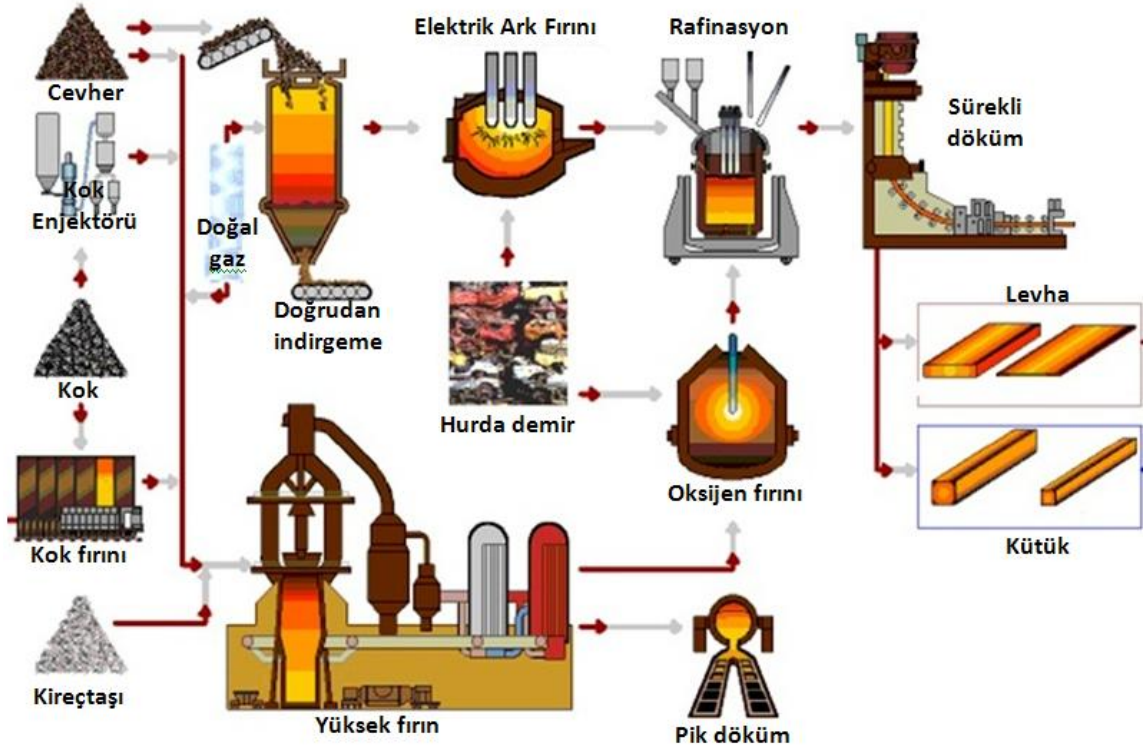
Şekil 7. İndüksiyon fırını

Metal, ısıtıcı elemanlarla temas halinde olmadığından, yüksek kalitede ve saflıkta erimiş metaller üretmek için ortam iyi bir şekilde kontrol edilebilir. İndüksiyon fırınlarının bazı üstünlükleri;

- Diğer çelik tesisleriyle karşılaştırıldığında, yatırım maliyetlerinin çok düşük oluşu,
- Enerjiyi en verimli kullanan tesisler oluşu,
- Oksijen ihtiyacının olmayışı
- Düşük gürültü düzeyi

olarak sıralanabilmektedir. Buna karşılık, ark ocaklarında verimli bir şekilde gerçekleştirilebilen fosfor ve kükürt giderme işlemi indüksiyon fırınlarında yapılamamaktadır.

Günümüzde çelik üretimine cevherden yarı mamul ürüne kadar işlem aşamaları aşağıdaki Şekil 8'de topluca verilmektedir.

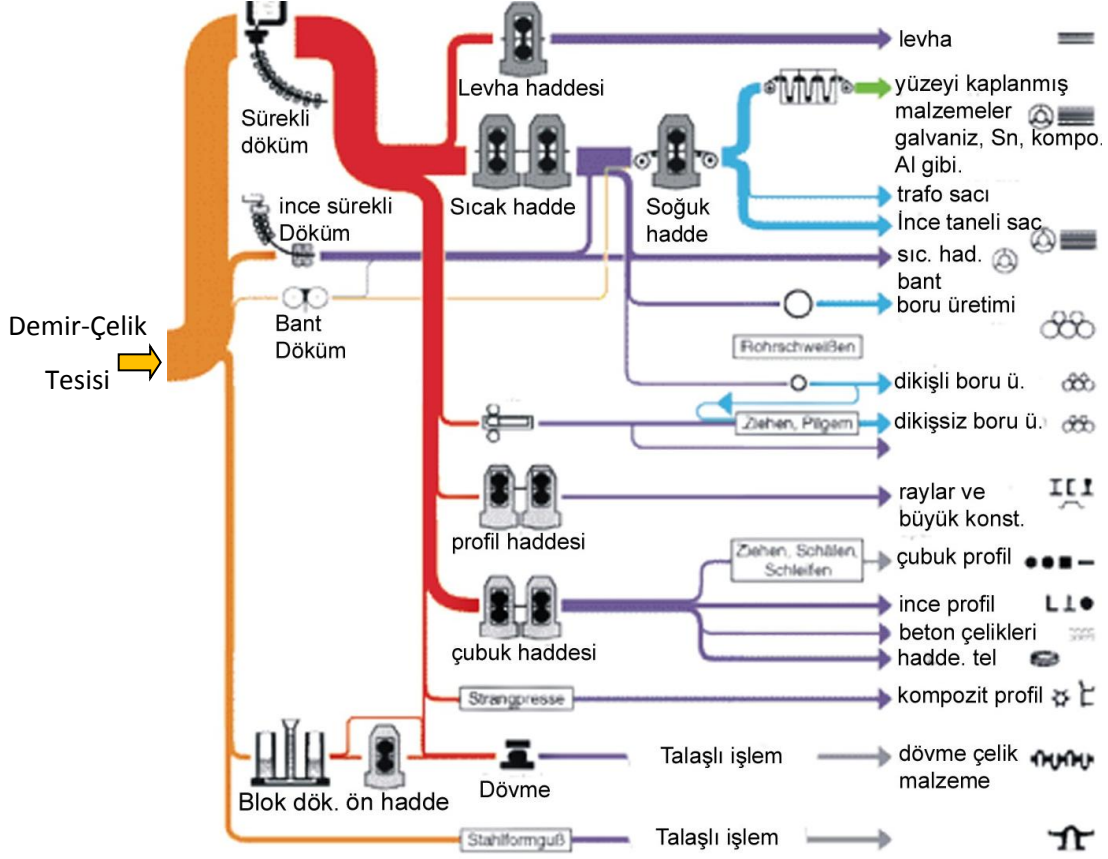


Şekil 8. Demir-Çelik üretiminde işlem aşamaları

1.4. Çelik Ürünleri ve Üretim Yöntemleri

Çelik, günümüzde her türlü mühendislik uygulamalarında en fazla kullanılmakta olan malzeme olduğundan, ihtiyaçlara göre birçok farklı tipte üretilmekte ve demir-çelik tesisinden çıktığı, “bloom”, “slab” ve “kütük” olarak adlandırılan yarı mamul hali üzerinde uygulanan farklı işlemlerle de son ürün haline getirilmektedir. Bu işlem aşamaları aşağıdaki Şekil 9’de şematik olarak özetlenmektedir.

Aşağıdaki Şekil 9’dan da görüleceği üzere, çelik ürünler üzerlerinde “sıcak” ve “soğuk” şekillendirme teknikleri uygulanmaktadır. Çelik yarı mamuller üzerinde uygulanan bu teknikler sonucunda elde edilen ürünlerin sıcak veya soğuk şekillendirmeye bağlı olarak bazı mekanik özellikleri de farklı olmaktadır. Bu teknikler ve elde edilen çelik ürünler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.



Sıcak haddelenmiş çelik ürünleri olarak geleneksel profillerden olan I, U, L, Z, T profillerinin yanı sıra, levhalar, borular, kutu kesitler, dolu kesit çubuklar ve nervürlü çubuklar sayılabilir. Uygulamada ince levhalar sac, kalın levhalar ise platina adıyla anılmaktadır.

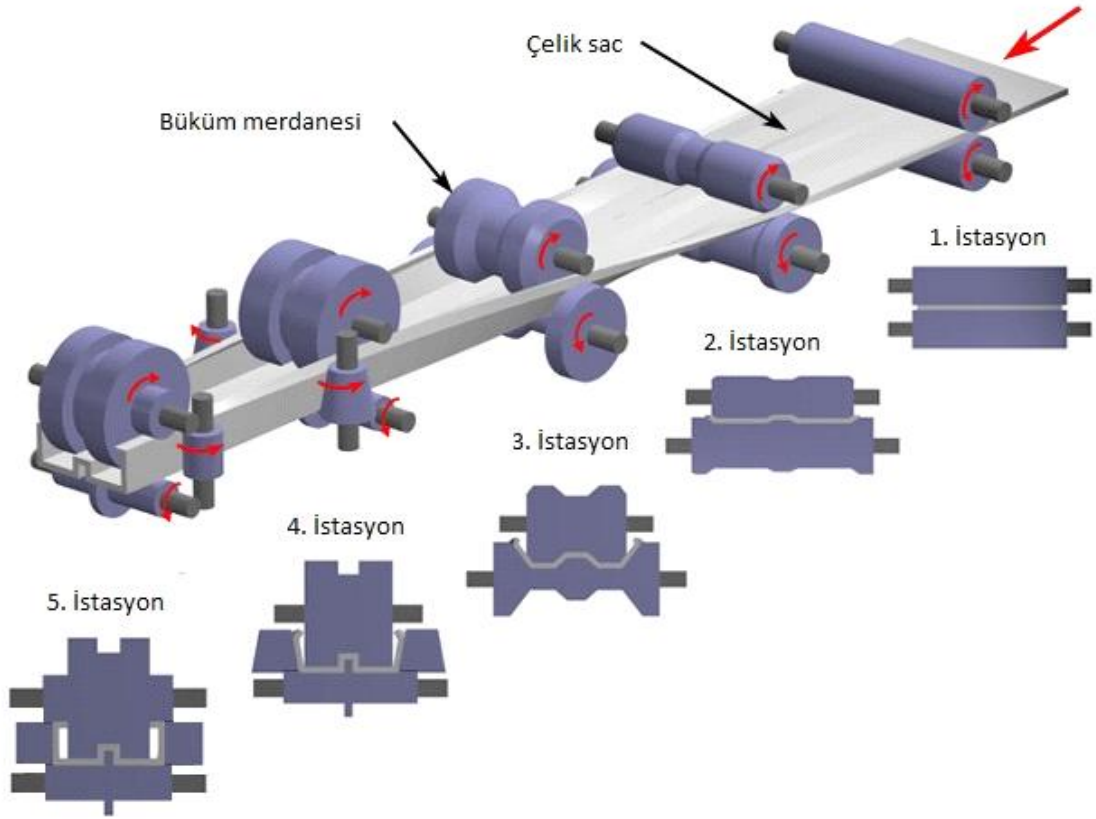
1.4.2. Soğuk Şekillendirme ile Üretilen Çelik Ürünleri

Bu teknikte, sıcak şekillendirmedeki gibi malzemenin önceden ısıtılması söz konusu değildir. Malzeme, darbe ile bir kalıbın şeklini almaya zorlanır ya da merdaneler arasından geçerken istenen şekli alır. “Eğme”, “bükme”, “zımbalama”, “dövme”, “soğuk haddeleme” olarak adlandırılan bu işlemler, üretimin özelliğine göre bir ya da birkaç adımda gerçekleştirilir. İnşaat Mühendisliği uygulamalarında kullanılan soğuk şekillendirilmiş ürünler daha çok sıcak hadde profillerinin benzerleri olan ve çoğunlukla soğuk haddeleme (roll forming) tekniği ile üretilen “hafif çelik profiller”dir.

Çelik yapı sektöründe kullanılan ince cidarlı taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan elemanların soğuk şekillendirme ile üretiminde soğuk haddeleme (Sürekli formda şekil verme, Roll-Forming) ve soğuk bükme (Preste bükme) şeklinde iki farklı yöntem uygulanmaktadır. Hafif profil üretiminde soğuk bükme tekniği çok daha az oranda kullanılmaktadır. Bu yöntemler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

1.4.2.1. Soğuk Haddeleme (Sürekli Formda Şekil Verme)

Soğuk haddelemede, başlangıçta düz olan çelik sac eleman arzu edilen nihai kesit şekli elde edilinceye kadar gitgide artan şekilde, “pas” veya “istasyon” denilen küçük adımlarla sürekli deformasyona uğratılmaktadır (Şekil 11). Uygulamada Roll-Forming olarak da adlandırılan bu yöntemde ardı ardına sıralanmış çok sayıda hadde silindirleri/diskleri kullanılmaktadır (Şekil 12). İnce sac levhanın nihai kesite adım adım getirilmesinin başlıca nedeni, malzemenin iç yapısında ani plastik şekil değiştirme nedeniyle oluşacak kusurların ve artık gerilme olarak adlandırılan gerilme yığılmalarının azaltılmasını sağlamaktır.



Şekil 11. Sürekli soğuk şekillendirme (Roll-Forming) işlemi



Şekil 12. Sürekli soğuk şekillendirme silindir ve diskleri

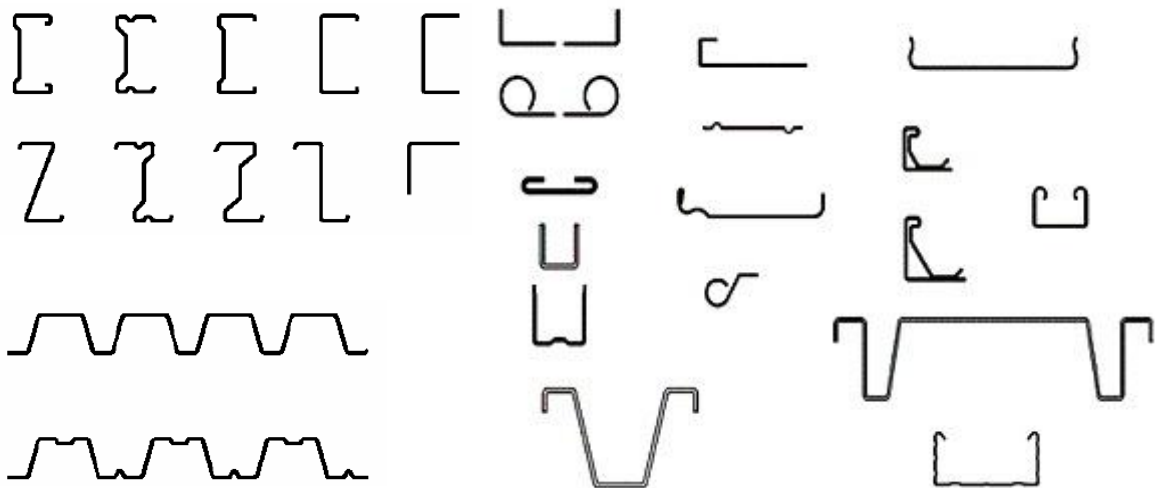
Şekillendirme işleminde kullanılan silindirlerin yerleşimi ve gerekli istasyon sayısı elde edilmek istenilen kesit şekline bağlıdır (bkz. Şekil 12). Üretilmek istenen kesit şekli ne kadar karmaşıkça gerekli istasyon sayısı da o kadar fazladır. Bitiş ucunda, tamamlanmış olan kesit makineyi durdurmaksızın otomatik olarak kesilir. Kesme boyları genellikle 6 m

ve 12 m'dir. Sürekli soğuk şekillendirme yöntemiyle şekillendirme işleminin uygulandığı bir makineye ait görünüm Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. Sürekli soğuk şekillendirme (Roll-Forming) makinesi

Seri üretime çok uygun olan bu yöntemle hafif profiller, oluklu levhalar ve sayısız farklı tipte elemanlar da üretilebilmektedir (Şekil 14).



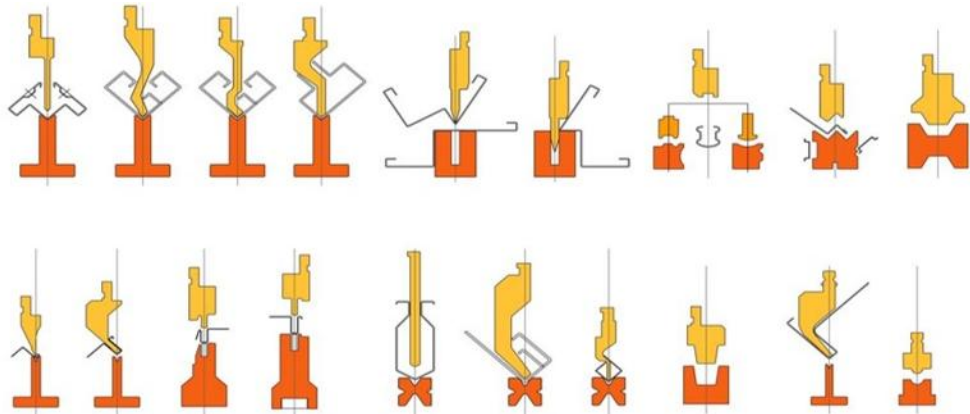
Şekil 14. Sürekli soğuk şekillendirme yöntemi ile üretilen bazı kesit tipleri

1.4.2.2. Soğuk Bükme (Preste Bükme)

Preste bükerek şekil verme, bir baskı (zımbalama) tezgahı, kalıplar ve bazı yardımcı aparatların gerektiği, kısıtlı üretim kapasiteli bir bükme işlemidir. “Abkant pres” adıyla da anılan pres tezgahı, düşey hareketli bir üst kiriş ve sabit alt kalıptan oluşur. Bu yöntemde, makinedeki kalıbın boyuna bağlı olarak, tek parça levha malzeme, elde edilmek istenen kesitte mevcut her köşe ya da kıvrım için ayrı bir darbe uygulanmak suretiyle bükülür. Soğuk bükme işlemi uygulanan bir “Abkant” pres ve bükme kalıbına ait tipik görünümler aşağıdaki Şekil 15’te, yöntem uygulanarak üretilebilen bazı kesitler ise Şekil 16’da verilmektedir.



Şekil 15. Abkant pres tezgahı ve bükme kalıbı

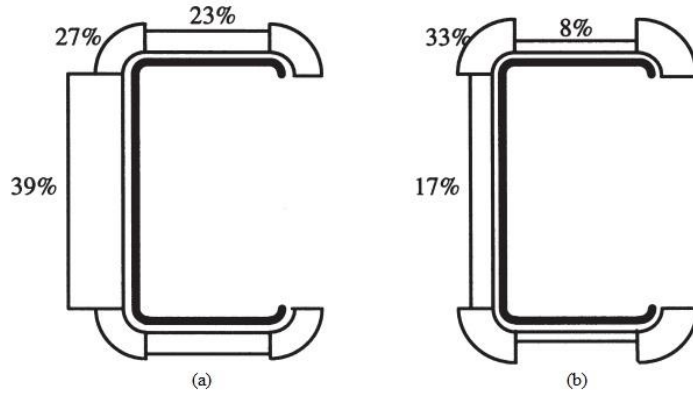


Şekil 16. Soğuk bükme yöntemi ile üretilebilen bazı kesitler

1.4.3. Soğuk Şekillendirmenin Malzemenin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Soğuk şekillendirme işlemi sırasında kullanılan yöntemler, çelik malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli değişiklikler meydana getirir. Bu değişiklikler özellikle kesitlerin köşe bölgelerinde yoğunlaşır. Bunun nedeni, kesitin köşelerinin düz kısımlara göre çok daha büyük plastik şekil değiştirmeye uğratılmasıdır. Kesitlerin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin oranı önemli ölçüde kullanılan şekil verme yöntemine bağlıdır. Soğuk şekillendirme işlemi çeliğin gerilme-şekil değiştirme eğrisinde değişimlere neden olur.

Bir malzeme üzerine herhangi bir dış yük uygulanıp kaldırıldıktan sonra, bu elemanın üzerinde arta kalan gerilme dağılımı olarak adlandırılan ve malzemedeki elastik geri toparlanma çabasının mevcut plastik şekil değiştirme tarafından tutulması sonucu ortaya çıkan “artık gerilmeler” hafif çelik profillerde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Ham hali ile kıyaslanınca, sürekli soğuk şekillendirme işlemi uygulanmış malzemede, özellikle köşe büküm bölgelerinde oluşan artık gerilmeler, bu bölgelerin akma dayanımında bir artış sağlarken, preste bükme ile şekillendirme bu özelliklerde daha küçük bir değişime neden olmaktadır. Akma dayanımındaki bu artış, pekleşmeden kaynaklanır ve bükme işleminde kullanılan çelik tipine göre farklılık gösterir. Bükme işlemiyle ortaya çıkan ve eğilme artık gerilmesi olarak adlandırılan gerilmelerin sürekli soğuk şekillendirme ve preste bükme işlemleri açısından farkı aşağıdaki Şekil 17’de görülmektedir.



Şekil 17. Soğuk şekillendirilmiş bir profilde eğilme artık gerilmelerinin akma dayanımının yüzdesi olarak gösterimi a) Sürekli şekil değiştirmede, b) preste bükmede [7].

Soğuk şekillendirilmiş kesitlerdeki eğilme artık gerilmeleri malzemede zaten var olan membran artık gerilmelerinden çok daha fazladır. Membran artık gerilmeleri sürekli şekil verme işleminde preste bükmeye göre daha yaygındır ve basınç membran artık gerilmeleri kesitlerin basınç dayanımında önemli kayıplara neden olmaktadır. Özellikle elemanların köşe bölgelerinde büyük membran artık gerilmeleri oluşmaktadır. Uygulanan sürekli şekil verme işlemi ile bu bölgelerde akma dayanımını artırdığı için oluşan olumsuz etki de giderilmiş olmaktadır.

Sıcak haddeleme yöntemiyle üretilmiş profiller, bu işlemden sonraki soğuma ile ortaya çıkan artık gerilmelerden etkilenir. Bu gerilmeler çoğunlukla membran gerilmesi şeklinde olup, kesit şekline bağlıdır. Artık gerilmelerin burkulma dayanımı üzerinde de önemli etkileri bulunmaktadır. Bundan dolayı, artık gerilmeler, sıcak haddelenmiş profillerin tasarımında Avrupa tasarım şartnamelerindeki farklı burkulma eğrilerinin kullanımına neden olan başlıca etkendir. Uygulanan sıcak ve soğuk şekillendirme yöntemlerine bağlı olarak profil kesitinde ortaya çıkan artık gerilmelerin karşılaştırılması aşağıdaki Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Kesitlerde oluşan artık gerilmelerin karşılaştırılması

Şekillendirme yöntemi	Sıcak şekillendirme	Soğuk şekillendirme	
		Soğuk haddeleme	Soğuk bükme
Membran artık	Yüksek	Düşük	Düşük
Eğilme artık	Düşük	Yüksek	Düşük

1.5. Hafif Çelik Ürünlerinin Yapılarda Kullanımı

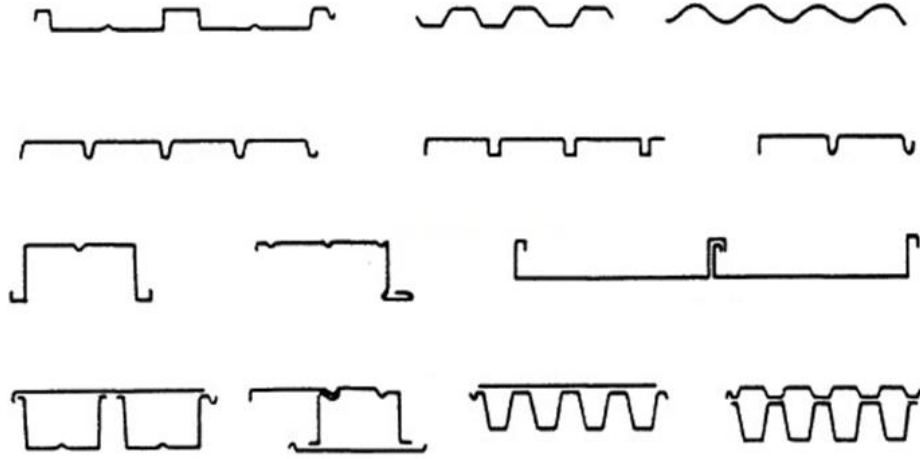
Sürekli soğuk şekillendirme ya da soğuk bükme yöntemleri kullanılarak üretilmekte olan hafif çelik ürünleri;

- a) Sac paneller,
- b) Sandviç paneller,
- c) Hafif profiller

şeklinde başlıca üç tiptedirler. Bu ürünlerin yapılarda kullanımı aşağıda sırasıyla verilmektedir.

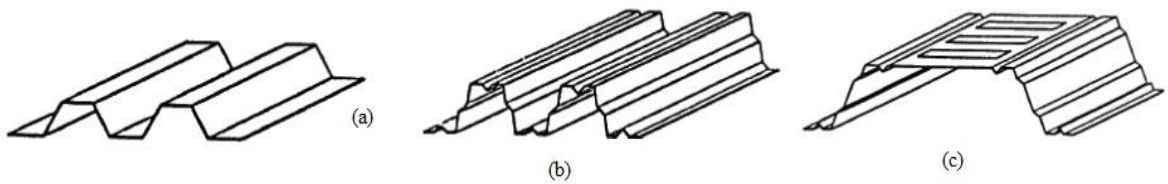
a) Sac Paneller

Sac paneller, genellikle döşeme, çatı ve duvar gibi yerlerde hafif düzgün yayılı yükleri taşımak için kullanılırlar. Kullanım yerine göre birçok farklı kesit şeklinde üretilen bu elemanlardan bazıları aşağıdaki Şekil 18’de verilmektedir.



Şekil 18. Bazı sac panel tipleri

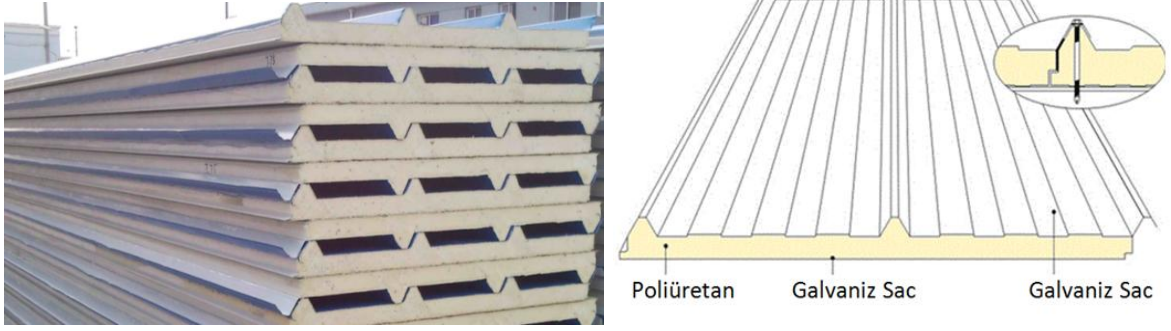
Yukarıdaki sac panellerin yükseklikleri genellikle 40 mm ile 200 mm, kalınlıkları ise 0.5 mm ile 2 mm arasında değişmektedir. Üç farklı nesil sac panel türü mevcuttur. Birinci nesil sac paneller, berkitmesiz düz trapez kesitlere sahip olup ikincil elemanlarla 3 m den fazla olmayan açıklıklarda kullanılmaktadırlar. İkinci nesil sac paneller, bükülerek oluşturulmuş düşey berkitmelere sahip trapez kesitli olup 6 m - 7m’ye kadar olan açıklıklarda kullanılmaktadırlar. Üçüncü nesil olanlar ise yatay ve düşey berkitmelere sahip olup aşıklara ihtiyaç duymadan 12 m ye kadar olan açıklıklarda kullanılabilirler (Şekil 19).



Şekil 19. a) birinci, b) ikinci, c) üçüncü nesil sac panel tipleri

b) Sandviç Paneller

İki sac panel arasına poliüretan köpük, taş yünü gibi yüksek ısı izolasyonu özelliğine sahip malzeme yerleştirilerek üretilen sandviç paneller ısı izolasyonu sağlamalarının yanında hava şartlarından korunma konusunda oldukça basit uygulanabilir ve etkili bir çözüm sundukları için oldukça yüksek kullanım oranına sahiptirler. Sandviç paneller ve kesit görünümü aşağıdaki Şekil 20’de verilmektedir.



Şekil 20. Sandviç paneller ve kesit görünümü

c) Hafif Profiller

Soğuk şekillendirilmiş profiller kullanılarak üretilen hafif çelik yapılar konusunda bilgi ve tecrübe birikimi 20. Yüzyıl başlarında uçak endüstrisinin, mümkün olduğunca hafif fakat taşıma kapasitesi o oranda yüksek taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyması ile başlamıştır. Bu sahada çalışmaların hızlanmasına neden olan ikinci büyük etken ise otomobil endüstrisidir. I. Dünya Savaşı sırasında, otomobil kaportalarının ve demiryolu vagonlarının üretiminde soğuk şekillendirilmiş çelik sac elemanlar kullanılmıştır. Uçak ve otomobil endüstrisinin neden olduğu bilgi ve tecrübe birikimi, soğuk şekillendirilmiş çelik taşıyıcı elemanların yapı endüstrisinde de yaygın şekilde kullanılmasına neden olmuştur.

Bu profillerin yükseklikleri genellikle 50 mm - 300 mm arasında, kalınlıkları ise 1 mm – 6 mm arasında olmakla birlikte bu boyutlar dışındaki kesitler de istek üzerine imal edilebilmektedir. Uygulamada en çok kullanılmakta olan hafif profil kesit tipleri aşağıdaki Şekil 21’de görülmektedir.

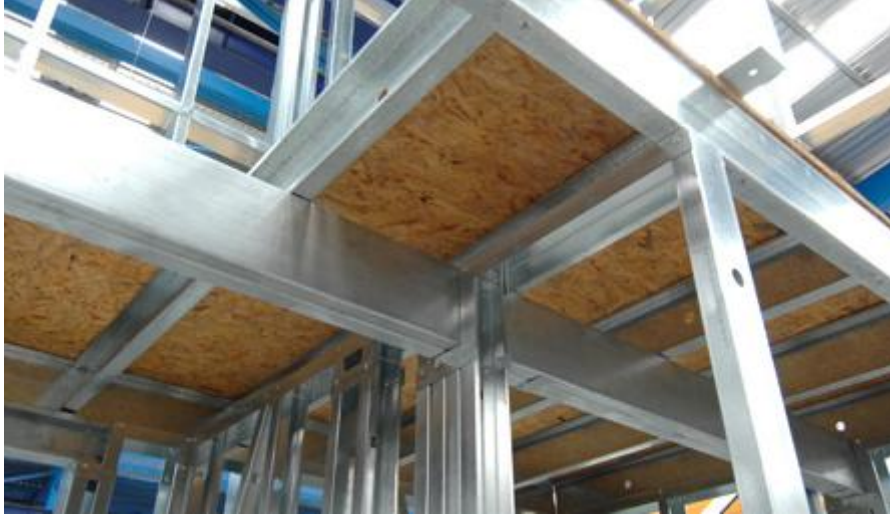


Şekil 21. Uygulamada en çok kullanılan bazı hafif profil tipleri

Hafif profillerin geçmişteki kullanımı genellikle ağırlıktan tasarruf sağlanması gereken durumlarda sınırlı olmuştur. Ancak zamanla malzeme ve üretim sürecinde yaşanan gelişmeler sayesinde bu profillerin güncel ve potansiyel kullanım alanlarının sınırları günümüzde oldukça genişlemiştir. Hafif profiller çoğunlukla kolon, kiriş, duvar ve kafes sistem gibi taşıyıcı elemanların teşkilinde, tekli ya da bileşik olarak kullanılmaktadır (Şekil 22-24).



Şekil 22. Hafif profil kafes kirişler



Şekil 23. Hafif profil kolon ve kirişler



Şekil 24.Hafif profil duvar elemanları

1.6. Hafif Çelik Yapılar

Taşıyıcı sistem elemanlarının teşkilinde hafif profiller kullanılarak inşa edilen yapılara “hafif çelik yapılar” adı verilmektedir. Aşağıda ayrıntılı olarak açıklanacak olan bu yapılar;

- a) Konut türü yapılar
 - b) Endüstriyel binalar
 - c) Geçici yapılar
- olarak sınıflandırılabilir.

a) Konut Türü Yapılar

Hafif profillerin konutlarda yaygın kullanımına Amerika Birleşik Devletleri öncülük etmiştir. Bugün Avrupa ve Türkiye’de bu profillerin özellikle müstakil ev türü yapılarda kullanımının oldukça yaygınlaştığı görülmektedir. Bu tür yapılarda hafif profillerin en çok kullanıldığı taşıyıcı elemanlar kolon, döşeme kirişleri, taşıyıcı duvar ve kompozit döşemeler olarak sayılabilir. Hafif profillerle üretilmiş konut türü yapılara ve bu profillerin kullanıldığı döşeme tiplerine ilişkin bazı görünüşler aşağıdaki Şekil 25, Şekil 26 ve Şekil 27’de verilmektedir.



Şekil 25. Hafif profillerle inşa edilmiş konut türü bir yapı tipi [8].



Şekil 26. Hafif profillerle inşa edilmiş başka bir konut türü yapı [8].



Şekil 27. Hafif profil döşeme sistemleri [9].

b) Endüstriyel Yapılar

Atölye, depo, hangar vb. gibi yapıların üretiminde hafif profiller ve bu profillerle üretilen kafes kiriş, kolon, duvar panelleri gibi elemanlar giderek artan hızda kullanılmaktadır. Bunun temel nedeni, bu elemanların hafiflik, farklı kesit tipleri, kolay birleşim, mimari özgürlük, estetik yeterlilik gibi etkenler yönünden standart sıcak hadde profillerine ve ahşap elemanlara kıyasla daha üstün özelliklere sahip olmasıdır. Aşağıdaki Şekil 28'de hafif profiller ve bu profillerle üretilen hafif çelik elemanlar kullanılarak inşa edilen bazı endüstri yapıları görülmektedir.

c) Geçici Yapılar

Sahneler, stantlar ve şantiyelerde konaklama için kullanılan kapalı alanlar gibi yapılar hafif çelik profiller kullanılarak rahatlıkla üretilebilmektedir. Hafif çelik profiller kullanılarak üretilmiş geçici yapılara ilişkin bazı örnekler aşağıdaki Şekil 29 ve Şekil 30'da verilmektedir.



Şekil 28. Hafif profillerin endüstriyel yapılarda kullanımı



Şekil 29. Hafif profillerin endüstriyel yapılarda kullanımı



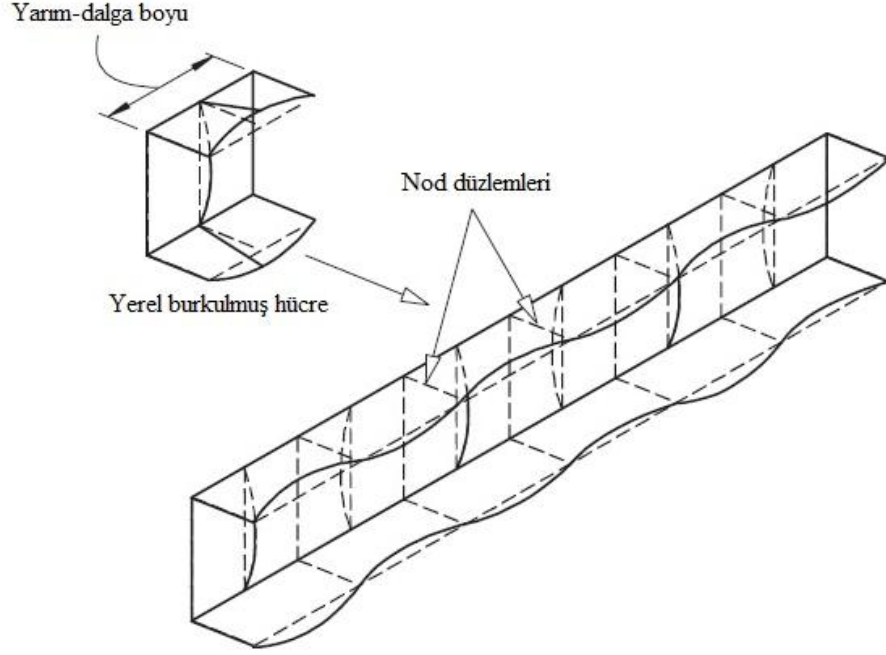
Şekil 30. Hafif profillerin geçici yapılarda kullanımı

1.6.1. Hafif Profillerin Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Hafif profillerin ince cidarlı oluşu ve soğuk şekillendirme işleminin etkileri, standart sıcak hadde profillerinde genellikle karşılaşılmayan bazı özel tasarım sorunlarına yol açmaktadır. Aşağıda hafif profillerle tasarımda karşılaşılan bazı özgün problemler kısaca açıklanmaktadır [10].

1.6.1.1. Burkulma

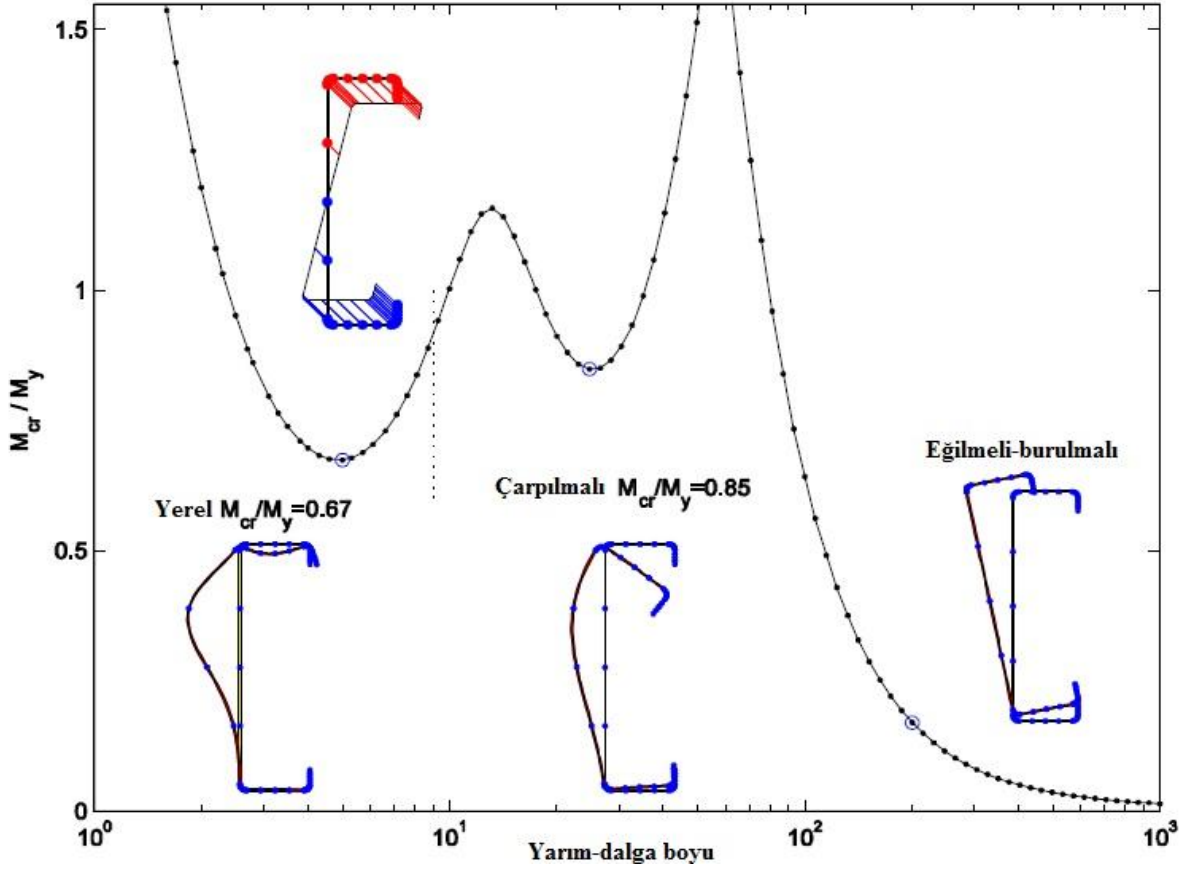
Hafif profillerde genel ve yerel burkulmaya ek olarak, çarpılma, ve kesme burkulması şeklinde sıralanabilen kendilerine özgü burkulma türleri (modları) meydana gelmektedir. Yerel burkulmalar özellikle hafif çelik profillerde sıklıkla görülmekte ve bağımsız düzlem elemanların kısa dalga boyulu (sık aralıklı) burkulmaları sonucunda oluşmaktadır. Dalga boyu, burkulmaya uğramış elemandaki burkulma ya da burkulmaların hangi boylarda meydana geldiğini dolayısıyla oluşma sıklığını tanımlayan bir terimdir. Burkulma modları ve bu modlarda oluşan dalga boyları bir levha için Şekil 31'de verilmektedir.



Şekil 31. Yerel burkulmuş narin bir kolonda ve dalga boyu

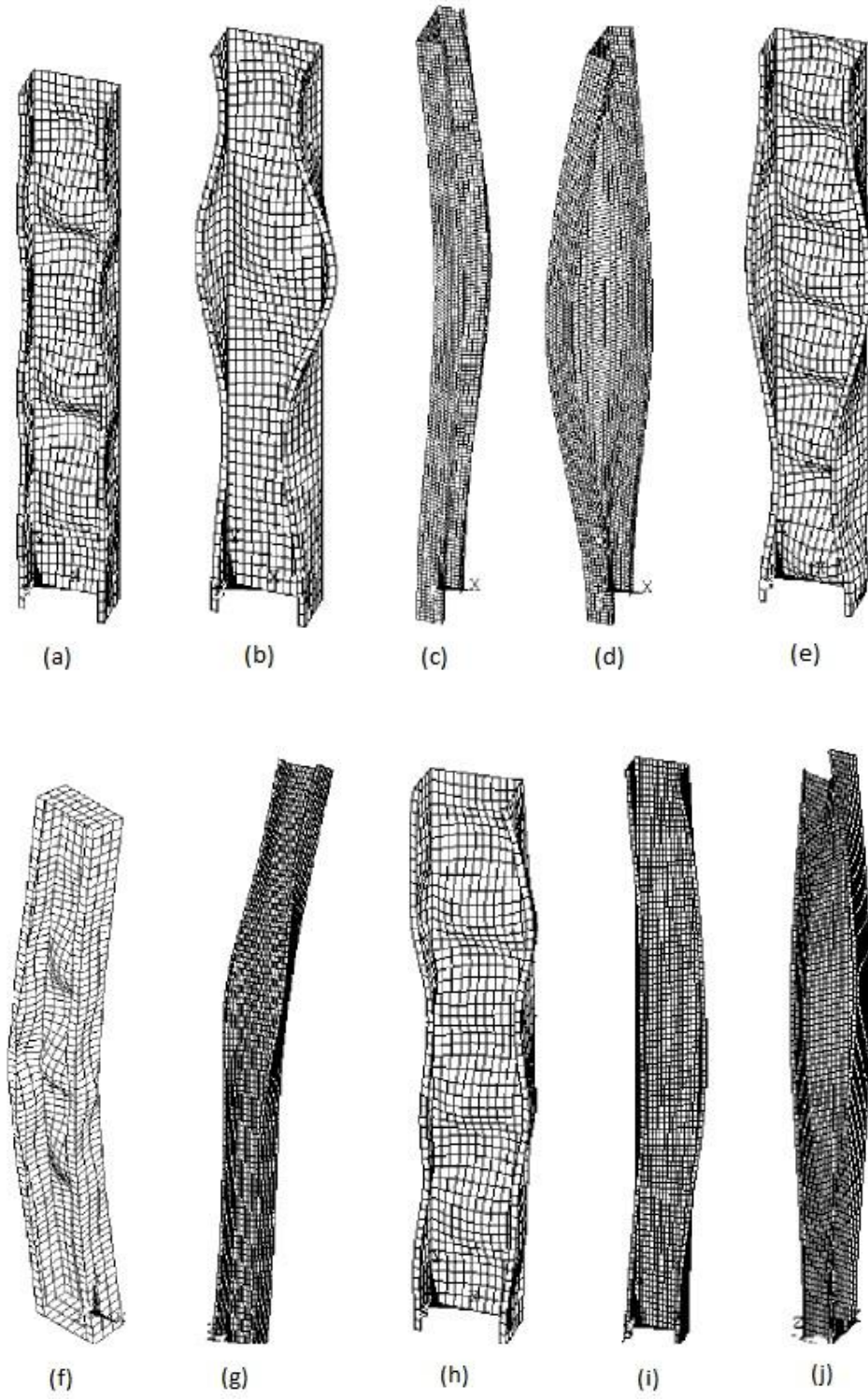
Genel burkulma terimi, kolonlar için eğilme ve eğilmeli-burulmalı burkulmayı, kirişler için ise yanal burulmalı burkulmayı kapsamaktadır. Genel burkulma, profillerin kesit geometrisinde herhangi bir değişiklik meydana gelmeden rijit olarak hareket etmelerinden dolayı rijit-gövde burkulması olarak da adlandırılmaktadır. Çarpılmalı burkulma bükme hatlarının göreceli hareketleri sonucu kesitte meydana gelen bir şekil

bozulması olarak ortaya çıkmaktadır. Çarpılmalı burkulmada dalga boyları genellikle yerel ve genel burkulmadaki dalga boyları arasında olmaktadır (Şekil 32).



Şekil 32. Hafif profillerde burkulma türleri ve oluştukları dalga boyları [11].

Hafif profil kesit tiplerinin giderek karmaşıklaşması sonucu yerel burkulma hesaplamaları da zorlaşmakta, bundan dolayı da çarpılmalı burkulma daha önemli hale gelmektedir. Yerel ve çarpılmalı burkulma “kesit” modları olarak değerlendirilmeye birlikte kendi aralarında ve genel burkulmayla da etkileşime girmektedirler (Dubina, 1996). Eksenel basınç altındaki bir C profilinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş elastik eigen burkulması analiz sonuçlarından elde edilmiş burkulma modları Şekil 33’te gösterilmektedir.



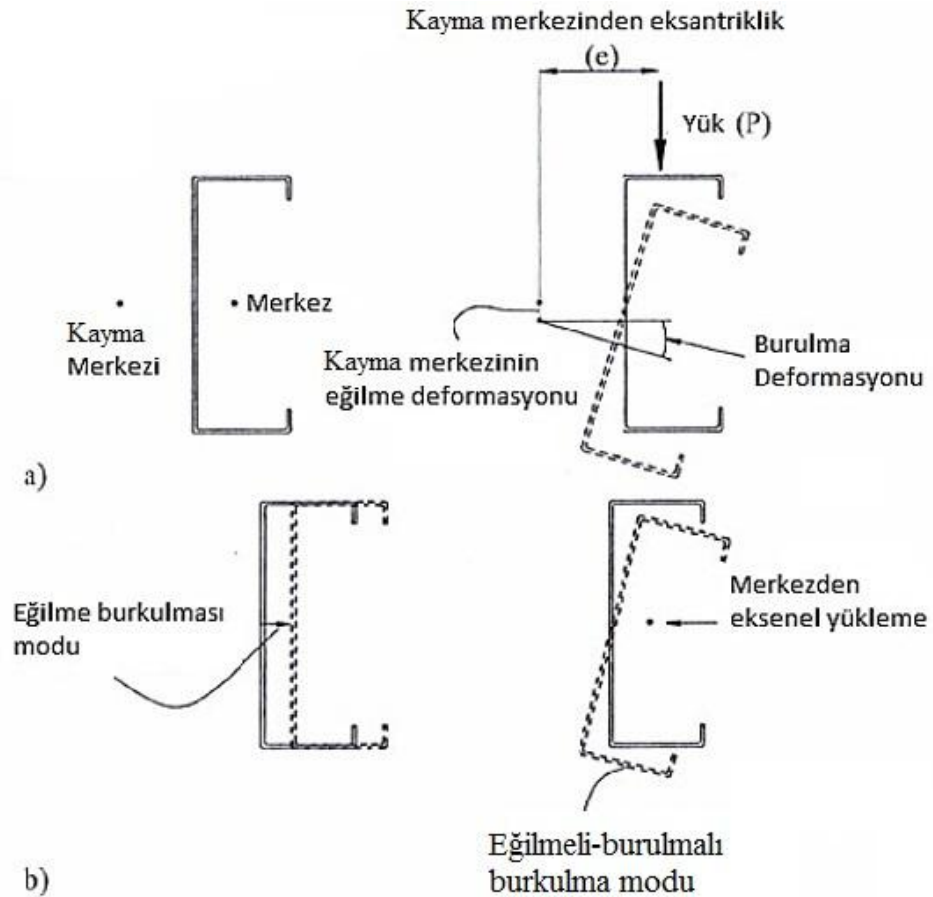
Tekli modlar: a) Yerel (L), b) Çarpımalı (D), c) Eğilme (F), d) Eğilmeli-burulmalı (FT)

Birleşik modlar: e) L+D, f) F+L, g) F+D, h) FT+L, i) FT+D, j) F+FT

Şekil 33. Eksenel basınç altındaki bir C profilin burkulma modları [12].

1.6.1.2. Burulma

Hafif çelik profiller sahip oldukları ince cidarlarından dolayı düşük burulma rijitliklerine sahiptir. Soğuk şekillendirme ile üretilen kesitlerin çoğu tek eksene göre simetrik olduklarından dolayı kayma merkezi Şekil 34'te gösterildiği gibi ağırlık merkezine göre eksantriktir. İnce cidarlı kesitler, burkulma meydana gelmeden eğilmeleri için kayma merkezinden geçen bir eksen üzerinden yüklenmelidir. Ancak, yüklemdeki kayma merkezine göre eksantriklik Şekil 34a'da gösterildiği gibi ince cidarlı kirişlerde önemli burulma şekildeğişimleri meydana getirmektedir. Bu nedenle, ince cidarlı kirişlerde belli aralıklarda ya da uzunlukları boyunca burkulma berkitmelerinin kullanılması gerekmektedir [10].



Şekil 34. a) Eksantrik olarak yüklenmiş bir kiriş ve b) aksenal yüklenmiş bir kolonun burulma şekildeğişimleri [10].

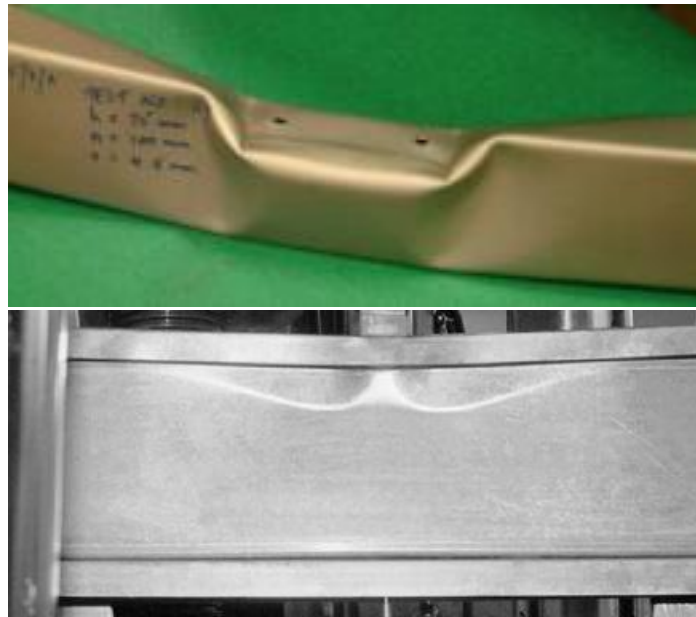
Bunun yanı sıra, aksenal olarak yüklenmiş kolonlar için, kayma merkezi eksenine göre yükleme eksantrikliği Şekil 34b’de görüldüğü gibi yanal burkulmaya neden olan yüklerden daha düşük değerlerde eğilmeli-burulmalı burkulma modlarına neden olmaktadır. Bundan dolayı, tek eksene göre simetrik olan kolon kesitleri için eğilmeli-burulmalı burkulmalarının kontrolü önem kazanmaktadır.

1.6.1.3. Gövde Buruşması

Mesnetlerde ve düzgün yayılı yüklerin altındaki noktalarda Şekil 35’te görüldüğü gibi meydana gelen gövde buruşmaları hafif profillerde önemli bir problem olmaktadır. Bu problemin nedenleri;

- Hafif çelik tasarımında yük taşıyan veya mesnetlere konulan berkitmelerin uygulamadaki zorlukları,
- Hafif profil gövdelerinin boy-kalınlık oranlarının (narinlik) büyük oluşu,
- Bazı durumlarda gövdenin eğik oluşu,
- Yükleme yapılan başlık ve gövde arasındaki bükmeden dolayı yüklemenin gövdeye göre eksantrik oluşu.

şeklinde kısaca sıralanmaktadır.



Şekil 35. Bir C ve I profilinin yükleme bölgesi altındaki gövde buruşması

1.6.1.4. Süneklik ve Plastik Tasarım

Çoğunlukla kesit burkulmalarından kaynaklanmakla birlikte soğuk şekillendirmeden meydana gelen pekleşmenin de etkisiyle hafif profiller düşük sünekliğe sahiptir. Bu nedenle, bu profiller genellikle plastik tasarıma uygun olmayıp, depreme dayanıklı yapı tasarımında enerji sönümleyici olarak da kullanılamazlar. Dolayısıyla bu profiller bahsedilen bu yapılarda sadece elastik tasarım kuralları uygulanmak kaydıyla kullanılabilir.

1.6.1.5. Birleşimler

Çelik yapılarda kullanılan bulon (cıvata) ve kaynak gibi geleneksel birleşim yöntemleri, hafif çelik yapılarda da kullanılmakla birlikte, kolay tahribat etkileri nedeniyle, ince cidarlı hafif profiller için pek uygun değildir. Bu nedenle hafif profillerin montajında perçin ve son yıllarda geliştirilen ucu matkaplı “akıllı vida” gibi özel birleştirme araçları daha çok kullanılmaktadır. Hafif çelik profilleri daha kalın mesnet elemanlarına birleştirmek için sıklıkla kullanılan pnömatik çivileme uygulamasının yanında son yıllarda pres perçinleme veya yapıştırma gibi birleşim teknolojileri de geliştirilmiştir. Başlangıçta çoğunlukla otomotiv endüstrisi için geliştirilmiş olan bu yöntem yapılarda da başarıyla uygulanmaktadır.

1.6.1.6. Korozyon

Hafif profillerin korozyon dayanımının en önemli etkeni, metal kalınlığından çok, çelik üzerine uygulanan koruyucu malzemenin kalınlık ve türüdür. Hafif profiller, şekil verme işleminden önce henüz şerit halindeyken galvaniz kaplı olduklarından, bu profillerin korozyon koruması için ilave bir işlem gerekmemektedir.

Hafif profiller genellikle 275 g çinko /m² (Zn 275) ve her yüzde 20 µm kalınlığa denk gelen sıcak daldırma uygulanarak galvaniz kaplanır. Doğru uygulandığı takdirde galvaniz tabakası profilleri yapı ömrü boyunca korozyona karşı koruyabilmektedir.

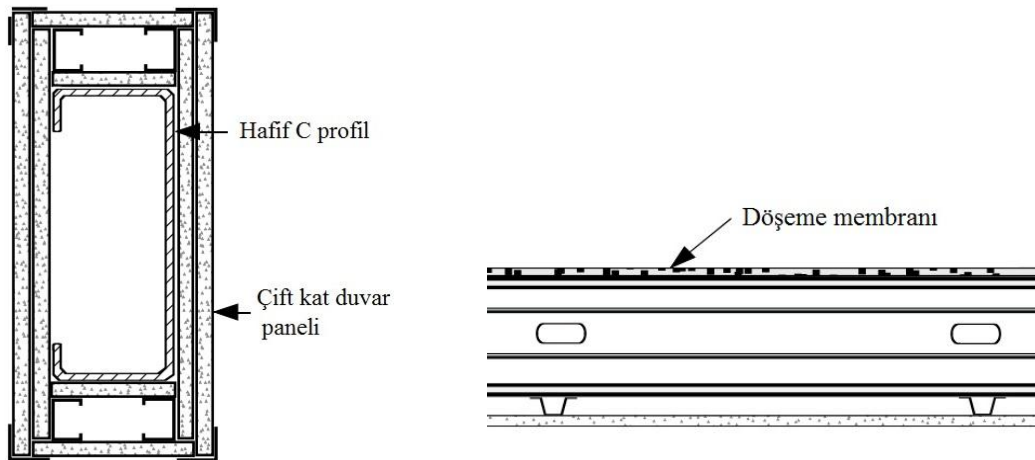
Korozyon olayı hafif profiller üzerinde taşıma sırasında ve açıkta saklama durumunda daha etkili olmaktadır.

1.6.1.7. Yangın

Korumasız hafif profillerin yangın dayanımları, ısınan hacmin profil kesit alanına oranı olarak tanımlanan, “düşük kesit faktörü” değerinden dolayı oldukça düşüktür. Bu nedenle şişme tipi kaplama yapılarak yangına karşı koruma sağlamak mümkün olmamaktadır. Diğer birçok uygulama için uygun olan spreylı sementasyon ya da alçıtaşı özlü kaplamalar da genellikle galvanizli hafif profiller için kullanılabilir değildir. Hafif profillerin yük taşıyıcı olarak kullanıldığı uygulamalarda tek kat yangına dayanıklı, düşük rötre ve yüksek kendini muhafaza kapasiteli özel alçı plakalar kullanılarak 30 dakikalık yangın maruziyetleri hasarsız olarak atlatılabilmektedir. Duvar ve döşemeler üzerine uygulanan düzlem koruyucular, kapalı kesitler için uygun yangın dayanımı sağlayarak 500°C gibi sıcaklıklarda bile profil dayanımlarının çok büyük kısmının korunmasını sağlamaktadır.

Hafif çelik yapılarda, duvar ve döşemelerin plakalarla kaplanması, kullanılan plakaların malzeme ve adedine bağlı olarak 120 dakikaya kadar yangın dayanımı sağlayabilmektedir. Seçilen yalıtım malzemesinin mineral yünü veya taş yünü olması yangın dayanımını önemli derecede etkilemektedir.

Yük taşımayan hafif çelik elemanların yangına maruz kalmaları durumunda, yalnız yalıtım kriterini sağlamaları gerektiğinden, bu elemanlar üzerinde daha az yangın koruması yeterli olmaktadır. Hafif çelik sistemlerde uygulanmakta olan bazı yangın koruması yöntemleri bir profil ve döşeme sistemi için yukarıdaki Şekil 36’da verilmektedir.



Şekil 36. Hafif çelik sistemlerde bazı yangın koruması yöntemleri: a)Profilde, b)Döşemede

1.6.1.8. Sürdürülebilirlik

Günümüz dünyasının en büyük zorluklardan biri, toplumun sağlıklı gelişimine katkıda bulunan çevresel, ekonomik ve sosyal yönleri olan ve kısaca “daimi olma yeteneği” olarak tanımlanan sürdürülebilirlik kavramıdır.

İnşaat sektörü, hem ulusal ekonomilerde hem de genel olarak dünyanın sürdürülebilirlik gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Sürdürülebilir yapıların farklı ülkelerde çeşitli öncelik ve amaçları mevcuttur. Bu yapılar sürdürülebilir gelişimin bir bileşeni olmakla birlikte; mevcut yapıların tekrar kullanılması ve kaynak kullanımının, enerji tüketiminin ve çevre kirliliğinin azaltılması gibi geniş kapsamlı konuları içermektedir.

Sürdürülebilir yapılar için değerlendirilmesi gereken esasları kısaca;

- Sürdürülebilir gelişimin müşteri ve kullanıcılar için ne anlama geldiğini anlama,
- Ömür boyu düşüncesi ve en yüksek önem değerlendirmesinin kullanımı,
- Yapı ömrünü artırmak için esnek tasarım ve mümkün olan yerlerde onarım ve yenileme yapılması,
- En kısa sürede ve en az aksaklıkla tasarım ve yapım,
- Gelecekte tekrar kullanımı ve geri dönüşümü sağlamak için sökülebilir tasarım şeklinde sıralamak mümkündür.

1.7. Hafif Çelik Yapılarda Analiz ve Tasarım Yöntemleri

1.7.1. Genel Çerçeve Analizi

Genel çerçeve analizinin amacı bir yapıda oluşan kesit etkilerinin dağılımını ve belirli yükler altında meydana gelen yerdeğiştirmeleri belirlemektir. Bu amacı gerçekleştirmek için, bir yapının, bu yapının elemanlarının ve birleşimlerinin davranışı hakkındaki kabulleri bir arada bulunduran uygun modeller gerekmektedir.

Çerçevelerin genel analizi, yapısal modelin, yapının, bu yapıya ait elemanların geometrik ve malzeme davranışı, bağlantı ve kesitlerin davranışı gibi birçok kabulü içeren bir model üzerinde yapılmaktadır. Analiz tamamlandıktan sonra çerçeveye ve bu çerçeveye

ait elemanlar ve bağlantılarının, gerçekleştirilen analizin türüne ve kullanılan kesit doğrulama yöntemine göre değişen tasarım kontrolleri yapılmaktadır.

Davranışa ilişkin daha gerçekçi yük-yerdeğiştirme eğrisinin elde edilmesi genellikle oldukça karmaşık analiz yöntemlerinin kullanımını gerektirmektedir. Uygulamada yapı ve yapıya ait eleman ve bağlantıları için maksimum taşıma yükünün elde edilmesinde güvenli bir tarafta kalınmasını sağlayan bazı kabuller yapılmaktadır. Bundan dolayı, basit doğrusal elastik veya rijitplastik kabulden, yapının gerçek davranışına en yakın sonucu sağlayan ancak, çok daha karmaşık olan, elastoplastik kabule kadar çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Analiz yöntemleri arasında yapılması gereken ilk ayırım elastik ve plastik yöntemlerden hangisinin kullanılacağına karar verilmesi olmaktadır. Elastik analiz her durumda kullanılırken, plastik analiz için bazı kısıtlamalar mevcuttur. Kullanılan yöntemler arasındaki diğer bir ayırım ise yapının gerçek yerdeğiştirmiş durumunun göz ardı edilmesi ya da hesaba katılmasıdır. Bu ayrımlar kendi aralarında birinci ve ikinci merteye teorisi olarak adlandırılmaktadır. İkinci merteye teorisi bütün durumlarda uygulanabilirken, birinci merteye teorisi yalnızca yapının yerdeğiştirme etkilerinin göz ardı edilebildiği ya da birleştirilebildiği durumlarda kullanılmaktadır. Özet olarak, genel çerçeve analizi için kullanılan yöntemler,

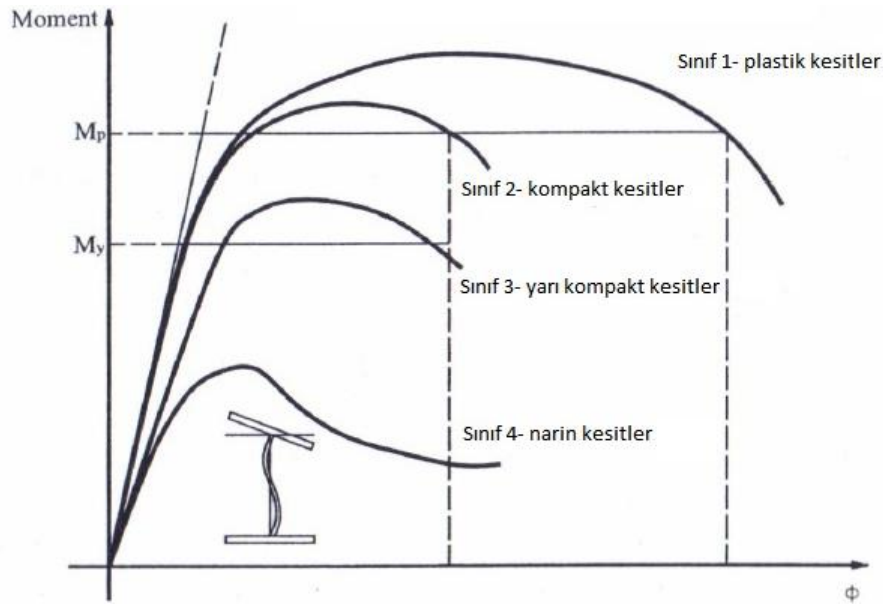
- Birinci merteye elastik analiz,
- İkinci merteye elastik analiz,
- Elastik-mükemmel plastik analiz (İkinci merteye teorisi),
- Elastoplastik analiz (İkinci merteye teorisi),
- Rijitplastik analiz (Birinci merteye teorisi).

şeklinde sıralanmaktadır.

Genel analiz yöntemini belirlemede kullanılan önemli parametrelerden biri, çerçeve elemanlarının kesitleridir. EN1993-1-1 bu kesitleri dört sınıfa ayırmaktadır. Kesitlerin, eğilme momenti dayanımlarına ait performans gerekliliklerine göre belirlenen sınıflardan hangisinde yer alacağı elemanların genişlik-kalınlık oranına göre tanımlanan narinliklerine ve basınç gerilme dağılımlarına bağlıdır. Bu sınıflar,

- Plastik analizler için gerekli dönme kapasitesine sahip plastik mafsal oluşturabilen kesitler Sınıf 1,
- Plastik mafsal oluşturmasına rağmen sınırlı dönme kapasitesine sahip ve bu nedenle plastik analizle tasarlanan yapılar için uygun olmayan kesitler Sınıf 2,

- En dış basınç lifinde hesaplanan gerilmenin akmaya ulaşabildiği ancak yerel burkulmanın plastik moment dayanımının gelişimini engellediği kesitler Sınıf 3,
- Yerel burkulmanın moment dayanımını ya da aksel yüklü elemanlar için basınç dayanımını sınırladığı ve yerel burkulma etkisine belirgin olarak izin veren kesitler Sınıf 4 olarak ayrılmaktadır. Bu sınıfların karakteristik eğrileri Şekil 37’de gösterilmektedir.



Şekil 37. Kesit davranışına göre belirlenen sınıflar [6].

İnce cidarlı hafif çelik profiller genellikle Sınıf 4, nadiren de Sınıf 3 olarak tanımlanan kesitler arasında yer almaktadır. Sınıf 1 ve Sınıf 2’de yer alan sıcak hadde profillere kıyasla bu profiller daha düşük burkulma sonrası dayanıma ve dolayısıyla düşük sünekliğe sahiptir. Şekil 37’de de görüldüğü gibi hafif profiller plastik mafsallı oluşumu için yeterli plastik dönme kapasitesine sahip değildir. Bu nedenle, daha önce Madde 1.6.4’te de belirtildiği gibi, hafif profiller için plastik analiz yerine, genellikle elastik genel çerçeve analizi gerçekleştirilmektedir.

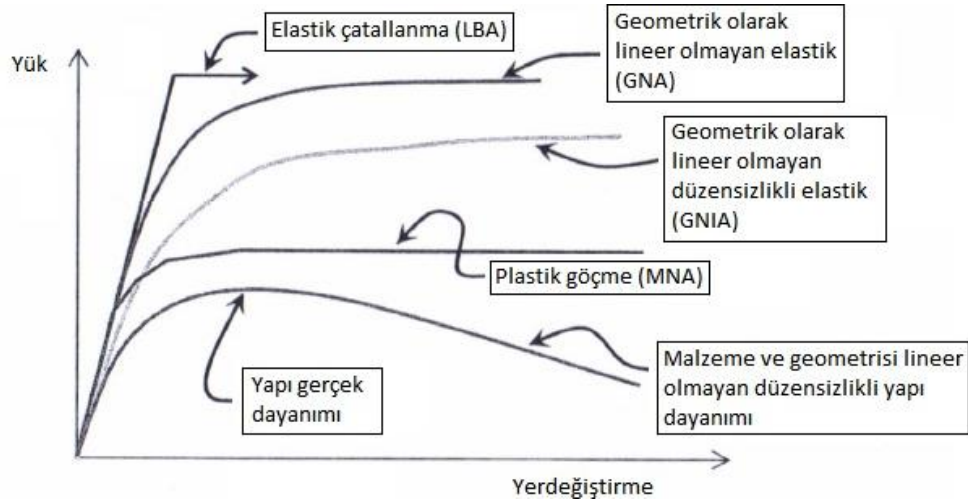
1.7.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

EN1993-1-5 Ek-C’de [13] maksimum sınır durumu tasarımı, kullanılabilirlik sınır durumu tasarımı ve yorulma doğrulamaları için sonlu elemanlar kullanım yöntemleri

verilmektedir. Kullanılacak sonlu elemanlar yöntemi analiz edilecek probleme göre değişmektedir. Gerçekleştirilebilecek analizler;

- LBA: Yapının en düşük özdeğerini elde eden “Doğrusal elastik çatallanma analizi”,
- MNA: Küçük yerdeğiştirme teorisi (geometride değişim meydana gelmeyen) ve malzeme için ideal elastoplastik yapı modelini kullanan, “doğrusal olmayan malzeme analizi”,
- GNA: Mükemmel elastik yapıların “doğrusal olmayan geometri analizi”,
- GMNA: Mükemmel yapıların “doğrusal olmayan geometri ve malzeme analizi”,
- GMNIA: Belirgin düzensizlikleri bulunan “doğrusal olmayan geometri ve malzeme analizi”.

şeklinde sınıflandırılmaktadır [10]. Aşağıdaki Şekil 38, farklı analiz tipleri için bir yapıda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri arasında ortaya çıkacak farkları göstermektedir.



Şekil 38. Bir yapının farklı analiz tiplerine göre yük-yerdeğiştirme eğrileri [10].

“Doğrusal olmayan geometri analizi”, geometride meydana gelen, tek doğrultudaki küçük bir değişim ya da tüm yapıdaki büyük bir değişim için kinematik ve denge ilişkilerinin tamamını hesaba katan bir analizdir. Benzer şekilde, GMNA ve GMNIA analizlerinde de basit bir ideal elastoplastik model yerine tamamen doğrusal olmayan malzeme modeli kullanılmaktadır.

Tasarım için sonlu elemanlar yöntemi kullanılırken dikkat edilmesi gereken birçok nokta bulunmaktadır. Bunlar;

- Yapısal elemanın modellenmesi ve sınır şartları,
- Kullanılacak yazılım ve doküman,
- Düzensizliklerin modellenmesi,
- Malzeme özelliklerinin modellenmesi,
- Yüklerin modellenmesi,
- Sınır durum kriterinin belirlenmesi,
- Uygulanacak kısmi faktörlerin seçimi.

şeklinde sıralanmaktadır.

Analizlerden elde edilecek sonuçların doğruluğunu, sonlu eleman tipinin seçimi, sonlu eleman ağ büyüklüğü, mesnetler için sınır şartları, temas yüzeyleri, uygulanan yükler ve geometri özelliklerinin nominal alınması gibi hususlar önemli derecede etkilemektedir.

Düzensizliklerin analizi yapılacak yapı ya da elemanda mevcut herhangi bir iç yapı ya da geometrik bozukluk durumu) sonlu eleman modeline dahil edilmesi gerektiği durumlarda geometrik ve yapısal düzensizlikler birlikte kullanılmaktadır. Uygulanan düzensizliklerin yönü yapıda en düşük dayanımını verecek şekilde belirlenmektedir.

Analiz için izin verilen gerilme değeri ve doğruluk oranına bağlı olarak, kullanılan malzeme davranışı için aşağıda sıralanan kabuller yapılmaktadır;

- Gerilme pekleşmesi olmayan elastoplastik malzeme,
- Nominal bir eğriye sahip elastoplastik malzeme,
- Doğrusal gerilme pekleşmesine sahip elastoplastik malzeme,
- Test sonuçlarından elde edilmiş gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrisine sahip malzeme davranışı göstermesi.

Hafif çelik profillerde, eleman duvarlarının yerel burkulması, kesitlerin çarpımalı burkulması ya da elemanların genel burkulması gibi denge bozuklukları ve bazı durumlarda da bu modlar etkileşimli olarak meydana gelmektedir. Hafif çelik profillerin tasarımı büyük oranda denge analizlerine bağlı olduğundan dolayı tasarımlarda güvenli ve güvenilebilir sonuçların elde edilebilmesi için elastik denge davranışı mümkün olduğunca doğru bir şekilde dikkate alınmalıdır. Elastik denge davranışı, genel burkulma durumu için kullanılan daha önce elastik denge teorisinden elde edilen formüllerin uygulanmasıyla belirlenebildiği gibi temel özdeğer problemlerini çözerek genel denge analizlerini gerçekleştiren bazı bilgisayar programlarıyla da belirlenebilmektedir. Hafif çelik profiller için birinci mertebe denge problemlerinin genel çözümü sonlu elemanlar tabanlı birçok program sayesinde kolayca yapılabilmektedir.

Sonlu elemanlar modellerinin yanında, sayısal modellere dayanan genel kiriş teorisi ve sonlu şerit yöntemi gibi ilave bilgisayar çözümleri de geliştirilmiştir.

1.7.3. Deney Destekli Tasarım

Hafif çelik profillerde hesaplama tasarımı yerine deney destekli tasarımda, ilave gereklilikleri de içeren EN1993-1-3 Bölüm 9 ve EN1993-1-1 Bölüm 2.5'te yer alan deney destekli tasarım ilkeleri kullanılmaktadır. EN1993-1-3 Ek-A, hafif çelik tasarımı için gerekli olan bazı standart deney ve değerlendirmeleri açıklamaktadır. Bu deney ve irdellemeler;

- Döşeme ve çatı kaplaması deneyleri,
- Hafif profil deneyleri,
- Yapı veya yapının bir bölümü üzerine deneyler,
- Çatı kaplaması tarafından burulması engellenmiş kiriş deneyleri,
- Tasarım değerlerini belirlemek için deney sonuçlarının irdelenmesi şeklindedir. Deney destekli tasarım, aşağıda sıralanan birçok durumda gerekli olabilmektedir;

- Çelik özelliklerinin bilinmemesi,
- Hafif profillerin ya da döşemelerin gerçek özelliklerinin hesaba katılmak istenmesi,
- Hesaplama tasarımı yönteminin tek başına yeterli olmaması,
- Tasarım için gerçek verilerin başka şekilde elde edilememesi,
- Mevcut bir yapının ya da bu yapıya ait bir elemanın dayanımının belirlenmek istenmesi,
- Benzer yapıların ya da yapı elemanlarının model olarak belli sayıda üretilmek istenmesi,
- Üretilmiş bir ürünün uyumluluk onayının gerekmesi,
- Yapısal elemanların birbirleri ile etkileşimlerinin belirlenmesi,
- Yapıdaki diğer elemanlar tarafından sağlanan eğilme ya da burulma sınırlandırmalarının belirlenmesi,
- Analitik bir işlemin doğruluk ve uygunluğunun belirlenmesi

1.8. Hafif Çelik Yapılarda Düzensizlikler

Gerçekte tüm yapılar, kesit ve eleman geometrisinde bozukluk, artık gerilmeler, akma dayanımının kesit boyunca üniform olmayan dağılımı, farklı mesnet ve yükleme koşulları gibi birçok düzensizliğe sahip olabilmektedir. Hafif profillerde mesnet ve yükleme koşulları dışında kalan geometri ve malzeme düzensizlikleri, bu profillerin üretildiği çelik şeritlerin genişlik, kalınlık ve geçtikleri şekillendirme sürecinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Rondal (1988) sıcak hadde ve soğuk şekillendirme ile üretilen kesitlerin düzensizlikleri arasındaki farkları incelemiş ve hafif profillerin sıcak hadde profillere kıyasla narinlikten dolayı farklı denge bozukluklarına sahip olduğunu bulmuştur. Bu nedenle, tasarımda standart sıcak hadde profilleri ve hafif profiller için farklı burkulma eğrileri kullanılmaktadır.

1.8.1. Düzensizliklerin Gelişmiş Sayısal Simülasyonlara Etkisi

Sonlu elemanlar ya da sonlu şerit gibi doğrusal olmayan sayısal analiz yöntemlerinin yapısal davranışın simülasyonu ya da hafif çelik bir kesitin etkili özelliklerinin belirlenmesi için kullanıldığı durumlarda düzensizlik etkilerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Kesitlerinde meydana gelen yerel ve çarpılmalı burkulma davranışından dolayı hafif profillerin doğrusallıkları son derece düşüktür. Bu tür profillerin davranışını belirleyen iki tip düzensizlik mevcuttur. Bunlar;

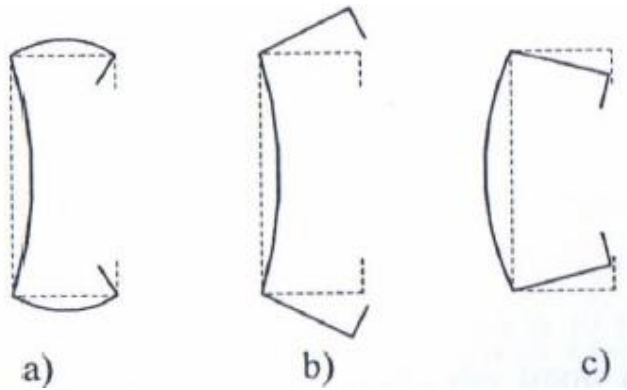
- Kesitte ve boydaki geometrik düzensizlikler,
- Soğuk şekillendirmeden doğan artık gerilmeler ve akma dayanımındaki değişkenliktir.

Başlangıç düzensizliklerinin geometrik doğrusal olmama durumunu etkinleştirmek için kullanıldığı durumlarda, düzensizlik şekilleri öz burkulma analiziyle belirlenebilmekte ve bunların eleman ve kesitin yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modlarından hangisine yol açtığı incelenebilmektedir. Bu nedenle, önceleri geometrik düzensizlikler, ilgili denge bozukluk modlarına karşılık gelen eşit boylu sinüs dalga eğrilerinin kullanıldığı sayısal modellerde yer almaktaydı. Rasmussen ve Hancock (1988) ve daha sonraları Schafer ve Peköz (1998a), geometrik düzensizlik modlarını otomatik olarak veren sayısal modeller geliştirmişlerdir. Schafer (1998b) düzensizliklerin frekans ve büyüklüklerini hesaplamak için olasılık analiz yöntemini kullanmıştır.

Ölçülen en büyük düzensizlikler analizle alt sınır dayanımını tahmin etmek için sinüs eğrilerinde bir büyüklük olarak kullanılmıştır (Rasmussen ve Hancock 1988). Genellikle düzensizliklerin büyüklüğü arttıkça dayanım da azalmaktadır. Ancak, analizlerde kullanılan eigenmod şekillerinin elemanlarda en kötü düzensizlik durumunu göstermediği durumlarda, büyük düzensizlikler her zaman düşük dayanımlara yol açmayabilmektedir. En büyük sinüs eğrisi düzensizliğinin kullanımı analizlerde büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle, Dubina ve Ungureanu (2002) geometrik düzensizliklerin şekil ve büyüklüklerini araştırmak için sistematik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Esasen, en büyük düzensizlikler eleman boyunca periyodik olarak meydana gelmedikleri için, en büyük düzensizliğin burkulma şekilleri için bir büyüklük olarak kullanılması oldukça ölçülü bir uygulamadır. Bu güçlükler rağmen, en büyük düzensizlikler alt sınır dayanım analizleri için uygun bir kriter sağlamaktadır. Ayrıca, Bernard (1999) istatistiksel olarak yük taşıma kapasitesinde azalmaya neden olan önemli düzensizliklerin ince cidarlı elemanlarda kısa ve orta dalga boylarında ortaya çıkabildiğini göstermiştir.

1.9. Hafif Çelik Yapılarda Yerel Burkulma

Bir kesitte meydana gelen burkulma modlarının yerel ve çarpımalı olarak ikiye ayrıldığı daha önce belirtilmişti. Bu modlar kesitin şeklini ve dayanımını etkiledikleri için Ungureanu ve Dubina (1999) tarafından “kesit modları” olarak tanımlanmıştır. Bir hafif C profil kesitinde oluşan yerel ve çarpımalı burkulma modları Şekil 39’da verilmektedir.



Şekil 39. Bir C kesitin yerel (a) ve çarpımalı burkulması (b ve c)

Şekil 39a’da görüldüğü gibi, köşelerin tüm eleman boyunca yerdeğiştirmediği durumda düzlem elemanların yerel burkulması, bunların genişliklerine bağlı yarım dalga boyları ile belirlenmektedir. Kesitlerin çarpımalı burkulması ise Şekil 39b ve 39c’de gösterildiği gibi dudakların ya da başlıkların, başlık ya da gövde kesişim hatlarındaki dönmeleri ile meydana gelmektedir. Çarpımalı burkulma, “berkitme burkulması” ya da “yerel burulma burkulması” olarak da adlandırılmaktadır. Bu burkulma durumunda, gövde ve dudak ya da başlıkların çarpımalı burkulması, yerel burkulma yarım dalga boyundan daha büyük ancak, birbirleri ile aynı yarım dalga boyunda oluşmaktadır. Ara berkitmeli elemanlardaki çarpımalı burkulma, ara berkitmenin düzlem elemana dik olarak yaptığı yerdeğiştirmeyle belirlenmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, yerel burkulma ince cidarlı elemanların yapısını belirleyen ve bu doğrultuda çözülen bir olgudur. Çarpımalı burkulma ise, uzun bir levhanın elastik kritik burkulma problemi ya da bir kolon başlığının eğilmeli-burulmalı burkulması problemi olarak değerlendirilmektedir. Yerel ve çarpımalı burkulma modları aynı zamanda eğilme ya da eğilmeli-burulmalı gibi genel burkulma modları ile de etkileşimde bulunmaktadır. Bu tip etkileşimler güçlü ya da orta dereceli olarak sınıflandırılmakta ve düzensizliklerden dolayı teorik kritik çatallanma yükünün aşırı olarak aşımı durumunda ortaya çıkmaktadır. Yerel burkulma, çarpımalı burkulma ile aynı anda oluşabildiği gibi daha düşük ya da daha yüksek yüklerde de görülebilmektedir.

1.10. Hafif Çelik Profillerle Üretilen Çerçeve Sistemler ve Elemanları Üzerinde Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar

Hafif çelik profillerin yapılarda kullanımını artırmak için, bu profillerin birbirine moment aktaracak pratik ve verimli bağlantıları detaylarını geliştirmek, bu konudaki çalışmaların esas kısmını oluşturmaktadır. Bu profillerin gövde kelepçeleri kullanılarak yapılan basit bağlantıları üzerinde bazı araştırmalar yanında, kolon-taban elemanı bağlantısı ve kolon-kiriş bağlantıları üzerinde de çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, doğrusal olmayan malzeme, geometri ve sınır şartlarına sahip üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ileri sonlu elemanlar modellemeleri de mevcuttur. Aşağıda hafif çelik profiller kullanılarak gerçekleştirilmiş çalışmalardan bazıları kısaca özetlenmektedir.

Pernes ve Nagy [14] gerçekleştirdikleri çalışmalarında, sırt sırta cıvatalı birleştirilmiş dudaklı profillerden oluşan eğik çatılı çerçeve sistemlere ait köşe ve tepe bağlantılarının monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki davranış ve göçme mekanizmalarını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Deneysel incelemede, yalnız gövde cıvatalarıyla oluşturulan bağlantıların zayıflığı göz önünde bulundurularak hem gövde hem de başlık cıvatalarının bulunduğu düzenlemelere sahip birleşimlerin olduğu iki adet tam ölçekli çerçeve tepe ve köşe birleşim bölgesini test edilmiştir (Şekil 40). Aynı çalışmanın teorik inceleme kısmında ise, birleşimlerin gerçek davranışlarıyla uyumlu sayısal modelleri elde etmek için kullanılan parametreler ve kalibrasyon prosedürü açıklanmıştır.



Şekil 40. Pernes ve Nagy tarafından uygulanan tepe ve köşe birleşim deneyleri [14].

Bağlantılar üzerinde yapılan deneyler sonucunda meydana gelen göçme modlarının her defasında profiller ile bağlantı levhalarının birleştiği sınır bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında yakın bir benzerlik elde edilmiş olan bu çalışmada, hem köşe hem de tepe birleşimlerinde, sadece gövdeden bulonlu profil gövdelerinde daha erken bir yerel burkulma olduğu, diğer bir deyişle birleşimin daha düşük bir taşıma kapasitene sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Elkersh [15] hafif çelik C profillerinden oluşan bir çerçeve sisteme ait bulonlu tepe birleşim bölgesini incelediği çalışmasında, farklı faktörlerin çerçeve kapasitesi ve göçme modları üzerindeki etkisini araştırmıştır (Şekil 41). Çeşitli bulon aralıkları, bağlantı plakası kalınlığı ve bulon deliklerinin deformasyon etkisi incelenmiş, aynı sınır şartları kullanılarak teorik bir çalışma yürütülmüş ve sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlarla deneysel çalışma arasında iyi bir uyum yakalanmıştır. Birleşim elemanlarının eğilme göçmesinin bütün durumlarda en kritik etken olduğunu belirlemiş olmakla birlikte bulon aralıklarını değiştirmenin taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir değişim meydana getirmediğini deneysel ve teorik olarak göstermiştir.



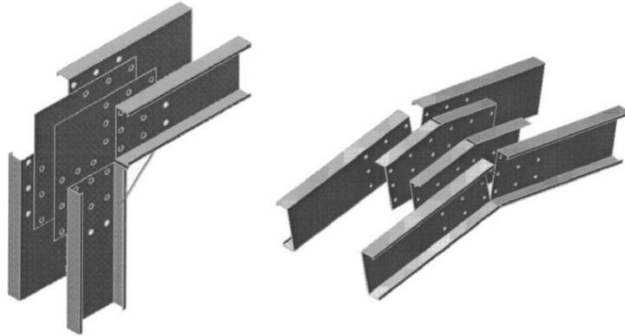
Şekil 41. Elkersh tarafından uygulanan tepe birleşim bölgesi deneyi [15].

Dubina vd. [16] farklı türdeki yapısal ve geometrik düzensizliklerin yapının stabilitesi üzerindeki etkisini ölçmek için Şekil 42’te verilen bulonlu birleşimlere sahip eğik çatılı çerçeve sistem üzerine deneysel ve sayısal simülasyonlar yürütülmüştür. Bu çalışmada tüm sayısal modeller yanal yükleme altındaki çerçevenin genel dayanımını, gerçek dayanımından büyük tahmin etmişlerdir. Meydana gelen ilk yerel burkulmanın yeri sayısal model tarafından doğru olarak tahmin edilmiş, ancak deneysel olarak kolonda gözlemlenen mafsallaşma sayısal modeller tarafından tahmin edilememiştir.



Şekil 42. Tam ölçekli çerçeveye ait deney düzeneği ve birleşimindeki yerel burkulma [16].

Lim ve Nethercot [17] sonlu elemanlar yöntemi kullanarak bir hafif çelik çerçeve sisteminin Şekil 43’te görülen köşe ve tepe birleşim bölgelerini idealleştirilmek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, elde ettikleri yerdeğiştirmelerin hem deneysel hem de sonlu elemanlar modelinden elde ettikleri yerdeğiştirmeler ile yakınlık gösterdiğini belirlemişlerdir.



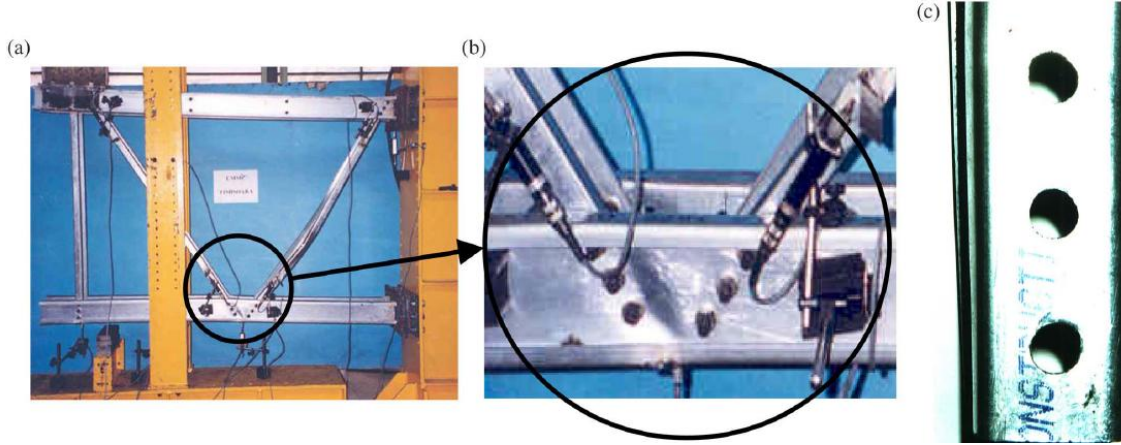
Şekil 43. Lim ve Nethercot tarafından incelenen birleşim bölgeleri [17].

Yu vd. [18] hafif çelik profillerin moment bağlantılarının yapısal davranışını belirlemek için teorik bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, bağlantıların içsel kuvvet dağılımı için bir analiz ve tasarım yöntemi sunmuş ve bunun neticesinde bileşik eğilme ve kesme kuvvetleri altındaki bağlantıların kesit göçmeleri için bazı tasarım kuralları geliştirmişlerdir. Bununla birlikte, yarı rijit bağlantı etkisinin dahil olduğu kolon-kiriş birleşim bölgesinin bir bölümünü doğrusal olmayan sonlu eleman modeliyle analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, bulonlu moment birleşimlerine ait ölçülen moment-dönme eğrilerine dayanarak modellenen bölgeye ait deney sonuçlarıyla yakın benzerlik gösteren bazı yanal yük-yerdeğiştirme eğrilerini ortaya koymuşlardır. Bu deneylere ait bir görüntü Şekil 44'te verilmektedir.



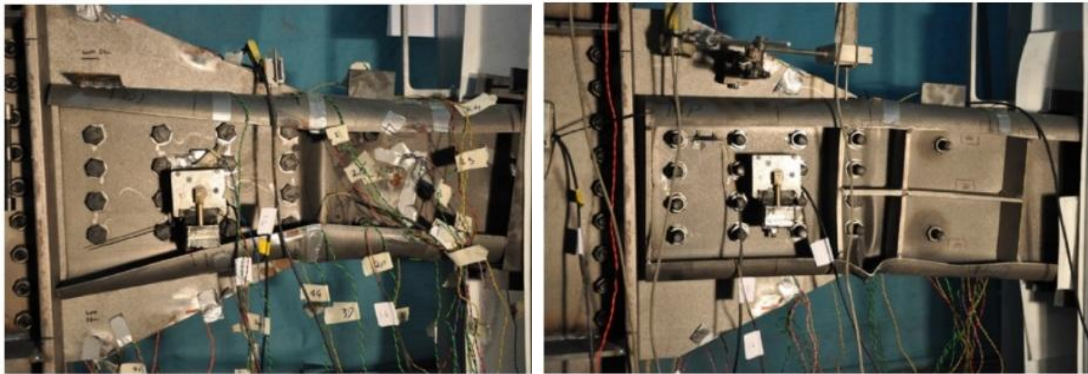
Şekil 44. Kolon-kiriş birleşim bölgesinin deney sonucu yanal göçmesi [18].

Zaharia ve Dubina [19], bulonlu birleşime sahip hafif çelik kafes sistemlere ait birleşim noktalarının rijitliklerini araştırmışlardır. Tek etkili bulon bağlantıları ve Şekil 45'te de görülen kafes sistemin bir bölümü üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde birleşim noktalarının rijitlerini belirleyen teorik bir model geliştirmişlerdir. Gövde elemanların burkulma boylarının da belirlenmesinde kullanılan birleşim noktası rijitlik formülü yapılan tam ölçekli deneylerle de doğrulanmıştır.



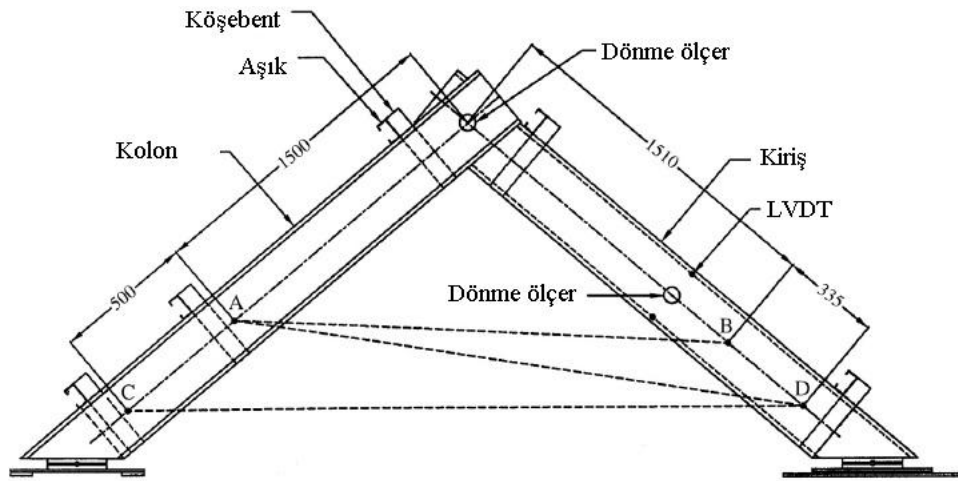
Şekil 45. Kafes sisteme ait bir bölgenin deney sonrası görünümü [19].

Sabbagh vd. [20] yaptıkları çalışmada, sonlu eleman analizleri ve deneyler yürüterek çok katlı çerçeve tipi yapıların sismik moment dayanımları için enerji sönümleyici elemanlar olarak görev yapan bazı hafif çelik profil tipleri geliştirmişlerdir (Şekil 46). Farklı yapısal düzeylerde gerçekleştirmiş oldukları çalışmalardan eleman düzeyinde yapmış oldukları çalışmada başlık bükümlerini artırmanın hem elastik hem de elastik ötesi davranışı geliştirdiği, ayrıca kavisli başlıklara sahip kirişlerdeki bükümlerin ise en yüksek dayanım, rijitlik ve sünekliği sağladığını görmüşlerdir. Birleşim düzeyinde yaptıkları çalışmada ise, bağlantı plakaları kullanarak birleştirdikleri hafif çelik kolon ve kirişlerin farklı birleşim düzenlemelerini sayısal olarak araştırmış, ayrıca deneysel olarak da doğrulamışlardır.



Şekil 46. Geliştirilen hafif profil tipleri ve deney düzeneği [20].

Dundu ve Kemp [21] hafif çelik profillerle oluşturulan çerçeve bir sisteme ait Şekil 47'de görülen kolon-kiriş köşe birleşim bölgesinin yük taşıma kapasitesi ve göçme modlarını belirlemek için deneyler gerçekleştirilmişlerdir. Bu deneyler sonucunda profil başlığının basınç bölgesinde ve profil gövdesinde yerel burkulma, yatay destek noktaları arasındaki profilde eğilmeli-burkulma burkulması ve bulon deliklerinde çekme şekildeğiştirmesi olmak üzere üç farklı göçme modu belirlemişlerdir. Bunlar arasından basınç başlığı ve gövdede oluşan göçme modlarının en son ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen tüm deneylerde basınç başlığı ve gövdede oluşan yerel burkulmaların göçmenin asıl kaynağı olduğu görülmüştür. Bunun yanında, birleşimdeki bulon sayılarının artırılmasının moment kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye yol açmadığını göstermişlerdir.



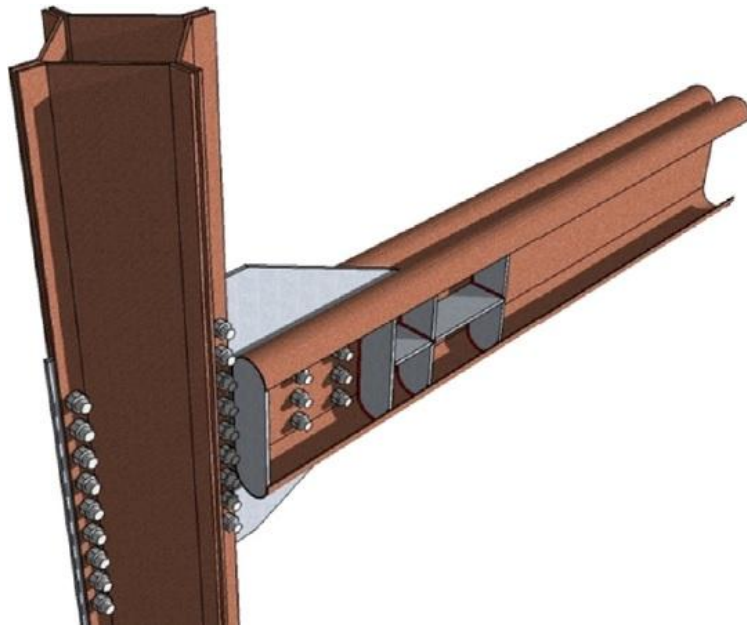
Şekil 47. Kolon-kiriş köşe birleşim bölgesi [21].

Santos vd. [22] çalışmada yerel, çarpımalı ve genel burkulma modlarının etkileşiminin meydana geldiği ankastre bağlanmış soğuk şekillendirilmiş çelik kolonların davranışını incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada üçlü burkulma modu oluşumunun deneysel olarak kanıtlanması ve bu bileşik modların kolonların kırılma yükünü ne derecede azalttıklarını görmeyi hedeflemişlerdir. Çalışma sonunda bahsedilen üçlü mod oluşumu deneysel olarak kanıtlamış ve bu mod etkilerinin göçme mekanizması ve kırılma yükü azalmasındaki etkilerini belirlemişlerdir (bkz. Şekil 48).



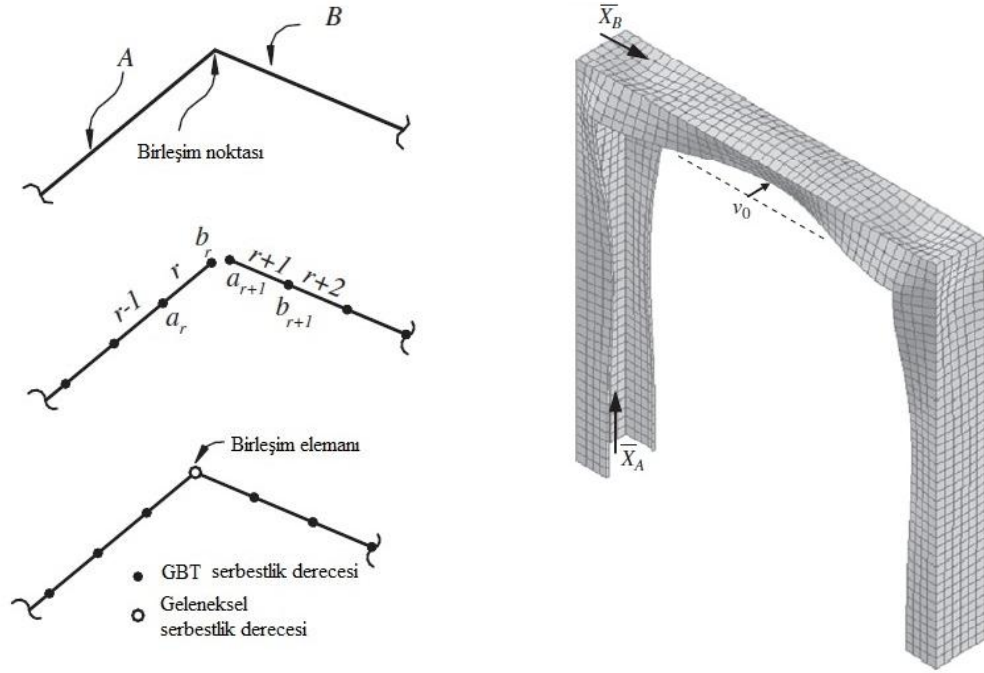
Şekil 48. Çarpılmalı ve genel burkulma modlarının birlikte gözlemlendiği kolonların deney sonrası durumları [22].

Sabbagh vd. [23] bulonlu soğuk şekillendirilmiş çelik moment birleşimlerinin göçme şekildeğiştirmesi ve histerik moment-dönme davranışı araştırmak için sonlu eleman modelleri oluşturmuşlar ve bunları yaptıkları deneylerle kıyaslamışlardır. Çevrimsel yükleme altında incelenen ve Şekil 49’da görülen eğik başlıklı kiriş, kolon ve bağlantı levhasından oluşan birleşimlerin moment-dönme davranışları kirişlerdeki eğilme veya birleşimdeki bulon delik deformasyonları tarafından oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçları arasında önemli bir benzerlik olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 49. İncelenen kolon-kiriş birleşim bölgesi [23].

Basaglia vd. [24] yaptıkları çalışmada genelleştirilmiş kiriş teorisine dayanan bir sonlu kiriş modeli (bkz. Şekil 50) geliştirerek geometrik kusurları (düzensizlik) bulunan bir hafif çelik çerçevelerin yerel, çarpılmalı ve genel burkulma sonrası davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda elde ettikleri sonuçları ANSYS modellerinden elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırarak geliştirdikleri modeli doğrulamışlardır.

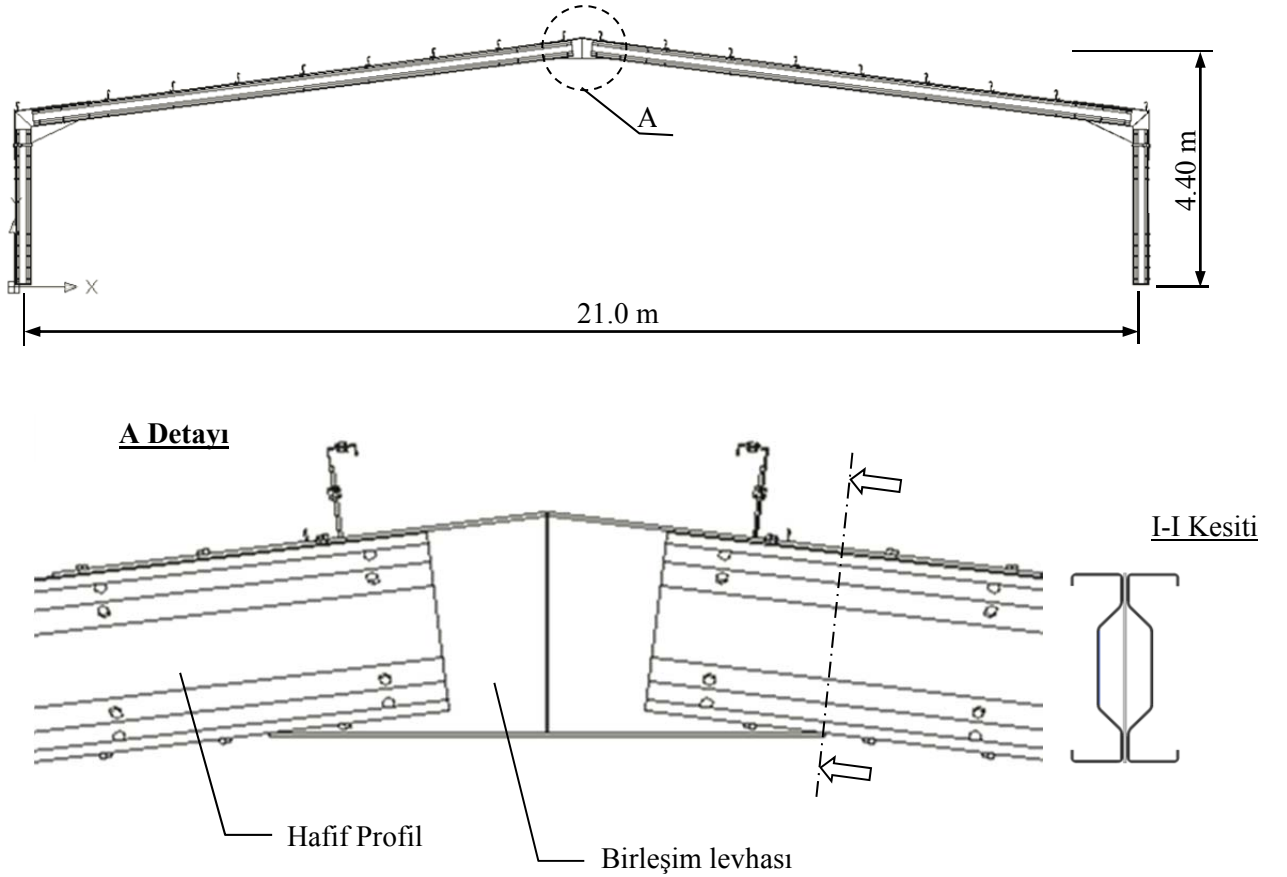


Şekil 50. Geliştirilen kiriş modeli ve ANSYS modelinden bir görüntü [24].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

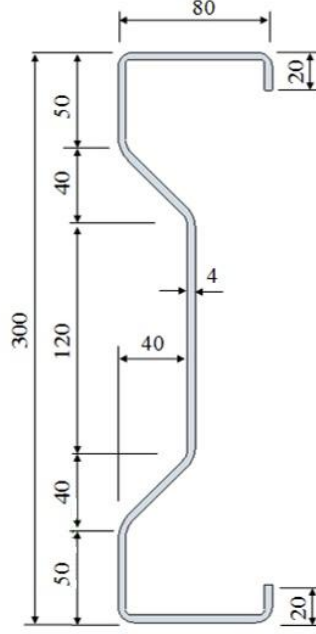
2.1. İnceleme Konusu Hafif Çelik Çerçeve Sistemi ve Tepe Birleşim Bölgesi

Bu çalışmada, hafif çelik çerçevelerin tepe birleşim bölgesinin farklı tasarımları üzerinde sonlu elemanlar analizleri yapılarak optimum birleşim bölgesi tasarımı belirlenecektir. Çerçeve sistemin genel görünümü ile tepe birleşim bölgesine ait detay ve kesit Şekil 51’de verilmektedir.



Şekil 51. Çerçeve sistemin genel görünümü ve söz konusu tepe birleşimi detayı

Hafif çelik çerçevenin kolon ve kirişlerinde “Sigma”, “Epsilon” ya da “M” adlarıyla anılan profiller sırt sırta vermiş şekilde yerleştirilmiştir. Kullanılan bu profilin kesit detayı aşağıdaki Şekil 52’de verilmektedir.



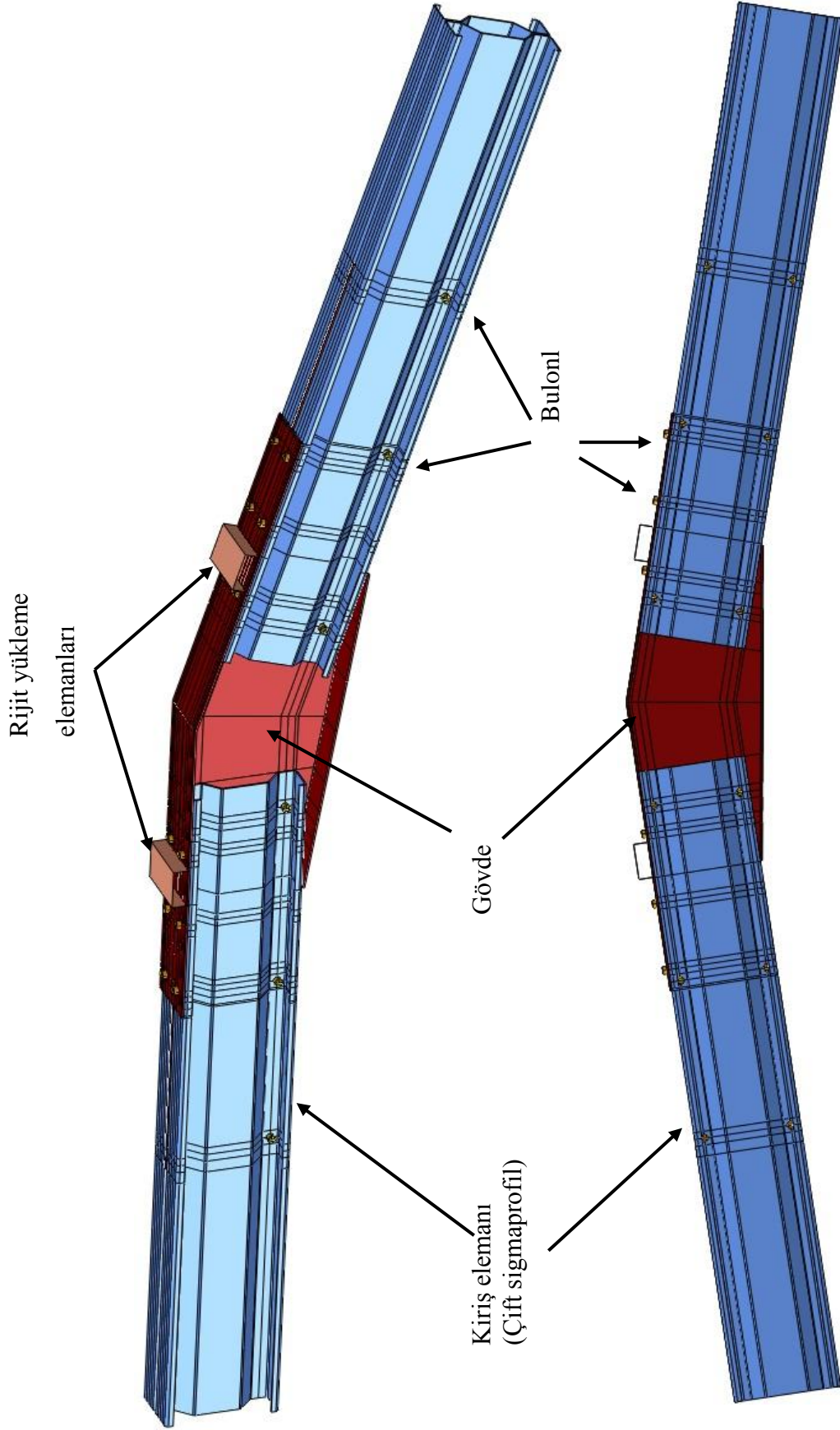
Şekil 52. Sigma profil kesiti (ölçüler: mm)

2.2. Tepe Birleşim Bölgesinin Abaqus Yazılımı ile Modellenmesi

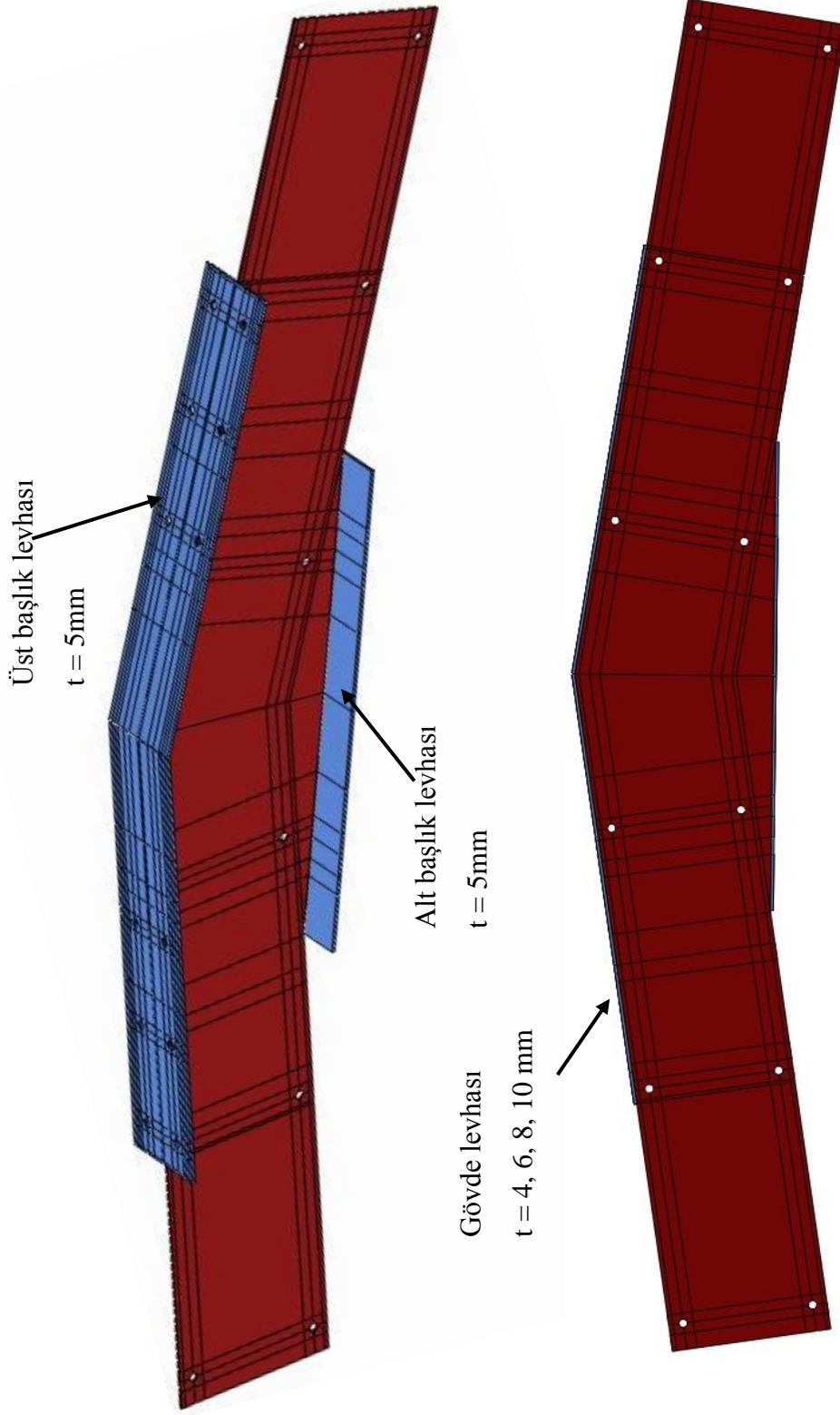
Bu çalışmada, söz konusu tepe birleşim bölgesindeki birleşim levhası ve profillerde düşey yükleme altında oluşacak yerel burkulma başlangıçlarının aynı anda oluşmasını sağlayan ve taşıma kapasitesi olarak da ayrıca değerlendirilen en uygun birleşim levhası tasarımının elde edilmesi hedeflenmektedir. Bunun için, Abaqus v6.12 [1] sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle, Şekil 51’de verilen çerçeveye ait tepe birleşimi gövdede ilave rijitleştirici levhasız olarak modellenmiştir. Bu yalın modele ek olarak gövde levhasının ilave rijitleştirici levhalı ve üst başlığın dudaklı olduğu modeller de gerçekleştirilerek optimum birleşim levhası tasarımı elde edilmiştir.

2.2.1. Geometrik Modelin Oluşturulması

Çerçeve tepe birleşim bölgesinin ve birleşim levhasının Abaqus yazılımı ile oluşturulan en yalın haline ait geometrik modeli aşağıda Şekil 53 ve Şekil 54’te verilmektedir. Tepe birleşim bölgesi modeli, çift sigma kiriş profilleri ve bu profilleri birbirine bağlayan birleşim levhasından, birleşim levhası ise yekpare gövde levhası ve ona bağlanan üst ve alt başlık levhalarından oluşmaktadır.



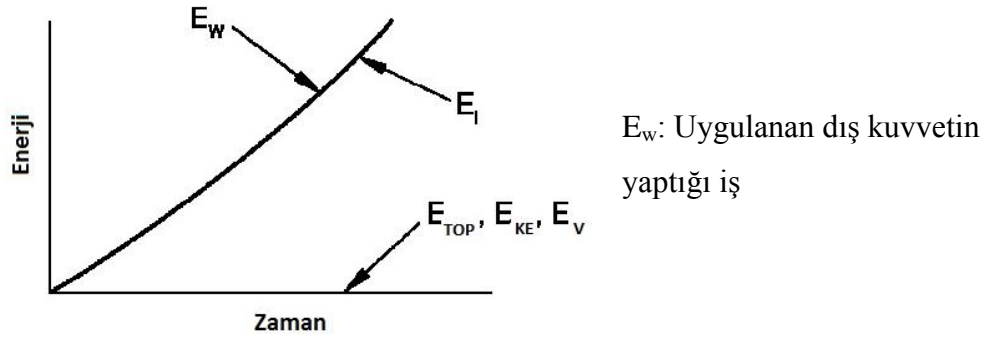
Şekil 53. Tepe birleşim bölgesinin geometrik modeli



Şekil 54. Birleşim levhasının yalın halinin geometrik modeli

2.2.2. Analiz ve Yükleme Tipinin Seçimi

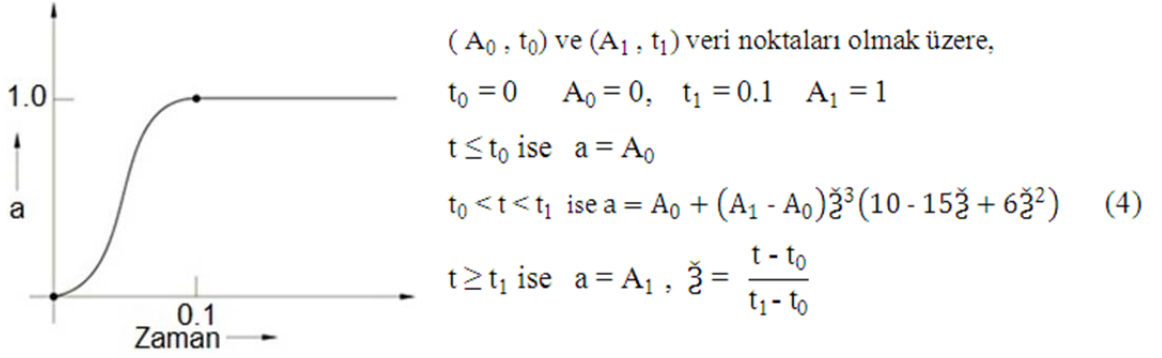
Abaqus yazılımı, *standard/implicit* ve *explicit* olmak üzere iki farklı çözücüye sahiptir. Temel olarak, *implicit* çözücü statik problemlerde, *explicit* çözücü ise dinamik problemlerde kullanılmaktadır. Ancak *implicit* çözücünün doğrusal olmayan statik problem modellemeleri için uygun seçenek görünmesine rağmen *explicit* çözücü, karmaşık temas ve büyük deformasyonların meydana geldiği 3 boyutlu problemler için zaman açısından çok daha verimli olmaktadır. Bu nedenle bu çalışma *explicit* çözücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. *Explicit* çözücü kullanılarak gerçekleştirilen statik problem çözümleri yarı-statik(*quasi-statik*) çözüm olarak adlandırılmaktadır. Bilindiği üzere, statik problemlerde uygulanan dış kuvvetler sistem içi kuvvetlere eşittir. Yarı-statik problemlerde doğru sonuç elde edebilmek için bu dengenin belli bir yakınsaklıkla sağlanması gerekmektedir. Şekil 55'te yarı-statik bir analize ait ideal enerji dengesi-zaman değişimi grafiği gösterilmiştir. Şekil 55'te de görüleceği gibi atalet kuvvetleri ve kinetik enerji değişimi uygulanan dış kuvvet değişiminin yanında göz ardı edilebilecek kadar düşük olmaktadır. Yarı-statik analizlerde, malzemenin şekil değiştirmesi ile meydana gelen kinetik enerji değişimi içsel enerjinin %1-5'i arasında olmalıdır.



Şekil 55. Yarı statik analizde enerji-zaman değişimi [1].

Analizlerin başlangıç kısmında bu dengeyi sağlamak genellikle oldukça güçtür. Bu nedenle, sistemde oluşacak kinetik enerjiyi, sistemin içsel enerjisine oranla %5'in altında tutabilmek için "*smooth step*" yükleme eğrisi kullanılmıştır. *Smooth step* eğrisi, doğrusal yükleme eğrisine göre yüklemenin başlangıç ve bitiminde yükleme hızını azaltan bir eğri

şeklinde olması nedeniyle aşılımaya çalışılan problem için kullanışlı bir çözüm olmaktadır. Şekil 56'da *smooth step* eğrisi ve bu eğriye ait denklem görülmektedir.

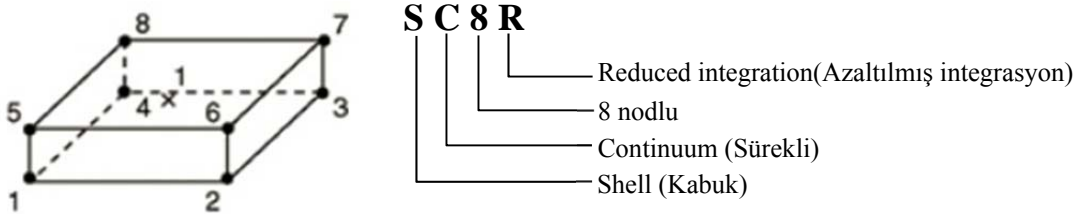


Şekil 56. Smooth step yüklemeye eğrisi (a: uygulanan yük, yerdeğiştirme vb.)

2.2.3. Sonlu Elemanların Seçimi

a) Profil ve Levhalarda

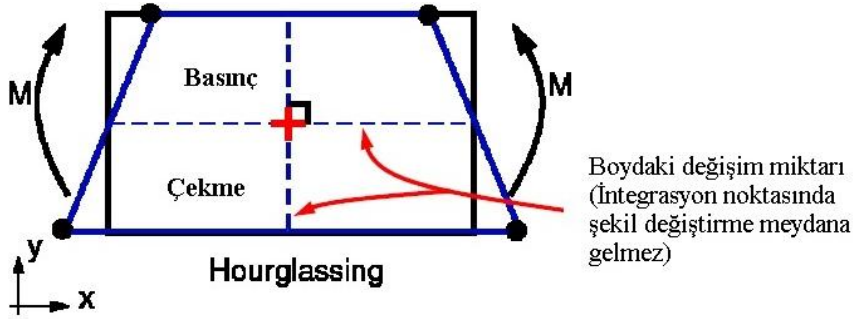
Sigma profiller ve birleşim levhasının elemanları olan gövde levhası, üst ve alt başlık levhaları, 8 nodlu, birinci derece interpolasyonlu ve azaltılmış integrasyona sahip sürekli kabuk “*continuum shell*” eleman türü olan SC8R tipi sonlu eleman ile modellenmiştir (Şekil 57).



Şekil 57. Profil ve levhaların modellenmesinde kullanılan SC8R sonlu elemanı [1].

Azaltılmış integrasyona sahip sonlu elemanların üstünlüğü, “Barlow noktaları” olarak adlandırılan bölgelerdeki gerilme ve şekildeğiştirmelerin ideal doğruluk

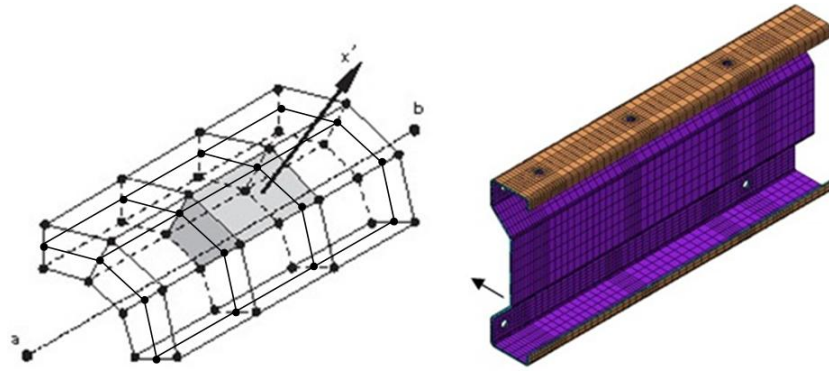
sağlamasının yanında işlem süresini azaltmasıdır. Ancak, bu tür elemanların kullanılması, integrasyon noktalarında şekildeğiştirmeye neden olmayan ve “Hourglassing” olarak adlandırılan sıfır enerjili şekildeğiştirme modlarının oluşumuna yol açabilmektedir (Şekil 58). Sonlu elemanı eksik mertebeli yapan sıfır enerji modları, sonlu eleman ağ yapısının içine yayılmaya başlayarak hatalı sonuçlara neden olan, trapez şeklinden dolayı kilit taşı olarak da adlandırılan "Hourglassing" olayına neden olur. Çok büyük şekildeğiştirmelere yol açan bu problem elemanlara yazılım tarafından yapay olarak ilave edilen rijitlik ile ortadan kaldırılmaktadır.



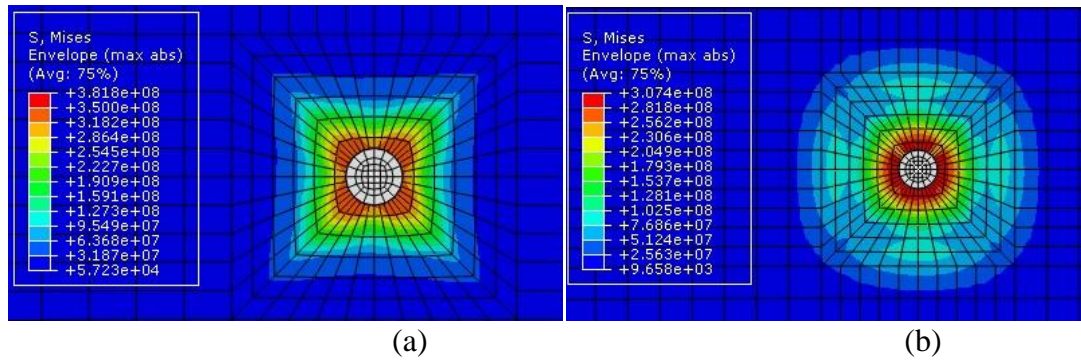
Şekil 58. Birinci mertebe azaltılmış integrasyonlu bir elemanın eğilme davranışı

SC8R sonlu elemanı kullanılarak iki yönlü temas (contact) ve kalınlık değişimleri hesaplanabildiği için geleneksel kabuk elemanlara göre daha gerçekçi temas modellemeleri gerçekleştirilebilmektedir. Davranışı kabuk elemanlarla benzer olduğu için eğilme davranışının etkili olduğu narin yapıların modellenmesinde de kullanılan bu elemanlar, katı (solid) elemanlara göre daha az işlem hacmine sahip olup, geleneksel kabuk elemanlara göre çok daha yüksek doğrulukla sonuçlar vermektedir [1].

Sürekli kabuk (continuum shell) elemanlar kullanılarak yapılan modellemelerde elemanların birikme yönleri, davranışı önemli oranda değiştireceği için, sonuçlar açısından çok önemlidir. Bu elemanların birikme yönleri Şekil 59’da görüldüğü gibi alt yüzey mor üst yüzey kahverengi olacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 60’da ise, sonlu elemanların birikme yönlerindeki farklılığın analiz sonuçları üzerindeki etkisini gösteren bir örnek verilmektedir.



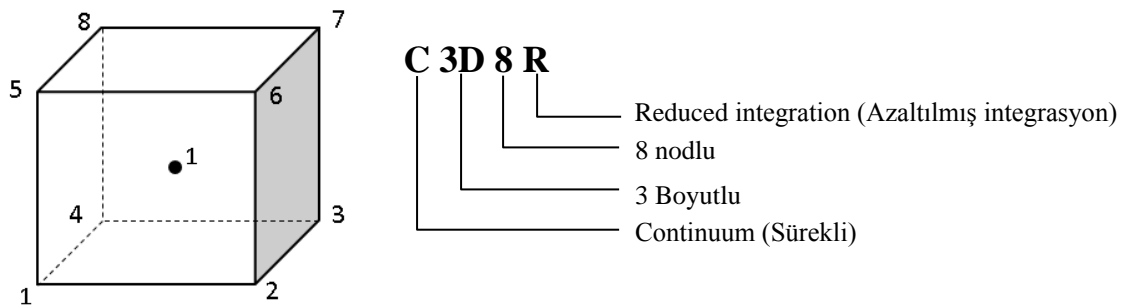
Şekil 59. Sonlu elemanların birikme yönleri



Şekil 60. Eleman birikme yönünün sonuçlar üzerindeki etkisine bir örnek (%20), a) yüzeye dik, b) yüzeye paralel (Gerilmeler N/m^2 cinsindedir).

b) Bulonlarda

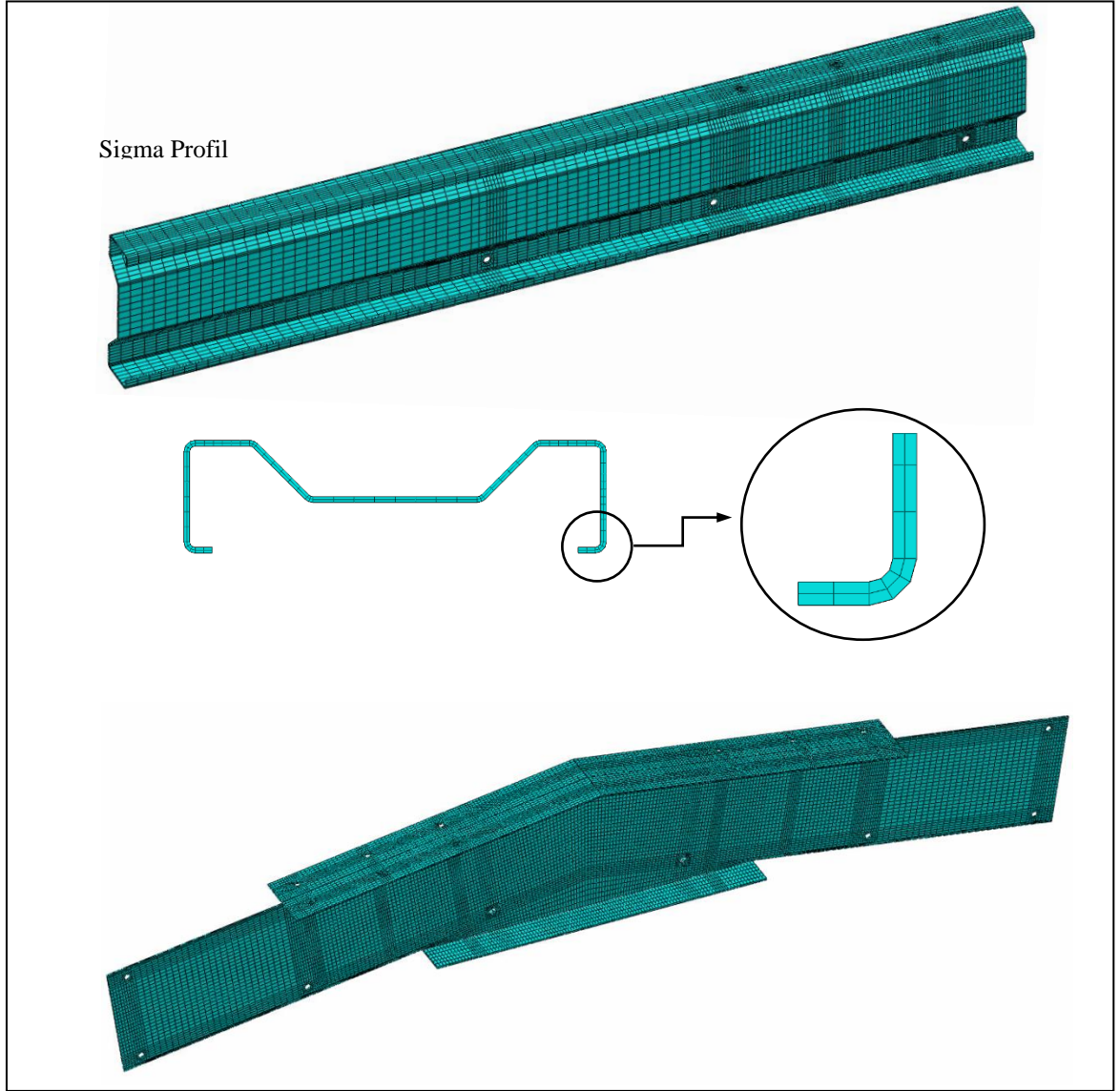
Bulonların modellenmesinde ise genellikle bu tip rijit elemanlar için daha uygun olan *hourglass* kontrollü, azaltılmış bir integrasyon noktasına sahip, 8 nodlu, C3D8R tipi “brick” sonlu elemanı kullanılmıştır (bkz. Şekil 61).



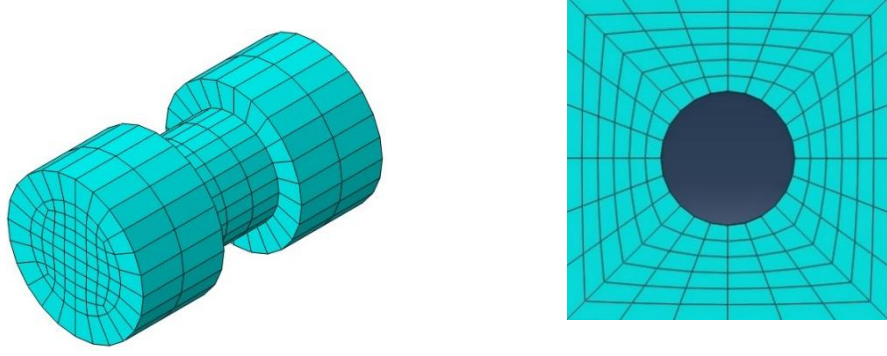
Şekil 61. Bulonların modellenmesinde kullanılan C3D8R sonlu elemanı [1].

2.2.4. Sonlu Eleman Ağ Yapısı

İnceleme konusu tepe birleşim bölgesinin farklı bölgeleri için farklı ağ (mesh) yapıları kullanılmıştır. Profil ve levhalardaki bulon deliklerinin etrafında, düzgün bir ağ yapısı elde edebilmek için 6x6x6 sisteminde alt birimlere sahip (6 yatay, 6 dikey, 6 kesişen) kare alanlar oluşturulmuştur. Deliklerden uzaktaki diğer bölgelerde işlem hacmini de azaltan daha geniş ağ yapısı kullanılmıştır. Sigma profiller ve birleşim levhası ile bulonlar ve bulon delikleri etrafında uygulanan ağ yapısı aşağıdaki Şekil 62 ve Şekil 63'te sırasıyla verilmektedir.



Şekil 62. Sigma profiller ve birleşim levhası elemanlarında sonlu eleman ağ yapısı



Şekil 63. Bulon ve bulon delikleri etrafındaki sonlu eleman ağ yapısı

Bağlantı levhaları ve bunların profillerle etkileşim halinde oldukları bölgelerde sonlu eleman boyutları, gerçeğe en yakın sonuçları elde edebilmek için, bir elemandaki en uzun kenarın en kısa kenara oranı olarak tanımlanan “*aspect ratio*” değeri %10’un altında olacak şekilde düzenlenmiştir. Böylece, modellemede toplam olarak 140.000 civarında sonlu eleman kullanılmıştır.

2.2.5. Bulonların Modellenmesi ve Sıkma Etkisinin Uygulanması

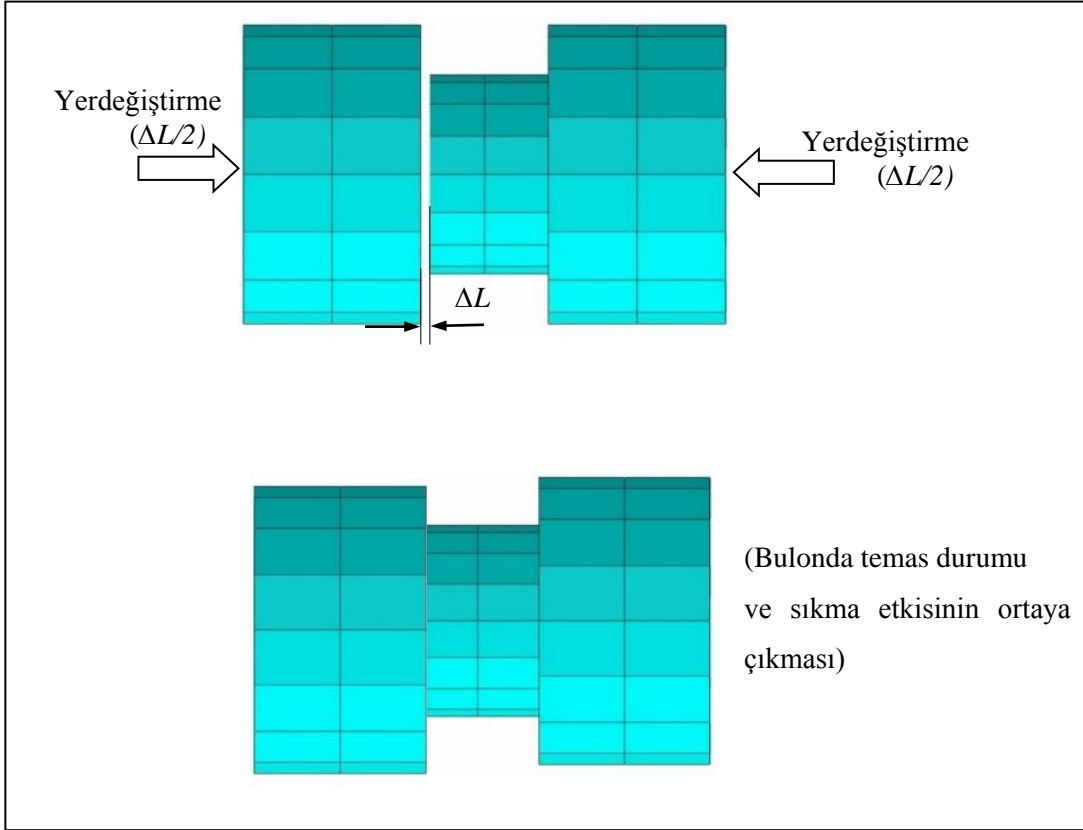
Genel davranışa ek olarak bulon davranışının da incelenmesi bu çalışmanın amaçları arasında yer almadığı ve işlem hacminde önemli miktarda azalma sağlanacağı için C3D8R tipi katı elemanlarla ve dış açılmamış düz yüzeyli silindir şeklinde modellenen bulonlar, daha sonra “rigid body” constraintler kullanılarak rijit hale getirilmiştir (bkz. Şekil 64). Bulonlar rijit cisim olarak modellendiklerinden dolayı çelik kalitesi önemini yitirmektedir. Modellerde bulon gövde çapı 14 mm olarak alınmıştır.

Bu çalışmada, sayısal modelin uygulama yöntemleri ile tutarlılığı ve elde edilecek sonuçların gerçekçi olması için bulonlarda sıkma etkisi de dikkate alınmıştır. Abaqus/Explicit çözücünde bulon sıkıştırma etkisinin uygulanmasında;

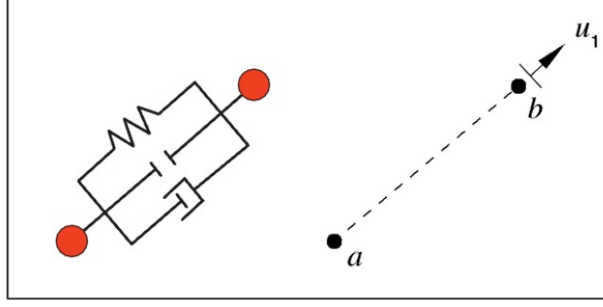
- Bulon başlarına sıcaklık değişimi uygulama,
- bulonlar yerine coupling (nodların eşleştirilmesi) kullanma,
- katı ya da kiriş eleman olarak modelleme,
- bağlantı elemanlar kullanma

gibi tamamen kullanıcıya bağlı birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışmada ise daha farklı bir yöntem geliştirilmiştir: Bulonların levhalara uygulayacağı sıkma etkisini hesaba dahil edebilmek için bulonlar baş ve gövde şeklinde iki bileşenli olarak modellenmiştir.

Öncelikle, bulonlar için EN 1993-1-8 [25]'e göre hesaplanan sıkma kuvvetine denk gelen boy değişimi (ΔL) hesaplanarak, bulon başı ve gövdesi arasında bu uzunluk kadar bir kesi oluşturulmuştur. Kesi yapılan yüzeyler arasında, ileride bahsedileceği üzere, birleşimden sonra ayrılmaya izin vermeyen “*rough*” temas özelliği tanımlanmıştır. Analizin ilk aşamasında, oluşturulan kesi miktarı kadar yerdeğiştirme, kesilen yüzeyleri birleştirecek şekilde her iki bulon başından aksel olarak uygulanmıştır (Şekil 64). Bu uygulama, sadece aksel doğrultuda hareket edebilen aksel konnektör (axial connector) eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 65). Temas gerçekleştikten ve analizin ilk adımı tamamlandıktan sonra analizin ikinci adımında yerdeğiştirme için bulon başlarına uygulanan sınır şartları kaldırılarak bu noktalar serbest bırakılmıştır. Böylece, bulon gövdesinin çekme davranışı göstermesi sağlanarak sıkıştırma etkisi modele dahil edilmiştir.

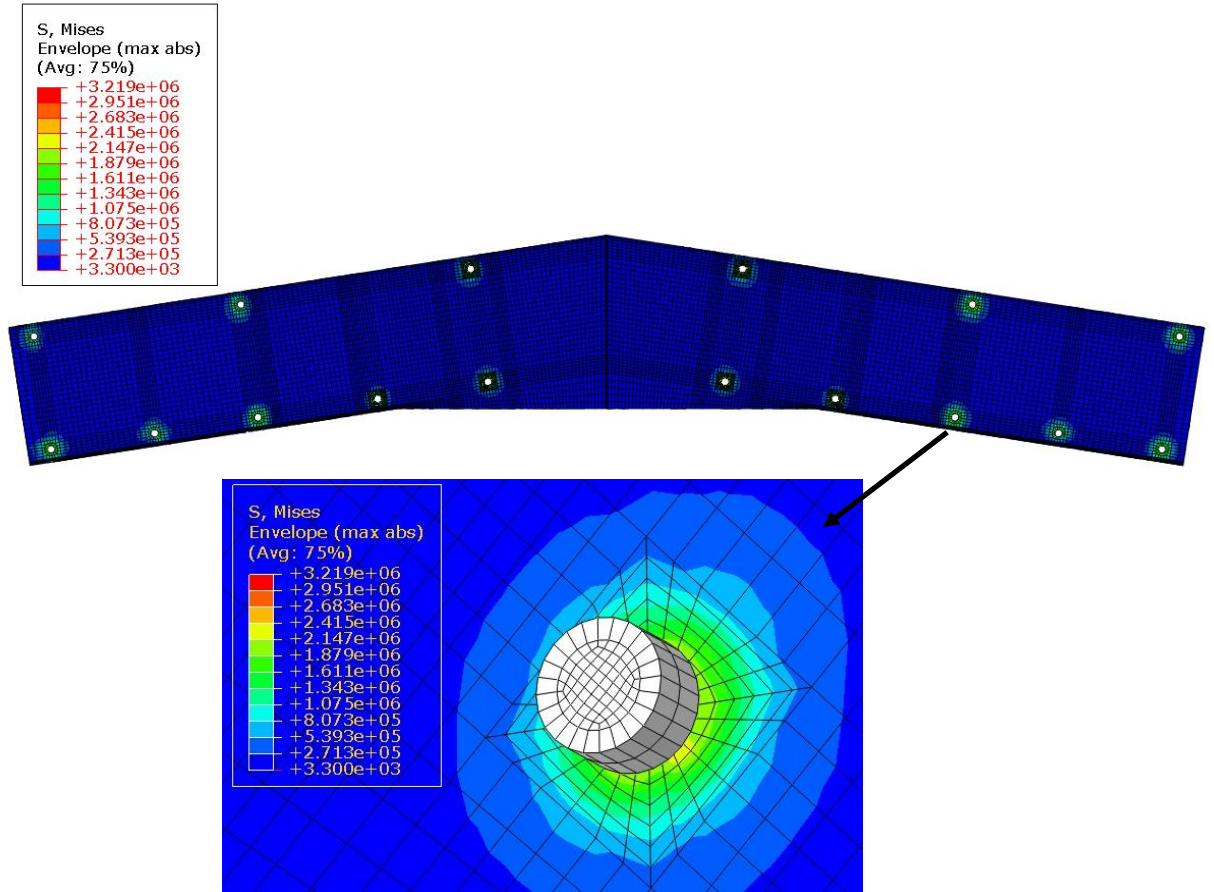


Şekil 64. Bulonda kesi yapılması ve sıkmanın uygulanması



Şekil 65. Eksenel konnektör eleman

Yukarıda açıklandığı şekilde modellenen bulon sıkma etkisi analizlerde birinci adım olarak uygulanmış, bunu takiben ikinci adım olarak dış yük uygulaması ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bir analiz başlangıcında bulonlara uygulanan sıkma etkisi ile bulonların etrafında ortaya çıkan von Mises gerilme konturlarının görünümü aşağıdaki Şekil 66'da verilmektedir.

Şekil 66. Bulon sıkma etkisi ile oluşan gerilme durumu (N/m^2)

Bulonlarda sıkma kuvveti olarak, anahtar kullanılarak elle sıkma ve EN 1993-1-8 [25]'e göre öngerilme ile sıkma uygulanmıştır. Bu kuvvetlerin belirlenme yöntemleri aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.

2.2.5.1. Anahtar Kullanarak Elle Sıkma Kuvvetinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Modelde kullanılan 14 mm gövde çapına sahip bulonların anahtar kullanılarak elle sıkılması halinde bulonda oluşacak eksenel sıkma yükünün gerçekçi olarak belirlenmesi için KTÜ Yapı ve Malzeme Laboratuvarında basit bir deney düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 67). Bu düzenek ile gerçekleştirilen elle sıkma deneyi sonucunda kullanılan M14 bulona ortalama 1250 N yük uygulandığı belirlenmiştir.

Belirlenen sıkma kuvveti bulona yerdeğiştirme olarak uygulanacağı için gerekli yerdeğiştirme miktarı aşağıda verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1250}{\pi * 0.007^2} = 8120 * 10^3 \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{8120000}{200 * 10^9} = 40.6 * 10^{-6} \quad (6)$$

- Gövde boyu 12 mm olan bulonlarda (Gövde levhasında) :

$$\Delta L_1 = \varepsilon * L_1 = 0.012 * 40.6 * 10^{-6} = 487.2$$

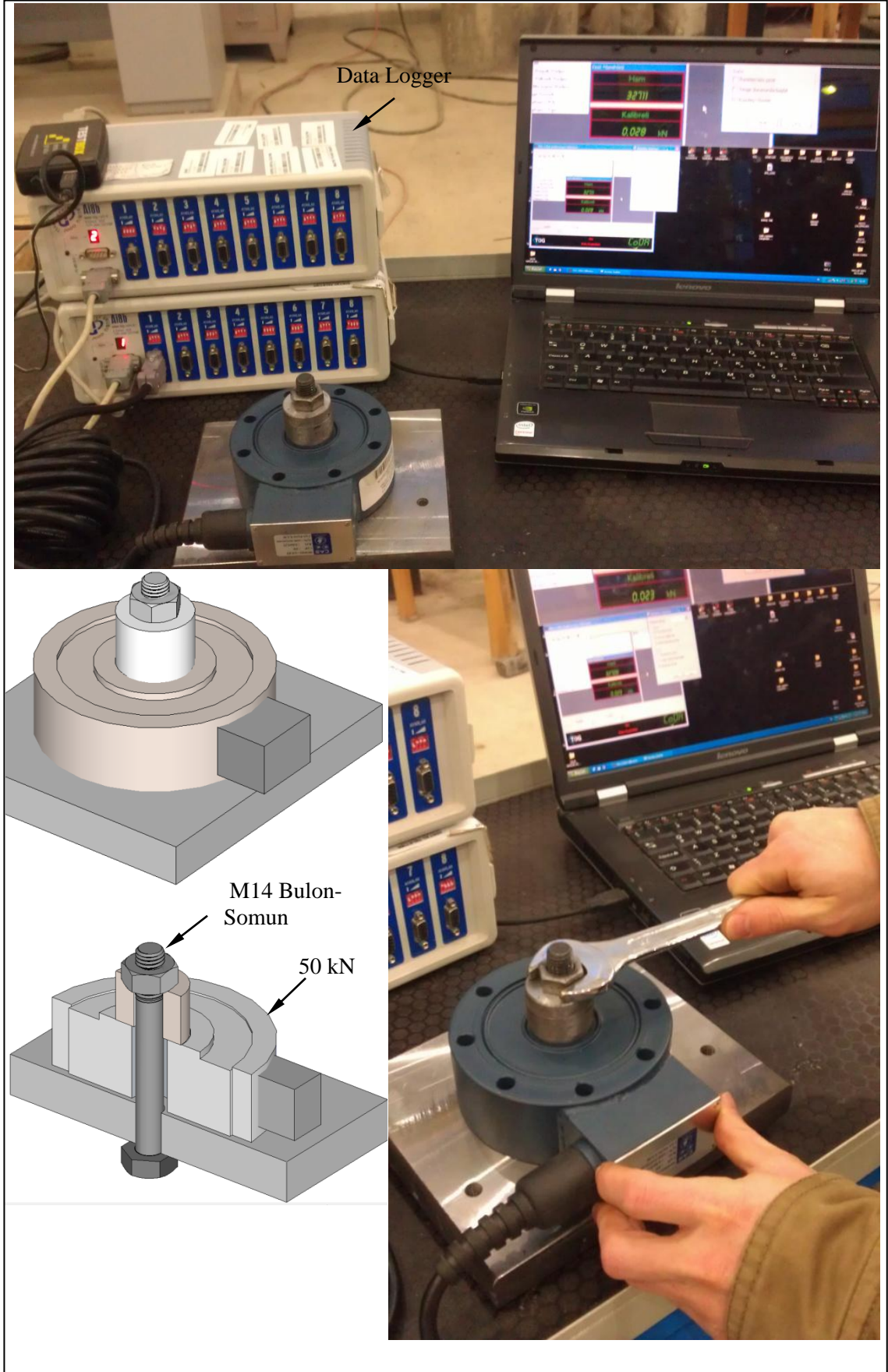
- Gövde boyu 9 mm olan bulonlarda (Başlık levhasında) :

$$\Delta L_2 = \varepsilon * L_2 = 0.009 * 40.6 * 10^{-6} = 365.4 * 10^{-9} \text{ m}$$

2.2.5.2. Öngerilme ile Sıkma Kuvvetinin EN 1993-1-8'e Göre Belirlenmesi

Avrupa çelik yapı standardı olan EN1993-1-8 [24]'de bulonlara uygulanacak öngerilme kuvveti,

$F_{P,cd}$: Uygulanması gereken sıkıştırma kuvvetini (kN), f_{ub} : Bulon kopma dayanımını (N/mm²), A_s : Bulon gövdesinin kesit alanını (mm²) göstermek üzere;



Şekil 67. M14 Bulonun elle sıkma ile uyguladığı kuvvetinin belirlenmesi

$F_{P,cd} = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ ifadesiyle önerilmektedir. Buna göre M14 bulona uygulanacak öngerilme kuvveti;

$$F_{P,cd} = 0.7 \cdot 640.000 \cdot \pi \cdot 0.007^2 = 69 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (7)$$

olarak hesaplanır. Bu kuvvet, daha önce de verildiği gibi,

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{69000}{\pi \cdot 0.007^2} = 448 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{448 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9} = 2.24 \cdot 10^{-3}$$

- Gövde boyu 12 mm olan bulonlarda (Gövde levhasında) :

$$\Delta L_1 = \epsilon \cdot L_1 = 0.012 \cdot 2.24 \cdot 10^{-3} = 27 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

- Gövde boyu 9 mm olan bulonlarda (Başlık levhasında) :

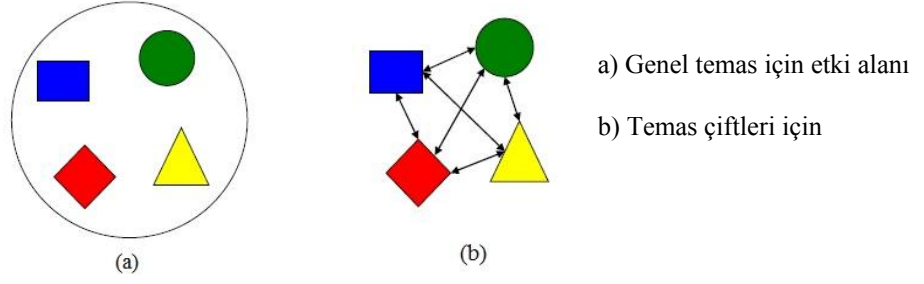
$$\Delta L_2 = \epsilon \cdot L_2 = 0.009 \cdot 2.24 \cdot 10^{-3} = 20.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Şeklinde hesaplanarak, bulonlara yerdeğiştirme olarak uygulanmıştır.

2.2.6. Yüzeyler Arasındaki Temasın Tanımlanması

Temas (Contact) tanımlamaları birbiriyle temas etme ihtimali olan ya da temas eden yüzeyler arasında yapılmaktadır. İnceleme konusu bulonlu bir birleşim bölgesi olduğu için, oluşturulan modelde doğal olarak çok sayıda temas bulunmaktadır. Birleşim bölgesinin modellenmesinde, modelin bir bölümündeki yüklerin diğer bölüme doğru bir şekilde aktarılabilmesi için çeşitli elemanlar arasındaki temas etkileşimlerinin de doğru olarak oluşturulması gerekmektedir.

Temas tanımlamalarının uygulamasında, kullanılan Abaqus/Explicit modülü için “genel” ve “temas çifti” olmak üzere iki farklı temas yaklaşımı mevcuttur. Genel temas, bir modeldeki tüm bölgeler arasında tek seferde etkileşim tanımlayıp temas edebilecek tüm yüzeyleri bir etki alanı içine alırken, temas çiftinde yalnızca özellikle belirtilen yüzeyler arasında etkileşim tanımlanır (Şekil 68).



Şekil 68. Yüzeyler arasında etkileşimin şematik ifadesi

Sonlu eleman modellerinde temas kısıtları genellikle farklı şekillerde uygulanır. Örneğin, “*hard contact*” için bir yüzey üzerindeki herhangi bir nodun diğer yüzeye nüfuz etmesi kısıtlanmıştır. Tamamen “*master-slave*” (efendi-köle) temaslarında kısıt uygulanan nod, köle yüzeyin bir parçasıdır ve bu nodun etkileştiği yüzey ise “efendi” olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada temas problemleri tüm temas yüzeyleri için tamamen “efendi-köle”, “ağırlık faktörü” ve “sonlu kayma” seçeneklerini içeren “yüzey-yüzey” temas çifti algoritması kullanılarak çözülmüştür. Bu tip temas formülasyonu kullanıldığında hangi yüzeylerin efendi hangi yüzeylerin köle oldukları son derece önemlidir. Bu doğrultuda, köle yüzeylerin “efendi” yüzeylere herhangi bir şekilde nüfuz etmemesi için “ağırlık faktörü” 1 alınmıştır. Ayrıca, temas eden yüzeyler arasından;

- İki yüzeyden büyük olan,
- Boyutları birbirine yakın olan yüzeylerden sert olan,
- Boyutları ve sertlikleri birbirine yakın olan yüzeylerden mesh boyutları büyük olan şartlarını sağlayan yüzeyler “efendi” olarak seçilmiştir [1]. Bundan dolayı, rijit elemanlar olarak tanımlanan bulonlar her durumda efendi yüzey olarak tanımlanmıştır. Sigma profillerle bağlantı levhaları arasında etkileşim olduğu yerlerde ise, bağlantı levhaları profillere göre daha sert olduklarından, efendi yüzey; profiller ise köle yüzey olarak seçilmiştir.

Profil ve bağlantı levhalarının temas eden tüm yüzeyleri arasında “Coulomb” kırılma modeli kullanılmıştır. Bu model, bir ara yüz boyunca izin verilen maksimum sürtünme gerilmesi ve temas eden yüzeyler arasında oluşan temas basıncı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle bu kırılma modeli, “yapışma” olarak adlandırılan ve temas halinde olan iki yüzey arasında belli bir kayma gerilmesi değerine ulaşıncaya kadar

göreceli bir yerdeğiştirme olmaması durumunu ifade eder. Şekil 69'da da gösterilen bu durum;

$$\tau_{eş} = \overline{\tau_1 + \tau_2} > \tau_{cr} = \mu P \quad (8)$$

τ : kayma gerilmesi, μ : sürtünme katsayısı, P: temas basıncı bağıntısıyla tanımlanmaktadır.



Şekil 69. Coulomb kırılma modeli için kayma bölgesi

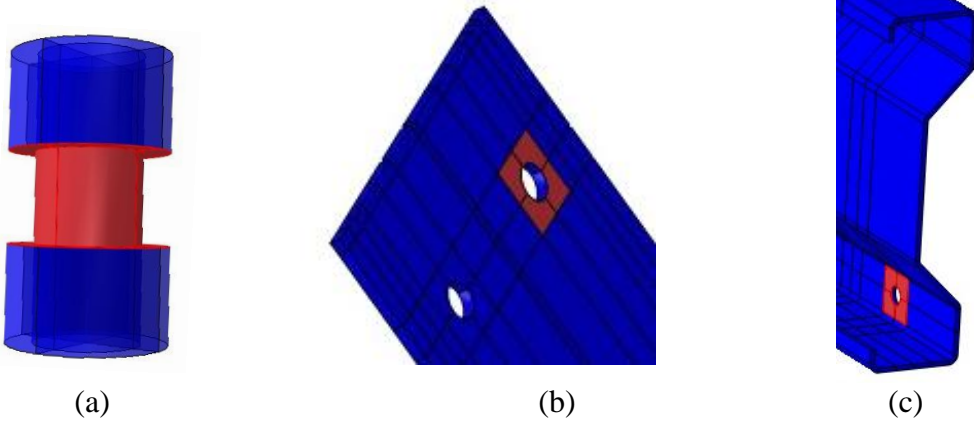
İzotropik kırılma modelinde temas bölgeleri arasında tanımlanan sürtünme katsayısı kullanılan malzemeye göre değişmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, bu değer hafif profillerin galvanizli metal yüzeyleri ile standart hadde ürünleri arasında yaklaşık 0.25-0.35 olarak alındığı için bu çalışmada da bu değer 0.3 olarak kullanılmıştır [26 ve 27].

Etkileşim tanımlamalarına, temas özelliği olarak yalnızca mekanik tipte olan teğetsel ve normal davranışlar dahil edilmiştir. Teğetsel davranış olarak yukarıda belirtilen sürtünme katsayısına ilave olarak kayma ve sürtünme ile ilgili belli bir sınırın aşılması halinde yüzeyler arasında ayrılmanın gerçekleştiği “*penalty friction formulation*”, normal davranış olarak da temas gerçekleştikten sonra yüzeylerin ayrılmasına izin verme özelliğinin dahil edildiği “*hard contact*” yaklaşımı kullanılmıştır.

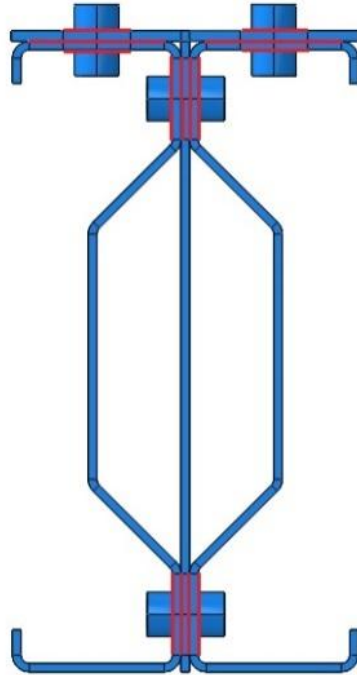
Bulonların kendi içindeki etkileşimlerinde, aşağıda detaylı olarak açıklanan, bulunun sıkma etkisini dahil etmek için oluşturulan kesinin sıkıştırma uygulandıktan sonra birleşen yüzeyleri arasında, penaltı sürtünme formülasyonlu ve birleştikten sonra ayrılmaya izin verme özelliğinin dahil edilmediği “*rough contact*” davranışı seçilmiştir. Tanımlanan “*rough contact*”, temas eden yüzeyler arasındaki göreceli yerdeğiştirmeyi engellediğinden

dolayı istenilen temas sağlandıktan sonra tamamen rijit bir birleşim sağlanmıştır. Bundan dolayı, bu yöntem doğru fiziksel bulon davranışını elde etmek için uygun bir çözüm olarak görülmüştür.

Yukarıda açıklanan bilgiler doğrultusunda, bulonlarda temas tanımlamaları için üç adet yüzey oluşturulmuştur. Bulonlara ve temas ettikleri profil ve bağlantı levhalarına ait yüzeyler Şekil 70’de, oluşturulan temas tanımlamalarının kesit üzerindeki görünümü ise Şekil 71’de gösterilmektedir.



Şekil 70. Bulon temas yüzeyleri; a)bulonda, b)üst başlık levhasında, c)profilde



Şekil 71. Kesitte aralarında temas tanımlanan yüzeyler

Ara bağlantı levhalarını oluşturan elemanlar arasındaki kaynaklı bağlantı ise, kaynağın birbirine bağladığı yüzeylerin yerdeğiştirme ve dönme serbestliklerini birbirine eşitleyen “*tie constraint*” kullanılarak modellenmiştir. Bu sayede kaynaklarda oluşabilecek kırılma davranışı da göz ardı edilmiştir.

2.2.7. Malzeme Özellikleri

Abaqus [1]’te gerçek gerilme ve gerçek şekildeğiştirme eğrileri kullanılarak, basınç altındaki davranıştan çekme altındaki davranışa kadar, farklı izotropik malzeme davranışları değerlendirilmiştir. Program büyük deformasyonları hesap edebilmek için tasarlandığından dolayı, şekildeğiştirmiş kesit alanını göz önünde bulundurabilmek için doğrusal olmayan gerçek gerilme gerçek şekildeğiştirme ilişkisinin tanımlanması gerekmektedir. Malzeme testleri genellikle mühendislik (nominal) gerilme ve şekildeğiştirmelerini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, nominal gerilme (σ_{nom}) ve nominal şekildeğiştirme (ϵ_{nom}) eğrileri gerçek gerilme ($\sigma_{gerçek}$) ve gerçek plastik şekildeğiştirme ($\epsilon_{p, gerçek}$) eğrilerine dönüştürülmüştür. Bu dönüşümler için kullanılan bağıntılar aşağıda verilmektedir;

$$\epsilon_{gerçek} = \ln 1 + \epsilon_{nom} \quad (9)$$

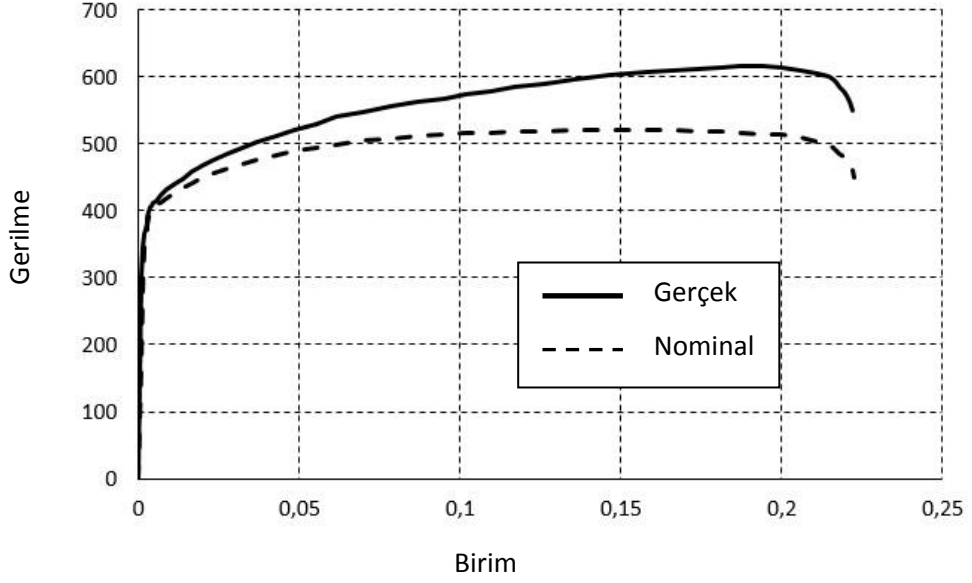
$$\sigma_{gerçek} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (10)$$

$$\epsilon_{p, gerçek} = \ln 1 + \epsilon_{nom} - \frac{\sigma_{gerçek}}{E} \quad (11)$$

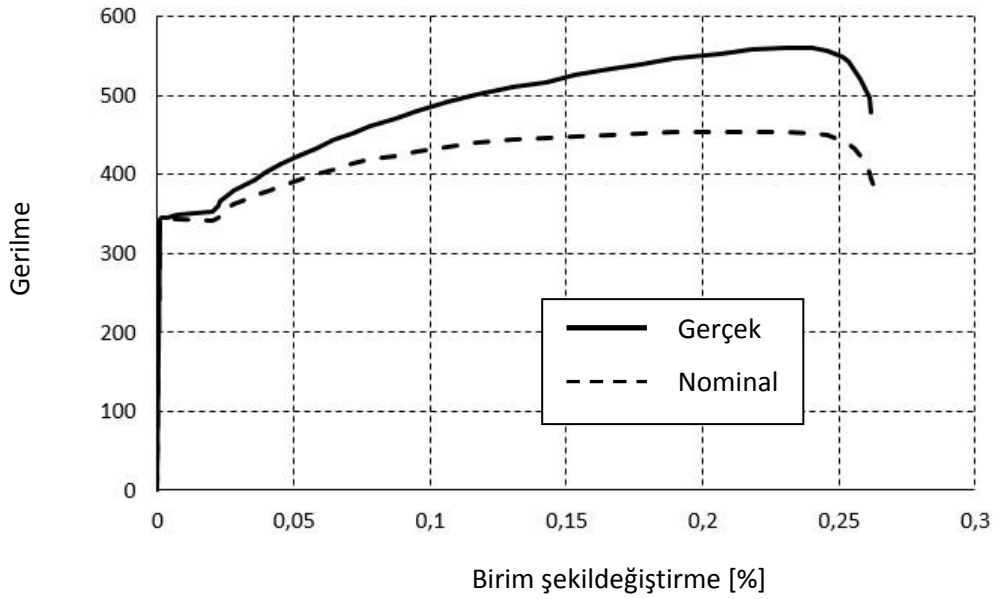
Sigma profiller için 350 N/mm² akma dayanımına sahip çinko kaplamalı galvanize S350GD+Z türü çelik, bağlantı levhaları için ise 275 N/mm² akma dayanımına sahip S275 türü sıcak haddelenmiş çelik malzeme kullanılmıştır. Bu çeliklerin gerilme-birim şekildeğiştirme diyagramları, gerçek ve nominal değerler olarak, S350GD+Z için Şekil 72’de, S275 için ise Şekil 73’te verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, analizlerde gerçek gerilme-birim şekildeğiştirme eğrileri kullanılmıştır. Hesaplarda çeliğin 20 C° oda sıcaklığındaki elastisite modülü 200 GPa ve poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır.

Abaqus programı içerisinde metallerin plastik davranışı için birçok malzeme modeli mevcuttur. Bu çalışmada yapılan literatür araştırmaları sonucunda profil ve bağlantı

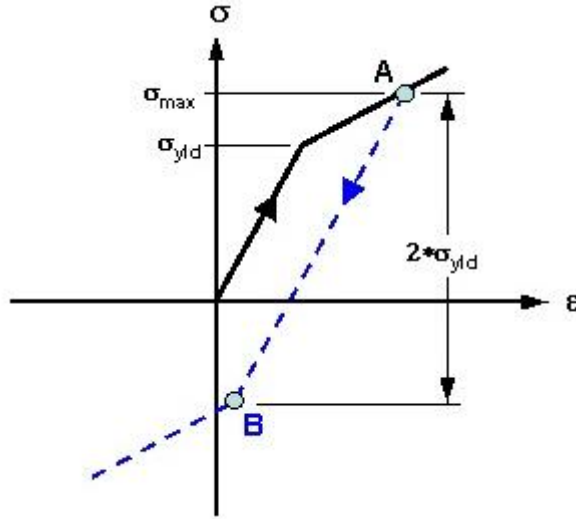
levhaları için, plastik gerilmeler meydana geldikçe akma yüzeyinin üniform olarak şekil değiştirdiği dolayısıyla akma gerilmesinin tüm gerilme yönlerinde üniform olarak arttığı ya da azaldığı Şekil 74'te görülen, genellikle sünek malzemelerin monotonik yüklemelerinde kullanılan izotropik pekleşmeli klasik metal plastikliği malzeme modelinin bu çalışmada incelenen probleme en uygun model olduğu belirlenmiştir.



Şekil 72. S350GD+Z çeliğine ait gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 73. S275 çeliğine ait gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 74. İzotropik pekleşme modeli

Şekil 74'te görüldüğü gibi, eğer izotropik pekleşmeli malzeme akma gerilmesinden daha büyük bir gerilmeye ulaşırsa plastik şekildeğiştirme yapmaya başlayacaktır. Bu gerilme, A noktasında gösterilen maksimum değere ulaştıktan sonra uygulanan yükün kaldırılması halinde davranış kesikli çizgiyle gösterilen yolu izleyecektir. Bu aşamada malzeme geri toparlanma oluşacaktır. Malzemenin tekrar yüklenmesi durumunda gerilme A noktasına ulaşmaya kadar herhangi bir plastik şekildeğiştirme meydana gelmeyecektir. Bu durumda malzeme pekleşmiş olarak kabul edilir. Malzemeye basınç yüklemesi uygulanır ise B noktasında akma meydana gelir.

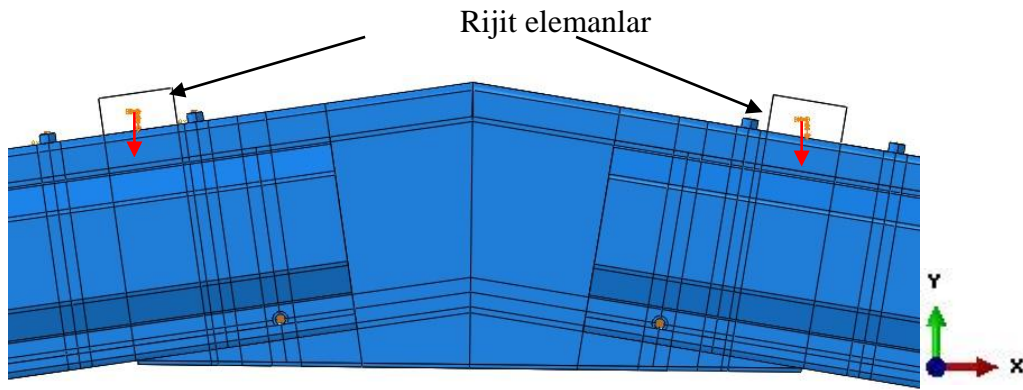
2.2.8. Sınır Koşulları

Sınır koşulları, yüklemelerin yapılması ve mesnet serbestliklerinin tanıtılması için yer değiştirme, dönme, hız, simetri gibi şekillerde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, daha öncede belirtildiği gibi, yüklemeler sabit bir hızın tanımlandığı sınır şartları ile yapılmıştır.

Analizlerin birinci adımını oluşturulan bulon sıkma etkisinin uygulanması sırasında, davranışları bulon başlarının dış yüzey merkezlerinde seçilen iki adet referans nodu tarafından belirlenen bulonlara, bu noktaların yalnızca sıkma yönünde hareketine izin verecek şekilde sınır şartları atanmıştır. Sıkma etkisi ise daha önce ifade edildiği gibi bu iki nokta arasında tanımlanan yalnızca bir doğrultuda hareket edebilen aksenal konnektör elemanlar ile uygulanmıştır. Sıkma uygulandıktan sonra konnektör elemanların

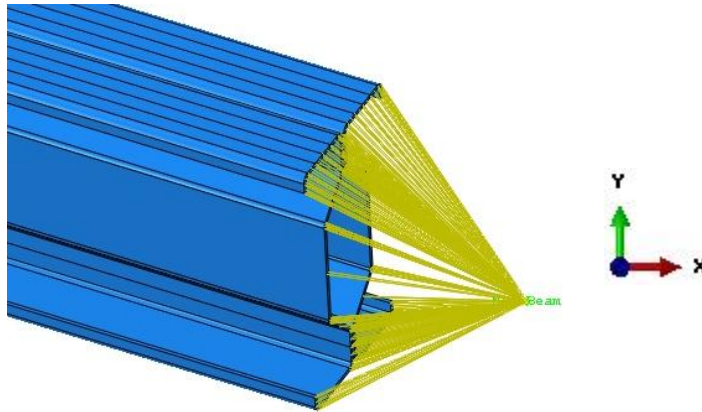
boylarındaki değişim sıfır olarak değiştirilerek rijit tanımlanmış olan bulon gövdelerinde herhangi bir uzama ya da kısalma meydana gelmesi önlenmiştir.

Analizlerin ikinci adımında ise dış yükleme uygulanmıştır. Bu amaçla, analizin birinci adımını oluşturan sıkma işlemi tamamlandıktan sonra, sınır şartlarının uygulandığı bulon referans noktaları da, dış yüklemenin uygulanabilmesi için, serbest bırakılmıştır. Dış yükün sisteme uygulanması için kullanılan rijit elemanların merkezine atanan referans noktalarına yalnızca yerçekimi doğrultusunda hareket serbestliğine sahip sınır şartları tanımlanmıştır (Şekil 75).



Şekil 75. Yükleme yapılan rijit elemanlar ve yükleme yönü

Mesnetlere uygulanan sınır şartları için ise profil kesitlerinin en dış yüzeyine kiriş tipi çok noktalı koşul (Multi-point constraint) atanarak, bu yüzeydeki nodların davranışı sistem dışında tanımlanan bir referans noktasına bağlanmıştır (Şekil 76).

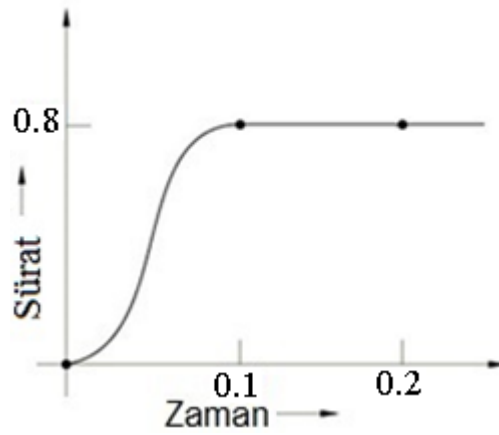


Şekil 76. Kiriş uçlarında mesnet sınır koşullarının uygulanması (Kiriş tipi MPC)

Analizi gerçekleştirilen birleşim bölgesi çerçeve sistemin yalnızca bir bölümünü temsil ettiğinden dolayı mesnet şartlarının gerçek duruma yakın olması için tanımlanan referans noktalarına yalnızca x eksenini doğrultusunda yatay hareket edebilme ve z eksenini etrafında dönebilme serbestlikleri tanımlanmıştır.

2.2.9. Yükleme Tipi, Hızı ve Analiz Süresi

Yükleme hızı, yarı-statik (quasi-static) analizlerin kinetik enerji oranını belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Yükleme hızı ne kadar düşük olursa sistemde oluşan kinetik enerji de aynı oranda düşük olmaktadır. Bu tip analizlerde kinetik enerjinin içsel enerjiye oranının %5'in altında olması yeterli görülmektedir [1]. Bu nedenle, analizin yarı-statik kalması ve istenilen kinetik enerji oranını sağlamak için yapılan denemeler sonucunda 0.2s'lik toplam sürede monotonik olarak 0.8 m/s'lik sabit bir yükleme hızı/sürati (*velocity*) uygulamanın yeterli olacağı belirlenmiştir. (Şekil 77).



Şekil 77. Uygulanan yükleme hızı eğrisi

Sonlu eleman sayısının fazla olduğu modellerin analiz süreleri oldukça uzamaktadır. Bu sürenin uzunluğu nedeniyle analizlerde çeşitli sorunlarla karşılaşmakta ve bazen analizlerin tekrarlanması gerekmekte, dolayısıyla da zaman kayıpları yaşanmaktadır. Bundan dolayı, analizler üç eşit parçaya bölünmüş ve her bir analiz diğerinin bittiği yerden başlatılarak (Restart analizleri) bu olasılık azaltılmıştır. Uygulanan her bir optimizasyon için tekrar edilen analizlerin her bir seti yaklaşık 30 saat sürmüştür.

2.2.9.1. Elle Sıkma Kuvveti İçin Yükleme Hızı ve Süresinin Hesaplanması

Daha önce hesaplanan kesi miktarlarının uygulanması için yükleme hızı ve süresi; x yerdeğiştirmeyi (m), v hızı (sürati) (m/s), t toplam zamanı (s) göstermek üzere;

$$x = v \frac{t}{2} \quad (12)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Daha önce belirlenen yerdeğiştirme değeri ve analizin yarı statik olmasını sağlayan hız değeri (12) ifadesinde yerlerine yazılarak; gövde boyu 12 mm olan bulonlarda :

$$480 * 10^{-9} = 0.00008 \frac{t}{2} \Rightarrow t = 0.12 \text{ s}$$

olarak elde edilir. Analiz süresi, yükleme tek seferde yapılacağından dolayı sabit olduğu için sıkmanın gövde boyu 12 mm ve 9 mm olan bulonlarda aynı süre içinde uygulanması gerektiğinden; 9 mm'lik bulon için uygulanması gereken yükleme hızı ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$360 * 10^{-9} = v \frac{0.12}{2} \Rightarrow v = 0.00006 \text{ m/s}$$

2.2.9.2. EN1993-1-8'e göre Sıkma Kuvveti İçin Yükleme Hızı ve Süresinin Hesaplanması

Bölüm 2.2.8.1'de verilen (12) bağıntısında daha önce hesaplanan kesi miktarları kullanılarak uygulanması gereken yükleme hızı ve süresi; gövde boyu 12 mm olan bulon için:

$$27 * 10^{-6} = 0.00027 \frac{t}{2} \Rightarrow t = 0.2 \text{ s bulunur.}$$

Bu değer gövde boyu 9 mm olan bulon için yerine yazılırsa:

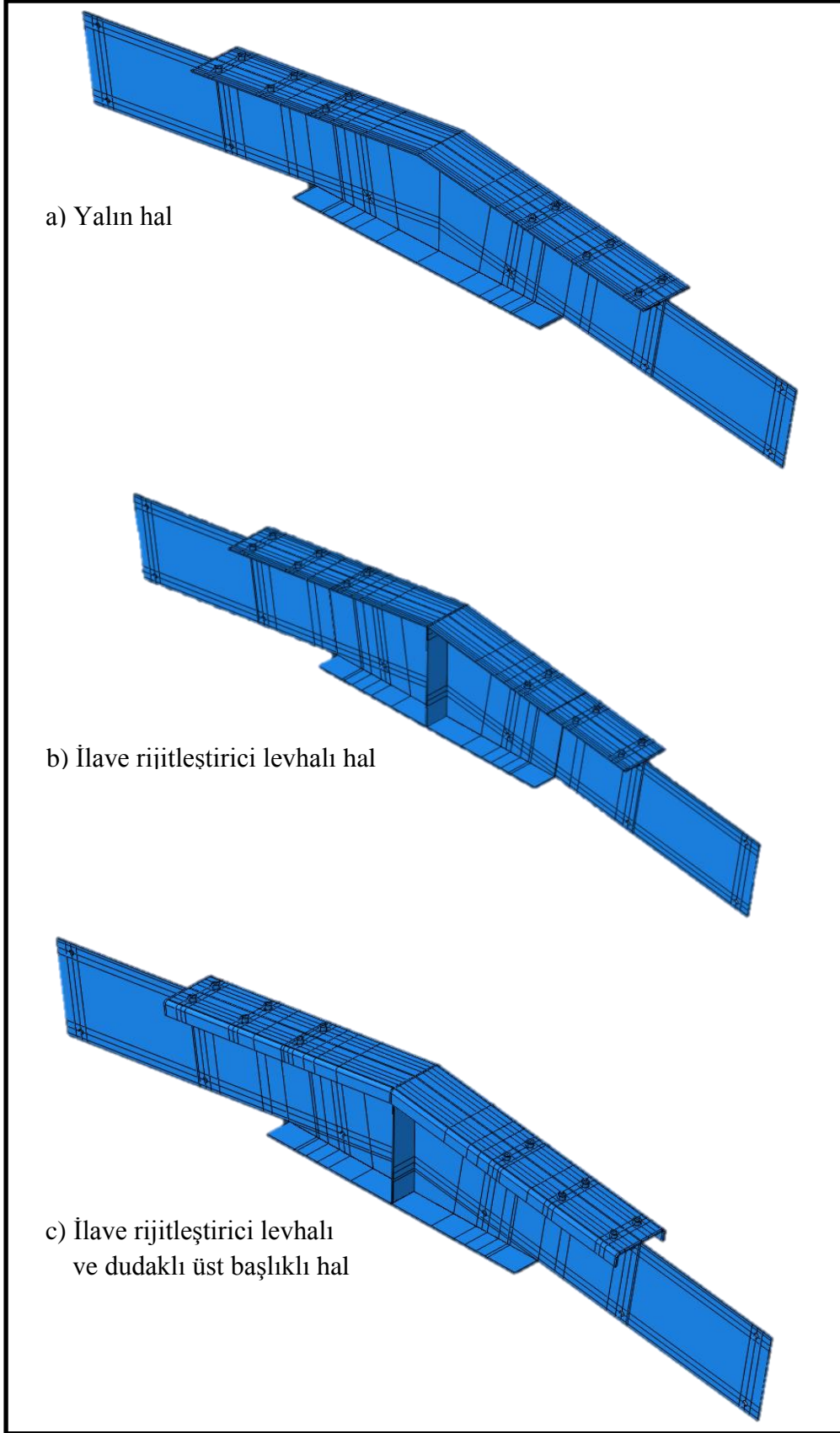
$$20.2 * 10^{-6} = v \frac{0.2}{2} \Rightarrow v = 0.000202 \text{ m/s olarak hesaplanır.}$$

2.3. Gerçekleştirilen Analizler

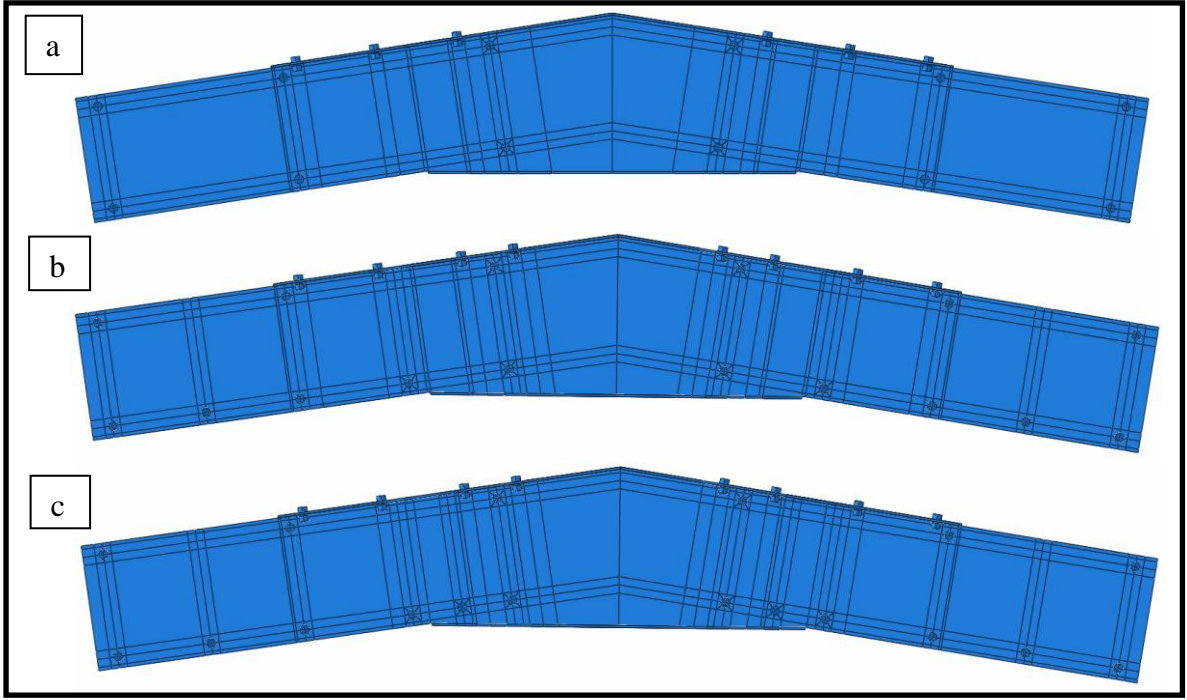
Bu çalışmada, sanayi tipi bir hafif çelik çerçeve sistemin kiriş-kiriş (tepe) birleşim bölgesini optimize edebilmek için, diğer bir deyişle, birleşim levhası ve kiriş profillerinde düşey yükleme altında oluşacak yerel burkulma başlangıçlarının aynı anda oluşmasını sağlayan optimum birleşim levhasının elde edilmesi için, gerçekleştirilen analizlerde;

- a) Birleşim levhasının farklı tasarımları;
 - Yalın hal (Şekil 78a)
 - İlave rijitleştirici levhalı (Şekil 78b),
 - İlave rijitleştirici levhalı ve dudaklı üst başlıklı (Şekil 78c),
 - Birleşim levhası kalınlığı artırılması
- b) Bulon yer ve adetlerinin farklı düzenlenmesi;
 - Çekme bölgesinde 6, basınç bölgesinde 6, üst başlıkta 12 bulonlu (Yalın hal, Şekil 79a)
 - Çekme bölgesinde 10, basınç bölgesinde 8, üst başlıkta 16bulonlu (Şekil 79b)
 - Çekme bölgesinde 12,basinç bölgesinde 8, üst başlıkta 16bulonlu (Şekil 79c)
- c) Birleşim levhasına bağlanan sigma profillerin ara mesafesinin değiştirilmesi (Şekil 80)
 - 350 mm boşluk (Yalın hal, Şekil 80a)
 - 230mm boşluk (Şekil 80b)
 - 130mm boşluk (Şekil 80c)

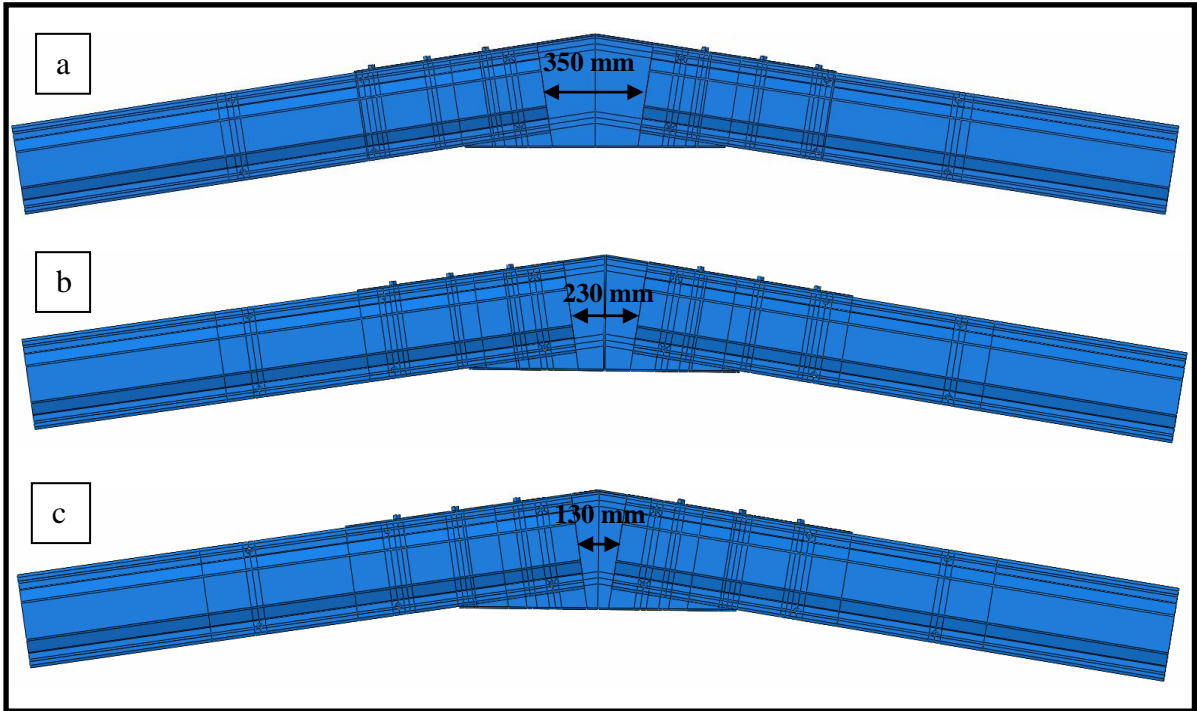
şeklinde üç ana modelleme yaklaşımı uygulanmıştır. Aşağıda bu modeller Şekil 78, Şekil 79 ve Şekil 80'de sırasıyla verilmektedir.



Şekil 78. Birleşim levhasının farklı tasarımlarına ilişkin modeller



Şekil 79. Bulon yer ve adetlerinin farklı düzenlenmesine ilişkin modeller



Şekil 80. Profillerin ara mesafesinin değiştirilmesine ilişkin modeller

Çalışma kapsamında, öncelikle analiz sonuçlarının kendi aralarındaki tutarlılığını belirlemek için ilk üç grup altında “kalibrasyon analizleri” gerçekleştirilmiştir.

- Birinci grupta, bulon gövdesi ile delik arasında boşluk olup olmamasının davranışa etkisini görebilmek amacıyla;
 - Bulon delikleri ile bulon gövdesi arasında boşluk olmadığı,
 - Bulon delik çapının bulon gövde çapından 2 mm fazla olduğu,
- İkinci grupta, bulon sıkma kuvvetindeki değişimin davranışa etkisini görmek amacıyla;
 - Bulonlara sıkma uygulanmadığı
 - Bulonlara elle sıkma uygulandığı,
 - Bulonların öngerilmeli olarak sıkıldığı
- Üçüncü grupta ise, çözümleme süresi ve sonuçların doğruluğunu esas alan bir optimum sonlu eleman ağ yapısını (mesh) belirlemek amacıyla; 90.000, 140.000 ve 185.000 elemanlı mesh düzenlemesine sahip modeller analiz edilmiştir.

Yukarıda belirtilen kalibrasyon analizleri sonucunda kabul edilen model esas alınarak, optimizasyona yönelik tasarlanan farklı modeller üzerinde 4., 5. ve 6. grup analizleri olarak sınıflandırılan çok sayıda analiz gerçekleştirilmiştir. Anılan tüm bu analizler Tablo 2’de topluca verilmektedir.

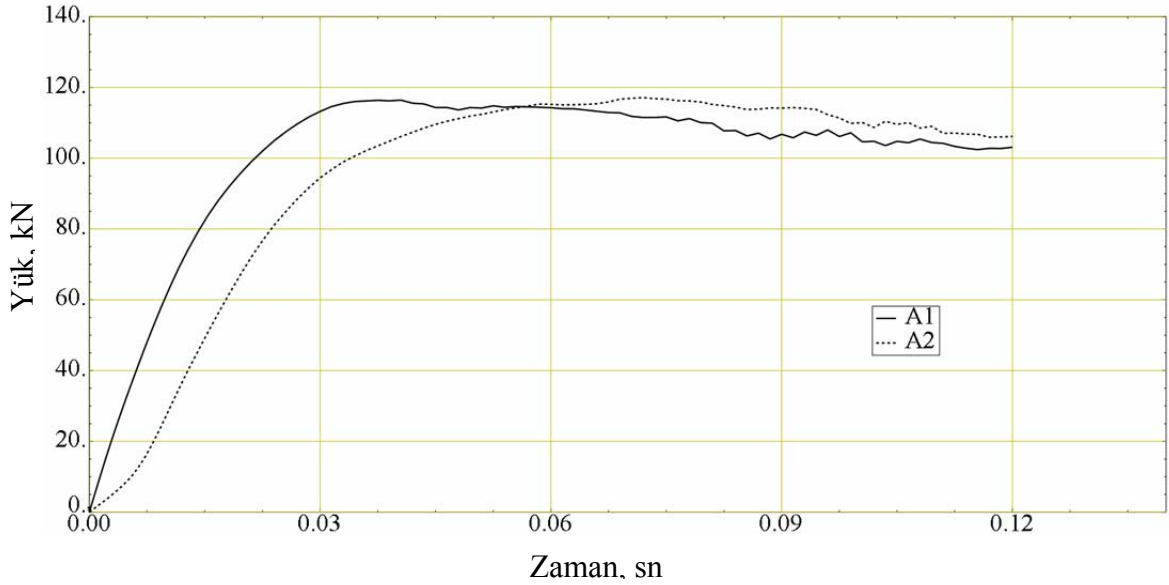
Tablo 2. Çalışmada gerçekleştirilen analizler

Analiz Grup No	Analiz Kodu	Gövde levhası kalınlığı (mm)	Bulon çapı - Delik çapı (mm)	Profiller arası mesafe (mm)	Bulonda sıkma	İlave Rijitleştirici levha	Üst başlıkta dudak	Açıklama
1	A1	4	14-14	350	YOK	YOK	YOK	
	A2	4	14-16	350	YOK	YOK	YOK	
2	A2	4	14-16	350	YOK	YOK	YOK	Sıkma yönteminin belirlenmesi
	A3	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	
	A4	4	14-16	350	ÖNG.	YOK	YOK	
3	A3-1	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	90.000 eleman
	A3-2	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	140.000 eleman
	A3-3	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	185.000 eleman
4	A3-2	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	bkz. Şekil 79a
	A3-2A	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	bkz. Şekil 79b
	A3-2B	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	bkz. Şekil 79c
5	A3-2	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	bkz. Şekil 80a
	A3-2R	4	14-16	350	EL	VAR	YOK	
	A3-2RD	4	14-16	350	EL	VAR	VAR	
	A3-2L1	4	14-16	230	EL	YOK	YOK	bkz. Şekil 80b
	A3-2L1R	4	14-16	230	EL	VAR	YOK	
	A3-2L1RD	4	14-16	230	EL	VAR	VAR	
	A3-2L2	4	14-16	130	EL	YOK	YOK	bkz. Şekil 80c
	A3-2L2R	4	14-16	130	EL	VAR	YOK	
	A3-2L2RD	4	14-16	130	EL	VAR	VAR	
6	A3-2	4	14-16	350	EL	YOK	YOK	
	A3-2T6	6	14-16	350	EL	YOK	YOK	
	A3-2T8	8	14-16	350	EL	YOK	YOK	
	A3-2T10	10	14-16	350	EL	YOK	YOK	

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Birinci Grup Kalibrasyon Analizlerinin Sonuçları

Bulon delikleriyle bulonlar arasında boşluk bırakılmadığı ve 1 mm boşluk bırakıldığı analizlere ait, doğrudan Abaqus ekranından alınan, yük-yerdeğiştirme eğrileri aşağıdaki Şekil 81’de görülmektedir. Boşluksuz olarak düzenlenen modele ait eğri, boşluklu olana göre başlangıçta daha doğrusal, dolayısıyla daha rijit davranış sergilemiş olmakla birlikte, modeller arasında taşıma kapasitesi açısından önemli bir fark oluşmamıştır. Bu eğriler beklenen davranışı gösterdiği için model, bu açıdan doğrulanmış olarak kabul edilmiştir. Diğer tüm analizlerde delik çapı, bulon gövde çapından 2 mm fazla (1 mm boşluklu) olarak modelleme yapılmıştır.

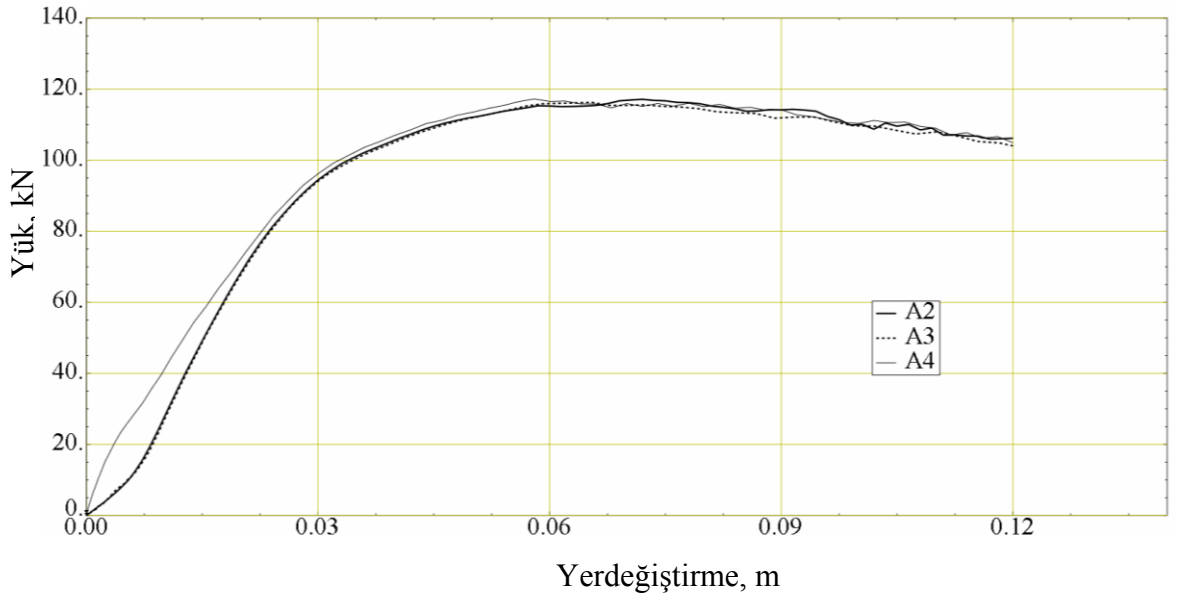


Şekil 81. Boşluksuz ve 1 mm boşluklu modellerin analiz sonuçları

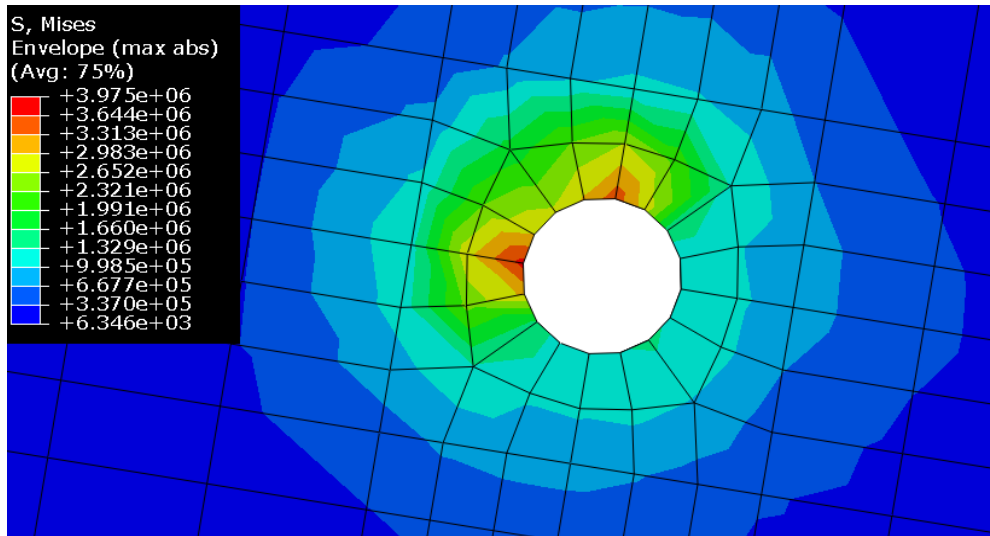
3.2. İkinci Grup Kalibrasyon Analizlerinin Sonuçları

Bulon sıkma kuvvetindeki değişimin tepe birleşim bölgesi davranışına etkisini görmek amacıyla gerçekleştirilen bu analiz serisinde elde edilen eğriler Şekil 82’de görülmektedir. Bulonlara sıkma uygulanmadığı ve bulonların elle sıkıldığı analiz eğrileri yüklemenin başından itibaren tamamen aynı denecek kadar yakın seyretmiştir. Bulonlara

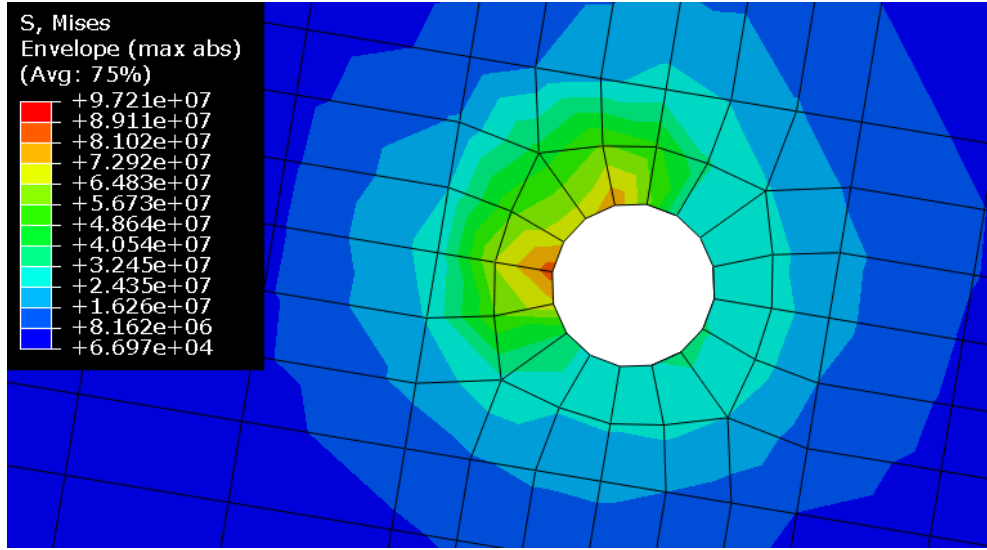
öngerilme ile sıkma uygulandığı analizde ise yüklemenin başında sistem A2 ve A3 modellerine göre daha rijit davranmış ancak plastik bölgede davranış bu modellerinkine uymuştur. İkinci grup analizlere ait eğriler Şekil 82’de, elle sıkma ve öngerilme ile sıkma altında delik çevresinde oluşan gerilme düzeyleri ise Şekil 83 ve Şekil 84’te verilmektedir.



Şekil 82. Sıkmasız, elle sıkmalı ve öngerilme ile sıkmalı modellerin analiz sonuçları



Şekil 83. Bulonun elle sıkıldığı modelde delik çevresinde oluşan gerilmeler (N/m²)



Şekil 84. Bulonun öngerilmeli olarak sıkıldığı modelde delik çevresinde oluşan gerilmeler (N/m²)

Global davranış esas alınarak yapılacak değerlendirmede, gerçek durumda somunların ekstra bir kuvvet uygulanmaksızın sadece gevşeklik kalmayacak kadar, boşluksuz sıkılıp bırakılması olarak kabul edilebilecek durum ile anahtar kullanılarak belli bir sıkma kuvveti uygulayarak yapılan elle sıkma arasında bir fark olmayışı sonucunda somunların sıkılmasının gereksiz olduğu gibi yanlış bir kanaate varılmamalıdır. Zira bilindiği gibi, kullanım yükleri altında gevşeme riski her zaman mevcut olduğundan, zaten somunlar zorunlu olarak sıkılmaktadır. Sıkmanın öngerilme ile yapıldığı modelin davranışı ile diğer iki modelin davranışları arasında da kapasite açısından önemli sayılabilecek bir farkın ortaya çıkmayışı daha ilginçtir. Zira ince cidarlı hafif profil elemanlarla üretilen taşıyıcı sistemlerin montajında öngerilmeli bulon uygulamasına da rastlanılmamaktadır.

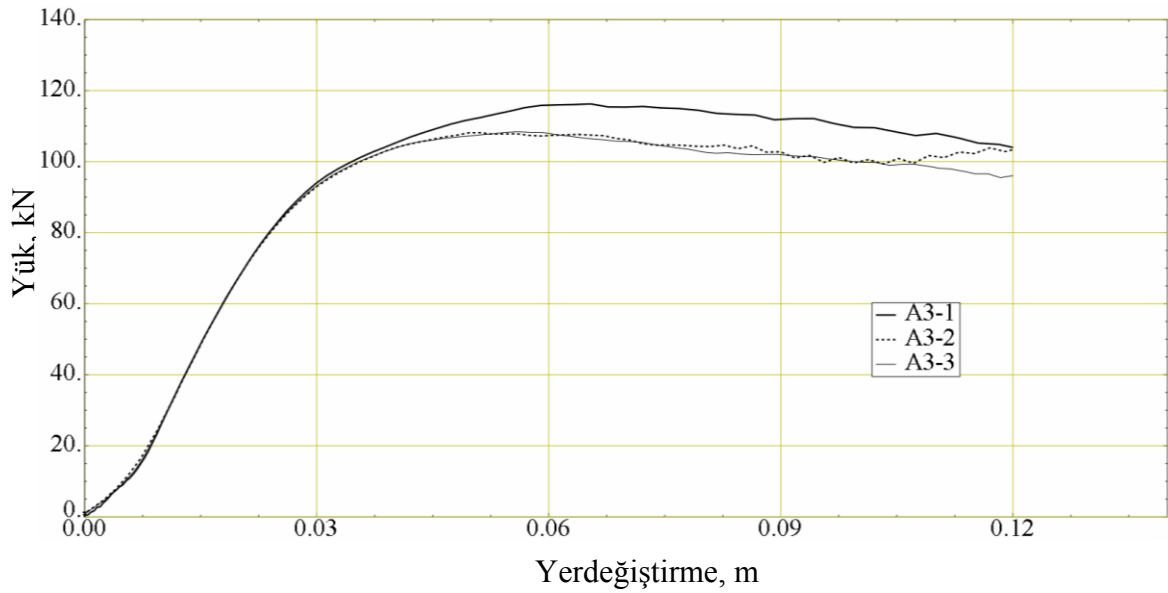
İkinci grup analizlerin topluca değerlendirilmesiyle, modellemenin kendi içinde tutarlılığı doğrulanmış ve sonraki analizlerin elle sıkma kuvveti uygulanarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

3.3. Üçüncü Grup Kalibrasyon Analizlerin Sonuçları

Gerçek davranışa daha yakın sonuç elde edebilmek için sonlu eleman boyutunun küçültülmesi gerektiği bilinmektedir. Bu küçültmenin nereye kadar yapılması gerektiği ise “yakınsalık analizi” olarak anılan bir çalışma ile belirlenmektedir. Bu çalışmada da sonlu

eleman ağ yapısının iyileştirilmesi amacıyla sonlu eleman boyutları aşamalı olarak küçültülmüştür.

Burada ilk model, iki yandan çift sigma profil ve ortada bir adet birleşim levhası olmak üzere toplam 5 adet ana parça ve birleştirme elemanı olarak kullanılan 24 adet cıvatanadan oluşan ve toplamda yaklaşık 90.000 adet sonlu elemanlı olarak analiz edilmiştir. İkinci aşamada modeldeki toplam sonlu eleman sayısı yaklaşık 140.000, üçüncü aşamada ise yaklaşık 185.000 adet olmuştur. Bu üç analize ait eğriler Şekil 85’te verilmektedir.



Şekil 85. Sonlu eleman boyutunun küçültülmesi ile ilgili analiz sonuçları

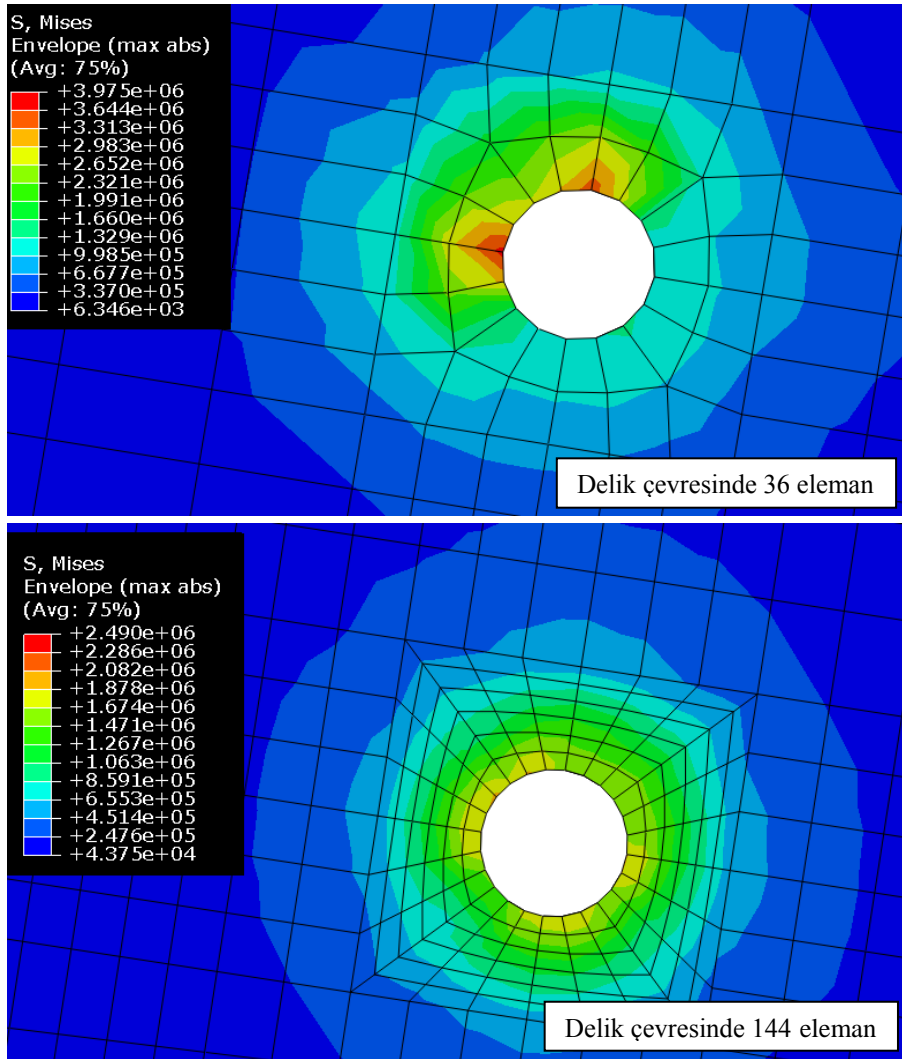
Yukarıdaki Şekil 85’ten de görüldüğü gibi, modeldeki sonlu eleman adedi arttıkça, diğer bir deyişle, sonlu eleman boyutları küçüldükçe, yük-yerdeğiştirme eğrileri birbirine yaklaşmakta ancak, analiz süresi artmaktadır. Aşağıdaki Tablo 3’te eleman sayısı ve bu çalışmada kullanılan HP Z820 Model iş istasyonuna özel analiz süresi ilişkisi verilmektedir.

Tablo 3. Sonlu eleman adedi ile analiz süresi ilişkisi

Sonlu eleman adedi	Yaklaşık analiz süresi (saat)
90.000	14
140.000	27
185.000	39

Şekil 85 ve Tablo 3'ün birlikte değerlendirilmesi sonucunda 140.000 ve 185.000 sonlu elemana sahip modellerin analiz sonuçları arasında önemli bir fark görülmemesine rağmen analiz süresinde yaklaşık %45'lik bir artış meydana geldiğinden, bundan sonraki analizlerde 140.000 sonlu elemanlı modelin kullanılmasının optimum çözüm olacağına karar verilmiştir.

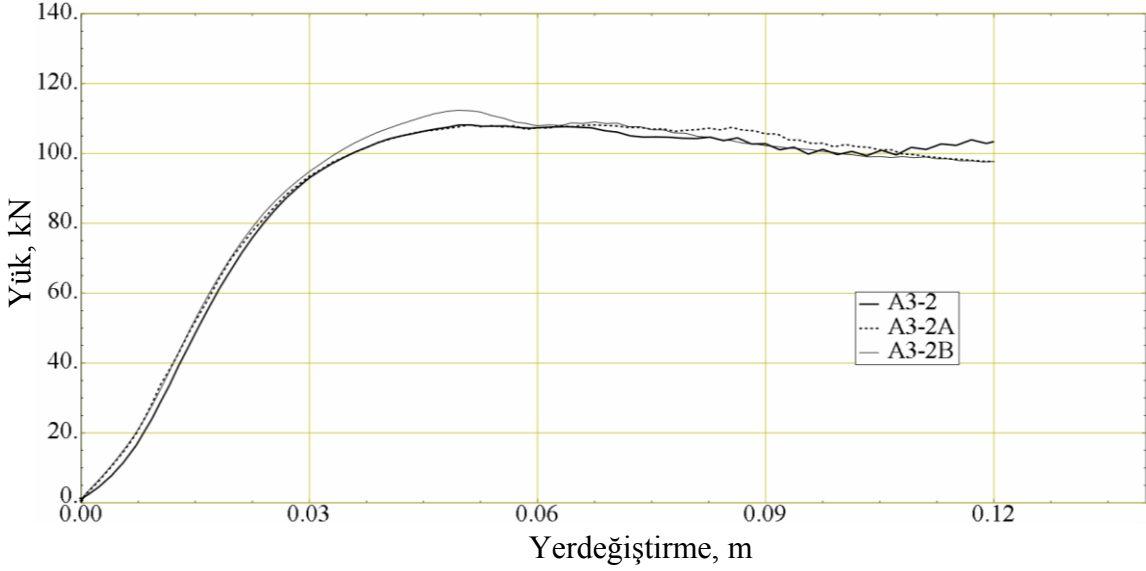
Diğer taraftan, sonlu eleman adedinin 90.000'den 140.000'e çıkarılması için yapılan düzenlemede bulon delik bölgesinin de sonlu eleman boyutları küçültülmüş, dolayısıyla bu bölgedeki sonlu elemanların adedi 36'dan 144'e çıkmıştır. Böylece, analiz sonucunda civata delik çevresinde oluşan gerilme yayılımı daha homojen hale gelmiş ve oluşan gerilme düzeyleri de ortalama %40 azalmıştır. Bu durum aynı delik çevresi için aşağıdaki Şekil 86'da görülmektedir.



Şekil 86. Sonlu eleman boyutlarının küçültülmesinin etkisi

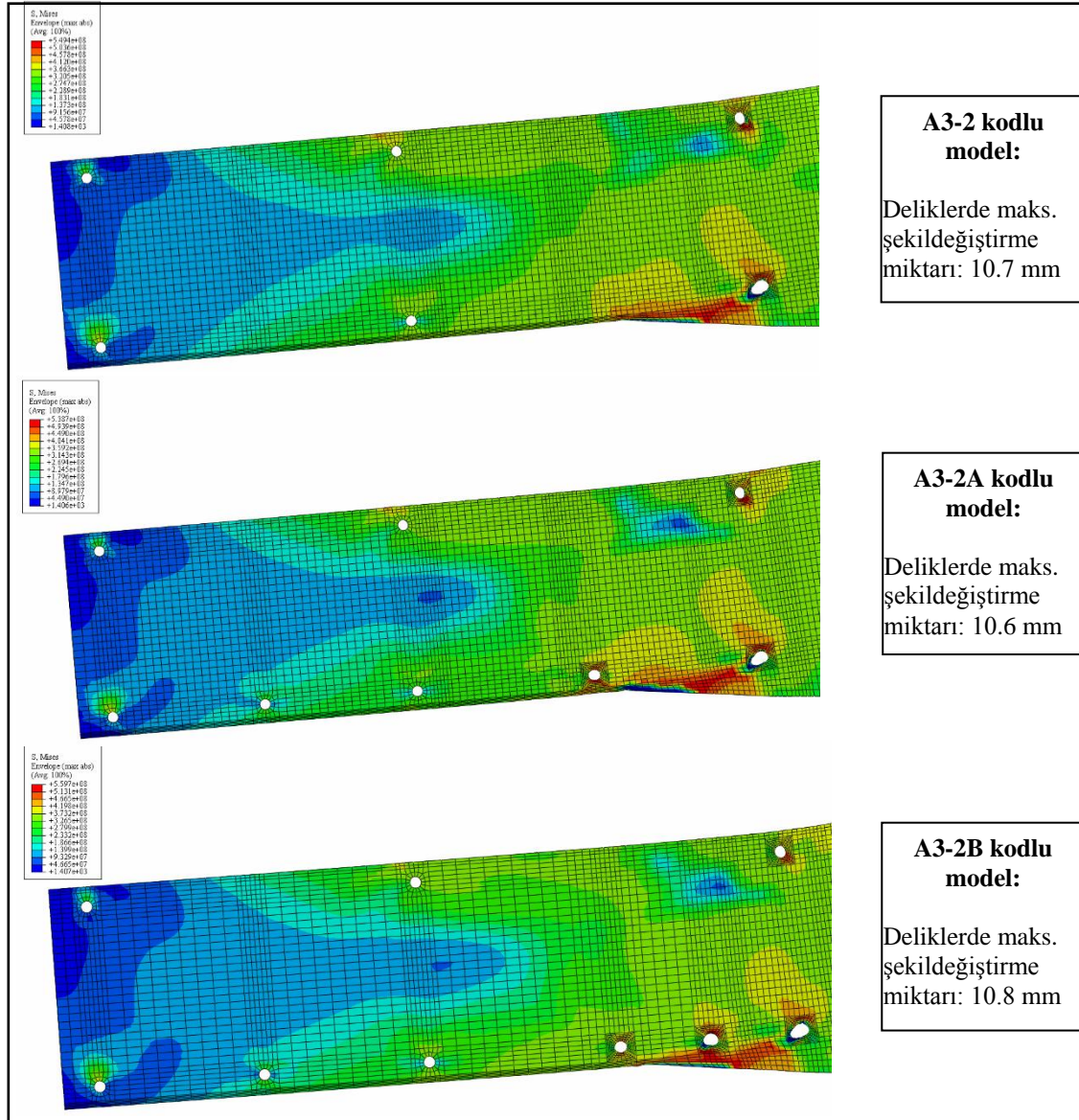
3.4. Dördüncü Grup Analizlerin Sonuçları

Daha önce birinci, ikinci ve üçüncü grup kalibrasyon analizleri olarak verilen analizler sonucunda, cıvata çapı - delik çapı, cıvata sıkma yöntemi ve kuvveti ile modellemelerde kullanılacak sonlu eleman ağ yapısına karar verilmişti. Bu noktadan itibaren dördüncü grup analizlerle; çift sigma profillerin birleşim levhasına montajı için kullanılan cıvataların yer ve adetlerindeki değişimin sistem davranışına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen bu analizlere ait eğriler Şekil 87’de verilmektedir.



Şekil 87. Farklı cıvata düzenlemesine sahip modellerin analiz sonuçları

Yukarıdaki Şekil 87’den de görüldüğü gibi, farklı cıvata düzenlemesi durumunda yük-yerdeğiştirme eğrileri arasında neredeyse hiçbir fark ortaya çıkmamıştır. Bu durum, Elkersh, I. [15] tarafından bu çalışmadakine benzer bir birleşim bölgesi üzerinde yapılan deneysel ve teorik çalışmada da ortaya konmuştur. Çekme bölgesindeki cıvata sayısının artırılması ile delik çevrelerinde oluşan aşırı gerilme yığılmalarının ve dolayısıyla ortaya çıkacak şekildeğiştirmenin azaltılması da amaçlanmıştır. Ancak, aşağıdaki Şekil 88’den görüleceği üzere farklı cıvata düzenlemesi ile yapılan analizler sonucunda şekildeğiştirmiş delik profilleri arasında da önemli bir fark elde edilememiştir. Dolayısıyla, takip eden beşinci ve altıncı grup analizlerde bu üç model içinde en az cıvata adedine sahip olan A3-2 kodlu modelin (bkz. Şekil 79a) esas alınması uygun görülmüştür.



Şekil 88. Farklı cıvata düzenlemesinin delik profili şekildeğiştirmesine etkisi

3.5. Beşinci Grup Analizlerin Sonuçları

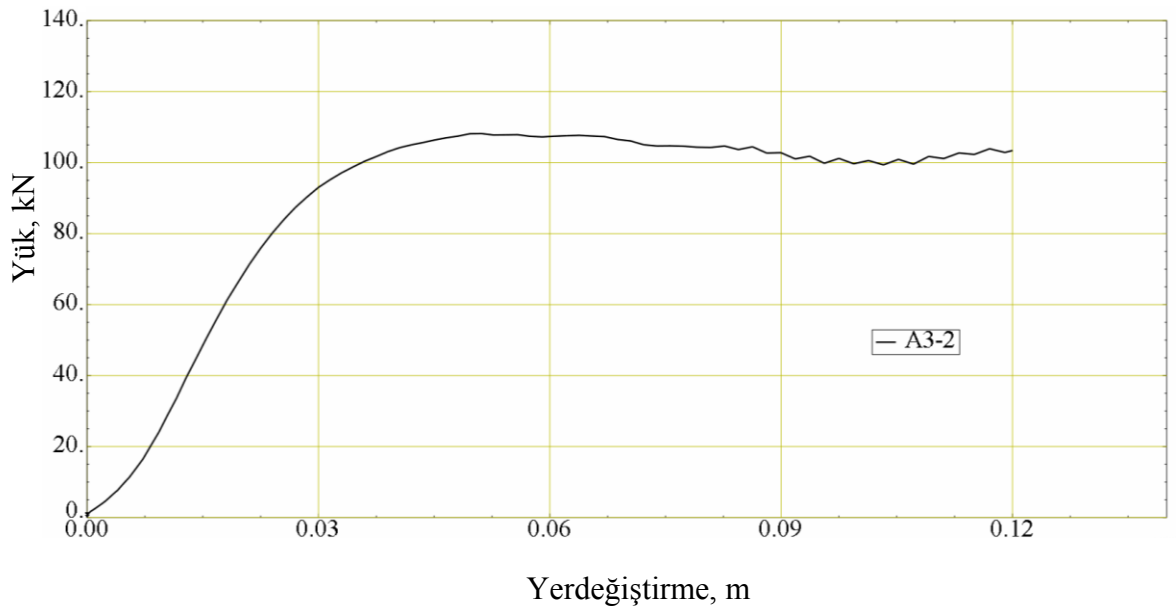
Yukarıdaki ilk dört grup analizler ile gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda beşinci ve altıncı grup analizlerin ne şekilde yapılacağına karar verilmiştir. Böylece, beşinci grup analizler olarak; birleşim levhasının yalın hali, ilave rijitleştirici levhalı ve üst başlığın dudaklı olması halleri için gerçekleştirilen bu analizler, sigma profiller arası mesafenin 350 mm, 230 mm ve 130 mm olması durumları için de tekrarlanmıştır.

Yerel burkulma davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan bu analizlerde hem birleşim levhasının gövde ve üst başlık levhalarında hem de sigma profillerde belirlenen bazı noktaların rölatif yerdeğiştirmeleri incelenmiştir.

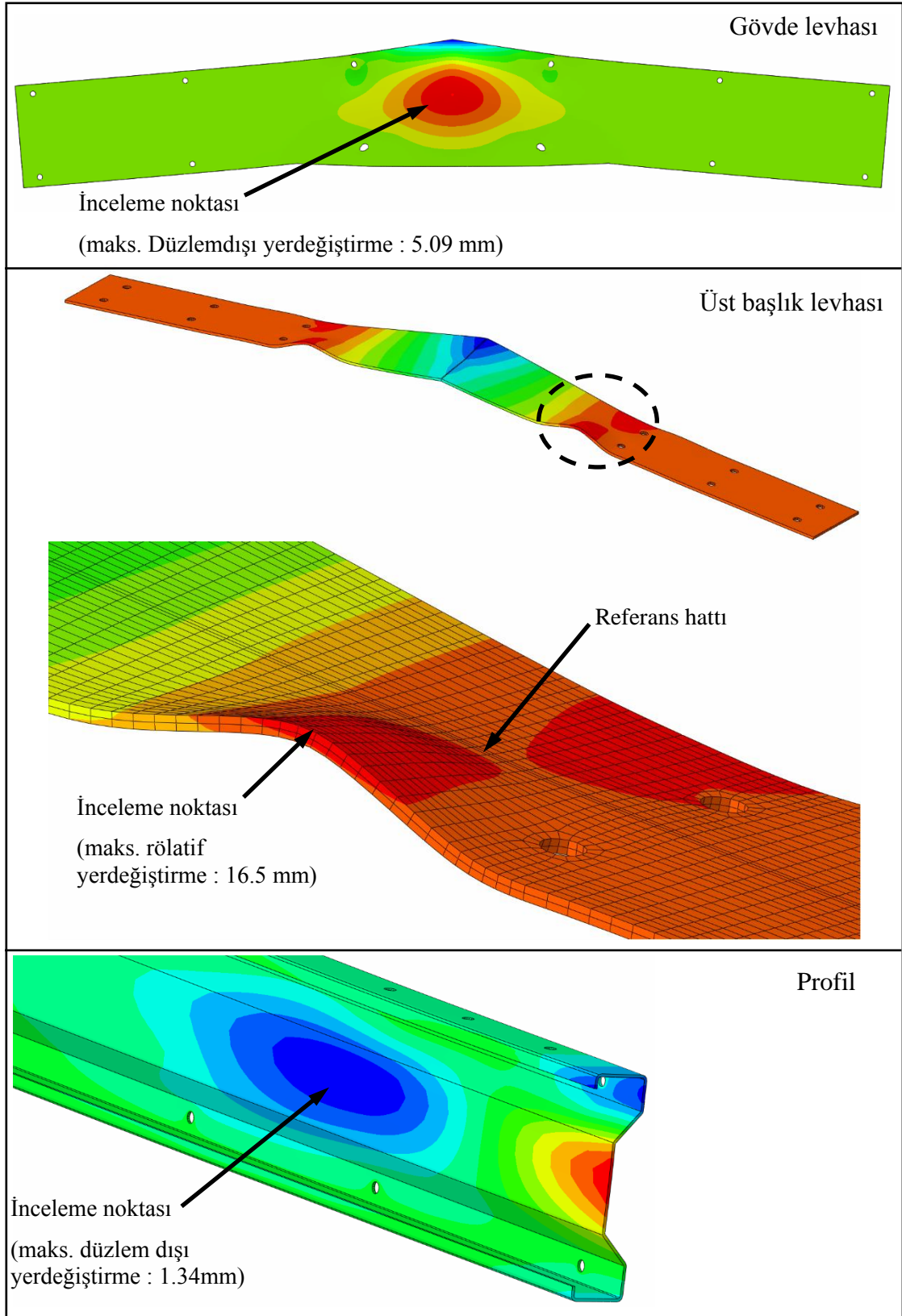
Davranışı incelenecek bu noktaların belirlenmesinde gövde levhası ve profil gövdeleri için maksimum düzlem dışı yerdeğiştirme yapan, üst başlık levhası için ise düşey gövde levhasına bağılı orta bölgesine göre maksimum rölatif yerdeğiştirme yapan noktalar esas alınmıştır. Bu noktalar değerlendirilerek optimum birleşim bölgesi tasarımına karar verebilmek için, birleşim levhasında ve profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının hangi analizlerde birbirine en yakın yük değerlerinde oluştuğı araştırılmış, bunun yanında, diğeri bir optimizasyon yaklaşımı olarak genel yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması da yapılmıştır. Aşağıda, profiller arası her bir mesafe için gerçekleştirilen analiz sonuçları ayrı ayrı incelenmekte ve gruplar kendi içinde karşılaştırılmaktadır. Daha sonra, profiller arası mesafenin değışimine göre de karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.5.1. Analiz A3-2

Profiller arası mesafenin 350 mm ve birleşim levhasının yalın halde olduğı A3-2 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 89’da verilmektedir.

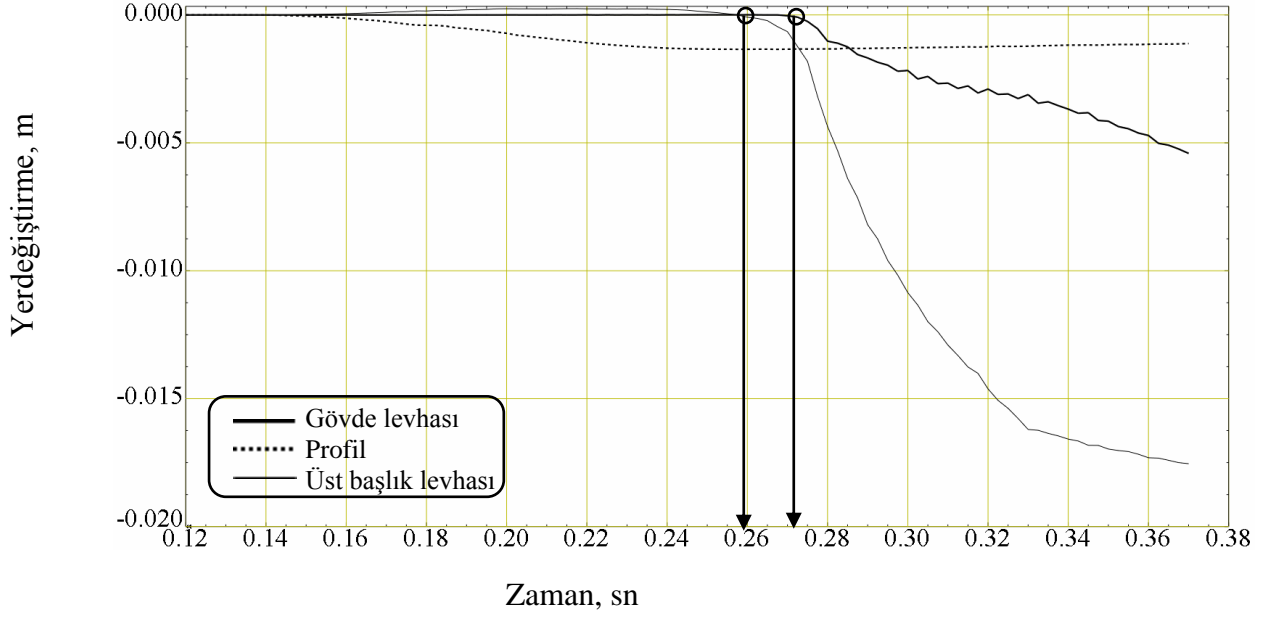


Şekil 89. A3-2 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

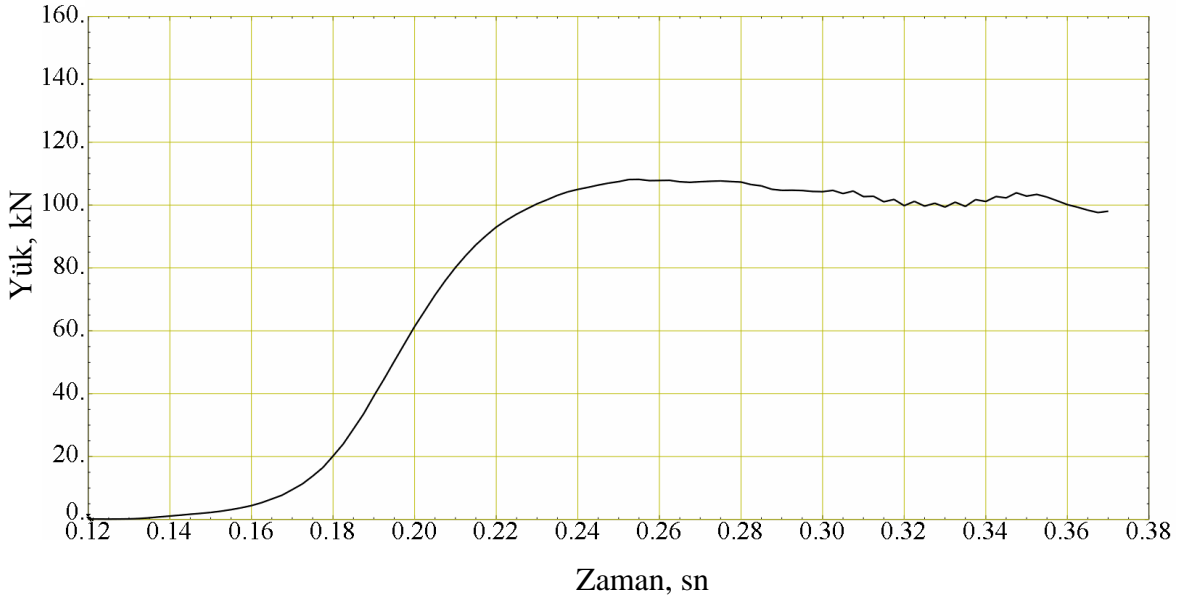


Şekil 90. A3-2 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları

Yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri yukarıdaki Şekil 90'da, bu noktalardan belirlenen yerel burkulma başlangıçlarına karşılık gelen dış yük değerinin belirlendiği yük-zaman eğrisi ise aşağıdaki Şekil 91'de verilmektedir.



Şekil 91. A3-2 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

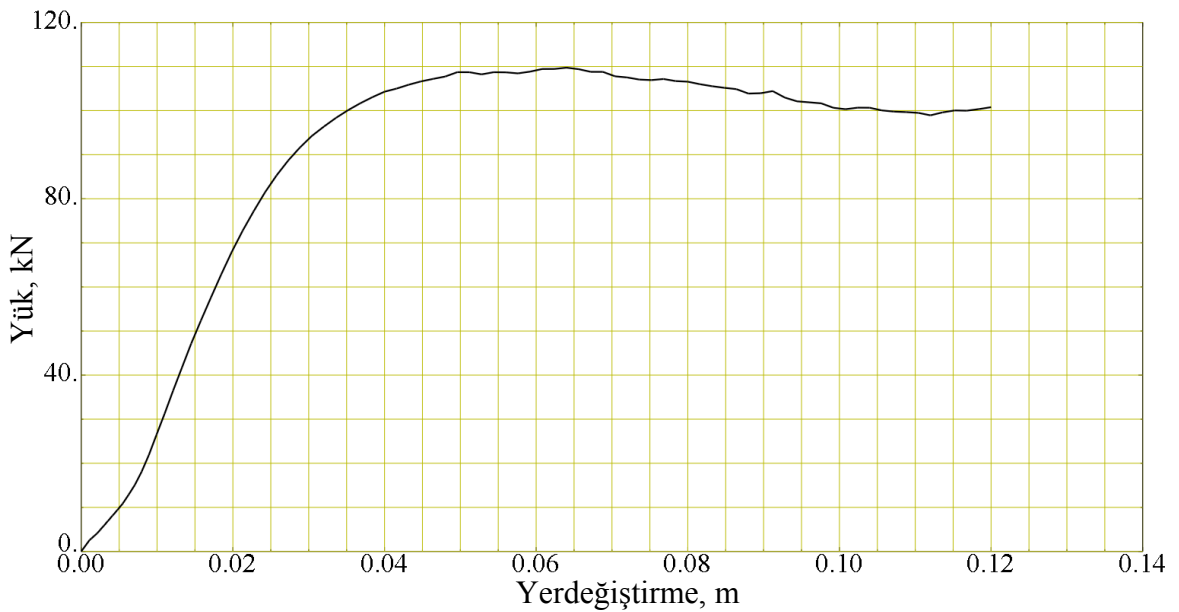


Şekil 92. A3-2 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

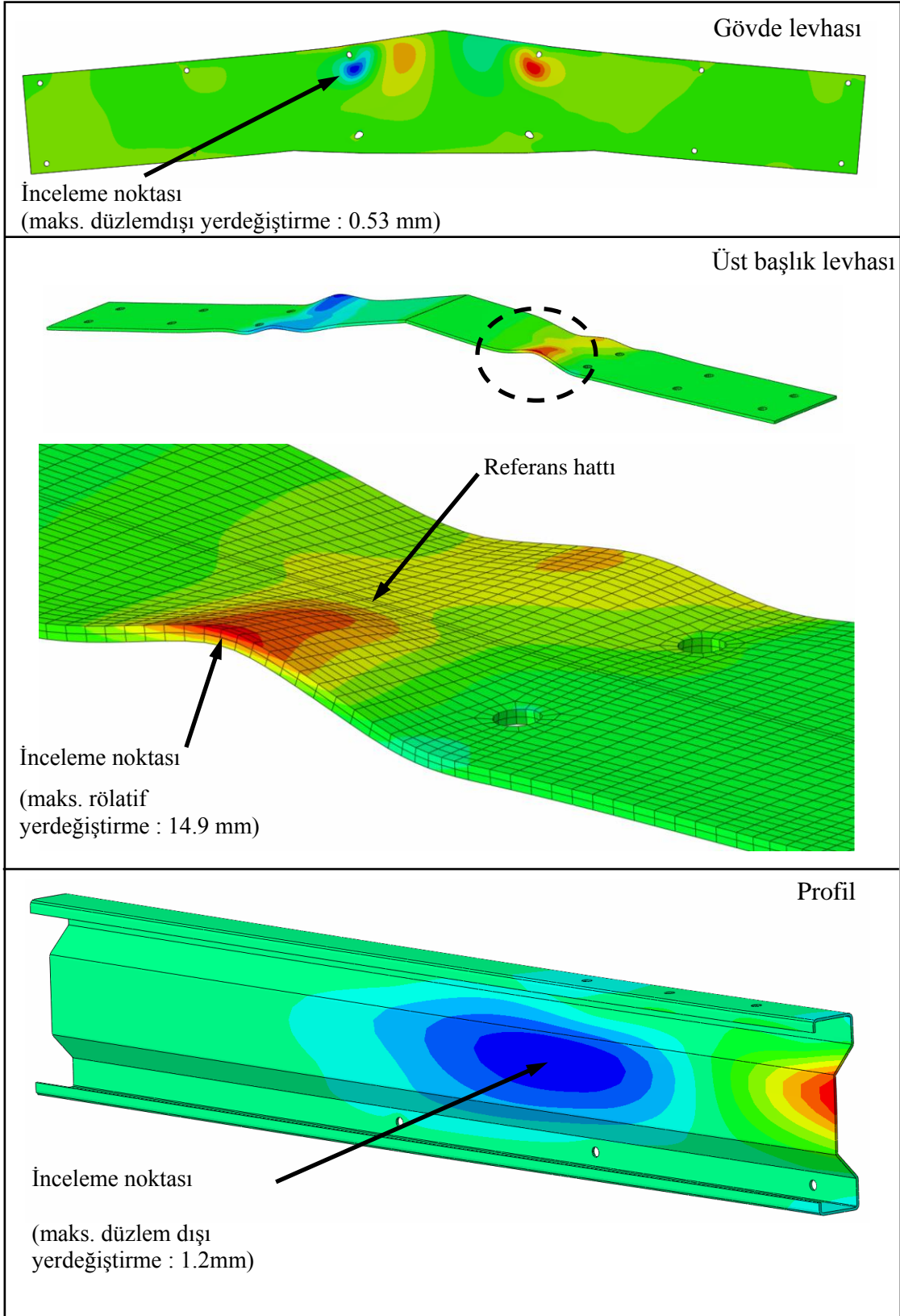
Optimum birleşim bölgesi tasarımının hedeflendiği analizler serisinin ilki olan A3-2 kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür. Bu yerel burkulma davranışının başlangıcı olarak, yerdeğiştirme-zaman ilişkisinde, eğrinin dönüm noktası kabul edilmiştir. Böylece, üst başlık levhası ve gövde levhasında yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 110 kN olduğu yük-zaman eğrisinden okunmuştur.

3.5.2. Analiz A3-2R

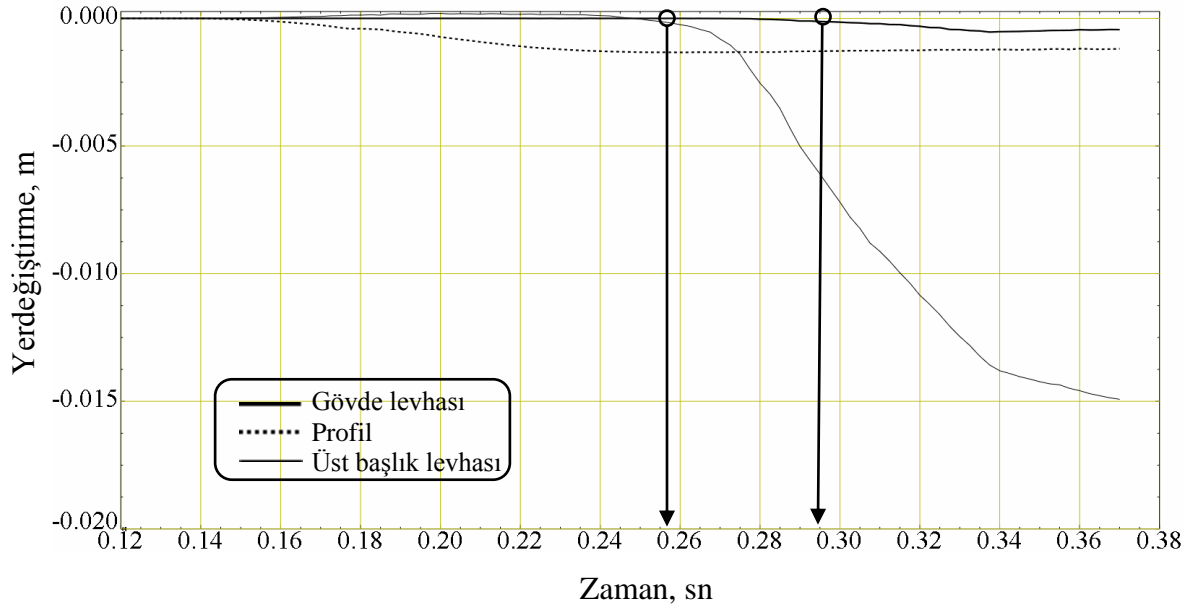
Profiller arası mesafenin 350 mm ve birleşim levhasının ilave rijitleştirici levhalı olduğu A3-2R kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 93'te, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; sırasıyla Şekil 94 ve Şekil 95'te verilmektedir. A3-2R kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, A3-2 kodlu analiz sonuçlarına benzer olarak, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür. Üst başlık levhası ve gövde levhasındaki yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 108 kN olduğu Şekil 96'daki yük-zaman eğrisinden okunmuştur.



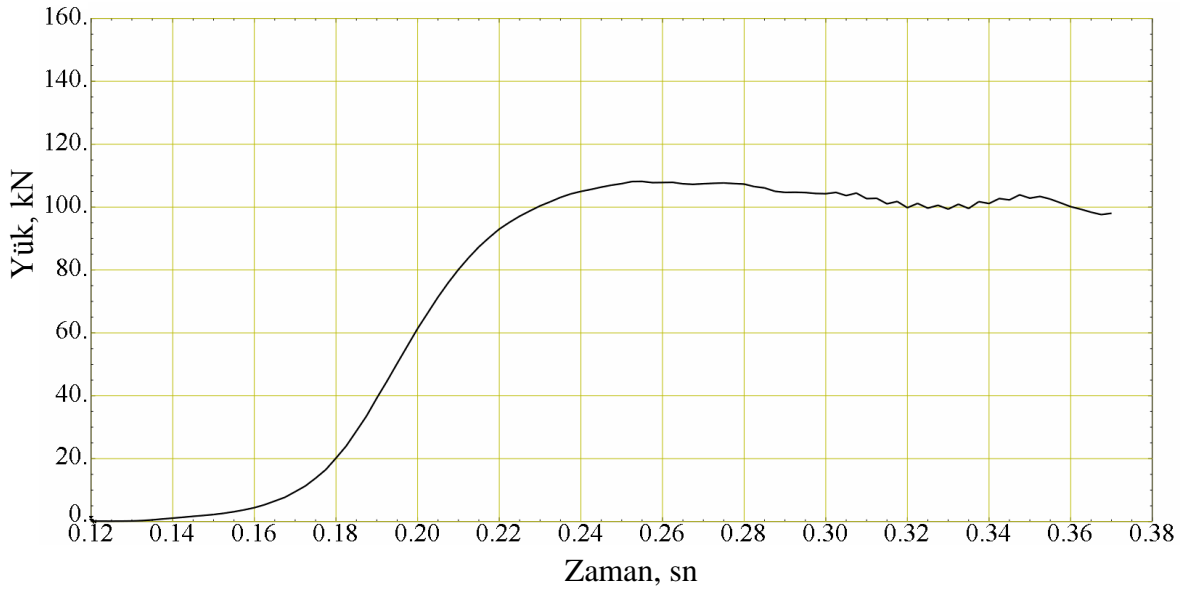
Şekil 93. A3-2R analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 94. A3-2R kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



Şekil 95. A3-2R kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

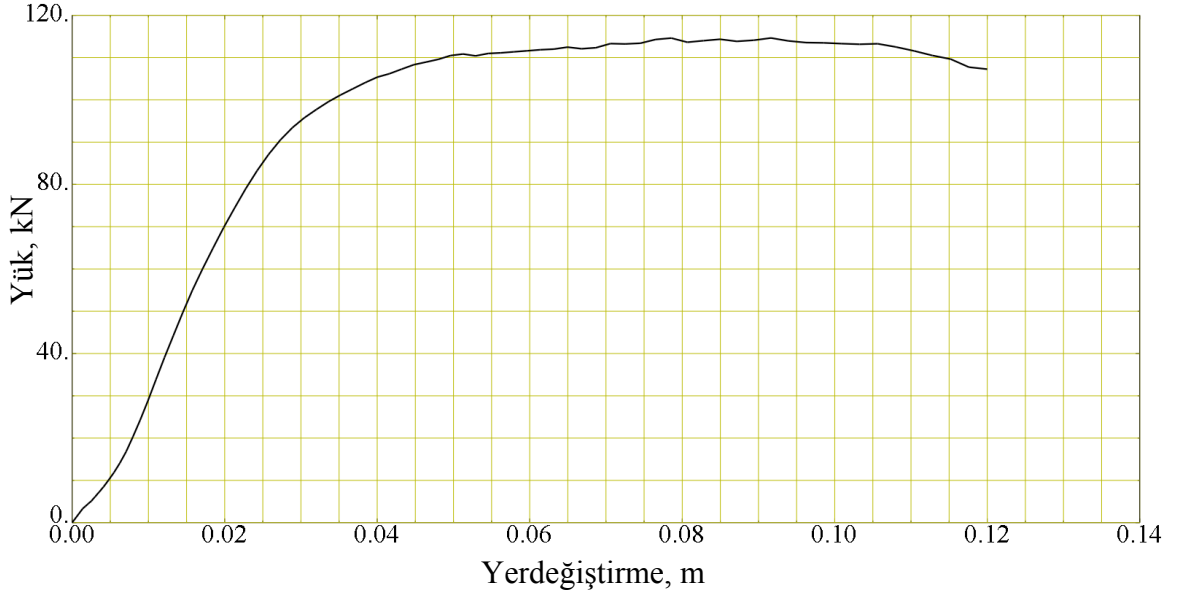


Şekil 96. A3-2R kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

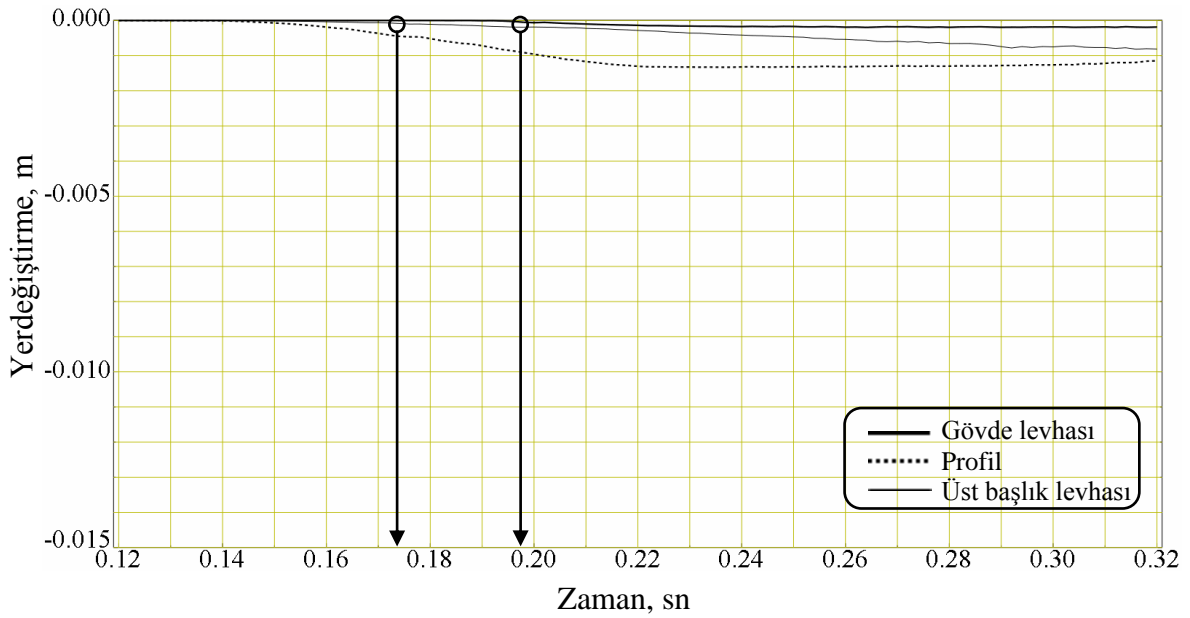
3.5.3. Analiz A3-2RD

Profiller arası mesafenin 350 mm, birleşim levhasının ilave rijitleştirici levhalı ve üst başlığın dudaklı olduğu A3-2RD kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 97'de,

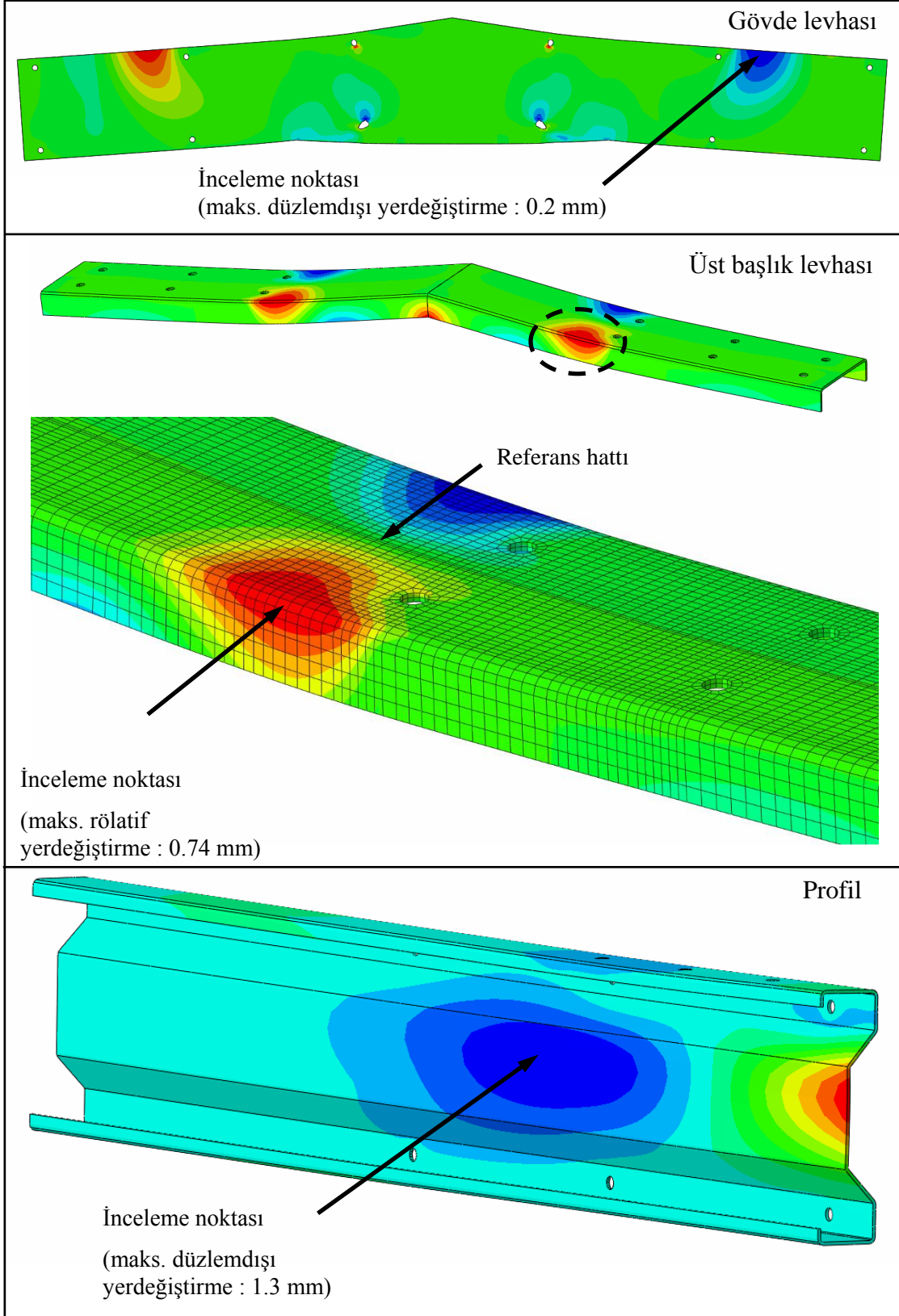
yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 98 ve Şekil 99'da verilmektedir.



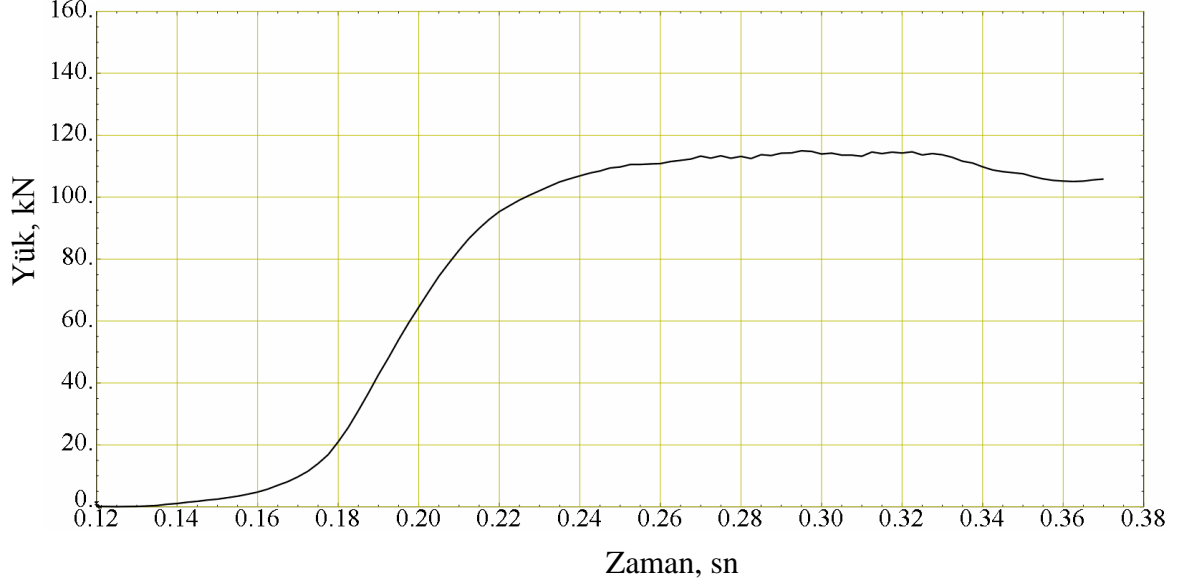
Şekil 97. A3-2RD analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 98. A3-2RD kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları



Şekil 99. A3-2RD kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları

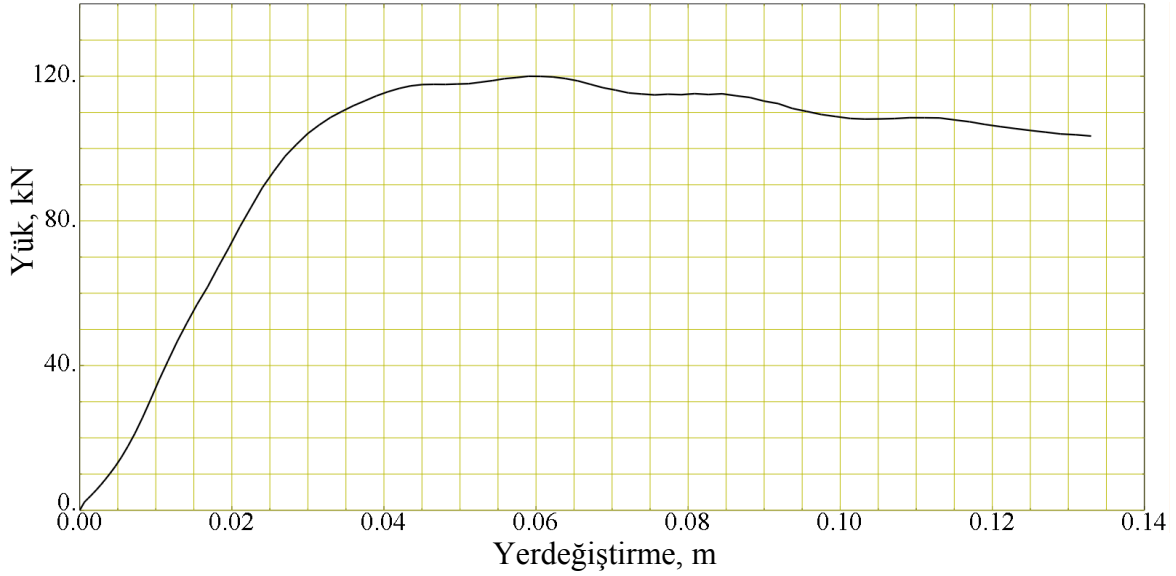


Şekil 100. A3-2RD kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

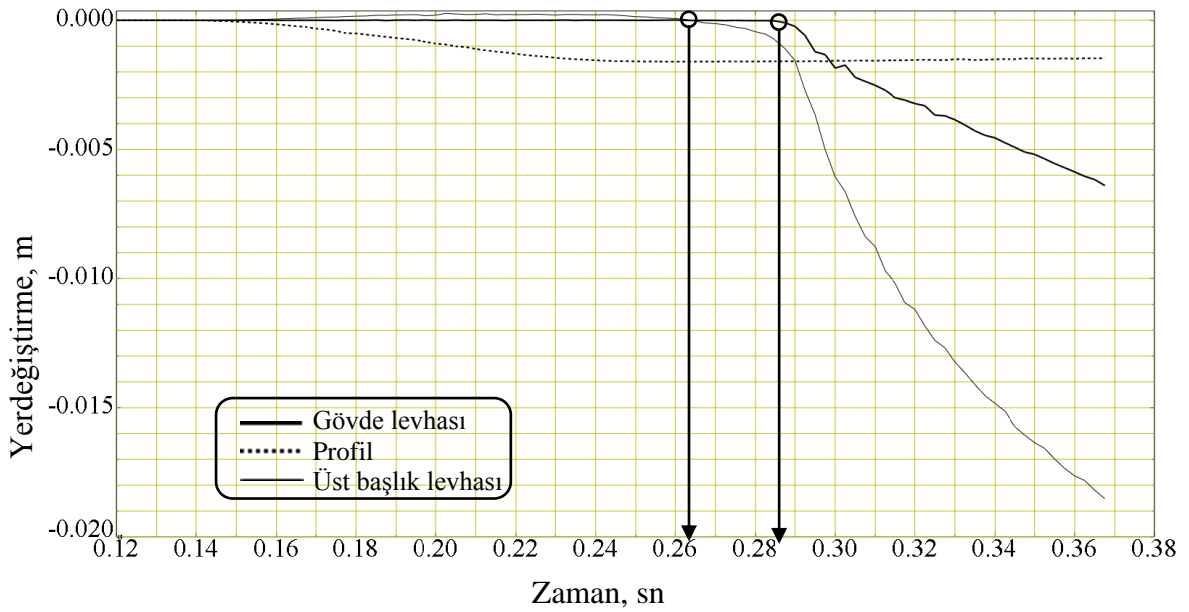
A3-2RD kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, gövde levhasındaki yerel burkulma başlangıcının eklene rijitleştirici levha sayesinde, üst başlık levhasındakine kıyasla daha sonra ortaya çıktığı görülmüştür. Yerel burkulmayı başlatan dış yükün üst başlık levhasında 63 kN, gövde levhasında ise yaklaşık olarak 73 kN olduğu Şekil 100'deki yük-zaman eğrisinden okunmuştur. Ancak yerel burkulmalar, başladıktan sonra yok denecek kadar az ilerleme göstermiştir.

3.5.4. Analiz A3-2L1

Profiller arası mesafenin 230 mm ve birleşim levhasının yalın halde olduğu A3-2L1 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 101'de, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 102 ve Şekil 103'te verilmektedir. A3-2L1 kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, A3-2 kodlu analiz sonuçlarına benzer olarak, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür. Üst başlık levhası ve gövde levhasındaki yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 120 kN olduğu Şekil 104'te verilen yük-zaman eğrisinden okunmuştur.

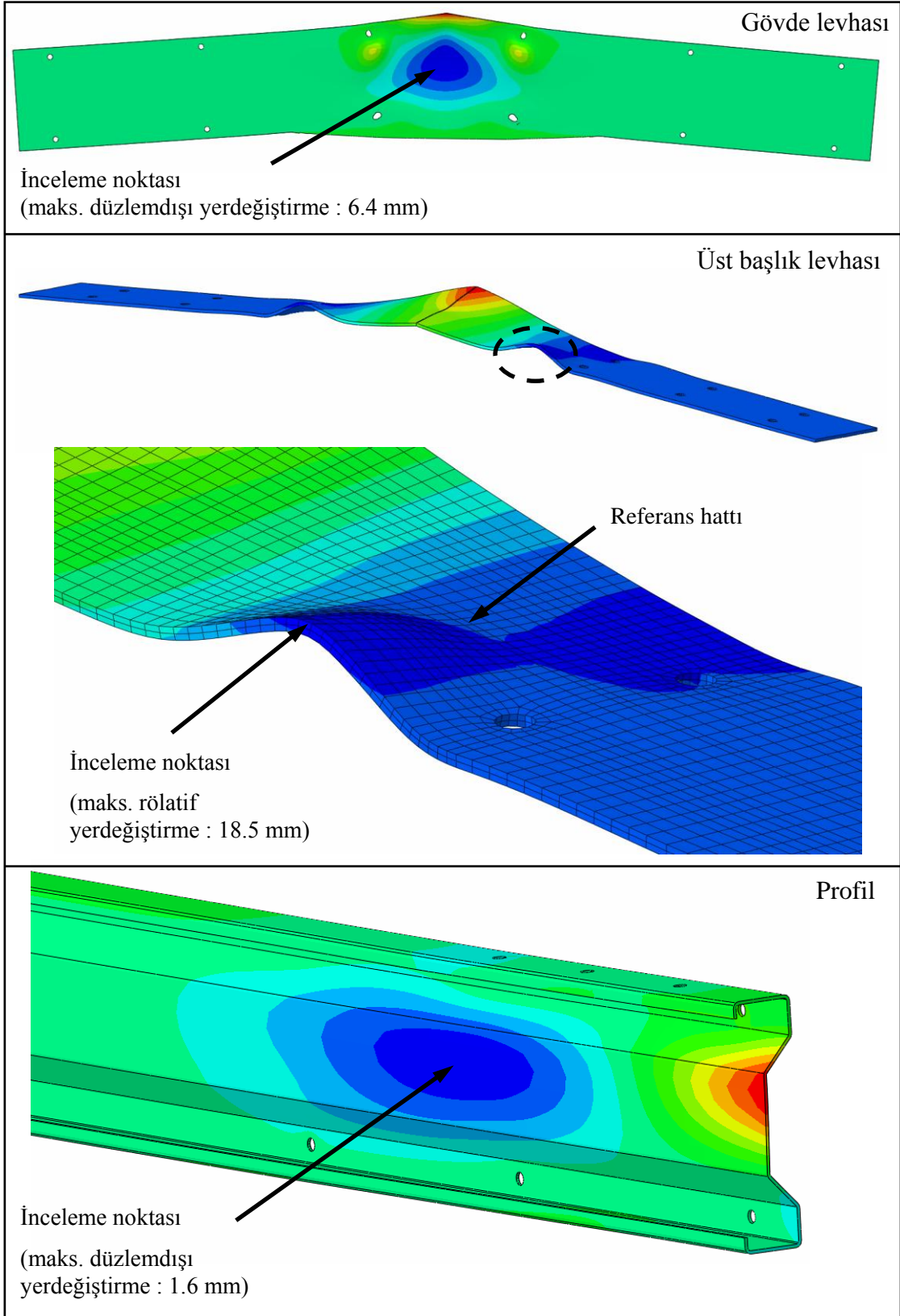


Şekil 101. A3-2L1 analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

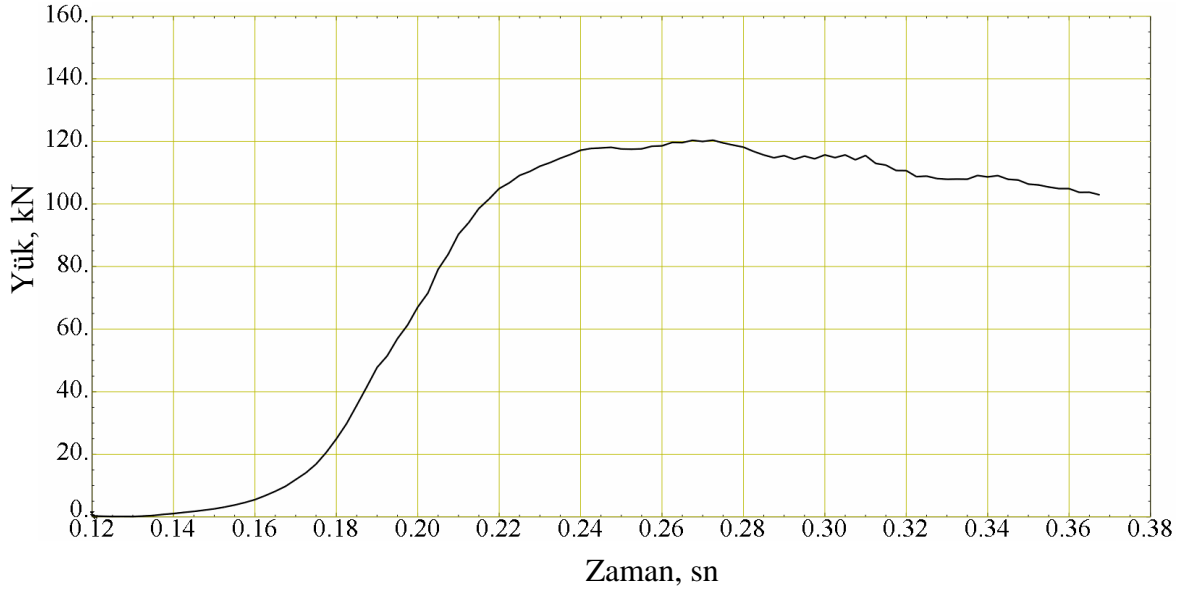


Şekil 102. A3-2RL1 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

Profiller arası mesafenin 230 mm'ye indirildiği analiz sonucunda yerel burkulma davranışları açısından A3-2 analizine göre önemli bir farklılık oluşmadığı ancak, yük taşıma kapasitesinin Şekil 89 ve Şekil 101 incelendiğinde yaklaşık 15 kN artırdığı görülmektedir.



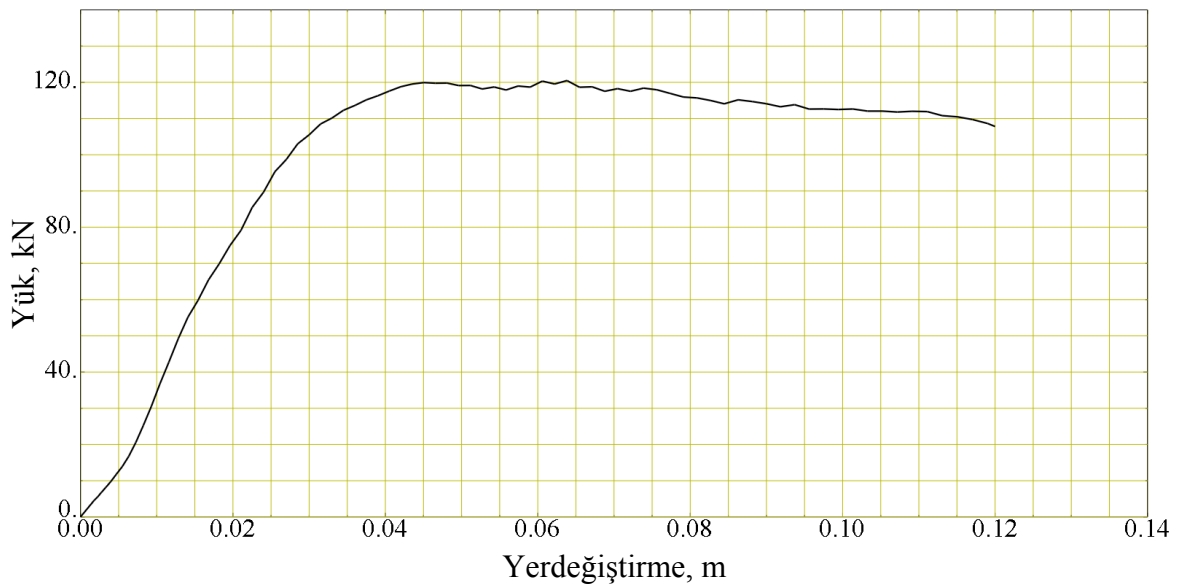
Şekil 103. A3-2L1 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



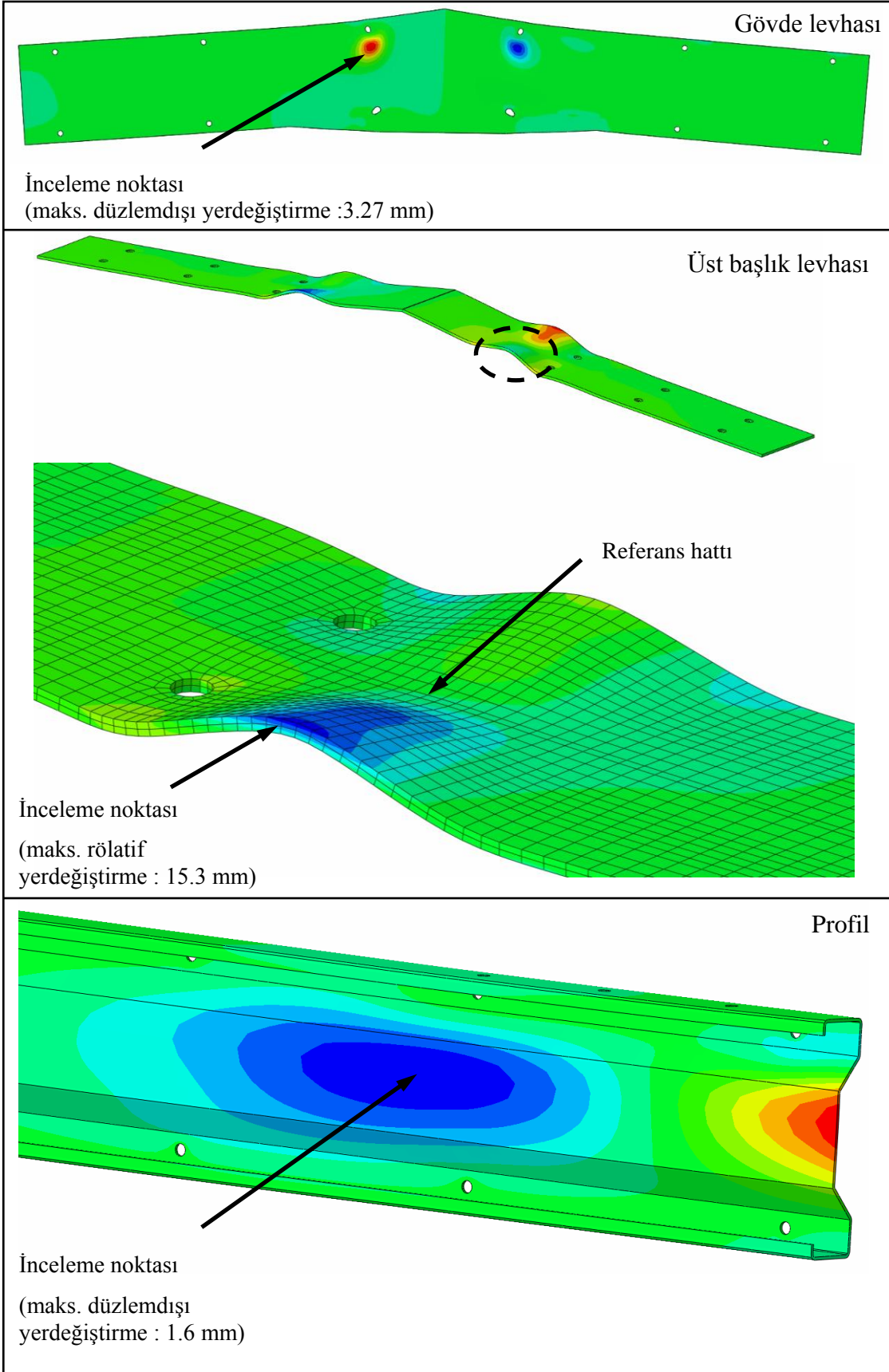
Şekil 104. A3-2L1 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

3.5.5. Analiz A3-2L1R

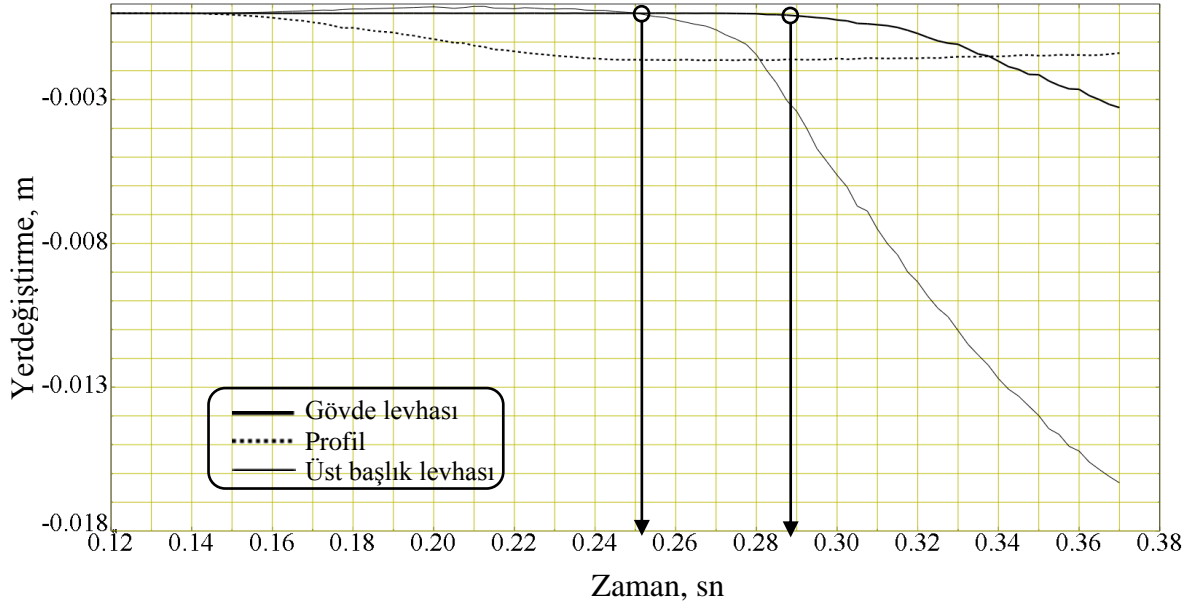
Profiller arası mesafenin 230 mm ve birleşim levhasında ilave rijitleştirici olduğu A3-2L1R kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 105'de, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 106 ve Şekil 107'de verilmektedir.



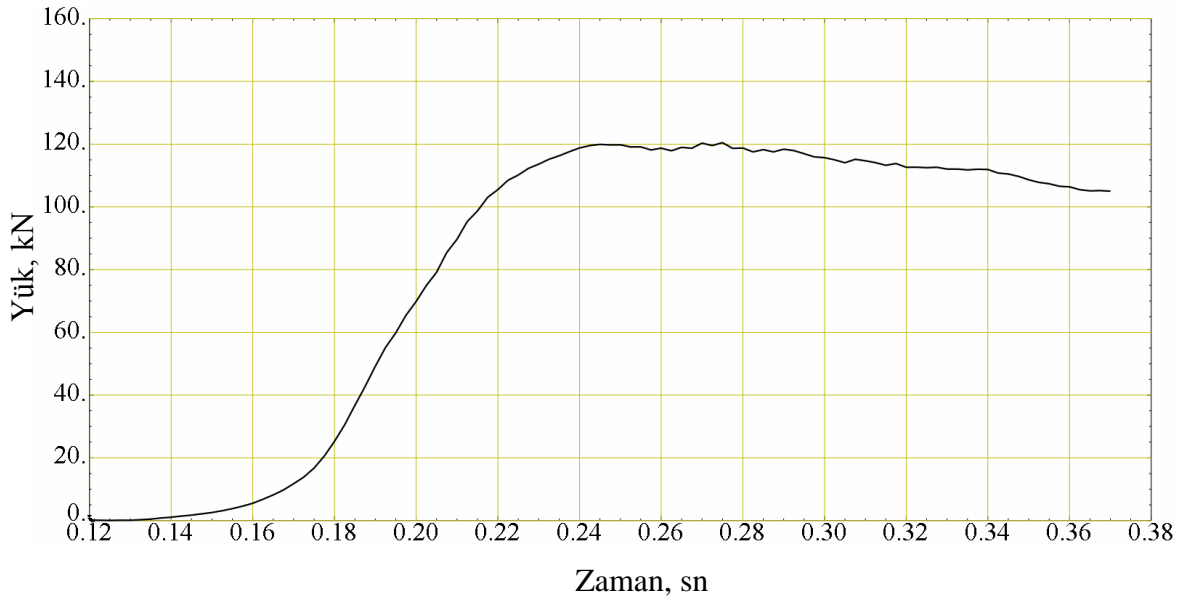
Şekil 105. A3-2L1R analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 106. A3-2L1R kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



Şekil 107. A3-2L1R kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

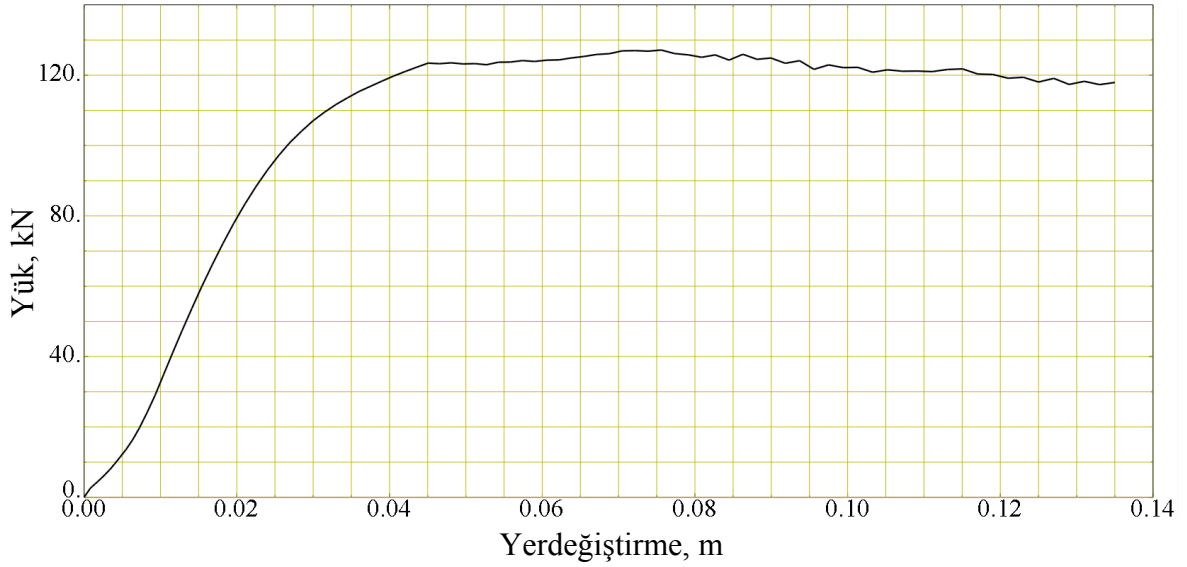


Şekil 108. A3-2L1R kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

A3-2L1R kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, A3-2R kodlu analiz sonuçlarına benzer olarak, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine yakın oldukları görülmüştür. Üst başlık levhası ve gövde levhasındaki yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 120 kN olduğu Şekil 108'de verilen yük-zaman eğrisinden okunmuştur.

3.5.6. Analiz A3-2L1RD

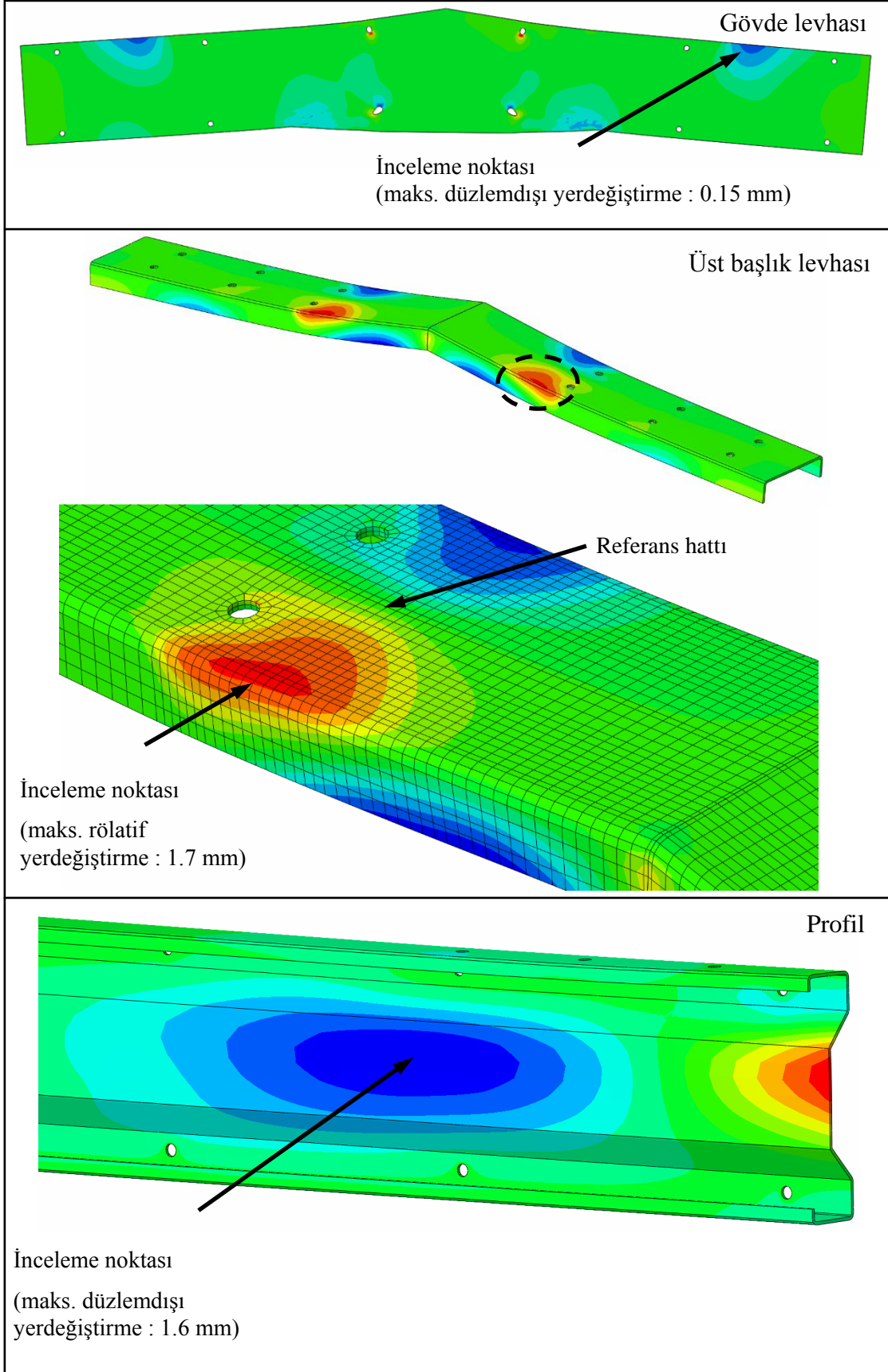
Profiller arası mesafenin 230 mm, birleşim levhasında ilave rijitleştirici, üst başlığın ise dudaklı olduğu A3-2L1RD kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 109’da, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 110 ve Şekil 111’de verilmektedir.



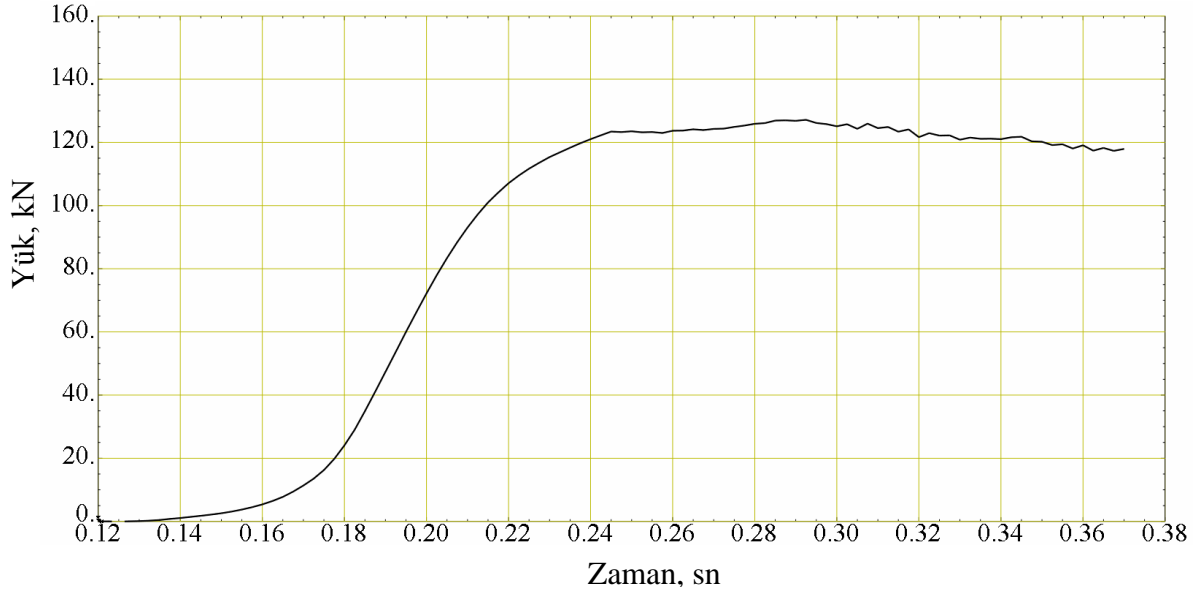
Şekil 109. A3-2L1RD analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 110. A3-2L1RD kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları



Şekil 111. A3-2L1RD kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



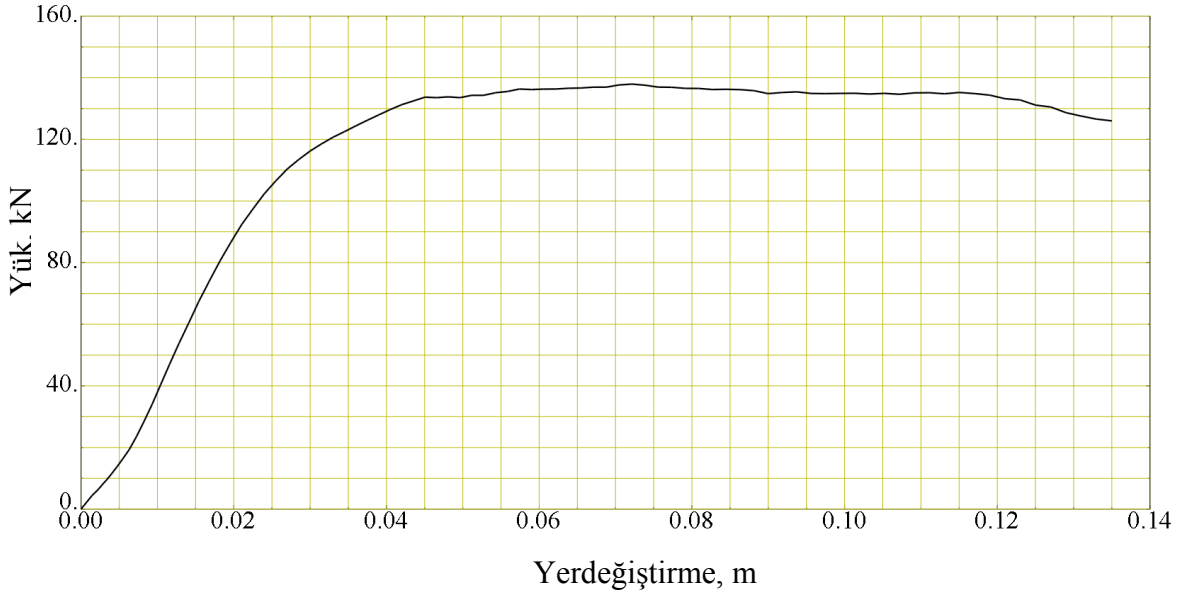
Şekil 112. A3-2L1RD kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

A3-2L1RD kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine yakın olmadıkları görülmüştür. Üst başlık levhasında yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık 25 kN, gövde levhasındakinin ise yaklaşık 105 kN olduğu Şekil 112'de verilen yük-zaman eğrisinden okunmuştur. Bununla birlikte, yerel burkulmalar, başladıktan sonra önemli bir ilerleme göstermemiştir.

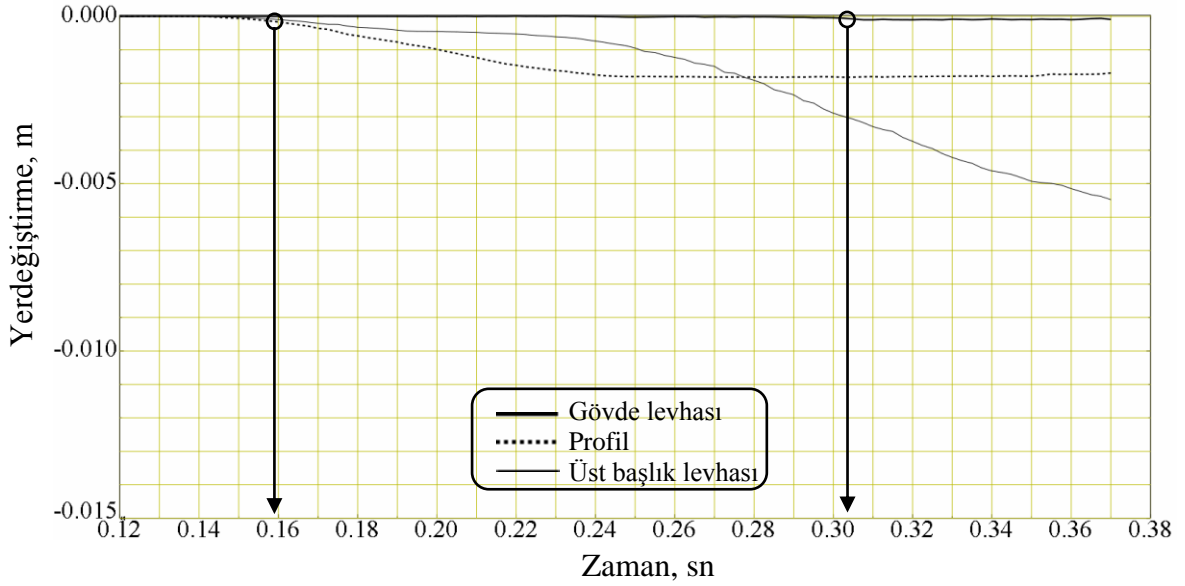
3.5.7. Analiz A3-2L2

Profiller arası mesafenin 130 mm, birleşim levhasının yalın halde olduğu A3-2L2 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 113'te, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 114 ve Şekil 115'te verilmektedir.

A3-2L2 kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça uzak oldukları görülmüştür. Bunun nedeni, profiller arası mesafenin azalmasıyla birlikte gövde levhasında burkulma yapabilecek alanın azalmış, başka bir deyişle, tutulu kısmının artmış olmasıdır.

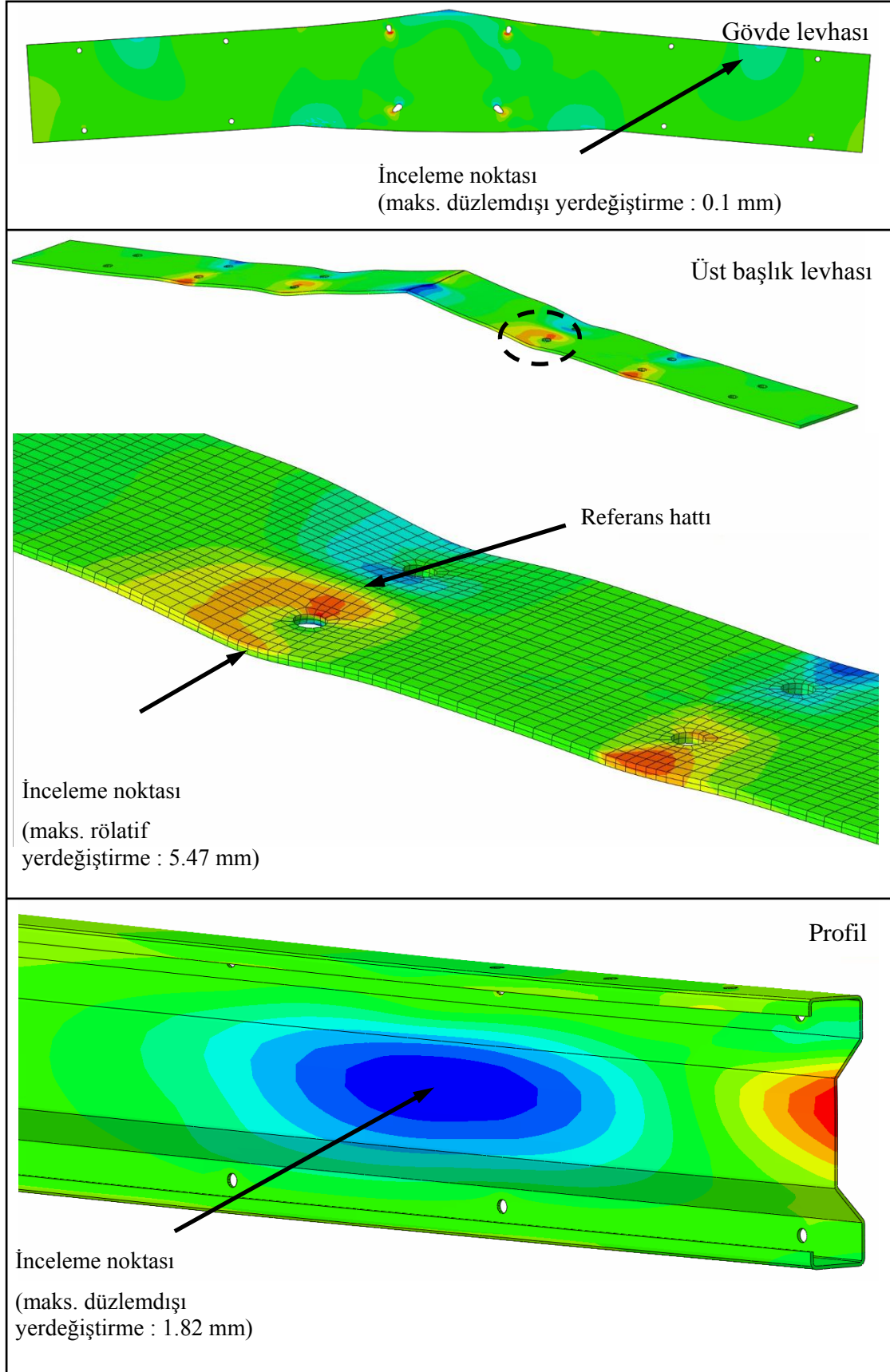


Şekil 113. A3-2L2 analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

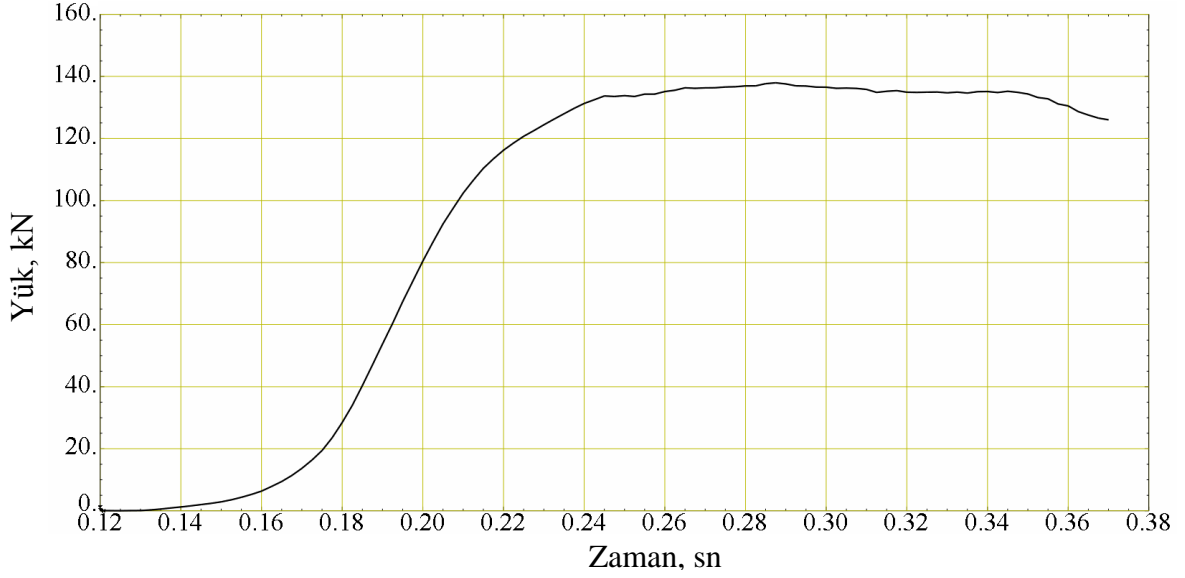


Şekil 114. A3-2L2 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

Şekil 114'te verilen yerel burkulma başlangıçlarını gösteren yerdeğiştirme-zaman eğrisinden okunan zaman değerlerinin Şekil 116'da verilen yük-zaman eğrisindeki yük karşılığına bakıldığında, yerel burkulmayı başlatan dış yükün üst başlık levhasında yaklaşık 12 kN, gövde levhasında ise 135 kN olduğu görülmüştür.



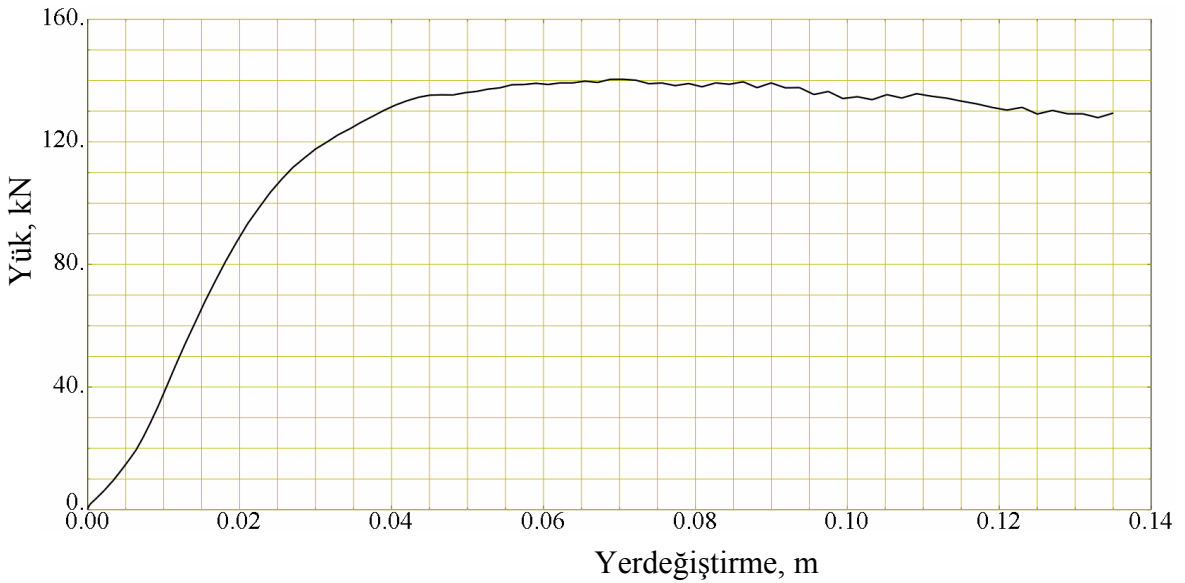
Şekil 115. A3-2L2 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



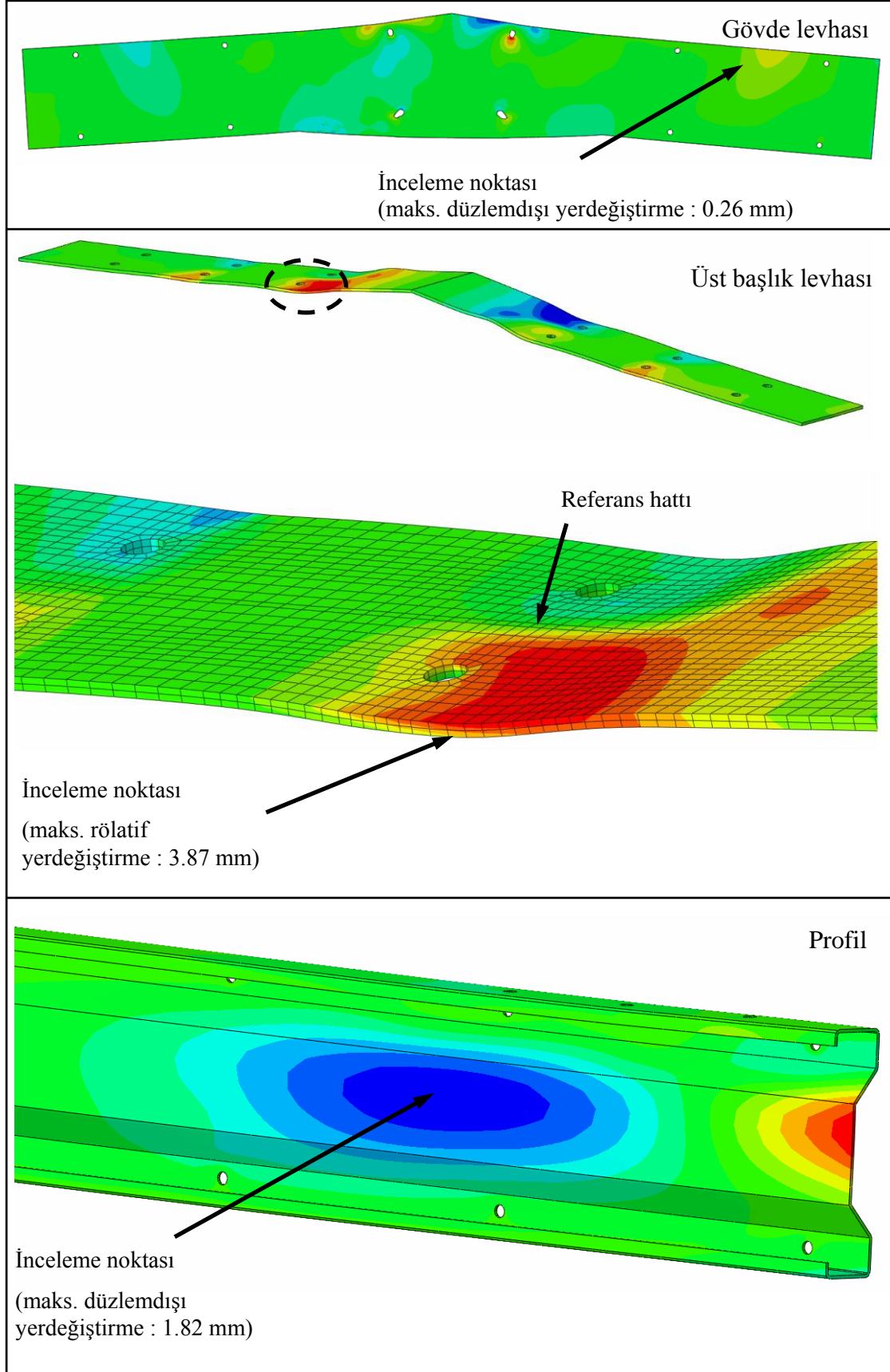
Şekil 116. A3-2L2 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

3.5.8. Analiz A3-2L2R

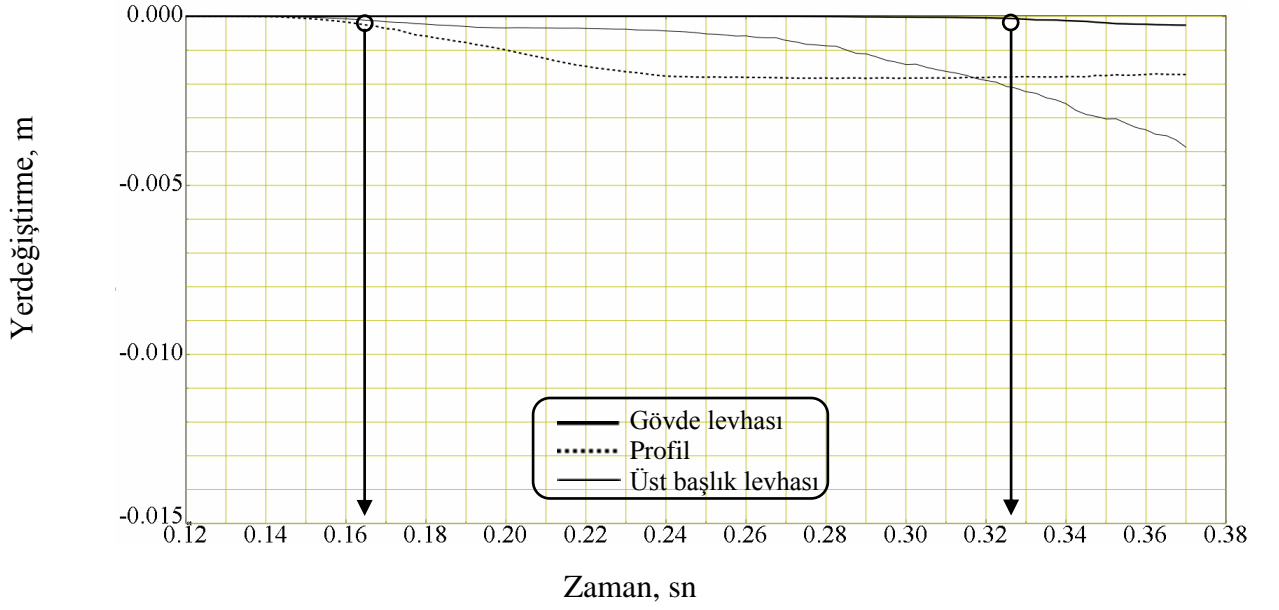
Profiller arası mesafenin 130 mm, birleşim levhasında ilave rijitleştirici bulunduğu A3-2L2R kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 117'de, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 118 ve Şekil 119'da verilmektedir.



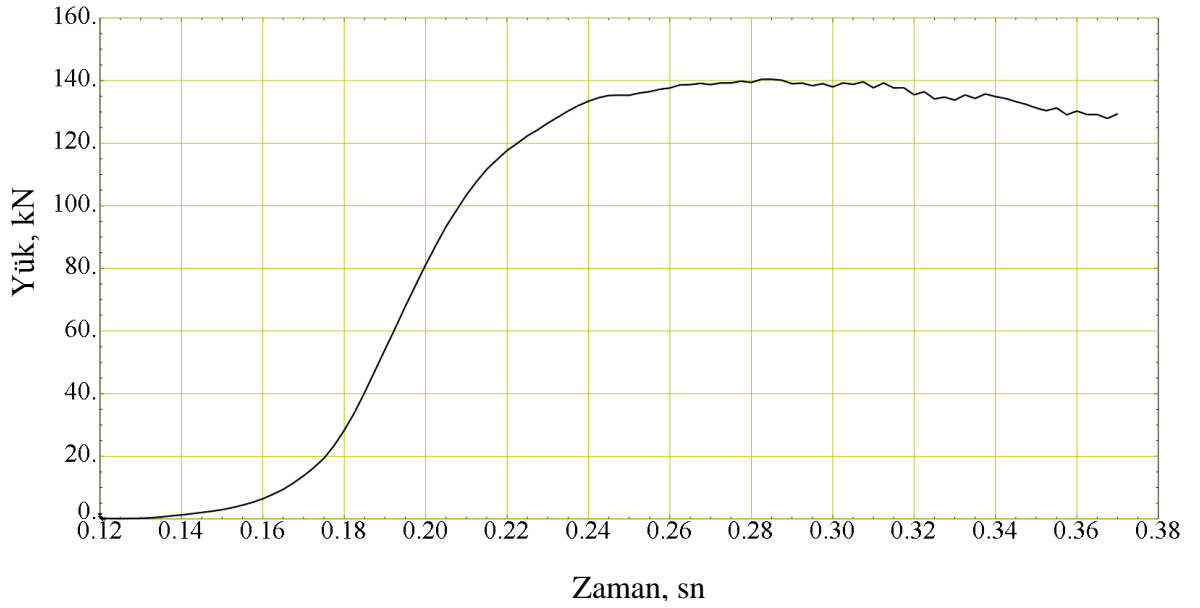
Şekil 117. A3-2L2R analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 118. A3-2L2R kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



Şekil 119. A3-2L2R kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları



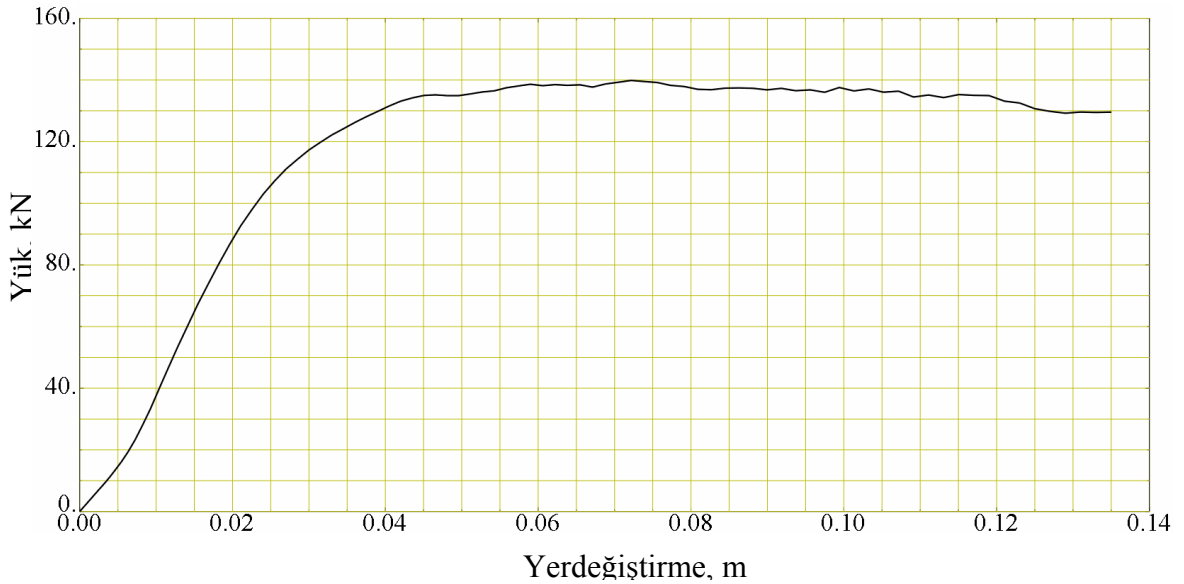
Şekil 120. A3-2L2R kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

A3-2L2R kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça uzak oldukları görülmüştür. Şekil 119'te verilen yerel burkulma başlangıçlarını gösteren yerdeğiştirme-zaman eğrisinden okunan

zaman değerlerinin Şekil 120’de verilen yük-zaman eğrisindeki yük karşılığına bakıldığında, yerel burkulmayı başlatan dış yükün üst başlık levhasında yaklaşık 25 kN, gövde levhasında ise 140 kN olduğu görülmüştür.

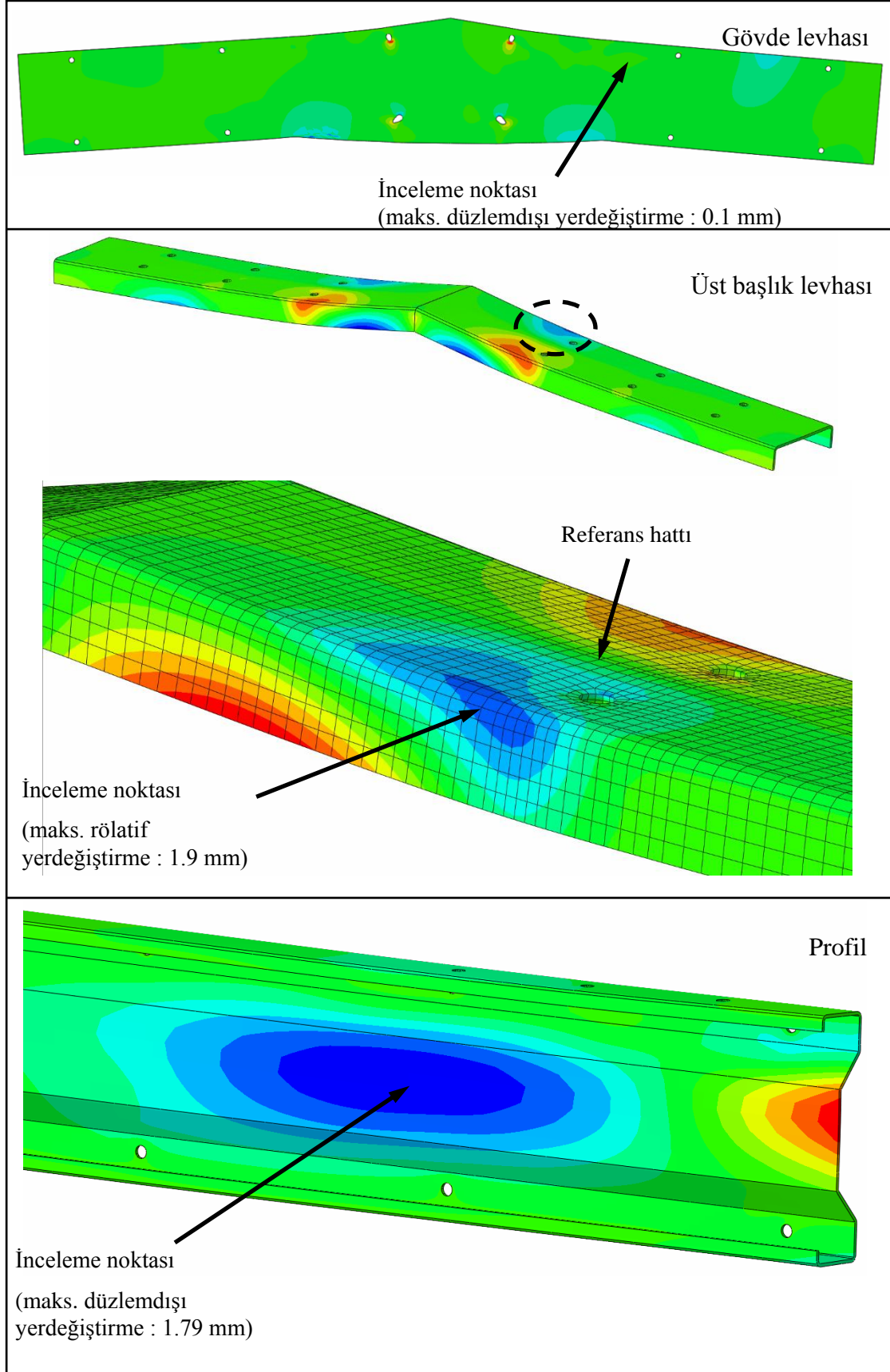
3.5.9. Analiz A3-2L2RD

Profiller arası mesafenin 130 mm, birleşim levhasında ilave rijitleştirici bulunduğu, üst başlığın ise dudaklı olduğu A3-2L2RD kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 121’de, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise; Şekil 122 ve Şekil 123’te verilmektedir.

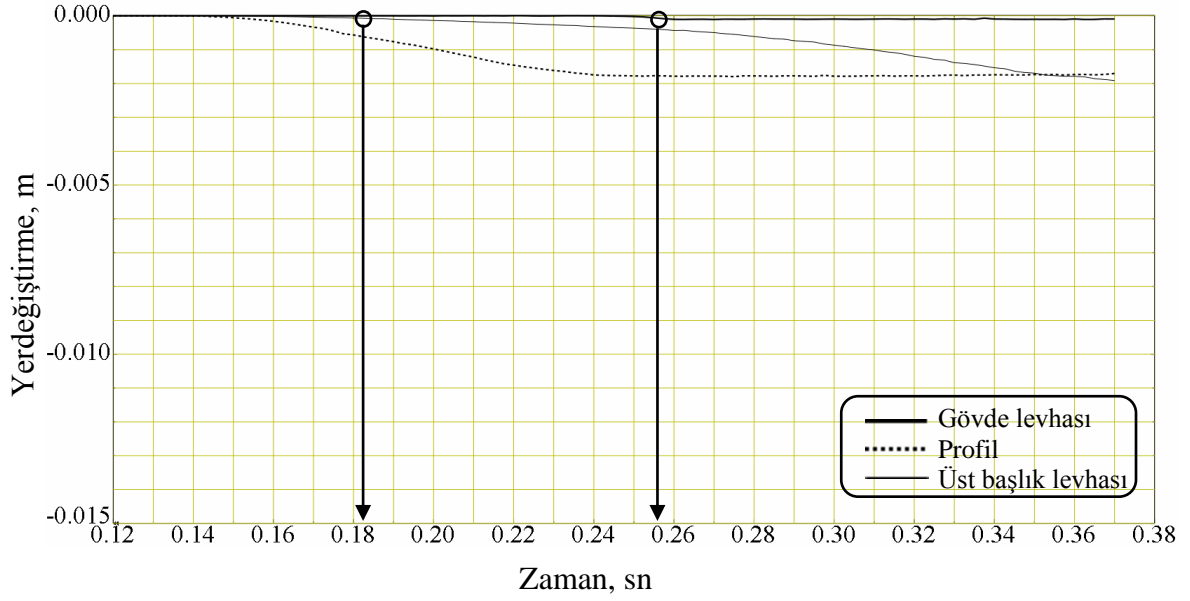


Şekil 121. A3-2L2RD analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

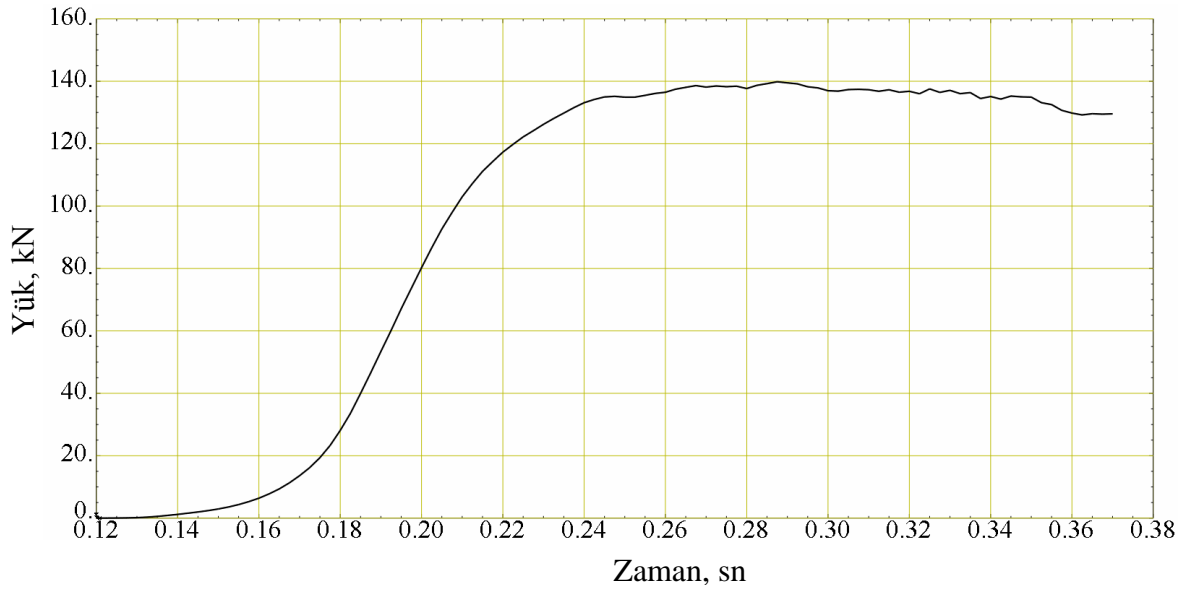
A3-2L2RD kodlu analizden elde edilen rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden, gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça uzak oldukları görülmüştür. Şekil 123’te verilen yerel burkulma başlangıçlarını gösteren yerdeğiştirme-zaman eğrisinden okunan zaman değerlerinin Şekil 124’te verilen yük-zaman eğrisindeki yük karşılığına bakıldığında, yerel burkulmayı başlatan dış yükün üst başlık levhasında yaklaşık 28 kN, gövde levhasında ise 136 kN olduğu görülmüştür.



Şekil 122. A3-2L2RD kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



Şekil 123. A3-2L2RD kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları



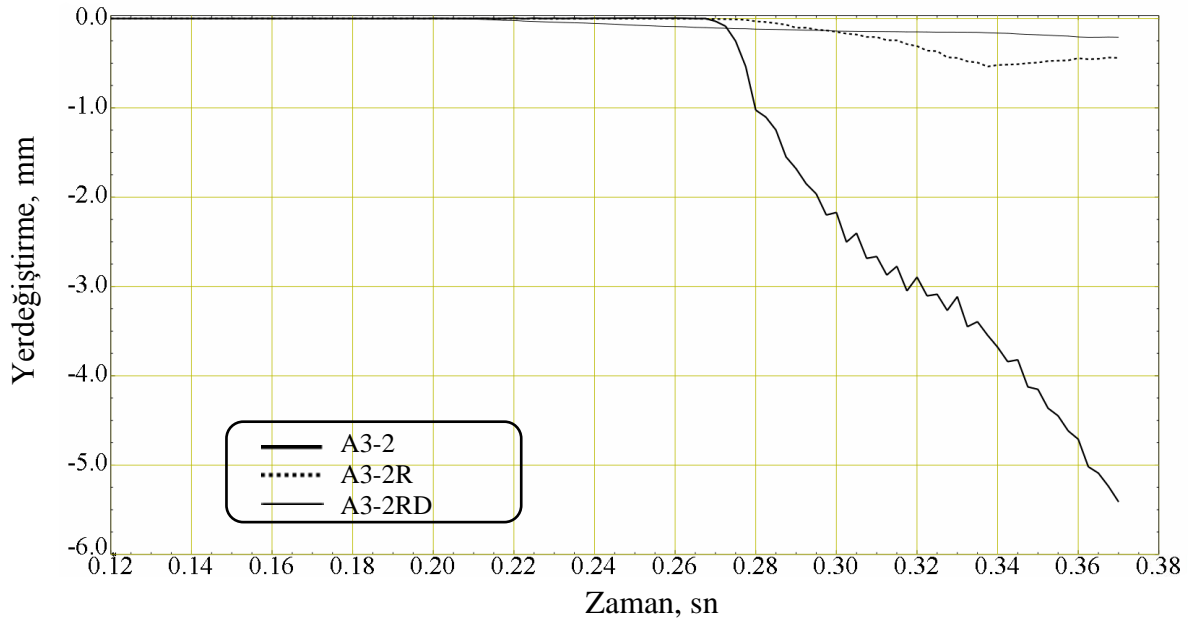
Şekil 124. A3-2L2RD kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

Yukarıda ayrı ayrı verilen tüm analiz sonuçları aşağıda, 350 mm, 230 mm ve 130 mm profil aralıkları bulunan modeller için öncelikle her bir mesafe kendi arasında sonra ise birleşim levhası ve üst başlık levhası bakımından aynı olan modeller profil aralıklarının değişimine göre kıyaslanacaktır.

3.6. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

3.6.1. Analiz A3-2, A3-2R ve A3-2RD'nin Karşılaştırılması

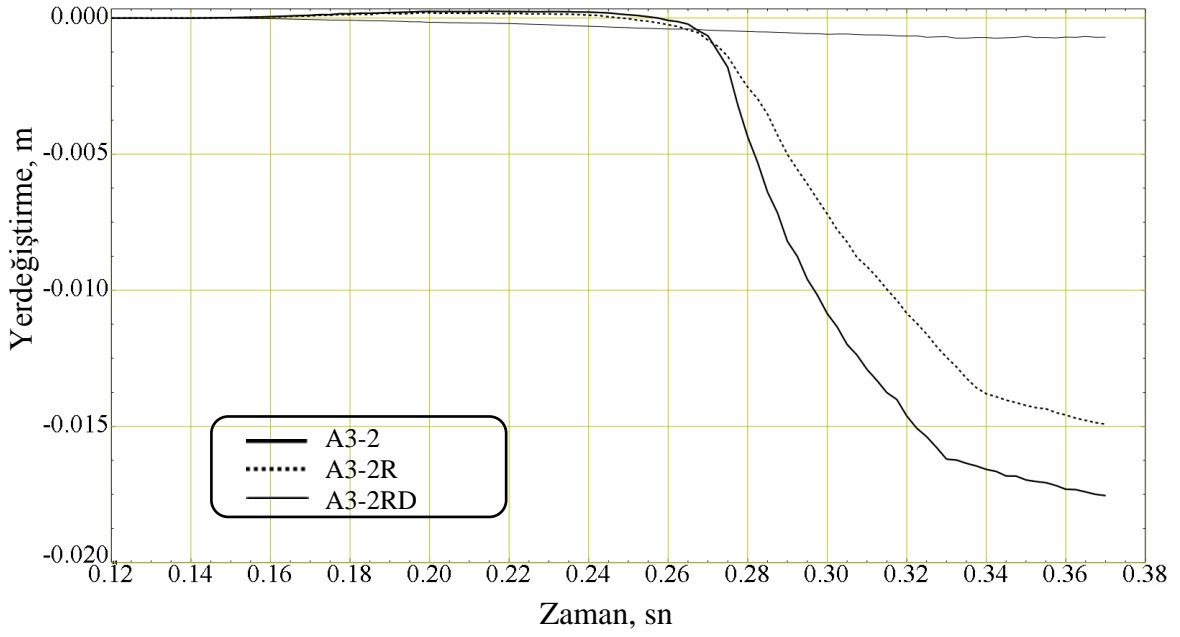
Beşinci grup analizlerin ilk üçü olan ve profiller arası mesafenin 350 mm olduğu A3-2, A3-2R ve A3-2RD kodlu analiz sonuçları gövde levhaları, üst başlık levhaları ve profillerin yerel burkulma başlangıçları ve sistemin taşıma kapasiteleri bakımından karşılaştırılmıştır. Gövde levhalarının yerel burkulma başlangıçlarına ait eğriler, karşılaştırılmak amacıyla, toplu halde aşağıdaki Şekil 125'te verilmektedir.



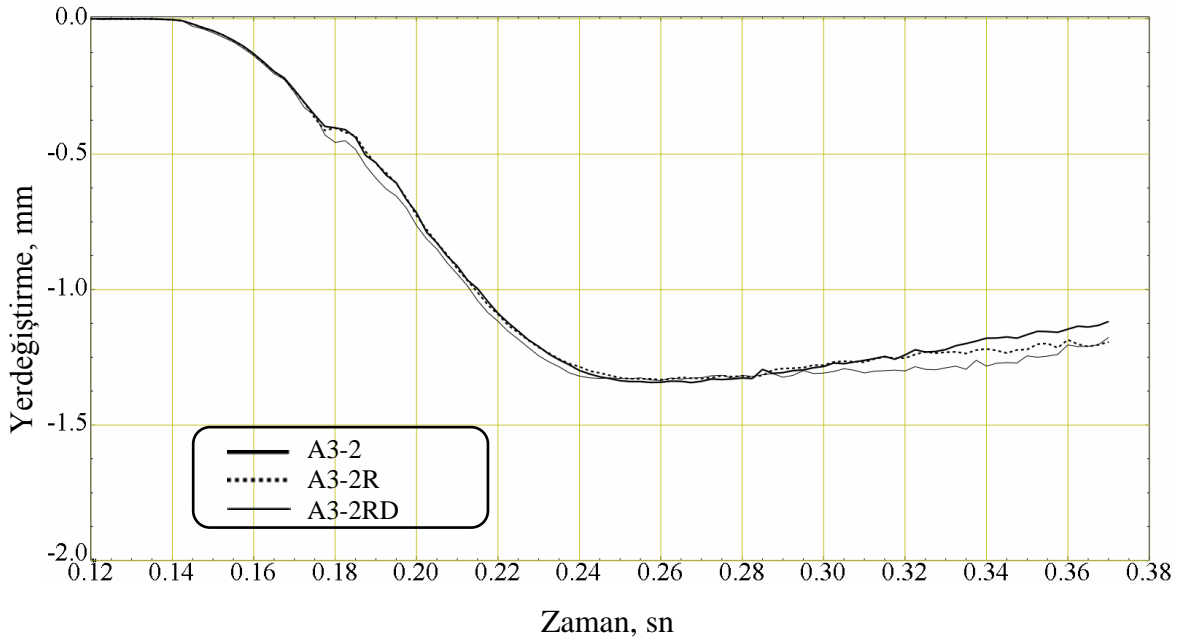
Şekil 125. Gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2, A3-2R, A3-2RD kodlu analizler için karşılaştırılması

Şekil 125'ten görüldüğü gibi ilave rijitleştirici levha bulunmayan A3-2 kodlu analizde gövde levhasındaki yerel burkulma 5 mm'den fazla olurken diğer analizlerde ise 1 mm'nin altında kalmaktadır. Başka bir deyişle, ilave rijitleştirici levha gövde levhasında meydana gelen yerel burkulmayı önemli ölçüde engellemiştir. Ayrıca, yerel burkulma başlangıçlarına karşılık gelen yük değerlerinin birbirine oldukça yakın ve yaklaşık 100 kN civarında olduğu görülmüştür (bkz. Şekil 92, Şekil 96 ve Şekil 100).

Üst başlık levhalarında ve profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının karşılaştırıldığı eğriler ise aşağıdaki Şekil 126 ve Şekil 127'de verilmektedir.



Şekil 126. Üst başlık levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2, A3-2R, A3-2RD kodlu analizler için karşılaştırılması

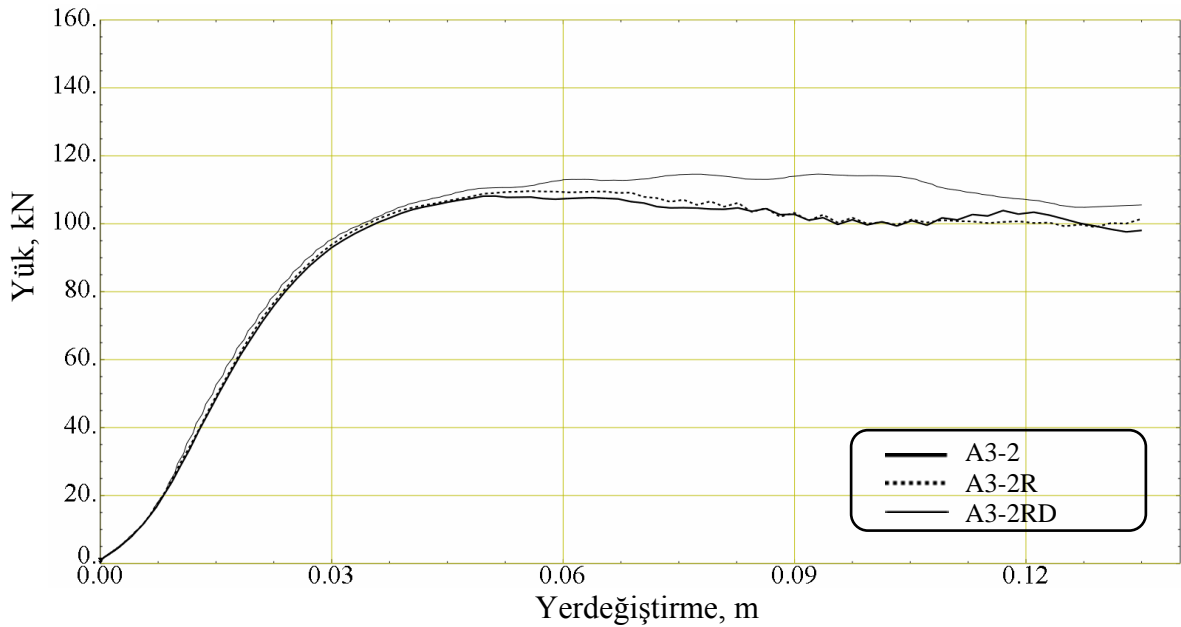


Şekil 127. Profilde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2, A3-2R, A3-2RD kodlu analizler için karşılaştırılması

Yukarıdaki Şekil 126'dan görüldüğü gibi, üst başlık levhalarında meydana gelen yerel burkulma başlangıçları A3-2 ve A3-2R analizlerinde birbirine oldukça yakın olup yaklaşık 110 kN'da (bkz. Şekil 112 ve Şekil 116), A3-2RD analizinde ise yaklaşık 15

kN'da (bkz. Şekil 120) meydana gelmiştir. Ancak, üst başlık levhasının dudaklı olduğu A3-2RD kodlu analiz sonucuna göre, yerel burkulma diğer analizlere göre oldukça erken başlamış ancak, en fazla 1 mm seviyesinde kalmıştır. Diğer iki analizde ise üst başlık levhalarındaki yerel burkulmalar; A3-2 kodlu analizde 15 mm'ye, A3-2R kodlu analizde ise 17 mm'ye kadar ilerlemiştir.

Profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının incelenmesinden, A3-2, A3-2R ve A3-2RD kodlu analizlerin üçünde de çok benzer davranış görülmektedir (bkz. Şekil 127). Zira, bundan sonraki analizlerde de profiller, yüklemeye en az etkilenen elemanlar olmuştur. Aşağıdaki Şekil 128'de ise bu üç analize ait yük-yerdeğiştirme eğrileri verilmektedir.

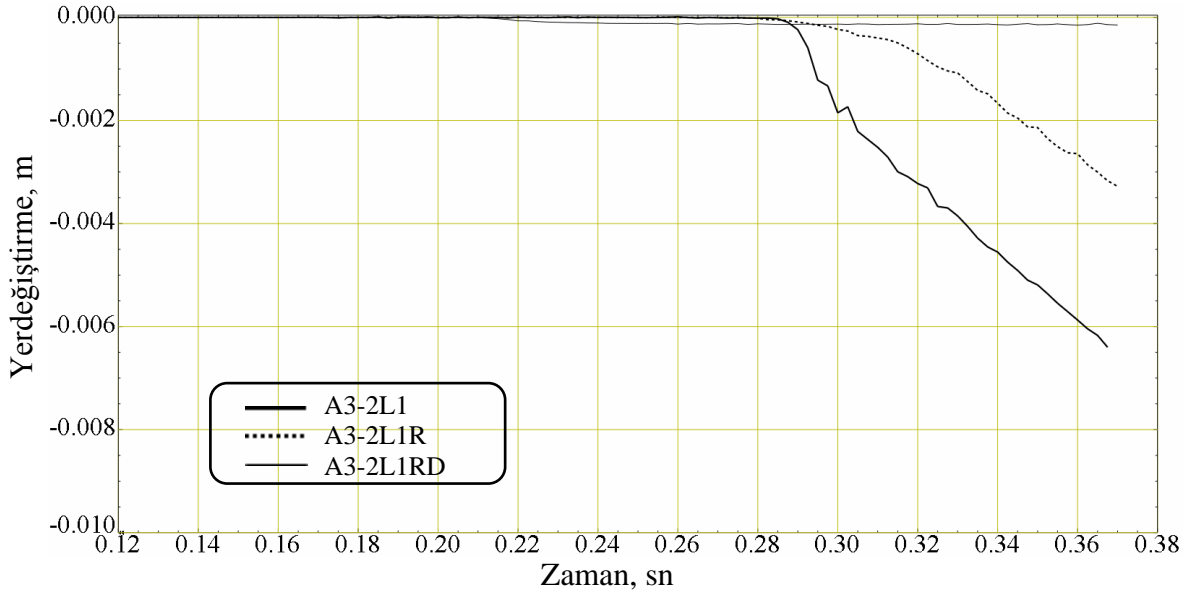


Şekil 128. A3-2, A3-2R ve A3-2RD kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 128'den görüldüğü gibi gövde levhasının yalnız ve ilave rijitleştirici levhali hallerinde sırasıyla maksimum 109 kN ve 110 kN kapasiteye ulaşılmış ve yük-yerdeğiştirme davranışları açısından hemen hemen hiçbir fark oluşmamıştır. Üst başlık levhasının dudaklı olduğu durumda ise diğer analizlere göre kapasitede yaklaşık %7'lik bir artış meydana gelerek 117.5 kN'a ulaşılmış ve analizin plastik aşamasında bu kapasite daha uzun süre korunmuştur.

3.6.2. Analiz A3-2L1, A3-2L1R ve A3-2L1RD'nin Karşılaştırılması

Beşinci grup analizlerin ikinci üçlü serisi olan ve profiller arası mesafenin 230 mm olduğu A3-L1, A3-2L1R ve A3-2L1RD kodlu analizlere göre gövde levhalarının ve üst başlık levhalarının yerel burkulma başlangıçlarına ait eğriler, karşılaştırılmak amacıyla, sırasıyla Şekil 129 ve Şekil 130'da verilmektedir.



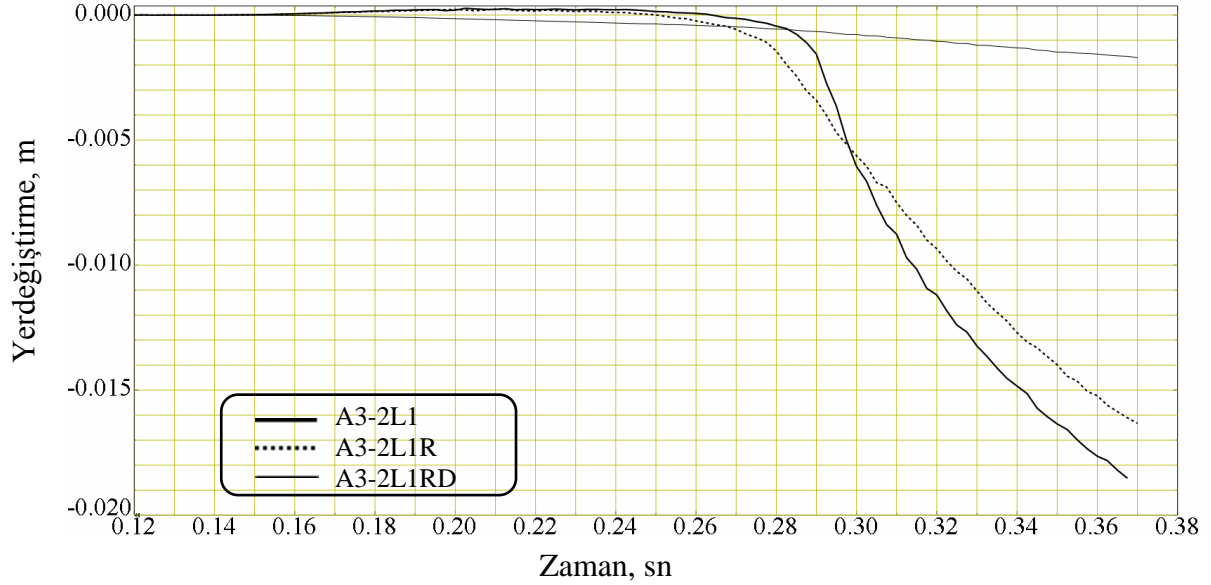
Şekil 129. Gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L1, A3-2L1R, A3-2L1RD kodlu analizler için karşılaştırılması

Şekil 129'dan görüldüğü gibi, ilave rijitleştirici levha bulunmayan A3-2L1 kodlu analizde gövde levhasındaki yerel burkulma 6 mm'den fazla olurken, A3-2L1R analizinde yaklaşık 3 mm'ye ulaşmıştır. Gövde levhasının rijitleştirici levhalı ve üst başlığın dudaklı olduğu A3-2L1RD kodlu analizde ise yerel burkulma 0.5 mm'nin altında kalmıştır.

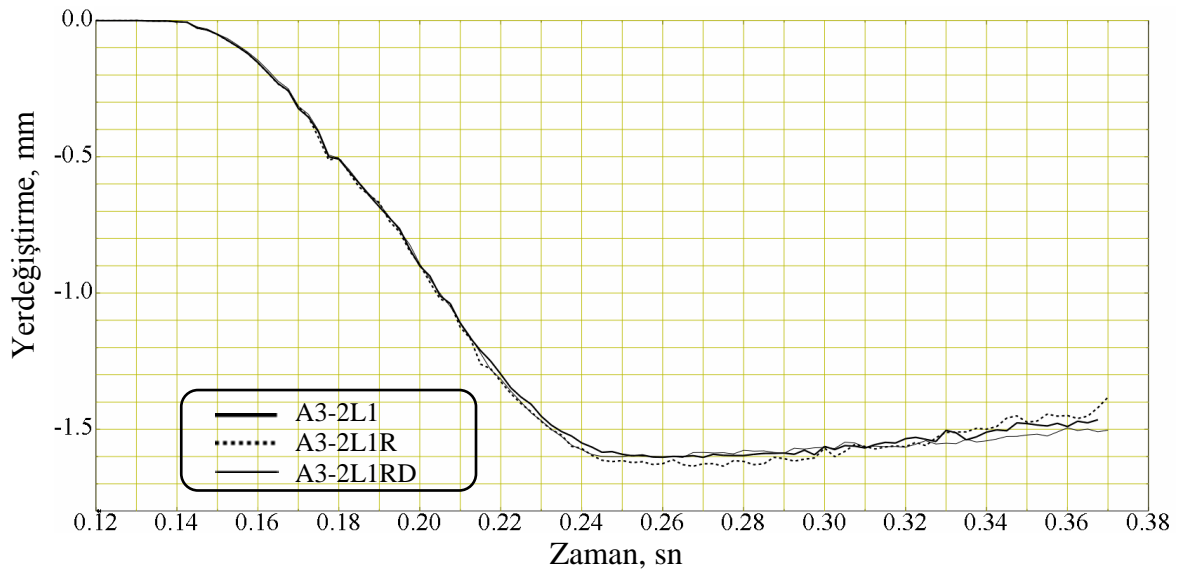
Üst başlıkta meydana gelen yerel burkulma başlangıçları A3-2L1 ve A3-2L1R kodlu analizlerde birbirine oldukça yakın olup yaklaşık 120 kN'da (bkz. Şekil 104 ve Şekil 108) ortaya çıkmış ve ortalama 17 mm'ye kadar artmıştır. Diğer taraftan, A3-2L1RD kodlu analizde ise yerel burkulma yaklaşık 15 kN'da (bkz. Şekil 112) başlamış ancak en fazla 2 mm'ye kadar ilerlemiştir (bkz. Şekil 130).

Profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının incelenmesinden, A3-2L1, A3-2L1R ve A3-2L1RD kodlu analizlerin üçünde de daha önceki analizlerde olduğu

gibi kendi aralarında çok benzer davranış görülmektedir. Profillerdeki yerel burkulma davranışı aşağıdaki Şekil 131’de verilmektedir.



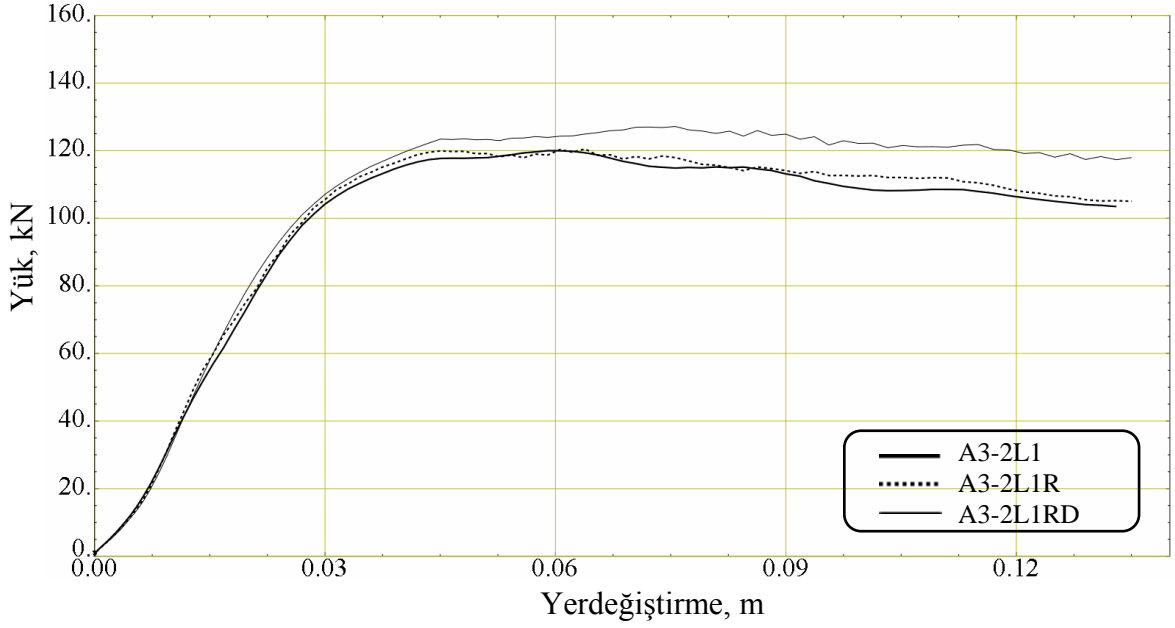
Şekil 130. Üst başlık levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L1, A3-2L1R, A3-2L1RD kodlu analizler için karşılaştırılması



Şekil 131. Profilde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L1, A3-2L1R, A3-2L1RD kodlu analizler için karşılaştırılması

Gövde levhasının yalın ve ilave rijitleştirici levhalı halleri arasında yük-yerdeğiştirme davranışı açısından, profiller arası mesafenin 350 mm olduğu durumdakine

benzer şekilde, hemen hemen hiçbir fark yoktur. Bu iki analizde ulaşılan maksimum kapasite ortalama 120 kN'dur. Üst başlık levhasının dudaklı olduğu durumda ise diğer analizlere göre taşıma kapasitesi yaklaşık %6 artarak 128 kN'a ulaşmış ve analizin plastik aşamasında bu kapasite daha uzun süre korunmuştur. Profiller arası mesafenin 230 mm olduğu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri aşağıdaki Şekil 132'de verilmektedir.

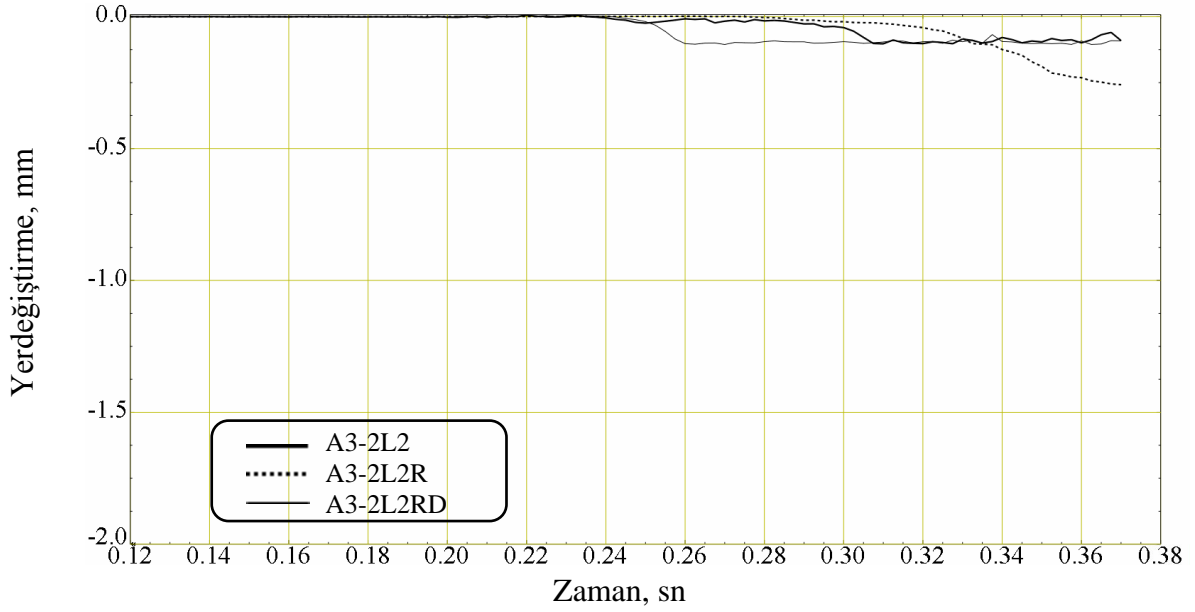


Şekil 132. A3-2L1, A3-2L1R ve A3-2L1RD analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

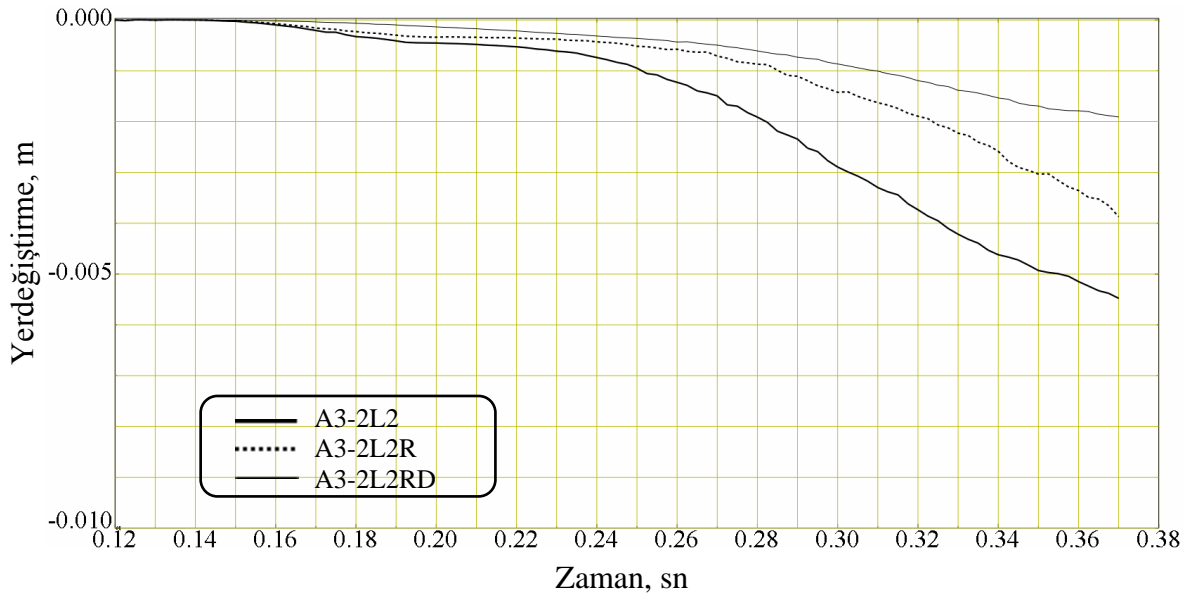
3.6.3. Analiz A3-L2, A3-2L2R ve A3-2L2RD'nin Karşılaştırılması

Beşinci grup analizlerin üçüncü serisi olan ve profiller arası mesafenin 130 mm olduğu A3-L2, A3-2L2R ve A3-2L2RD kodlu analizlere göre gövde levhalarının ve üst başlık levhalarının yerel burkulma başlangıçlarına ait eğriler, karşılaştırmak amacıyla, aşağıdaki Şekil 133 ve Şekil 134'te sırasıyla verilmektedir.

Şekil 133'ten görüldüğü gibi, gövde levhasının yalın ve ilave rijitleştirici levhalı olduğu analizler ile üst başlık levhasının dudaklı olduğu analizler arasında gövde levhalarının yerel burkulma davranışları açısından önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Zira, oluşan en büyük yerel burkulma miktarı 0.3 mm seviyesinde kalmıştır.



Şekil 133. Gövde levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD kodlu analizler için karşılaştırılması



Şekil 134. Üst başlık levhasında meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD kodlu analizler için karşılaştırılması

Şekil 134'te verilen üst başlık yerel burkulma davranışlarının karşılaştırılmasından yerel burkulmaların analizlerin yaklaşık 0.14'üncü saniyesinde başladığı, bunun da Şekil 116, Şekil 120 ve Şekil 124'e göre ortalama 10 kN'luk düşey yüke karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Gövde levhasının yalın ve ilave rijitleştirici levhalı olduğu analizler ile üst

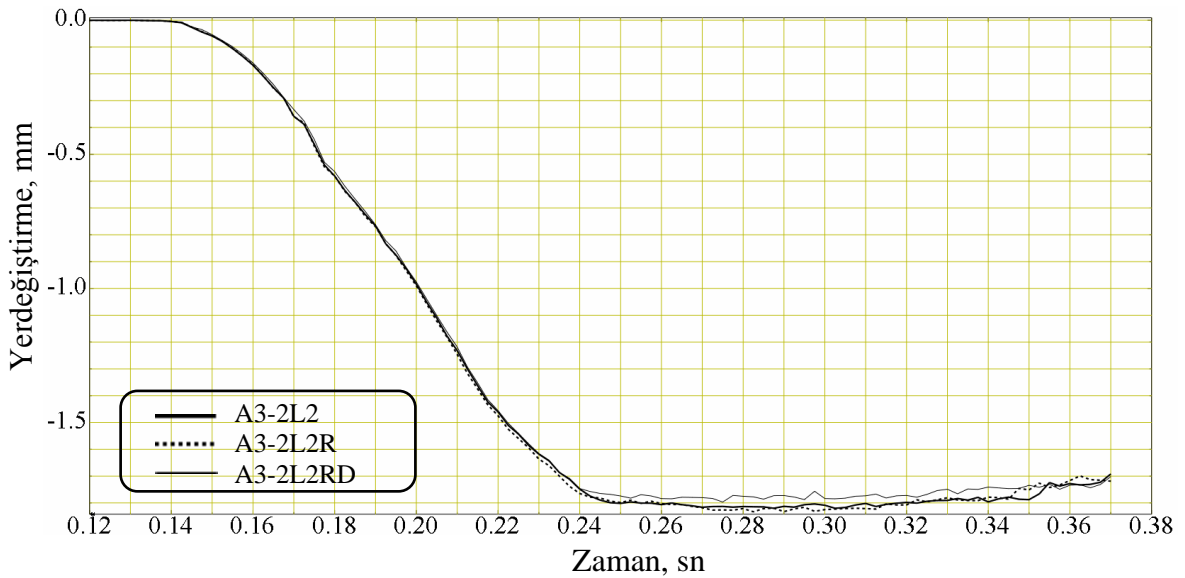
başlık levhasının dudaklı olduğu analizlerde ortaya çıkan maksimum yerel burkulmalar sırasıyla 2 mm, 4 mm ve 5.5 mm olmuştur.

Profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının incelenmesinden, A3-2L2, A3-2L2R ve A3-2L2RD kodlu analizlerin üçünde de daha önceki analizlerde olduğu gibi kendi aralarında çok benzer davranış görülmektedir. Profillerdeki yerel burkulma davranışı aşağıdaki Şekil 135'te verilmektedir.

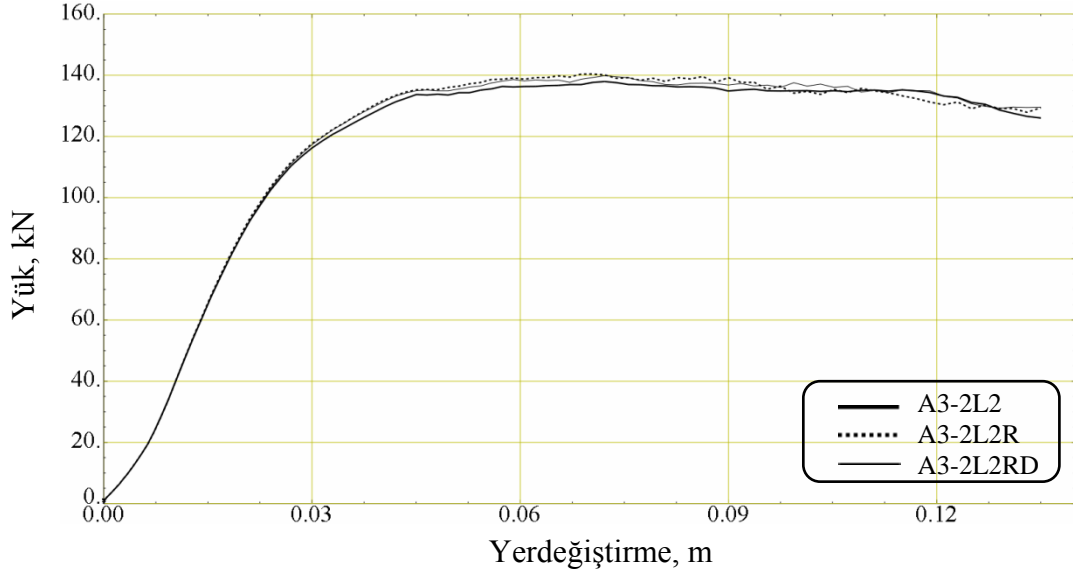
Gövde levhasının yalın ve ilave rijitleştirici levhalı halleri arasında yük-yerdeğiştirme davranışı açısından, profiller arası mesafenin 350 mm ve 230 mm olduğu durumdakilere benzer şekilde, hemen hemen hiçbir fark meydana gelmemiştir.

Her üç analizde de maksimum taşıma kapasitesi yaklaşık 138 kN'a ulaşmıştır. Bu durum aşağıdaki Şekil 136'da görülmektedir.

Üst başlık levhasının dudaklı olduğu durumda önceki analizlerde ortaya çıkan kapasite artışı bu seride oluşmamıştır. Bunun nedeninin, profiller arası mesafenin çok azalmış olmasından dolayı gövde levhasının yalın ve ilave rijitleştirici hallerindeki yerel burkulmaların oldukça azalması ve böylece üst başlık levhasının dudaklı olduğu hal ile aynı kapasiteye ulaşması olduğu söylenebilir.



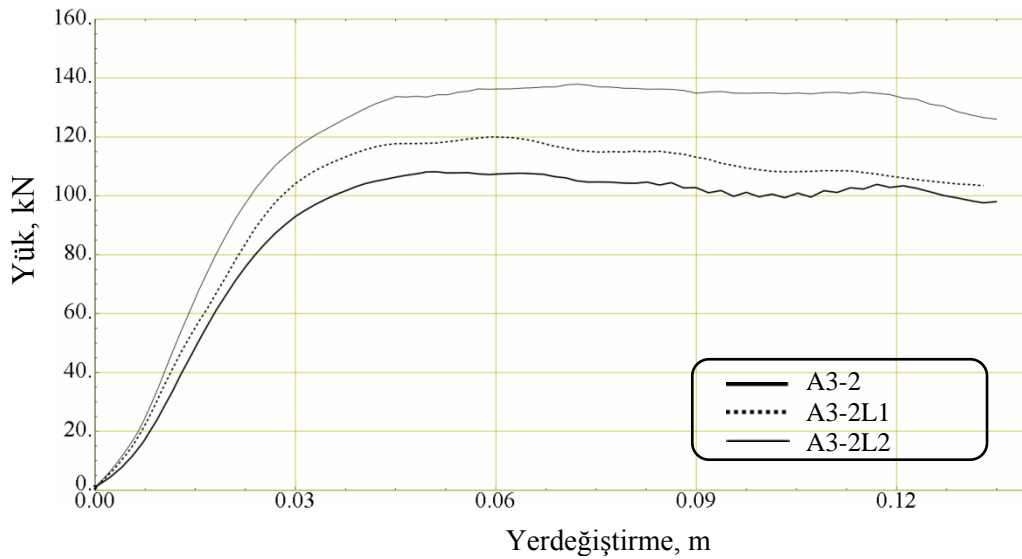
Şekil 135. Profillerde meydana gelen yerel burkulma başlangıçlarının A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD kodlu analizler için karşılaştırılması



Şekil 136. A3-2L2, A3-2L2R, A3-2L2RD analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

3.6.4. Analiz A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2'nin Karşılaştırılması

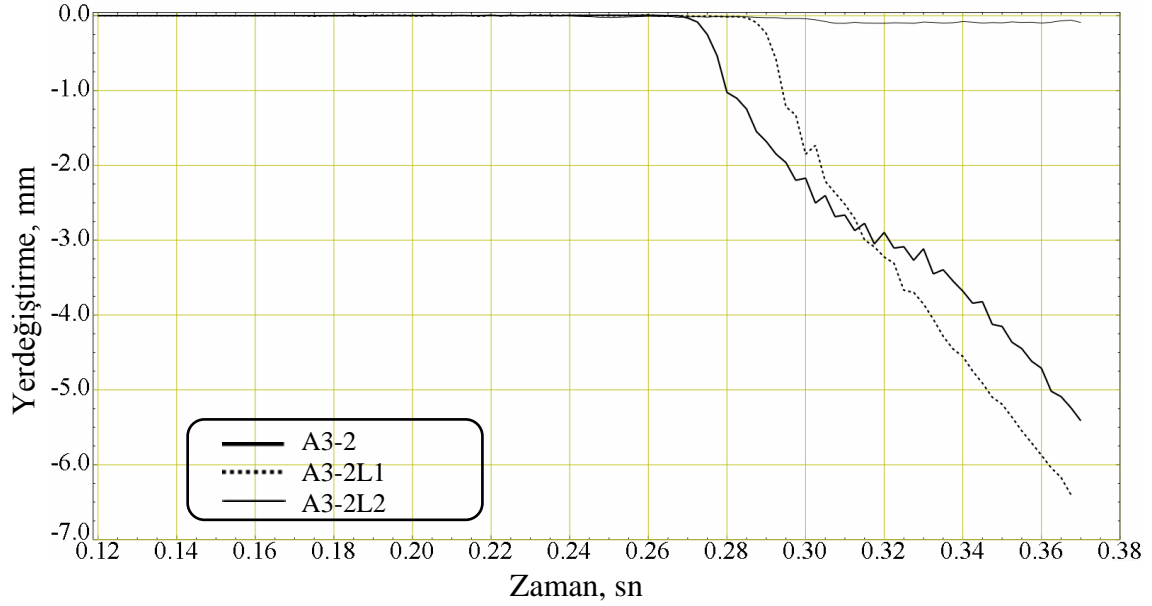
Bu başlık altında beşinci grup analizlerin yalın hallerine ait karşılaştırmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, gövde levhasında, üst başlık levhasında ve profillerde meydana gelen yerel burkulmalar ve sistemin yük-yerdeğiştirme davranışları profiller arası mesafenin 350 mm, 230 mm ve 130 mm olduğu durumlar için karşılaştırılmaktadır. A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 137'de verilmektedir.



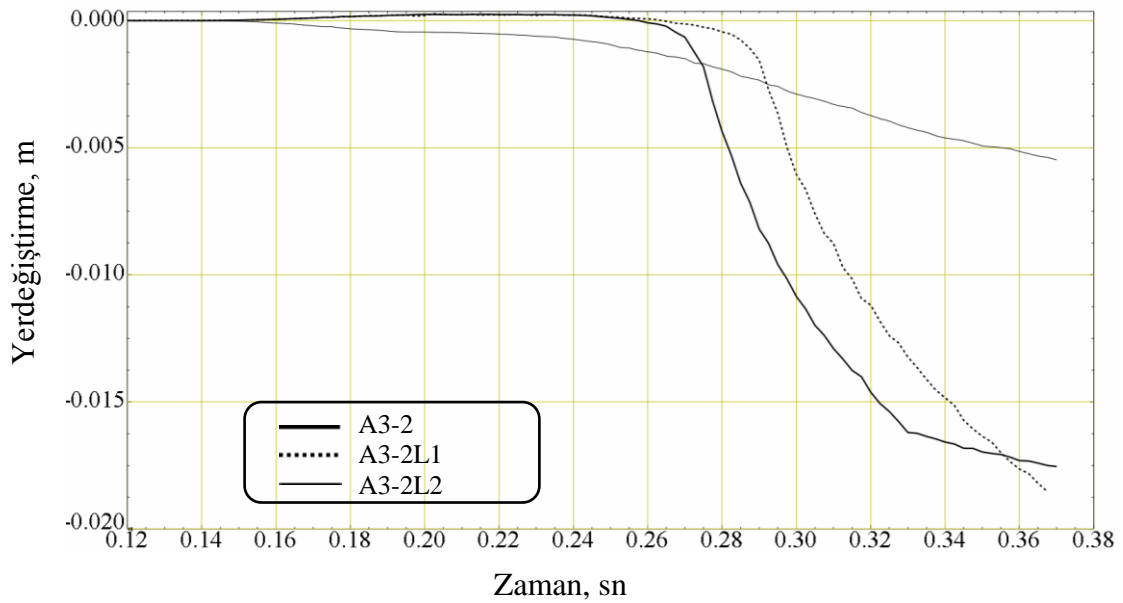
Şekil 137. A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

Gövde levhası, üst başlık levhası ve profillerin yerel burkulmalarının karşılaştırıldığı eğriler ise sırasıyla Şekil 138, Şekil 139 ve Şekil 140’da verilmektedir.

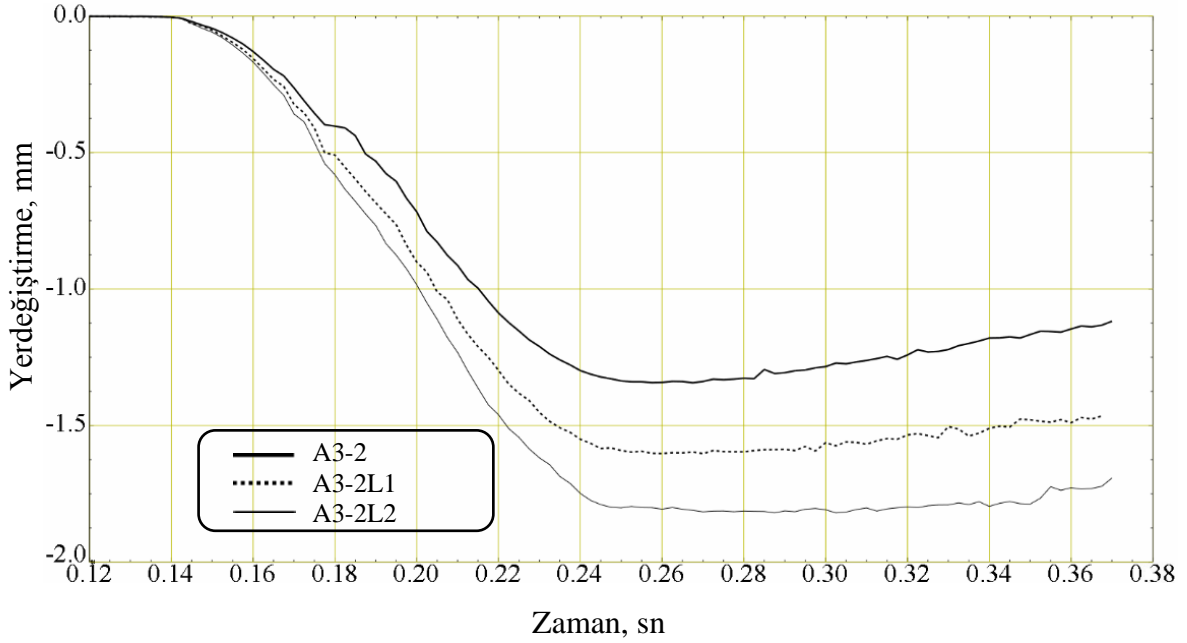
Yukarıdaki Şekil 137’ye göre profiller arası mesafenin 230 mm ve 130 mm olan modellerin taşıma kapasiteleri, aynı mesafenin 350 mm olduğu modelin kapasitesinden sırasıyla yaklaşık %10 ve % 27 oranında daha fazla olmuştur.



Şekil 138. Gövde levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi



Şekil 139. Üst başlık levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi



Şekil 140. Profillerde oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi

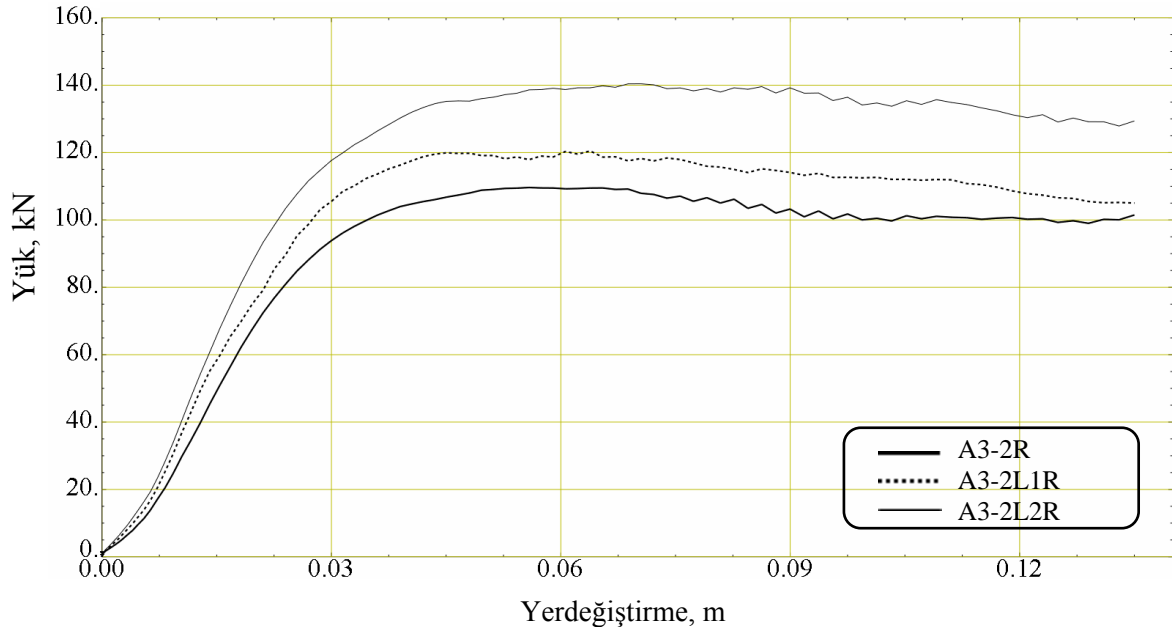
Gövde levhalarındaki yerel burkulmaların karşılaştırıldığı Şekil 138'den, profiller arası mesafe kısaltıldıkça yerel burkulma başlangıçlarının da geciktiği görülmektedir. Bu gecikmenin yanında, profiller arası mesafenin 350 mm ve 230 mm olduğu modellerde gövde levhası sırasıyla 5.5 mm ve 6.5 mm düzlem dışı yerdeğiştirme yaparken, profiller arası mesafenin 130 mm olduğu modeldeki gövde levhası sadece 0.1 mm'lik düzlem dışı yerdeğiştirme yapmıştır. Bu da, profiller arası mesafenin 130 mm olması durumunda söz konusu yalın modelin gövde levhasında yerel burkulma ortaya çıkmayacağını göstermektedir.

Üst başlık levhalarının davranışının incelendiği Şekil 139'a göre, profiller arası mesafenin 130 mm'ye inmesi ile bu elemandaki yerel burkulma miktarı diğerlerine göre 4 kat daha az olmaktadır. Bununla birlikte, profiller arası mesafenin 130 mm olduğu modelin üst başlığının yerel burkulma davranışında diğer modellerdeki gibi keskinlikler oluşmamıştır.

Profiller arası mesafenin azalmasıyla, profillerdeki zorlanma artmaktadır. Bu durum profillerin yerel burkulmalarının karşılaştırıldığı Şekil 140'da da görülmektedir. Zira, profiller arası mesafe azaldıkça profil gövdesindeki düzlem dışı yerdeğiştirme artmaktadır. Ancak, bu artış en fazla 1.8 mm'ye kadar ulaşmaktadır.

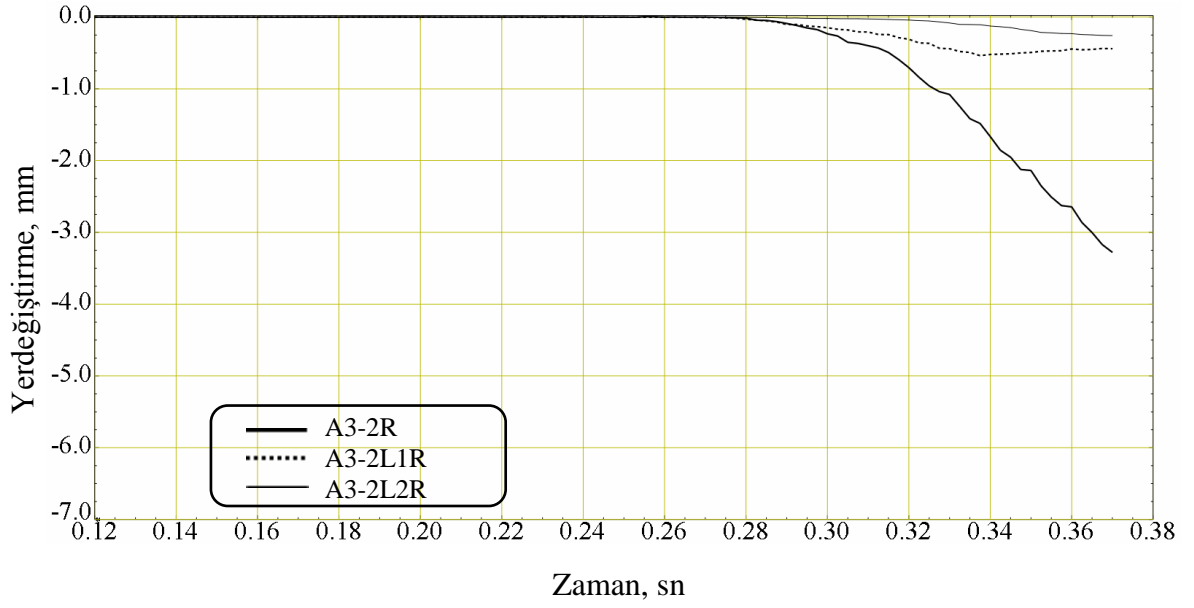
3.6.5. Analiz A3-2R, A3-2L1R ve A3-2L2R'nin Karşılaştırılması

Bu başlık altında beşinci grup analizlerin gövde levhalarında ilave rijitleştirici bulunduğu hallerine ait karşılaştırmalar yapılmaktadır. Gövde levhasında, üst başlık levhasında ve profillerde meydana gelen yerel burkulmalar ve sistemin yük-yerdeğiştirme davranışları profiller arası mesafenin 350 mm, 230 mm ve 130 mm olduğu durumlar için karşılaştırılmaktadır. A3-2R, A3-2L1R ve A3-2L2R kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 141'de verilmektedir. Gövde levhası, üst başlık levhası ve profillerin yerel burkulmalarının karşılaştırıldığı eğriler ise sırasıyla Şekil 142, Şekil 143 ve Şekil 144'te verilmektedir.

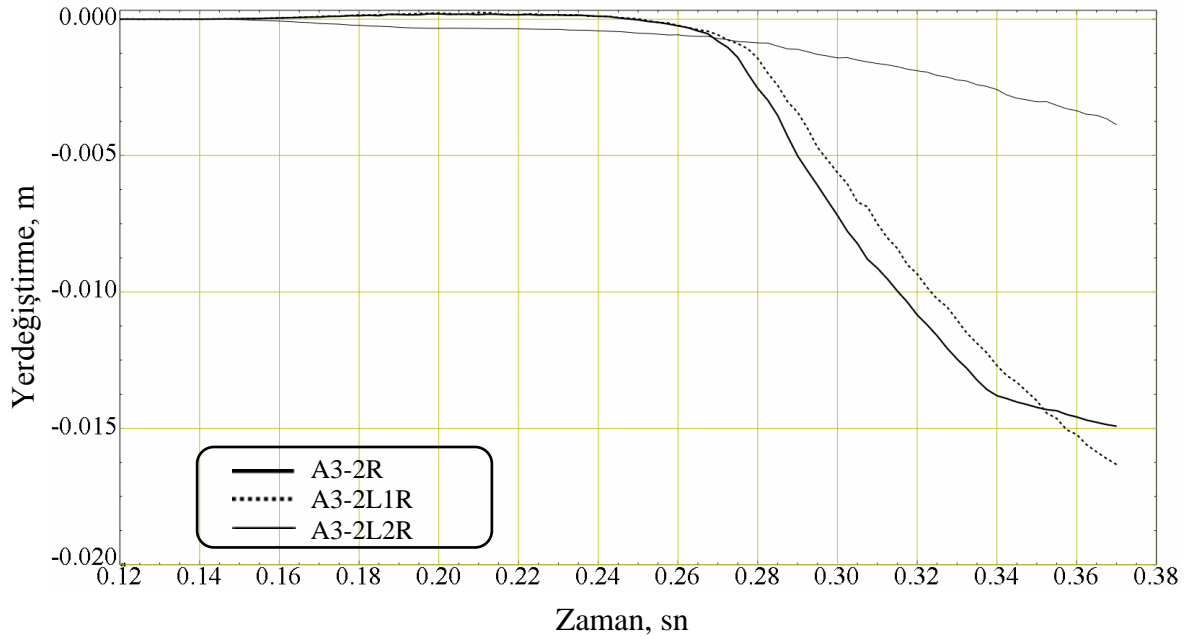


Şekil 141. A3-2R, A3-2L1R ve A3-2L2R analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

Yukarıdaki Şekil 141'e göre profiller arası mesafesi 230 mm ve 130 mm olan, ayrıca gövde levhasında ilave rijitleştirici bulunan modellerin taşıma kapasiteleri, aynı mesafenin 350 mm olduğu modelin kapasitesinden, A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 analiz sonuçlarındaki ilişkiye benzer şekilde, sırasıyla yaklaşık % 9 ve % 27 oranında daha fazla olmuştur. A3-2R kodlu analiz sonucunda maksimum taşıma kapasitesi 110 kN olurken, A3-2L1R ve A3-2L2R kodlu analizlerde ise sırasıyla 120 kN ve 140 kN olarak elde edilmiştir.



Şekil 142. Gövde levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi



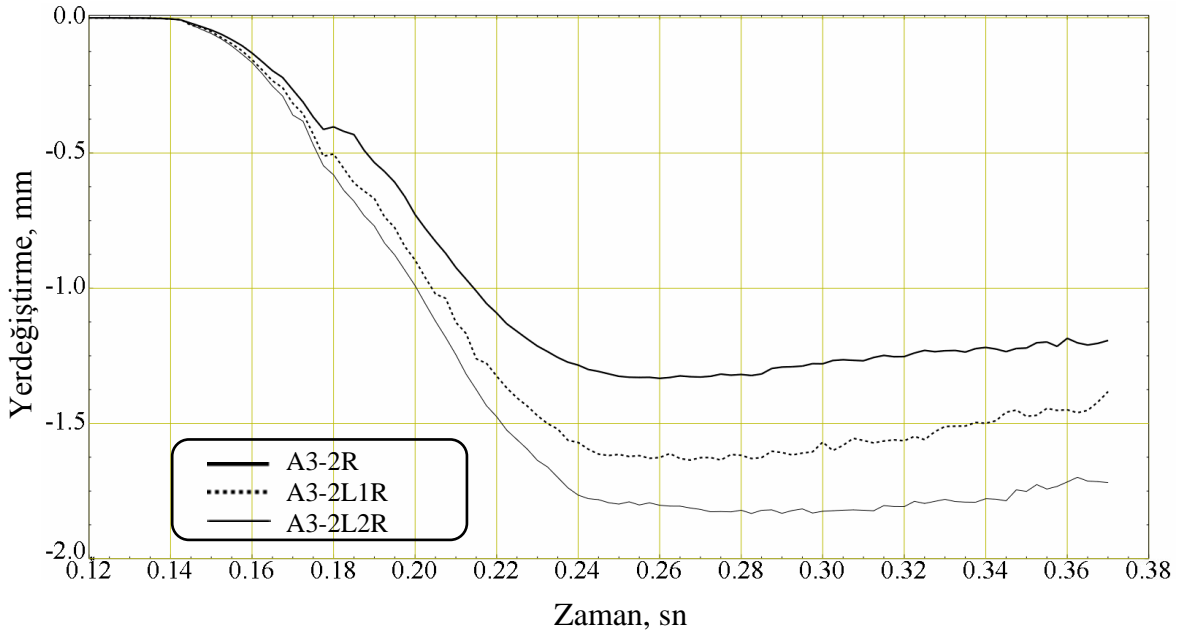
Şekil 143. Üst başlık levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi

Gövde levhalarındaki yerel burkulmaların karşılaştırıldığı Şekil 142'den, profiller arası mesafe kısaldıkça yerel burkulma başlangıçlarının, A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 analiz sonuçlarının aksine, gecikmediği görülmektedir. Bunun yanında, profiller arası mesafenin 350 mm olduğu modelde gövde levhası analiz sonunda 3.5 mm düzlem dışı yerdeğiştirme

yaparken, profiller arası mesafenin 230 mm ve 130 mm olduğu modeldeki gövde levhası sadece yaklaşık 0.5 mm'lik düzlem dışı yerdeğiştirme yapmıştır. Bu kadar az miktarda düzlem dışı yerdeğiştirme yapan A3-2L1R ve A3-2L2R kodlu analizlerin ait olduğu modeller, profiller arası mesafenin 350 mm olduğu modelle karşılaştırıldığında, bu modellerdeki gövde levhalarının yerel burkulma yapmayacağını söylemek mümkündür.

Üst başlık levhalarının yerel burkulma davranışının incelendiği Şekil 143'e göre, profiller arası mesafenin 350 mm'den 130 mm'ye inmesi ile bu elemandaki yerel burkulma miktarı da yaklaşık 15 mm'den 4 mm'ye kadar azalmıştır. Ayrıca, profiller arası mesafenin 130 mm olduğu modelin üst başlığının yerel burkulması diğer modellerdekinin aksine daha yumuşak bir şekilde gelişmiştir (bkz. Şekil 143).

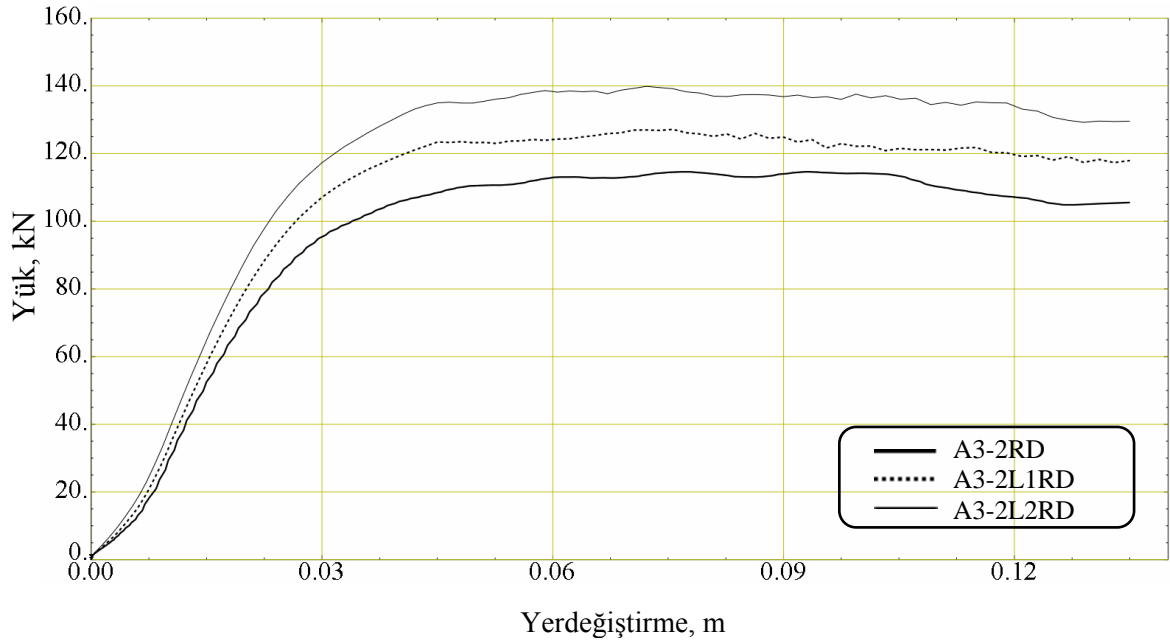
Profiller arası mesafenin azalmasıyla, profillerdeki zorlanma, daha önce A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 kodlu analiz sonuçlarında olduğu gibi, bu analizlerde de artmaktadır. Bu durum profillerin yerel burkulmalarının karşılaştırıldığı Şekil 144'te görülmektedir. Profiller arası mesafe azaldıkça, söz konusu zorlanma ile birlikte profil gövdesindeki düzlem dışı yerdeğiştirme de artmakta ancak, bu artış en fazla 1.8 mm'ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 144. Profillerde oluşan yerel burkulma davranışının profiller arası mesafe ile ilişkisi

3.6.6. Analiz A3-2RD, A3-2L1RD ve A3-2L2RD'nin Karşılaştırılması

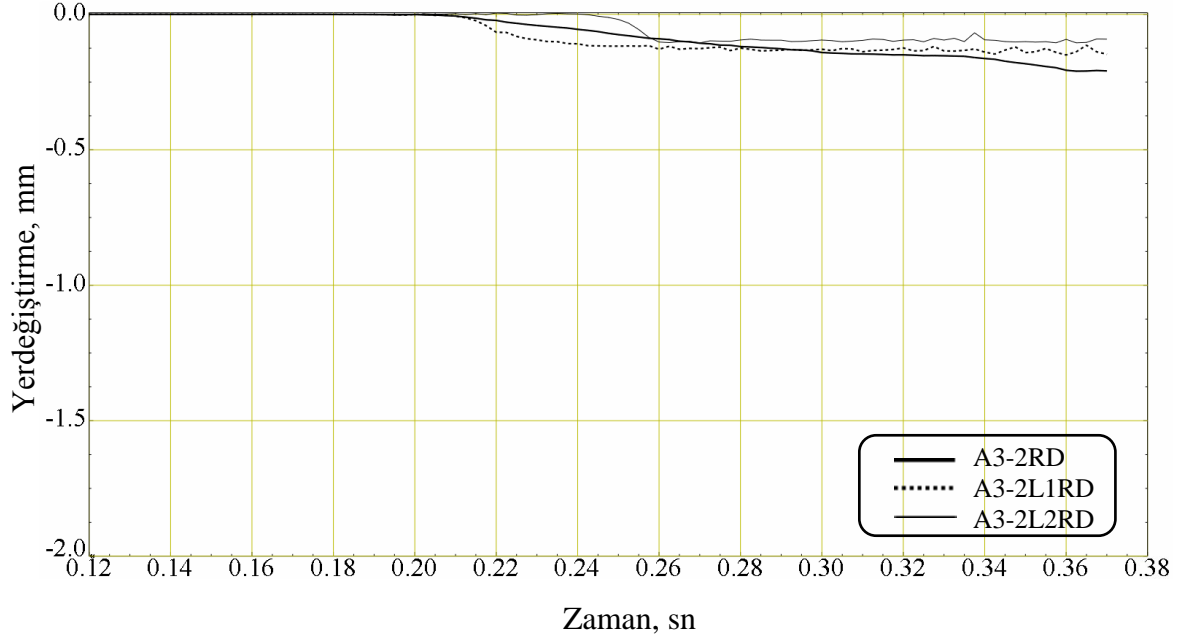
Bu başlık altında beşinci grup analizlerin gövde levhalarında ilave rijitleştirici bulunduğu ve üst başlığın dudaklı olduğu modellerin analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Bu kapsamda, gövde levhası, üst başlık levhası ve profillerde meydana gelen yerel burkulmalar ve sistemin yük-yerdeğiştirme davranışları profiller arası mesafenin 350 mm, 230 mm ve 130 mm olduğu durumlar için karşılaştırılmaktadır. A3-2RD, A3-2L1RD ve A3-2L2RD kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 145'te verilmektedir. Gövde levhası, üst başlık levhası ve profillerin yerel burkulmalarının karşılaştırıldığı eğriler ise sırasıyla Şekil 146, Şekil 147 ve Şekil 148'de verilmektedir.



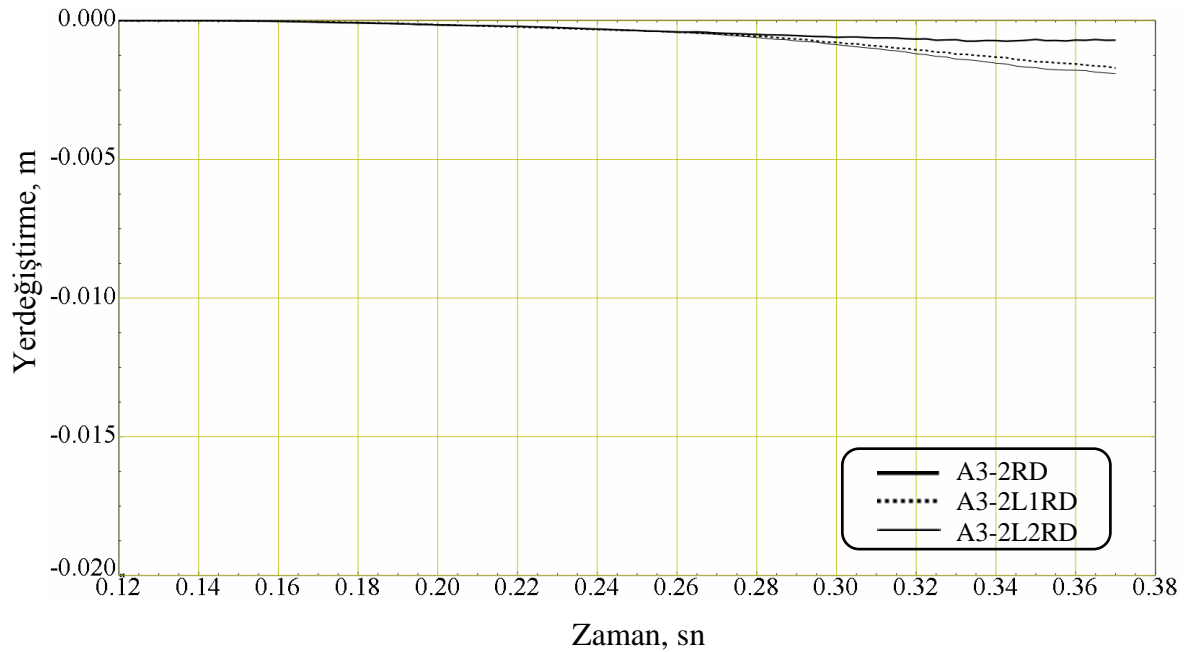
Şekil 145. A3-2RD, A3-2L1RD ve A3-2L2RD analizlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

Yukarıdaki Şekil 145'e göre profiller arası mesafesi 230 mm ve 130 mm olan, ayrıca gövde levhasında ilave rijitleştirici bulunduğu, üst başlık levhasının ise dudaklı olduğu modellerin taşıma kapasiteleri, aynı mesafenin 350 mm olduğu modelin kapasitesinden, A3-2, A3-2L1, A3-2L2 ile A3-2R, A3-2L1R, A3-2L2R analiz sonuçlarındaki ilişkiye benzer şekilde, sırasıyla yaklaşık % 10 ve % 22 oranında daha fazla olmuştur. Şekil 145'te görüldüğü gibi A3-2RD kodlu analiz sonucunda ulaşılan maksimum taşıma kapasitesi

115 kN olurken, A3-2L1R kodlu analizde 127.5 kN, A3-2L2R kodlu analizde ise 140 kN olmuştur.



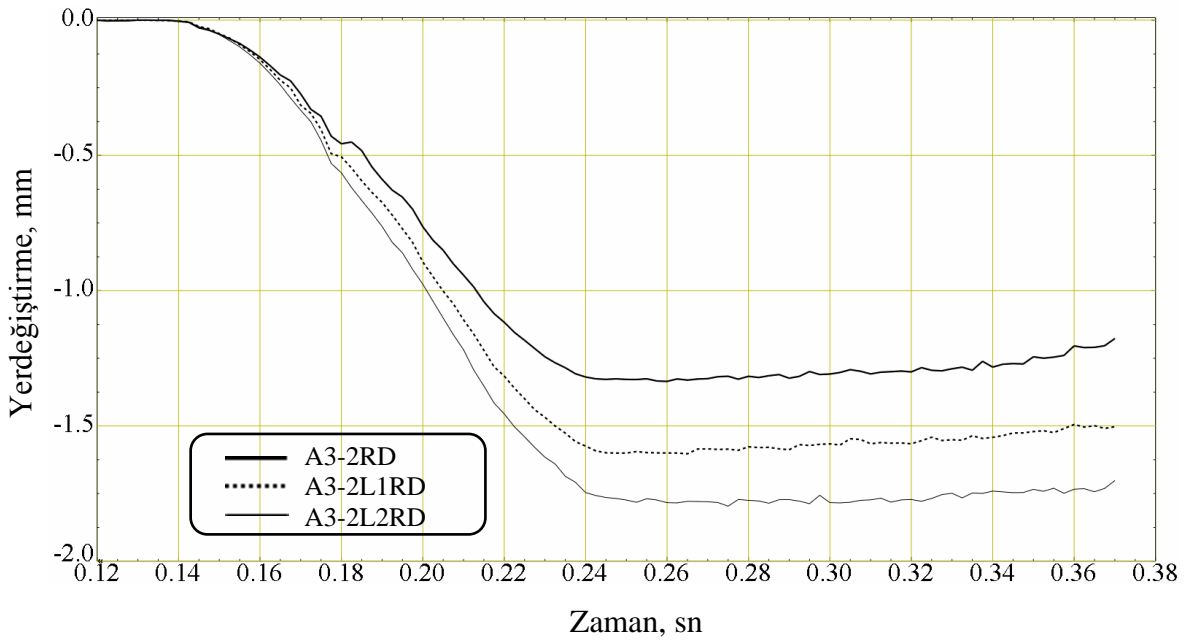
Şekil 146. Gövde levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi



Şekil 147. Üst başlık levhasında oluşan yerel burkulmanın profiller arası mesafe ile ilişkisi

Gövde levhalarındaki yerel burkulmaların karşılaştırıldığı Şekil 145'ten, profiller arası mesafenin değişiminin, gövde levhasında ilave rijitleştirici bulunduğu ve üst başlık levhasının dudaklı olduğu modellerin sonuçları üzerinde, önemli bir etki yapmadığı görülmektedir. Profiller arası mesafenin 350 mm, 230 mm ve 130 mm olduğu modellerin üçünde de gövde levhalarında meydana gelen yerel burkulmalar en fazla 0.2 mm'ye ulaşmıştır. Önceki modellerin gövde levhalarındaki düzlem dışı yerdeğiştirmelerle karşılaştırıldığında, oldukça düşük bir seviyede kalan bu yerel burkulmalar, bu modellerin gövde levhalarının yerel burkulma yapmayacağı söylenebilir.

Üst başlık levhalarının davranışının incelendiği Şekil 147'ye göre, profiller arası mesafenin değişimi üst başlık levhalarının burkulma davranışını etkilemediği, ayrıca her üç modele ait üst başlık levhasında en fazla 0.2 mm'lik yerel burkulma olduğu görülmektedir.



Şekil 148. Profillerde oluşan yerel burkulma davranışının profiller arası mesafe ile ilişkisi

Profiller arası mesafenin azalması, daha önce A3-2, A3-2L1 ve A3-2L2 kodlu analiz sonuçlarında da olduğu gibi, profil gövdelerinde meydana gelen düzlem dışı yerdeğiştirmelerin artmasına neden olmaktadır. Ancak, bu artış en fazla 1.8 mm'ye kadar ulaşmaktadır. Bu durum profillerin yerel burkulmalarının karşılaştırıldığı Şekil 148'de de görülmektedir.

Beşinci grup analiz sonuçlarına göre, yerel burkulmaları başlatan yükler ve ulaşılan kapasite değerleri ile bu yüklerin kapasiteye oranı, aşağıdaki Tablo 4’te verilmektedir.

Tablo 4. Analizlerdeki yerel burkulma başlangıçları ve kapasite değerleri

Analiz kodu	Yerel burkulmayı başlatan yaklaşık yük, F_L (kN)			Ulaşılan kapasite, F_O (kN)	Yerel burkulmayı başlatan yükün ulaşılan kapasiteye oranı $(F_L / F_O) * 100$ (%)		
	Gövde levhası	Üst başlık levhası	Profil gövdesi		Gövde levhası	Üst başlık levhası	Profil gövdesi
A3-2	110	110	10	110	100	100	9.0
A3-2R	108	108	9	110	98	98	9.0
A3-2RD	73	63	9	115	64	55	8.7
A3-2L1	120	120	10	120	100	100	8.3
A3-2L1R	120	120	11	120	100	100	8.3
A3-2L1RD	105	25	10	127.5	82.3	19.6	7.8
A3-2L2	135	12	11	137.5	98.2	8.7	7.2
A3-2L2R	140	25	11	140	100	17.8	7.1
A3-2L2RD	136	28	9	140	97	20	7.1

Bu tablodan öncelikle profil gövdesinde başlayan yerel burkulmaların, ulaşılan düşey yük taşıma kapasitesinin ortalama %8’i gibi düşük bir yüzdesinde ortaya çıktığı görülmektedir. Profil gövdelerinde diğer elemanlardan çok daha önce başlayan yerel burkulmalar, önceki başlıklar altında verilen, her bir analizin profil gövdesiyle ilgili yerdeğiştirme-zaman eğrilerinden de görüleceği gibi, oldukça düşük düzeylerde kalmıştır. Yine Tablo 4’e göre, profiller arası mesafe azaldıkça profillerdeki yerel burkulma başlangıçları, sistemin kapasitesinin daha düşük bir yüzdesinde ortaya çıkmaktadır. Profiller arası mesafenin değişiminin etkisinin karşılaştırıldığı önceki başlıklar ve Tablo 4 birlikte değerlendirildiğinde, bu durumun, profiller arası mesafenin azalmasının gövde levhasının yerel burkulma direncini artırıcı yönde etki yapması sonucunda profillerin gövde levhasına göre nispeten zayıflamaya başlaması olarak açıklanabilir.

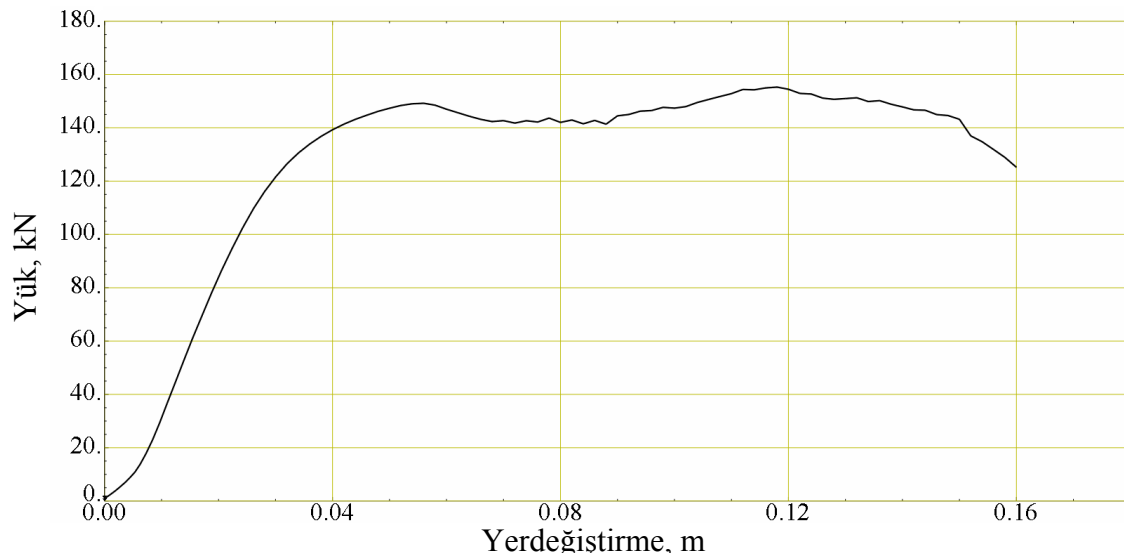
Gövde levhasındaki yerel burkulmalar genellikle kapasite civarında başlamaktadır. Üst başlık levhasında ise profiller arası mesafenin en düşük değeri olan 130 mm’de diğer analizlere göre kapasitenin çok daha düşük bir yüzdesinde başlamıştır.

3.7. Altıncı Grup Analiz Sonuçları

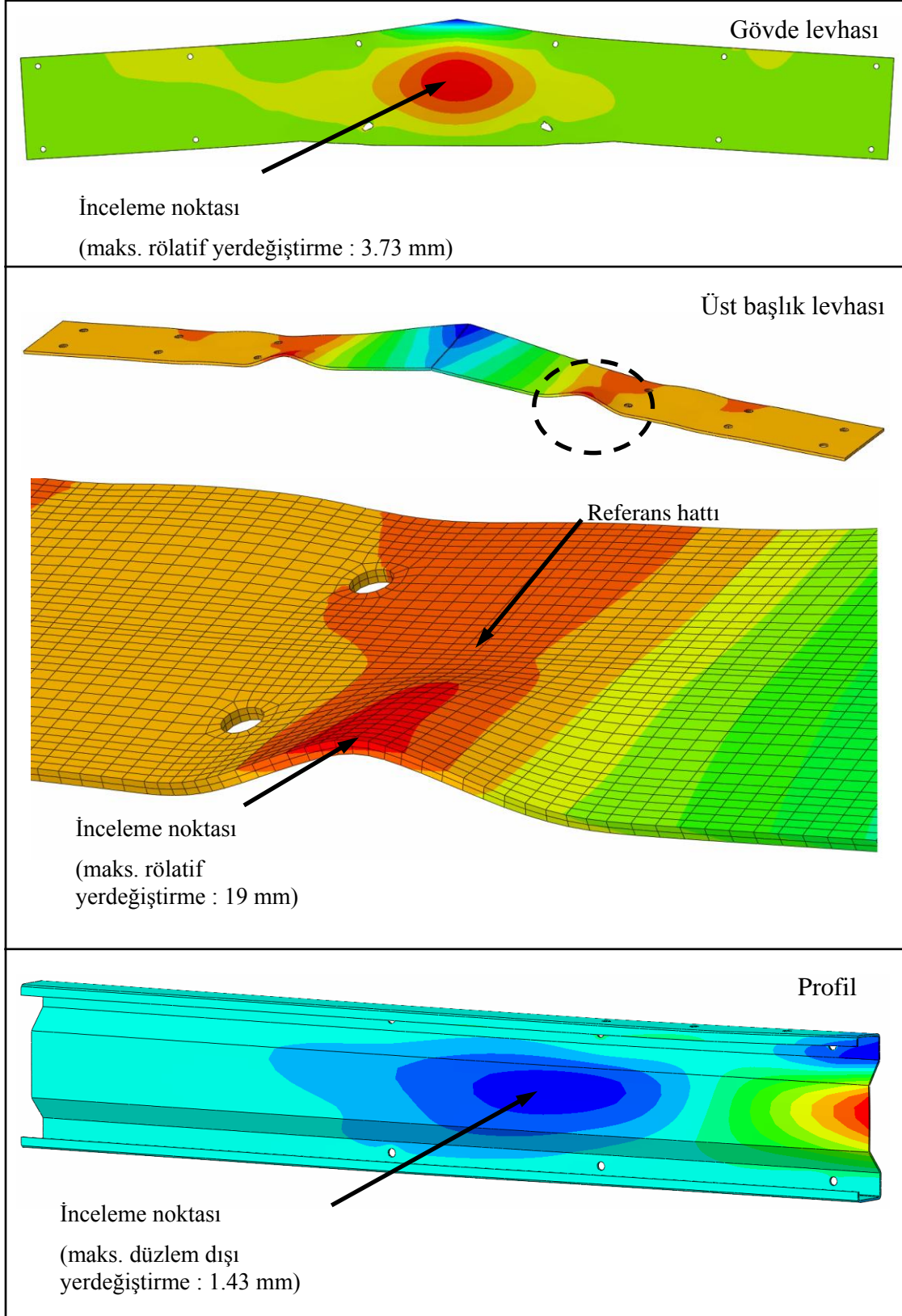
Yukarıdaki Madde 3.5'te verilen beşinci grup analizler başlığı altında; birleşim levhasının yalın hali, ilave rijitleştirici levhalı hali ve üst başlığın dudaklı olması hali için verilen analiz sonuçları, sigma profiller arası mesafenin 350 mm, 230 mm ve 130 mm olması durumları için de tekrarlanmıştır. Bu başlık altında ise, gövde levhası kalınlığındaki değişimin yerel burkulma davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, profiller arası mesafe 350 mm alınarak, gövde levhası kalınlığının 6 mm, 8 mm ve 10 mm olduğu modeller üzerinde gerçekleştirilmiş olan analiz sonuçları sunulmaktadır. Gövde levhası kalınlığındaki artışın yerel burkulma direncini artırması beklenen bir durum olduğundan, yerel burkulma gelişimlerini daha iyi görebilmek için, öncekilerden farklı olarak, analizlerdeki yükleme 0.12 m yerine 0.16 m'lik toplam düşey yerdeğiştirme değerine kadar devam ettirilmiştir.

3.7.1. Analiz A3-2T6

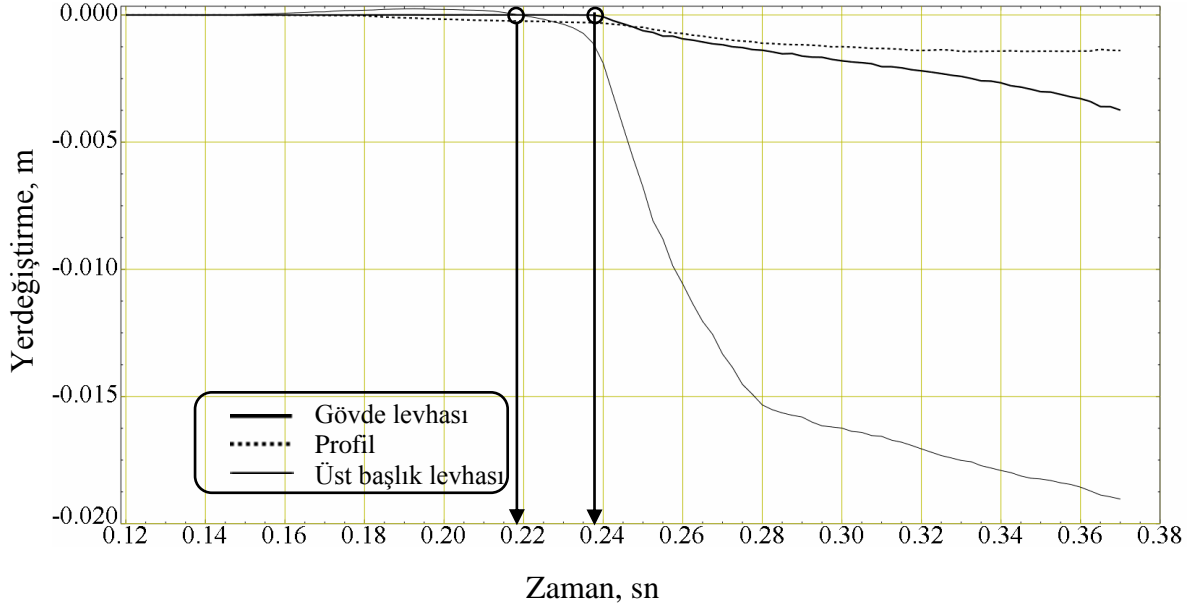
Gövde levhası kalınlığının 6 mm olduğu A3-2T6 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 149'da, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise Şekil 150 ve Şekil 151'de verilmektedir.



Şekil 149. A3-2T6 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

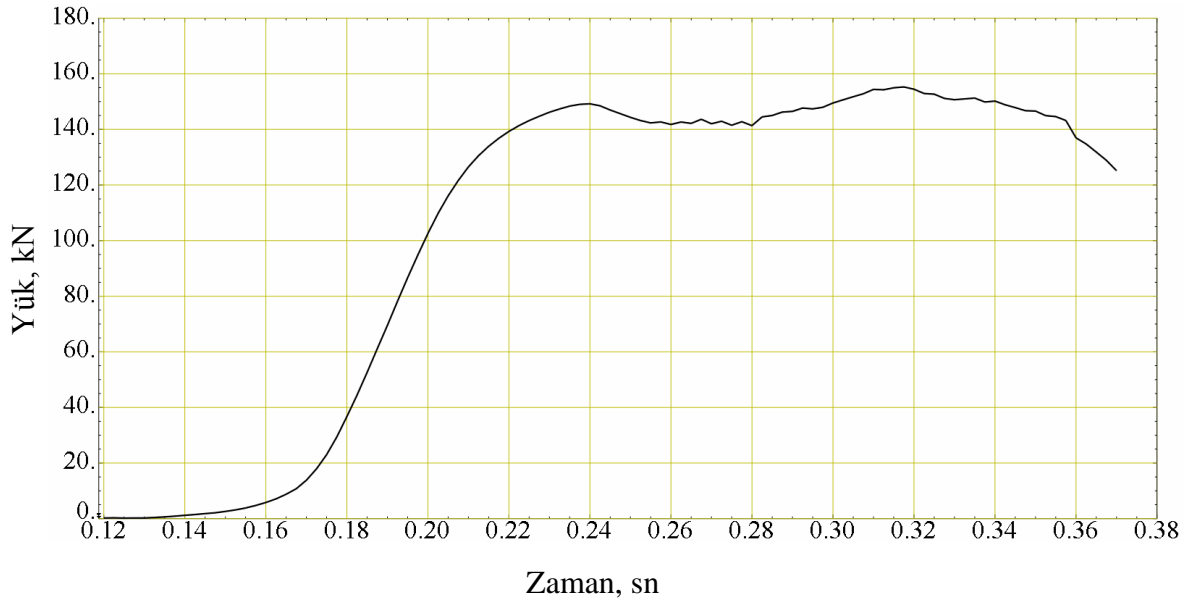


Şekil 150. A3-2T6 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



Şekil 151. A3-2T6 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

Karşılaştırma noktalarından belirlenen yerel burkulma başlangıçlarına karşılık gelen dış yük değerinin belirlendiği yük-zaman eğrisi aşağıdaki Şekil 152'de verilmektedir.

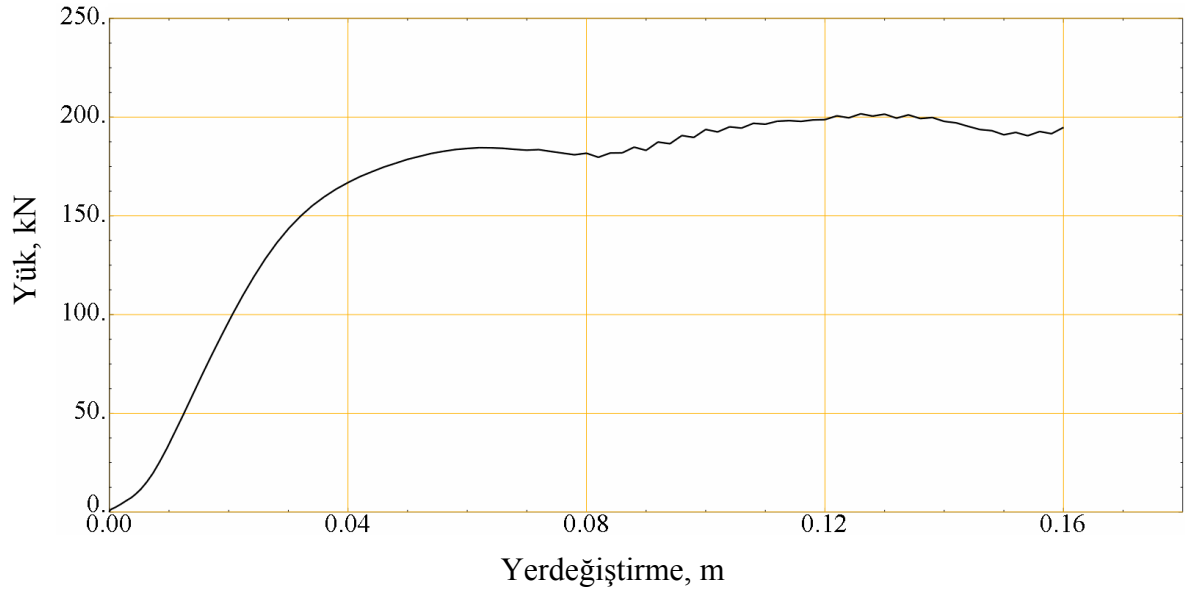


Şekil 152. A3-2T6 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

A3-2T6 kodlu analizden elde edilen rölâtif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin değerlendirilmesinden gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür. Üst başlık levhası ve gövde levhasındaki yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 145 kN olduğu Şekil 152'deki yük-zaman eğrisinden okunmuştur.

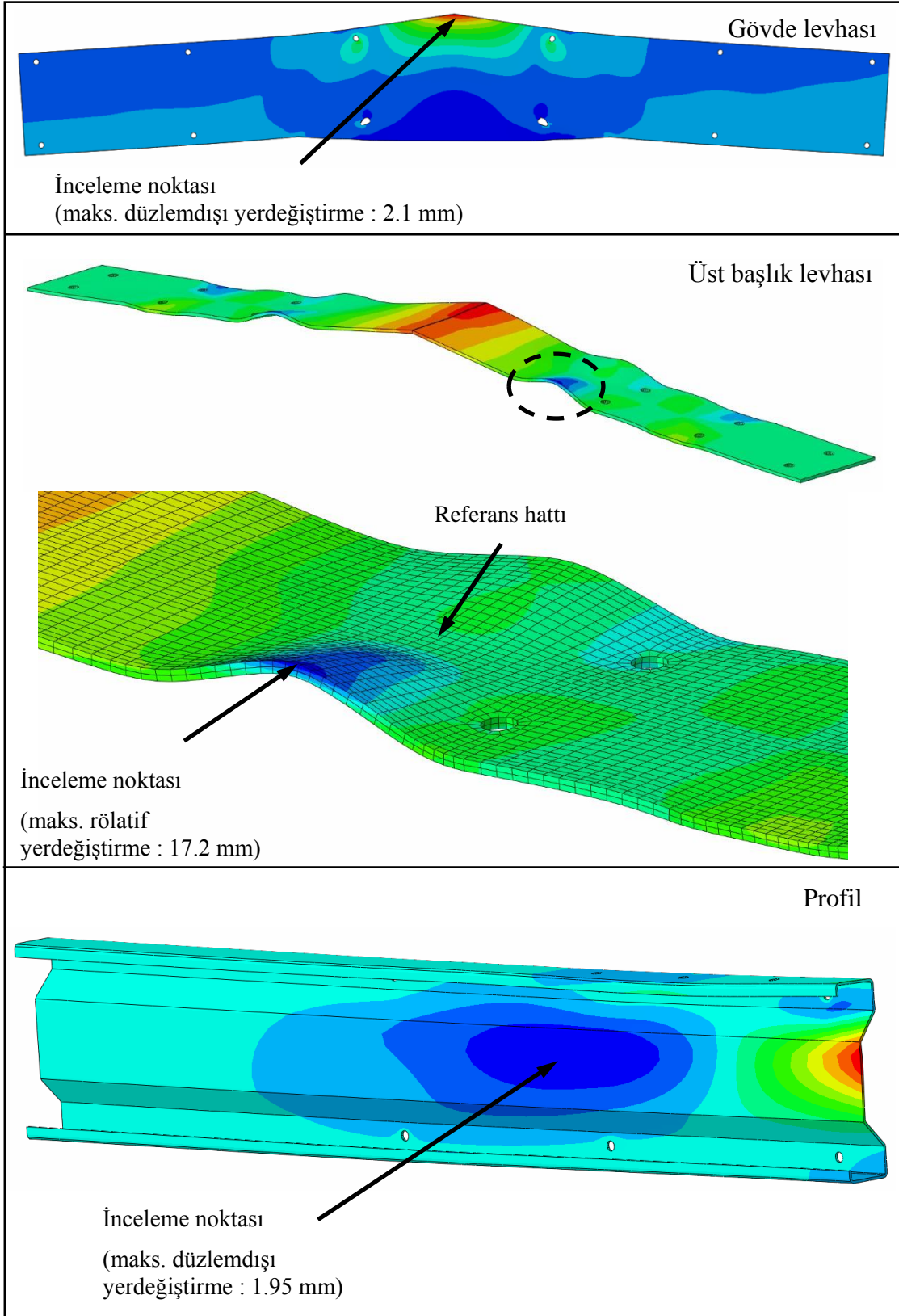
3.7.2. Analiz A3-2T8

Gövde levhası kalınlığının 8 mm olduğu A3-2T8 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 153'te, yerdeğiştirme konturları ve bu konturlardan belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölâtif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ise Şekil 154 ve Şekil 155'te verilmektedir. Bu noktalarından belirlenen yerel burkulma başlangıçlarına karşılık gelen dış yük değerinin belirlendiği yük-zaman eğrisi aşağıdaki Şekil 156'da verilmektedir.

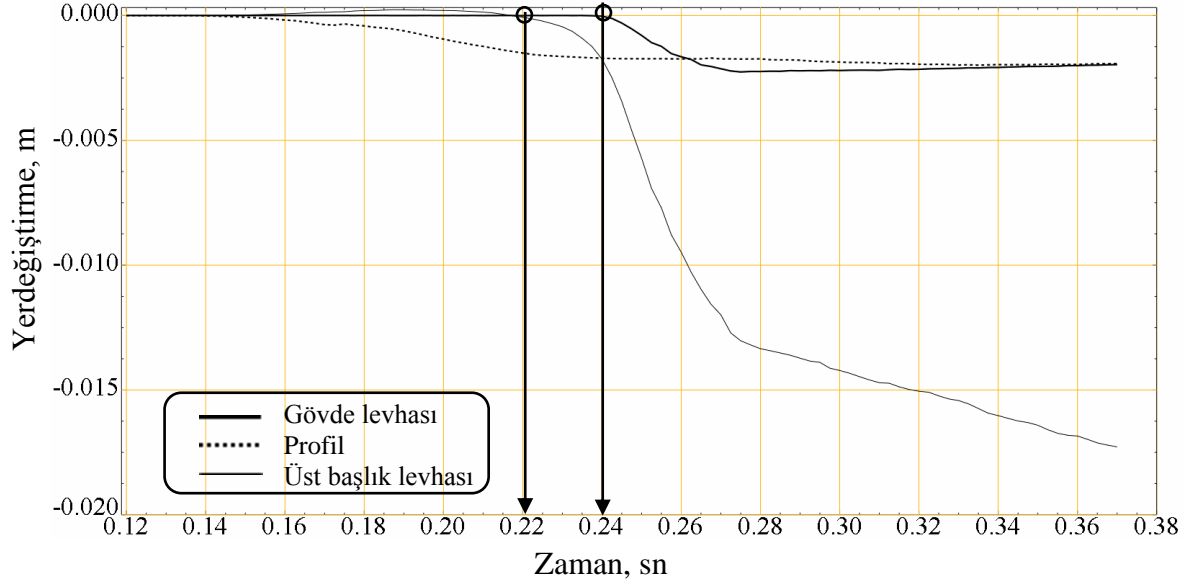


Şekil 153. A3-2T8 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

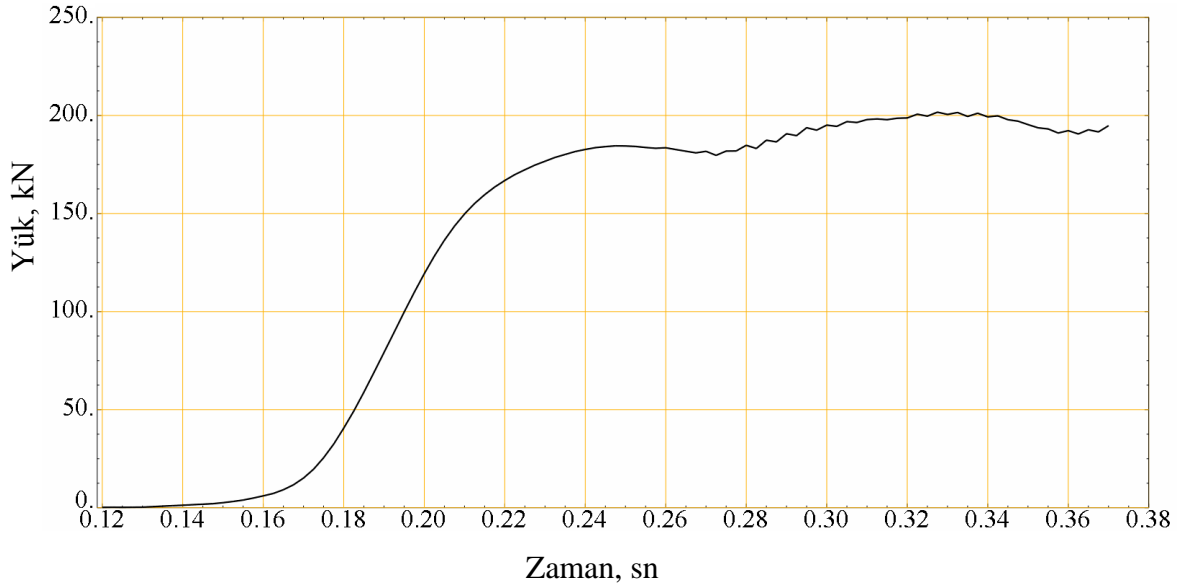
A3-2T6 kodlu analizden elde edilen rölâtif yerdeğiştirme-zaman eğrilerinin (bkz. Şekil 155) değerlendirilmesinden gövde levhasında ve üst başlık levhasında ortaya çıkan yerel burkulma başlangıçlarının birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür.



Şekil 154. A3-2T8 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları



Şekil 155. A3-2T8 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları

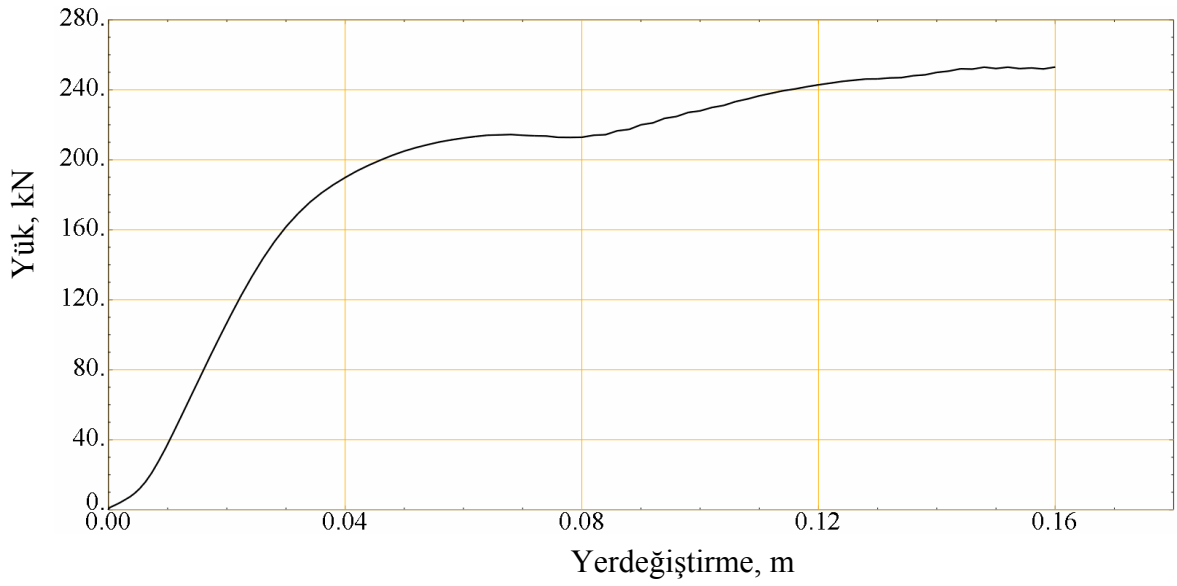


Şekil 156. A3-2T8 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

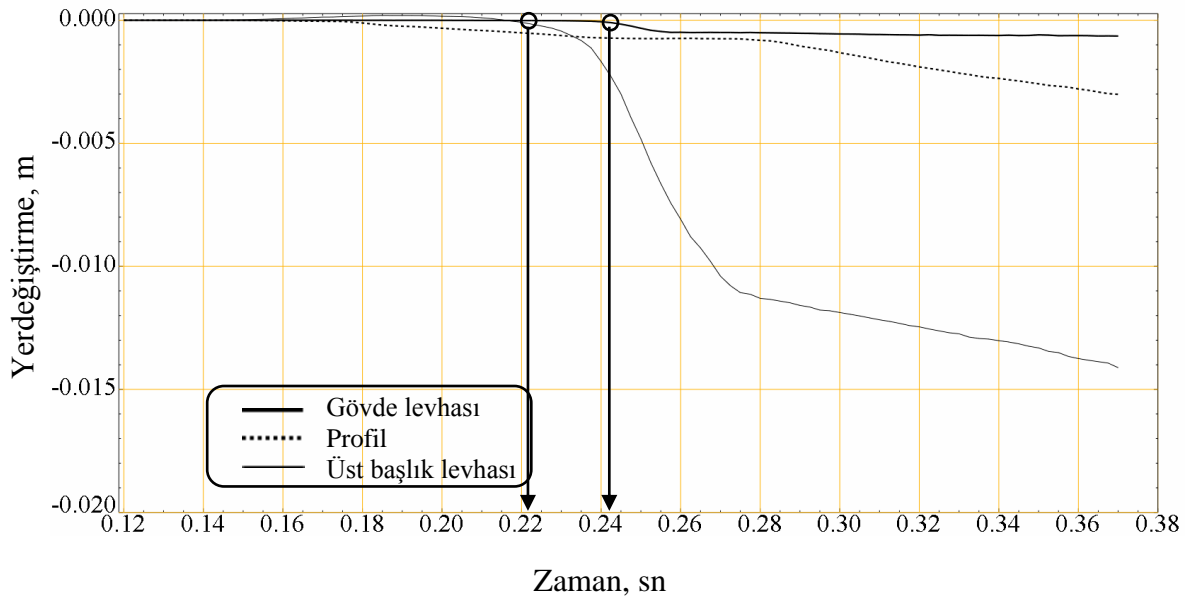
Üst başlık levhası ve gövde levhasındaki yaklaşık 0.24'üncü saniyede oluşan yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 155 kN, gövde levhasında ise 175 kN olduğu Şekil 156'daki yük-zaman eğrisinden okunmuştur.

3.7.2. Analiz A3-2T10

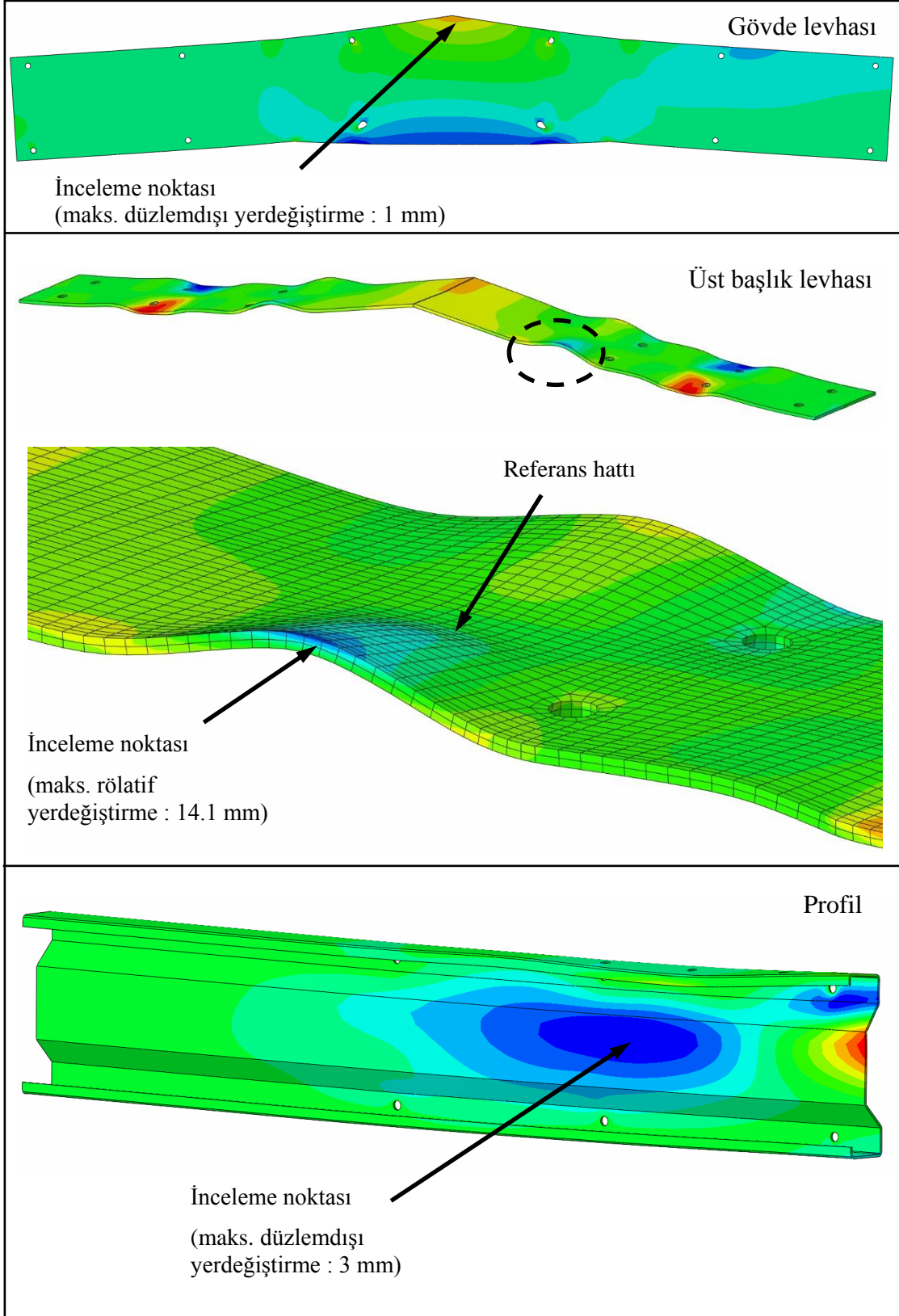
Gövde levhası kalınlığının 10 mm olduğu A3-2T10 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 157’de, yerdeğiştirme konturlarından belirlenen karşılaştırma noktalarına ait rölatif yerdeğiştirme-zaman eğrileri ve yerdeğiştirme konturları ise Şekil 158 ve Şekil 159’da verilmektedir.



Şekil 157. A3-2T8 kodlu analize ait yük-yerdeğiştirme eğrisi

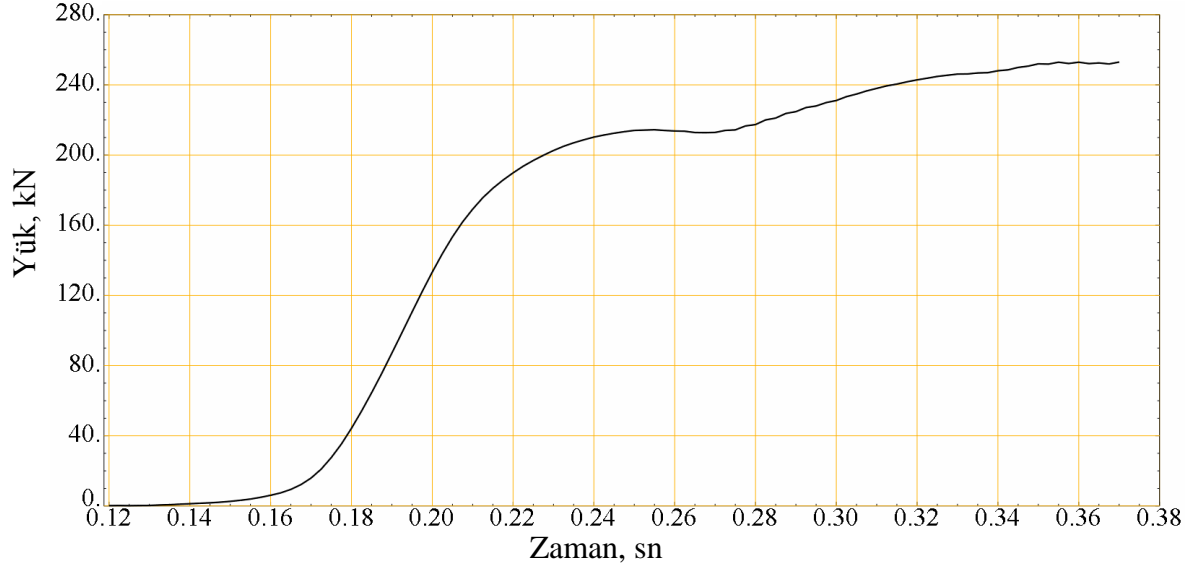


Şekil 158. A3-2T10 kodlu analizde inceleme noktalarına ait rölatif yerdeğiştirmeler ve yerel burkulma başlangıç zamanları



Şekil 159. A3-2T10 kodlu analize ait yerdeğiştirme konturları

Karşılaştırma noktaları noktalarından belirlenen yerel burkulma başlangıçlarına karşılık gelen dış yük değerinin belirlendiği yük-zaman eğrisi aşağıdaki Şekil 160'ta verilmektedir.

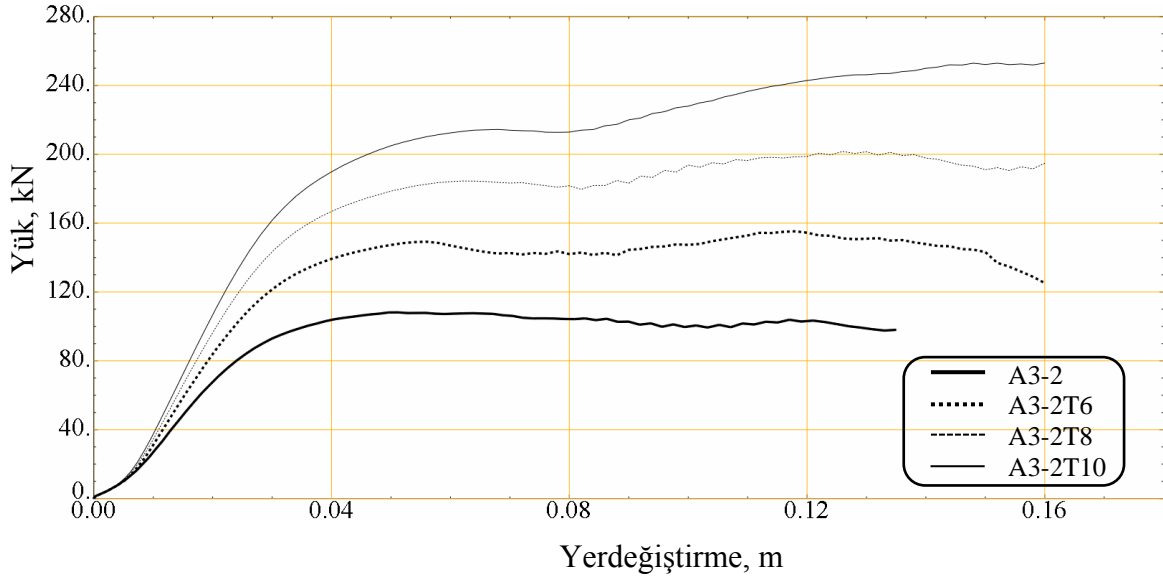


Şekil 160. A3-2T10 kodlu analize ait yük-zaman eğrisi

Üst başlık levhasındaki yerel burkulmayı başlatan dış yükün yaklaşık olarak 190 kN, gövde levhasındaki yerel burkulmayı başlatan dış yükün ise 210 kN olduğu Şekil 160'daki yük-zaman eğrisinden okunmuştur.

3.8. Analiz A3-2, A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10'un Karşılaştırılması

Bu başlık altında profiller arası mesafenin 350 mm olduğu, gövde levhası kalınlığının 4 mm, 6 mm, 8 mm ve 10 mm şeklinde değiştiği altıncı grup analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Bu kapsamda, gövde levhası, üst başlık levhası ve profillerde meydana gelen yerel burkulmalar ve sistemin yük-yerdeğiştirme davranışları gövde levhası kalınlığının 6 mm, 8 mm ve 10 mm olduğu durumlar için karşılaştırılmaktadır. A3-2, A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri, Şekil 161'de, gövde levhası, üst başlık levhası ve profillerdeki yerel burkulmaların karşılaştırıldığı eğriler ise sırasıyla Şekil 162, Şekil 163 ve Şekil 164'te verilmektedir.

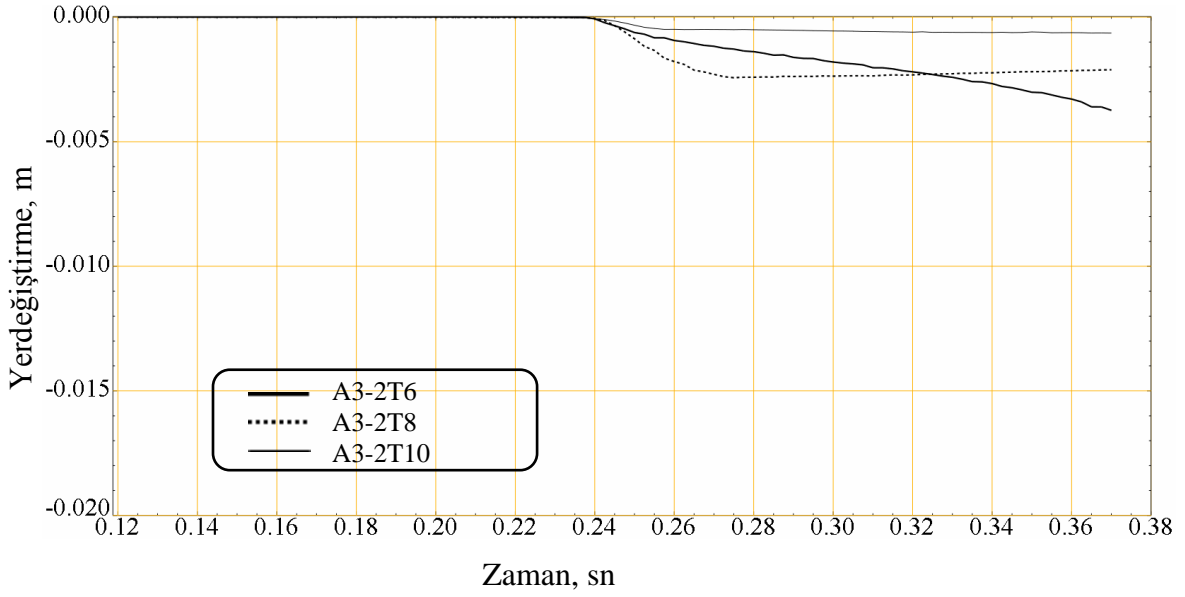


Şekil 161. A3-2, A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri

Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin verildiği Şekil 160 incelendiğinde, gövde levhası kalınlığı arttıkça, yüklemenin başlangıcından itibaren sistemin daha rijit davrandığı görülmektedir. Gövde levhası kalınlığının 4 mm'den 6 mm'ye, 8 mm'ye ve 10 mm'ye çıktığı analiz sonuçlarına göre yük kapasitesi sırasıyla %44, %86, %137 oranında artmıştır. Bir başka deyişle, her 2 mm'lik kalınlık artışına karşılık yük-yerdeğiştirme kapasitesinde, %44, %30 ve %28 oranında artış ortaya çıkmıştır. Bu da gövde levhası kalınlığı artışının sistemin düşey yük kapasitesini doğrudan artırdığını göstermektedir.

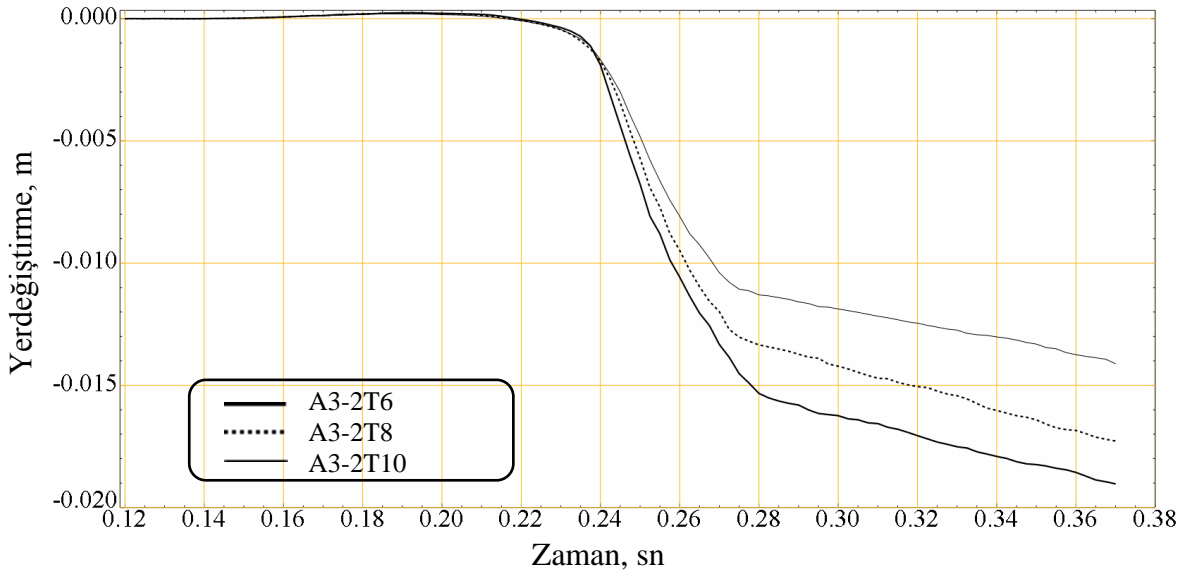
Buna ek olarak, Şekil 161'deki eğrilerden, gövde levhası kalınlığının 6 mm, 8 mm ve 10 mm olduğu analizlerde, 4 mm olduğu analizlerin tersine, düşey yerdeğiştirmenin ortalama 0.08 m değerinden sonra kapasitenin tekrar artmaya başladığı da görülmektedir. Bu durum, sistemin davranışının gövde levhası kalınlığının artışına bağlı olarak gövde levhası yerine profiller tarafından yönlendirilmeye başladığını düşündürmektedir. Zira, gövde levhası kalınlığı 4 mm olan analizde gövde levhası profillere göre nispeten zayıf durumdayken, levha kalınlığı artışıyla durum tersine dönerek kapasiteler arasındaki orantısızlık azalmaya başlamış ve artık profiller gövde levhasına göre nispeten zayıflamaya başlamıştır.

Gövde levhalarındaki yerel burkulmaların karşılaştırıldığı Şekil 162'den, yerel burkulmaların hemen hemen aynı anda ve aynı düşey yerdeğiştirme değerinde başladığı görülmektedir.



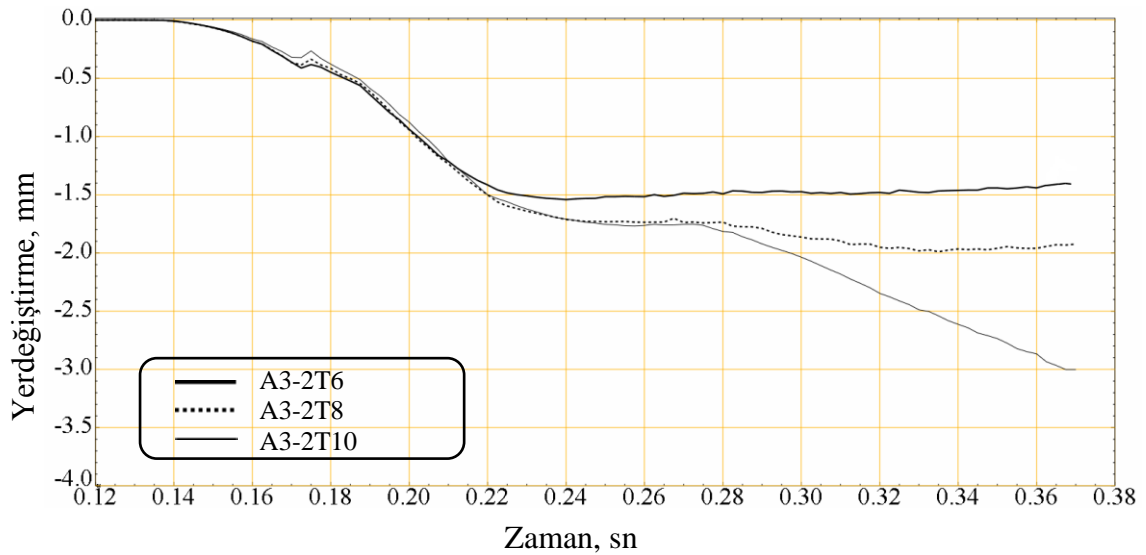
Şekil 162. A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlerin gövde levhalarındaki yerel burkulma davranışlarının kalınlıkla ilişkisi

Gövde levhası kalınlığının 6 mm, 8 mm ve 10 mm olduğu analizlerde gövde levhalarındaki yerel burkulma başlangıçları sırasıyla 150 kN, 175 kN ve 210 kN'da ortaya çıkmıştır (bkz. Şekil 152, Şekil 156 ve Şekil 160).



Şekil 163. A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlerin üst başlık levhalarındaki yerel burkulma davranışlarının kalınlıkla ilişkisi

Üst başlık levhalarının davranışının incelendiği Şekil 163'e göre, gövde levhası kalınlığının artışıyla üst başlık levhalarındaki yerel burkulma başlangıçlarının aynı düşey yük değerinde meydana gelmesine karşın, yüklemenin ilerleyen aşamalarındaki yerel burkulma değerlerinin belirgin olarak azaldığı söylenebilir. Profillerdeki yerel burkulmaların karşılaştırıldığı Şekil 164'e göre, profil gövdelerindeki yerel burkulma değerlerinin belirgin olarak arttığı söylenebilir. Bu durum, gövde levhası kalınlığının artmasıyla bu levhanın yerel burkulma direncinin de artması sonucunda profillerin gövde levhasına göre nispeten zayıflamaya başlamasıyla açıklanabilir. Profil gövdelerindeki yerel burkulmaların gövde levhası kalınlığıyla artması durumu, beşinci grup analizlerdeki profiller arası mesafenin azalmasına bağlı olarak gövde levhasının yerel burkulma direncinin artışına ve dolayısıyla profillerin rölatif olarak zayıflamasına benzer bir durumdur.



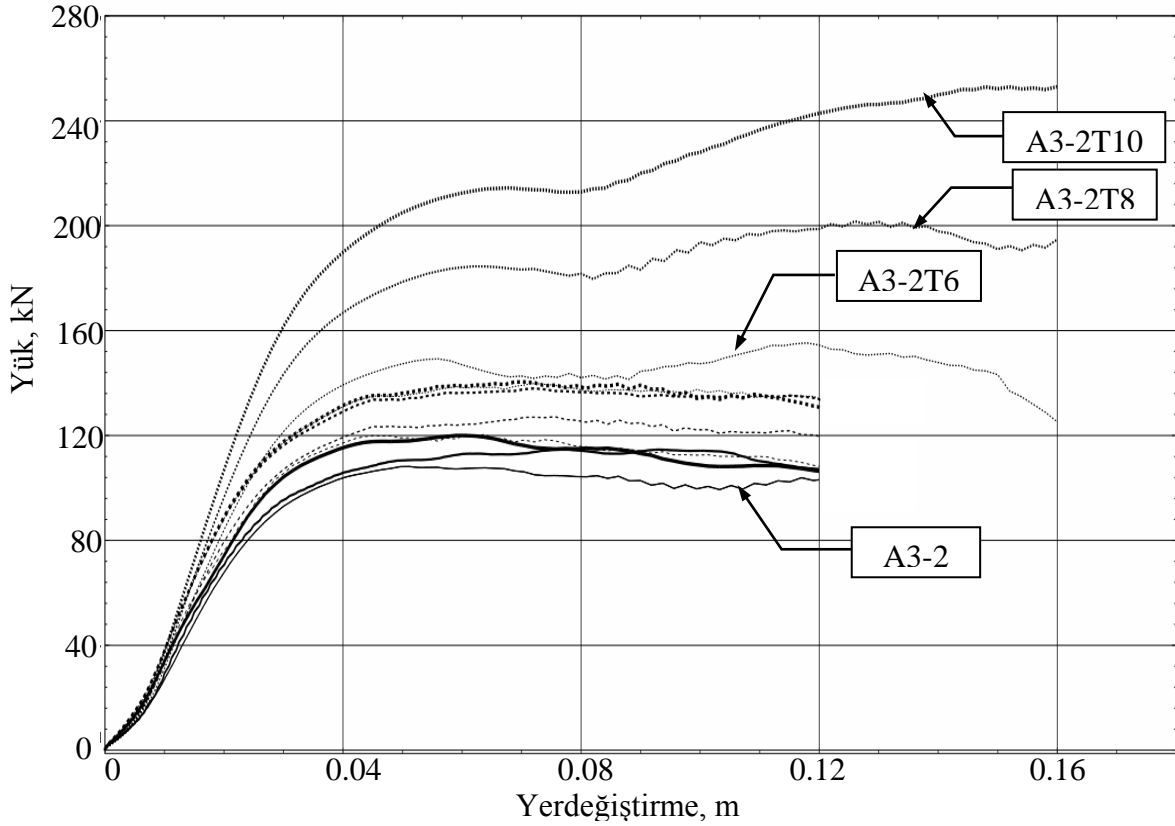
Şekil 164. A3-2T6, A3-2T8 ve A3-2T10 kodlu analizlerin profillerindeki yerel burkulma davranışlarının kalınlıkla ilişkisi

Altıncı grup analizlere göre, yerel burkulmayı başlatan yükler ve ulaşılan kapasite değerleri ile yerel burkulmaları başlatan yükün kapasiteye oranı aşağıdaki Tablo 5'te verilmektedir. Bu tabloya göre, profil gövdesinde başlayan yerel burkulmalar, Tablo 4'teki duruma benzer şekilde diğer elemanlarınkine göre daha erken başlamaktadır. Ancak, Tablo 4'te kapasitenin ortalama % 8'i olarak hesaplanan bu değer, burada yaklaşık % 21 seviyesine çıkmaktadır. Bununla birlikte, gövde levhası kalınlığı arttıkça profil gövdesinde oluşan yerel burkulma başlangıçları kapasitenin daha düşük bir yüzdesinde oluşmaktadır.

Tablo 5. Analizlerdeki yerel burkulma başlangıçları ve kapasite değerleri

Analiz kodu	Yerel burkulmayı başlatan yaklaşık yük, F_L (kN)			Ulaşılan kapasite, F_O (kN)	Yerel burkulmayı başlatan yükün ulaşılan kapasiteye oranı $(F_L / F_O) * 100$ (%)		
	Gövde levhası	Üst başlık levhası	Profil gövdesi		Gövde levhası	Üst başlık levhası	Profil gövdesi
A3-2	110	110	10	110	100	100	9.0
A3-2T6	150	145	40	155	96.7	93.5	25.8
A3-2T8	175	155	40	200	87.5	77.5	20.0
A3-2T10	210	190	45	255	82.3	74.5	17.6

Gövde levhası ve üst başlık levhasındaki yerel burkulmalar ise genellikle kapasite civarında başlamakta, gövde levhası kalınlığı arttıkça profil levhasındakine benzer şekilde, daha erken ortaya çıkmaktadır. Beşinci ve altıncı grup analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri genel bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla aşağıdaki Şekil 165'te topluca verilmektedir.



Şekil 165. Beşinci ve altıncı grup analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, küçük ve orta büyüklükteki açıklıklara sahip yapılarda kullanılan sistemlerden biri olan hafif çelik çerçevelerin tepe birleşim bölgesinin farklı tasarımları üzerinde yapılacak sonlu elemanlar analizleriyle optimum birleşim bölgesi tasarımının belirlenmesiydi. Bu amaçla, çalışmanın birinci bölümünde demir-çelik üretim yöntemleri, hafif çelik elemanlar, bu elemanların uygulamadaki kullanım alanları ile analiz ve tasarım yöntemleri üzerinde kısaca durulduktan sonra, hafif çelik çerçeve sistemler ve elemanları üzerinde daha önce gerçekleştirilen bazı deneysel ve teorik çalışmalar sunulmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde ise, bir hafif çelik çerçeveye ait kiriş-kiriş (tepe) birleşim bölgesinin sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan analizleri Abaqus v6.12 [1] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerle, birleşim levhası ve kiriş profillerinde düşey yükleme altında oluşacak yerel burkulma başlangıçlarının mümkün olduğunca eşzamanlı oluşmasını sağlayan en uygun birleşim levhası tasarımının elde edilmesi hedeflenmişti. Bununla birlikte, analiz edilen modeller taşıma kapasitesi açısından da ayrıca değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilmiş olan teorik çalışmaların tümünden elde edilen bazı sonuç ve öneriler aşağıda sunulmaktadır.

a) Beşinci ve altıncı grup analizlerden önce gerçekleştirilmiş olan kalibrasyon analizleriyle, oluşturulan sonlu eleman modeli doğrulanmıştır. Bu doğrulamada;

- Bulona uygulanacak sıkma kuvveti, anahtar kullanarak elle sıkma kuvvetine denk olan, 1.25 kN olarak belirlenmiş ve modellere uygulanmıştır. Zira, boşluksuz sıfır sıkma ve önerilmeli sıkma uygulanmış modellerin davranışları arasında plastik aşamada bir fark ortaya çıkmamıştır. Buna ek olarak, özellikle et kalınlığı düşük olan söz konusu hafif profil elemanlarda önerilme ile sıkma yönteminin uygulanmasının başka sakıncalar doğurması da muhtemeldir.
- Modellerdeki optimum toplam sonlu eleman adedi, analiz süresi ve özellikle bulon deliklerinin çevresindeki gerilme yayılışlarının düzgünlüğü açısından 140.000 olarak belirlenmiştir.
- Bulon sayısı ve yerleşim düzeni farklı olacak şekilde gerçekleştirilen analizler sonucunda şekildeğiştirmiş delik profilleri arasında önemli bir fark elde

edilmemiştir. Dolayısıyla, beşinci ve altıncı grup analizlerde bu üç model içinde en az bulon adedine sahip olan A3-2 kodlu model esas alınmıştır.

b) Beşinci grup analizlerden elde edilen sonuçlara göre;

- Profiller arası mesafenin 350 mm ve 230 mm olduğu analizlerde gövde levhasının yerel burkulması ilave rijitleştirici levha tarafından önemli ölçüde engellenmiştir. Bu mesafenin 130 mm olduğu analizde ise yalın hal ve ilave rijitleştirici levhalı hal arasında gövde levhasının yerel burkulması açısından bir fark ortaya çıkmamıştır.
- Profiller arası mesafenin 130 mm olması durumunda yalın modelde dahi gövde levhası yerel burkulma yapmamaktadır. Aynı modelde, üst başlık levhasının burkulması ise profiller arası mesafenin 350 mm ve 230 mm olduğu modellerden yaklaşık 4 kat daha az olmuştur.
- Üst başlığın dudaklı olması, modellerin yük-yerdeğiştirme davranışı üzerinde beklenen düzeyde olumlu bir etki yaratmamış analizlerin plastik bölgesinde yaklaşık %7'lik bir kapasite artışı meydana gelmiştir. Özellikle profil arası mesafenin 130 mm olduğu analizlerde ise hiç bir kapasite farkı ortaya çıkmamıştır.
- Üst başlık levhasının dudaklı olmasından dolayı bu levhanın güçlenmesine bağlı olarak, ilave rijitleştirici levha ile birlikte uygulandığı tüm modellerde gövde levhasının yerel burkulması önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak, bu analizlerde gövde levhasının çekme bölgesindeki bulon deliklerinde ortaya çıkan aşırı şekildeğiştirmeler nedeniyle üst başlığın dudaklı ve gövde levhasın rijitleştiricili olmasından beklenen gerçek kapasite artışı elde edilememiştir.
- Profiller arası mesafenin 350 mm'den 230 mm ve ardından 130 mm'ye düşürülmesiyle gerçekleştirilen analizlere göre, yük-yerdeğiştirme eğrilerinden belirlenen kapasitelerde %27'ye varan önemli bir artış meydana gelmiştir. Bu artış gövde ve üst başlık levhasının her durumu (yalın, ilave rijitleştiricili, üst başlık dudaklı) için geçerli olmuştur.
- Profiller arası mesafenin azalması gövde levhasını rijitleştirdiğinden, diğer bir deyişle, gövde levhasının yerel burkulma direncini artırdığından, profiller gövde levhasına göre nispeten zayıf duruma gelmiştir. Bu durum, profillerin daha fazla zorlanması ve dolayısıyla profil gövdelerinin daha fazla düzlem dışı yerdeğiştirme yapmalarına neden olmuştur.
- Modellerdeki yerel burkulmalar, yükleme kapasitenin %8'ine ulaştığında önce profil gövdelerinde başlamıştır. Ancak, incelenen tüm modellerdeki ortak davranış

olarak, analizler sonunda profillerde kesit çarpılması, genel kiriş eğilmesi, delik yırtılması gibi önemli bir şekildeğişimi ortaya çıkmamış, genel davranışı yönlendiren hasarın büyük kısmı, gövde levhası ve üst başlık levhasından oluşan birleşim levhasında meydana gelmiştir.

c) Altıncı grup analizlerden elde edilen sonuçlara göre;

- Gövde levhasının yalın halde olduğu ve sadece kalınlığının 4 mm'den 6 mm'ye, 8 mm'ye ve 10 mm'ye çıktığı bu altıncı grup analiz sonuçlarına göre yük kapasitesi sırasıyla %44, %86, %137 oranında artmıştır. Bu da gövde levhası kalınlığı artışının sistemin düşey yük kapasitesini doğrudan artırdığını göstermektedir.
- Gövde levhası kalınlığının 6 mm, 8 mm ve 10 mm olduğu analizlerde, 4 mm olduğu analizlerin aksine, düşey yerdeğiştirmenin ortalama 0.08 m değerinden sonra kapasite tekrar artmaya başlamıştır. Bu durum, gövde levhası kalınlığı arttıkça sistemin davranışının, gövde levhası yerine profiller tarafından yönlendirilmeye başladığını düşündürmektedir. Bu sonuç, gövde levhası kalınlığı 4 mm olan analizde profiller gövde levhasına göre nispeten güçlü durumdayken, levha kalınlığının artışıyla durumun tersine dönmesi şeklinde açıklanabilir.
- Bu analizlerde de yerel burkulmalar ilk olarak profil gövdelerinde başlamıştır. Ancak, yukarıda da açıklandığı gibi, kalınlığının artışına bağlı olarak, gövde levhasının yerel burkulma direncinin artmasıyla profillerin rölatif olarak zayıflaması sonucunda profillerin gövde ve başlıklarında çok daha belirgin şekildeğişirmeler ortaya çıkmıştır.

d) Gerçekleştirilen analizlerin tümünün değerlendirilmesinden, sistemin düşey yük altındaki davranışının, birleşim levhasında ortaya çıkan yerel burkulmaların ve özellikle delik geometrilerinin aşırı şekildeğiştirme nedeniyle bozularak ovalleşmesinin etkisiyle yönlendirildiği sonucuna varılmıştır.

e) Sistemin düşey yük kapasitesinin artışı, sadece profiller arası mesafenin azaltılması ve/ya da gövde levhası kalınlığının artırılmasıyla mümkün olabilmektedir.

f) Çalışmanın optimizasyon amacına yönelik olarak gerçekleştirilen beşinci grup analizlerin topluca değerlendirilmesiyle; gövde levhası kalınlığının 4 mm olduğu modeller arasında optimum birleşim bölgesi tasarımı olarak, profiller arası mesafenin 130 mm olduğu, gövde levhasında ilave rijitleştirici levha bulunduğu ve üst başlığın dudaklı olduğu tasarım kabul edilmiştir. Zira, profiller arası mesafenin 350 mm ve 230 mm olduğu modellerde gövde levhası ve üst başlık levhası yerel burkulmaları

eşzamanlı olarak başlamış olmasına rağmen, düşey yük taşıma kapasitelerinin profiller arası mesafenin 130 mm olduğu modellerinkinden az olması nedeniyle, bu modeller optimum tasarım olarak kabul edilmemiştir.

Özetle bu çalışma, hafif çelik çerçeve sistemlerin davranışını belirleyen iki ana unsurun, birleşim bölgesi tasarımı ve delik geometrisindeki bozulmanın etkisi olduğunu ortaya koymuş bulunmaktadır. Ancak, bu sonuçların çalışmaya konu olan hafif çelik çerçeve tepe birleşim bölgesi tasarımı ve sonlu eleman modellemesi için geçerli olduğu açıktır. Benzer çalışmaların farklı hafif profiller ve birleşim bölgesi tasarımları için de teorik ve deneysel olarak tekrarlanmasının, hafif çelik sistemlerin hesap ve tasarımı konusunda mevcut yönetmelikler ve uygulamadaki teknik bilgi eksikliklerin giderilmesi yönünde çok önemli bir katkı sağlayacağını ve bu katkının hafif çelik yapıların henüz çok az uygulama alanı bulduğu ülkemizde hafif çelik sektörünün gelişimi için de yararlı olacağını belirtmek uygun olmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Abaqus/CAE v6.12 Documentation, Dassault Systèmes, 2011.
2. Deren, H., Uzdiger, E., Piroğlu, F. ve ağlayan, ., elik Yapılar, ağlayan Kitabevi, 2005.
3. <http://www.kuark.org/2013/07/sinter-cevher-pelet-ve-demir-uretimi>. 05 Mayıs 2014.
4. <http://celticmythpodshow.com/blog/blavenavon-history-and-the-new-age-of-steel>. 05 Mayıs 2014.
5. <http://www.answers.com/topic/open-hearth-furnace>. 05 Mayıs 2014.
6. <http://malzemebilimi.net/forum/index.php?topic=7.0>. 05 Mayıs 2014.
7. Schafer B.W., T. Peköz, Computational modeling of cold-formed steel:characterizing geometric imperfections and residual stresses, Journal of Constructional Steel Research 47 (1998) 193–210.
8. <http://www.badecelik.com.tr/tr/referans-detay/17/2-Katli-Villa---Bodrum>. 05 Mayıs 2014.
9. <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=502>. 05 Mayıs 2014.
10. Dubina, D., Ungureanu, V. ve Landolfo, R., Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3 - Design of Cold-formed Steel Structures, First Edition, 2013.
11. Schafer B.W., Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 766–778.
12. Dubina, D., Foreword, Thin-Walled Structures 42 (2004) 149–152.
13. Eurocode 3, Design of steel structures Part 1-5: Plated structures, EN 1993-1-5, 2006.
14. Pernes, P., Nagy, Z., FE modeling of cold-formed steel bolted joints in pitch-roof portal frames, Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture 55 (2012) 3-7.
15. Elkersh, I., Experimental investigation of bolted cold formed steel frame apex connections under pure moment, Ain Shams Engineering Journal 1 (2010) 11–20.
16. Dubina, D., Ungureanu, V., Nagy, Z., Nunes L. ve Pernes, P., Imperfections Sensitivity Analysis Of Pitched Roof Cold – Formed Steel Portal Frames, SDSS’rio 2010 Stability and Ductility Of Steel Structures, Rio de Janeiro, Brazil, 2010, 8 - 10.
17. Lim, J. ve Nethercot, D., Finite Element Idealization of a Cold-Formed Steel Portal Frame, Journal Of Structural Engineering 130 (2004) 78-94.

18. Yu, W., Chung, K. ve Wong, M., Analysis of bolted moment connections in cold-formed steel beam–column sub-frames, Journal of Constructional Steel Research 61 (2005) 1332–1352.
19. Zaharia, R. ve Dubina, D., Stiffness of joints in bolted connected cold-formed steel trusses, Journal of Constructional Steel Research 62 (2006) 240–249.
20. Sabbagh, A., Petkovski, M., Pilakoutas, K. ve Mirghaderi, R., Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings, Engineering Structures 42 (2012) 371–386.
21. Dundu, M. ve Kemp, A. Strength requirements of single cold-formed channels connected back-to-back, Journal of Constructional Steel Research 62 (2006) 250–261.
22. Santos, E., Batista, E. ve Camotim, D., Experimental investigation concerning lipped channel columns undergoing local–distortional–global buckling mode interaction, Thin-Walled Structures 54 (2012) 19–34.
23. Sabbagh, A., Petkovski, M., Pilakoutas, K. ve Mirghaderi, R., Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip, Journal of Constructional Steel Research 80 (2013) 100–108.
24. Basaglia, C., Camotim, D. ve Silvestre, N., GBT-based local, distortional and global buckling analysis of thin-walled steel frames, Thin-Walled Structures 47(2009) 1246–1264.
25. EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, 2005
26. Yu, H., Burgess, I. Davison, J. ve Plank, R. Numerical simulation of bolted steel connections in fire using explicit dynamic analysis, Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 515–525.
27. Loureiro, A., Moreno, A., Gutiérrez, R. ve Reinoso, J., Experimental and numerical analysis of three-dimensional semi-rigid steel joints under non-proportional loading, Engineering Structures 38 (2012) 68–77.

ÖZGEÇMİŞ

19 Eylül 1986 yılında Trabzon'da doğan Ferhan ÖZTÜRK lise öğrenimini Trabzon Lisesi'nde tamamlamıştır. Lisans öğrenimini 2003-2007 yılları arasında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamladıktan sonra 1 yıl süreyle otoyol tüneli inşaatında saha mühendisi olarak çalışmıştır. 2008 yılında 1 yıl süreyle Londra'da dil eğitimi aldıktan sonra Türkiye'ye geri dönen yazar bir süre çelik tasarım mühendisi olarak çalıştıktan sonra yedek subay olarak askerlik görevini tamamlamıştır. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başlamış ve ikinci yılında Erasmus öğrencisi olarak Portekiz'de bir yarıyıl geçirmiştir. Yüksek lisans öğrenimi sırasında ayrıca bazı yapı denetim firmalarında çalışmaya devam etmiştir. Hafif çelik yapıların sonlu eleman analiz programları yardımıyla tasarım ve optimizasyonu alanında çalışan yazar hali hazırda Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.