

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOMPOZİT MALZEMELERDEN ÜRETİLMİŞ OTOMOBİL ÖN TAMPON SİSTEMİNİN
TASARIMI, BAĞLANTI YERLERİNİN OPTİMİZASYONU VE DARBE DAVRANIŞININ
BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

SALİM ÇAM

**MART 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOMPOZİT MALZEMELERDEN ÜRETİLMİŞ OTOMOBİL ÖN TAMPON SİSTEMİNİN
TASARIMI, BAĞLANTI YERLERİNİN OPTİMİZASYONU VE DARBE DAVRANIŞININ
BELİRLENMESİ**

Makina Yüksek Mühendisi Salim ÇAM

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 / 02 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 09 / 03 / 2022

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

ORCID : - - -

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora programında gerçekleştirilmiştir.

Doktora çalışmalarım süresince hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, bilimsel çalışmanın esasları ve akademik gelenek hakkında kendisinden sayısız bilgi ve tecrübe edindiğim kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam esnasında önerileri ve yapıcı eleştirileri ile verdikleri desteklerden dolayı değerli Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ ve Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK'e de ayrıca teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hayatımın her safhasında yanımda hissettiğim, daha iyi bir eğitim alabilmem için türlü fedakarlıklar yapmak zorunda kalan sevgili anne ve babama, bilhassa her zaman daha fazla çalışmam gerektiğini ısrarla belirten anneme ve her koşulda yanımda olan kardeşime minnettarım.

Çalışmalarım süresince desteğini her an yanımda hissettiğim, yoğun çalışmalarım esnasında sabırla beni destekleyen, yeri geldiğinde benim sorumluluklarımı da üstlenmek zorunda kalan sevgili eşim Çiğdem ÇAM'a, varlıklarıyla hayatımı güzelleştiren çocuklarım Salih Eymen, Bükre Lema ve Ömer Affan'a sevgilerimi sunarım. Onlar olmadan her şey eksik kalırdı.

Gayret bizden, başarı Allah'tandır.

Salim ÇAM
Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak “Kompozit Malzemelerden Üretilmiş Otomobil Ön Tampon Sisteminin Tasarımı, Bağlantı Yerlerinin Optimizasyonu ve Darbe Davranışının Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU’nun 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. 09/03/2022

Salim ÇAM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. İnce Cidarlı Enerji Sönümleyici Tüpler.....	2
1.2.1. Enerji Sönümleyici Tüplerde Yükleme Çeşitleri	4
1.2.2. Silindirik ve Kare Kesitli Enerji Sönümleyici Tüpler	5
1.2.3. Konik Enerji Sönümleyici Tüpler	7
1.2.4. Çokgen Enerji Sönümleyici Tüpler.....	8
1.2.5. Çok Hücreli Enerji Sönümleyici Tüpler.....	10
1.2.6. Değişken Kalınlığa Sahip Enerji Sönümleyici Tüpler	12
1.2.7. Deformasyon Tetikleyici Mekanizmalar	13
1.2.8. Dolgulu Enerji Sönümleyici Tüpler	15
1.3. Tampon Kirişi	17
1.3.1. Kesit Şeklinin Etkisi.....	17
1.3.2. Kalınlığın Etkisi	19
1.3.3. İç Desteklerin Etkisi	21
1.3.4. Malzemenin Etkisi.....	24
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
2.1. Enerji Sönümleyici Tüp Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	27

2.1.1. Enerji Sönümleyici Tüp Malzemesi ve Malzeme Modeli	28
2.1.2. Enerji Sönümleyici Tüp Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Modeli	29
2.1.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması ve Eleman Boyutu Bağımlılığı	32
2.1.4. İmalat Proseslerinin Darbe Performansına Olan Etkisinin Belirlenmesi	33
2.1.5. Enerji Sönümleyici Tüpün Kalınlık Optimizasyonu	39
2.1.6. Optimum Kalınlığın Haddelme ile Elde Edilmesi.....	41
2.1.7. Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansının Belirlenmesi	42
2.2. Ön Tampon Kirişi Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar	44
2.2.1. Ön Tampon Kirişi Malzemesi ve Malzeme Modeli.....	44
2.2.2. Ön Tampon Kirişi Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Modeli	46
2.2.3. Ön Tampon Kirişi Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması	47
2.2.4. Ön Tampon Kirişi Optimizasyonu	49
2.3. Hibrit Ön Tampon Sistemindeki Bağlantı Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar	50
2.3.1. Yapıştırıcı Malzemesi ve Malzeme Modeli.....	50
2.3.2. Hibrit Ön Tampon Sistemi Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Modeli	53
2.3.2.1.Yapıştırıcı Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması	55
2.3.2.2.Yapıştırıcıların Performansının Değerlendirilmesi	56
2.3.2.3.Yapıştırıcıların Optimizasyonu	57
3. BULGULAR VE İRDELEME	60
3.1. Enerji Sönümleyici Üzerine Tüp Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	60
3.1.1. Enerji Sönümleyici Tüpün Eleman Boyutu Bağımlılığına Ait Bulgular.....	61
3.1.2. Sabit Kalınlığa Sahip Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı	63
3.1.3. Plastik Şekil Verme İşlemlerinin Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı Üzerindeki Tekil Etkileri	65
3.1.4. Kalınlık Optimizasyonunun Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı Üzerindeki Tekil Etkisi.....	70
3.1.5. Plastik Şekil Verme ve Kalınlık Optimizasyonunun Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı Üzerindeki İkili Etkisi	73
3.1.6. Plastik Şekil Verme Yöntemleri ile İmal Edilmiş Değişken Kalınlığa Sahip Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Davranışı Bulguları	76
3.2. Kompozit Tampon Kirişi Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	84
3.2.1. Kompozit Tampon Kirişi Doğrulama Analizleri Bulguları.....	84

3.2.2. Kompozit Tampon Kirişı Optimizasyonu Bulguları	86
3.3. Hibrit Ön tampon Sistemindeki Bağlantı Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	88
3.3.1. Yapıştırıcı Doğrulama Analizleri Bulguları	89
3.3.2. Farklı Yapıştırıcıların Kullanıldığı Hibrit Ön Tampon Sistemlerinin Darbe Performanslarının Karşılaştırılması	90
3.3.3. Yapıştırıcıların Optimizasyonundan Elde Edilen Bulgular	95
4. SONUÇLAR	110
5. ÖNERİLER.....	113
6. KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

KOMPOZİT MALZEMELERDEN ÜRETİLMİŞ OTOMOBİL ÖN TAMPON SİSTEMİNİN
TASARIMI, BAĞLANTI YERLERİNİN OPTİMİZASYONU VE DARBE DAVRANIŞININ
BELİRLENMESİ

Salim ÇAM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU
2022, 120 Sayfa

Otomobil hibrit ön tampon sistemi üzerine gerçekleştirilen bu çalışma üç aşama barındırmaktadır. İlk aşamada ön tampon sisteminde kullanılan ince cidarlı çelik enerji sönümleyici tüpün hem kalınlık dağılımı hem de geometrik şekli, plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak elde edilmiş ve yüksek hızlar altında darbe performansı incelenmiştir. Böylece enerji sönümleyici tüpün darbe performansı, tüpün kalınlık dağılımı ve plastik şekil verme etkisi birlikte değerlendirilerek elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, karbon fiber kompozit malzemeden üretilmiş tampon kirişinin tabaka kalınlığı ve yönelimi, çelikten imal edilmiş tampon kirişi referans alınarak, darbeli yükler altında optimize edilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşaması, kompozit tampon kirişi ve ince cidarlı çelik enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantıyı düzenleme üzerine yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Bu bağlantı bölgesinde yapıştırıcı kullanılmış olup, farklı mekanik özelliklere sahip üç yapıştırıcı, darbe performansları açısından değerlendirilmiştir. Son olarak, seçilen yapıştırıcı ile oluşturulan hibrit ön tampon sisteminin geometrik özellikleri, yine darbe davranışı göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, kalınlık dağılımının ve plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyici tüpün darbe performansını önemli ölçüde etkilediğini ve bu ikili etki hesaba katılmaksızın elde edilen sonuçların yanıltıcı olduğunu göstermiştir. Tampon kirişinin optimizasyonu için kullanılan karbon fiber kompozit tamponun, en az çelik tampon kirişi kadar iyi darbe performansı sergilemesinin yanında, ağırlığının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Yapıştırıcılar ile gerçekleştirilen çalışmalar ise, yapıştırıcı kalınlığı ve tampon kirişi yarıçapının, hibrit ön tampon sisteminin darbe performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Böylece, ön tampon sisteminde farklı malzemelerden yapılmış tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüpler arasındaki bağlantı bölgelerinde, yapıştırıcıların güvenle kullanılabileceği de gösterilmiş olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Otomobil ön tampon sistemi, Tampon kirişi, Enerji sönümleyici, Yapıştırma bağlantısı, Darbe performansı, Optimizasyon

PhD. Thesis

SUMMARY

DESIGN AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITE AUTOMOBILE FRONTAL BUMPER SYSTEM UNDER HIGH SPEED IMPACT LOADING

Salim ÇAM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Program Supervisor: Prof. Dr. Hasan SOFUEOĞLU
2022, 120 Pages

This study consists of three stages. In the first stage, the thickness of the thin-walled steel energy absorber tube was optimized. Then the study aimed to evaluate the effect of plastic forming history carried out for thickness optimization on crashworthiness performance of the optimized energy absorber subjected to high speed impact to achieve the desired tube form. Thus, the impact performance of the energy absorber tube was obtained by evaluating the coupled effect of the thickness distribution and the plastic forming processing of the tube. In the second step, the layer thickness and orientation of the bumper beam made of carbon fiber composite material was optimized under the impact loads with reference to the bumper beam made of steel. The third and final phase of the study covers the studies on arranging the connection between the composite bumper beam and the thin-walled steel energy absorber tube. Adhesive bonding was preferred for joining method. Three adhesives with different mechanical properties were evaluated in this joint area and the most suitable one was selected in terms of impact performance. Afterwards, the geometric properties of the selected adhesive were optimized by considering the impact behavior of the frontal bumper system.

The results showed that impact performance of the energy absorber was highly affected from the thickness distribution and plastic forming processing. Furthermore, it was observed that neglecting the coupled effect of the thickness distribution and the plastic forming processing yields misleading conclusions. Additionally, it was determined that the carbon fiber composite bumper beam exhibited at least as good impact performance as the steel bumper beam, while its weight was significantly reduced. The studies with adhesives have shown that adhesive thickness and bumper beam radius directly affect the impact performance of the hybrid front bumper system. Thus, it has also been shown that the adhesive bonding can safely be used in the junction areas of the automobile hybrid frontal bumper system.

Key Words: Frontal bumper system, Bumper beam, Energy absorber, Adhesive bonding, Impact, Optimization

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Otomobil ön tampon sistemi.....	1
Şekil 2.	Enerji sönümleyici tüplerde yükleme çeşitleri.....	5
Şekil 3.	Eksenel yüklemeye maruz silindirik enerji sönümleyici tüpün deformasyon şekilleri: (a) Simetrik, (b) simetrik olmayan, (c) karma.....	6
Şekil 4.	Altıgen kesitli enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışı: (a) Genişlemeli deformasyon, (b) genişlemesiz deformasyon.....	9
Şekil 5.	Yıldız şekilli içbükey çokgen enerji sönümleyici tüpün eksenel yük altında deformasyon davranışı	10
Şekil 6.	Çok hücreli enerji sönümleyici tüplerde kullanılan köşe elemanı çeşitleri	11
Şekil 7.	Tek ve çok hücreli kare kesitli enerji sönümleyici tüpün eksenel yük altında deformasyon davranışı.....	12
Şekil 8.	Deformasyon tetikleyici mekanizmaların kare kesitli enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışına etkisi.....	14
Şekil 9.	Dolgu malzemesi iç yapısı.....	16
Şekil 10.	Dolgu malzemesinin enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışına etkisi	16
Şekil 11.	Enerji sönümleyici tüpte dolgu malzemesi kullanımının çarpışma kuvvetine etkisi.....	17
Şekil 12.	Tampon kirişinde kullanılan farklı kesit şekilleri	18
Şekil 13.	Tampon kirişi kesiti için alternatif şekiller.....	19
Şekil 14.	Karbon fiber tampon kirişi için kalınlığın deformasyona olan etkisi.....	20
Şekil 15.	Karbon fiber tampon kirişi için kalınlığın ivmelenmeye olan etkisi.....	20
Şekil 16.	Tampon kirişinin destek çubukları ile takviye edilmesi.....	21
Şekil 17.	Tampon kirişinde içi destek olarak kullanılabilecek yapılar: (a) Boş, (b) köpük ve (c) destek çubuğu	22
Şekil 18.	İç desteklerin çarpışma kuvvetine olan etkisi	23
Şekil 19.	İç desteklerin sönümlenen enerji miktarına etkisi.....	23
Şekil 20.	Enerji sönümleyici tüp malzemesinin gerçek plastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	28
Şekil 21.	Enerji sönümleyici tüpün başlangıç geometrisi	30
Şekil 22.	Enerji sönümleyici tüp sonlu elemanlar modeli.....	31

Şekil 23. Sonlu elemanlar modelinin eleman boyutu bağımlılığının belirlenmesi için oluşturulan modeller: (a) 1,25 mm, (b)2,5 mm ve (c) 5 mm	32
Şekil 24. Derin çekme prosesi sonlu elemanlar modeli	33
Şekil 25. Derin çekme prosesi geometrik detaylar	34
Şekil 26. Kenar bükme prosesi sonlu elemanlar modeli	34
Şekil 27. Kenar bükme prosesi geometrik detaylar	35
Şekil 28. Zimba hız profili	36
Şekil 29. Hidroforming prosesi sonlu elemanlar modeli	36
Şekil 30. Hidroforming prosesi geometrik detaylar.....	37
Şekil 31. Hidroforming prosesinde uygulanan iç basınç profili.....	38
Şekil 32. Kalınlık optimizasyonu akış diyagramı.....	40
Şekil 33. Haddelme işleminin şematik illüstrasyonu	41
Şekil 34. Değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modeli	43
Şekil 35. Tampon kirişi geometrisi.....	47
Şekil 36. Kompozit malzeme için oluşturulan doğrulama sonlu elemanlar modeli.....	48
Şekil 37. Kompozit tampon kirişi optimizasyonu akış diyagramı.....	49
Şekil 38. Yapıştırıcı malzeme modelinde hasar için kullanılan çift doğrusal çekme-ayrılma kanunu.....	52
Şekil 39. Hibrit ön tampon sistemi: (a) Ön görünüş, (b) yan görünüş ve (c) üst görünüş.....	53
Şekil 40. Hibrit ön tampon sistemi geometrisi	54
Şekil 41. Yapıştırıcı doğrulama sonlu elemanlar modeli geometrik detayları ve sınır şartları: (a) DP8005, (b) XNR6852E-3	55
Şekil 42. Hibrit ön tampon sistemi sonlu elemanlar modeli	57
Şekil 43. Enerji sönümleyici tüpten elde edilen çarpışma kuvvetinin seçilen sonlu eleman boyutuna bağımlılığı.....	61
Şekil 44. Enerji sönümleyici tüpte sönümlenen enerjinin seçilen sonlu eleman boyutuna bağımlılığı	62
Şekil 45. Enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modelinin doğrulanması sonuçları.....	63
Şekil 46. Sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpten elde edilen çarpışma kuvveti eğrisi.....	64
Şekil 47. Sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpten elde edilen enerji miktarı.....	64
Şekil 48. Derin çekme işlemi sonrasında elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri	65

Şekil 49. Kenar bükme işlemi sonrasında elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri	66
Şekil 50. Hidroforming işlemi sonrasında elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri	66
Şekil 51. Plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvvetine etkisi	67
Şekil 52. Plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyici tüpün sönümlediği enerji miktarına olan etkisi	68
Şekil 53. (a) Derin çekme, (b) kenar bükme ve (c) hidroforming ile elde edilen enerji sönümleyici tüplerde darbe yüklemesi sonucu oluşan deformasyonlar.....	69
Şekil 54. Enerji sönümleyici tüpün kalınlık optimizasyonu serpm diyagramı	70
Şekil 55. Optimizasyon edilmiş enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi.....	71
Şekil 56. Optimizasyon edilmiş enerji sönümleyici tüpün sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrisi.....	72
Şekil 57. Kare kesitli enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışı: (a) Sabit kalınlık, (b) optimize edilmiş kalınlık.....	73
Şekil 58. Derin çekme analizi sonrası iş parçası üzerinde meydana gelen plastik şekil değiştirmeler.....	75
Şekil 59. Budama işlemi sonrası iş parçasının nihai formu	75
Şekil 60. Enerji sönümleyici tüpün plastik şekil değiştirme ve kalınlık dağılımı	76
Şekil 61. Sabit kalınlığa sahip tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti dağılımı	77
Şekil 62. Sabit kalınlığa sahip tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün enerji sönümleme kapasitesi.....	78
Şekil 63. Kalınlık optimizasyonu sonrası tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti dağılımı.....	79
Şekil 64. Kalınlık optimizasyonu sonrası tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün sönümlenen enerji sönümleme kapasitesi.....	79
Şekil 65. Plastik şekil verme işlemlerinin çarpışma kuvvetine olan etkisi	80
Şekil 66. Plastik şekil verme işlemlerinin sönümlenen enerji miktarına olan etkisi	81
Şekil 67. Tüm seçenekler için elde edilen maksimum çarpışma kuvvetlerinin karşılaştırılması	82
Şekil 68. Tüm seçenekler için maksimum sönümlenen enerji miktarlarının karşılaştırılması	83
Şekil 69. Kompozit tampon kirişi doğrulama modelinden elde edilen çarpışma kuvveti dağılımı.....	85
Şekil 70. Tampon kirişi optimizasyonu sonucu serpm diyagramı	86

Şekil 71. Optimize edilmiş kompozit ve çelik tampon kirişi bulunduran ön tampon sistemlerinin çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	87
Şekil 72. Optimize edilmiş kompozit ve çelik tampon kirişi bulunduran ön tampon sistemlerinin sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrileri.....	88
Şekil 73. DP8005 ve XNR6852E-3 yapıştırıcıları için doğrulama analizi sonuçları	90
Şekil 74. AV138, DP8005 ve XNR6852E-3 Yapıştırıcıları için hibrit ön tampon sistemi çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi	91
Şekil 75. AV138, DP8005 ve XNR8852E-3 Yapıştırıcıları için hibrit ön tampon sistemi sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrisi	92
Şekil 76. Hibrit ön tampon sisteminde tampon kirişi yarıçapının AV138 yapıştırıcısının deformasyon davranışına olan etkisi: (a) Başlangıç durumu, (b) Hasar ilerlemesi ve (c) yapıştırıcının devre dışı kalması.....	93
Şekil 77. DP8005 kullanıldığında yapıştırıcı tabakalarının durumu: (a) Üst yapıştırıcı, (b) yan yapıştırıcı.....	94
Şekil 78. XNR6852E-3 kullanıldığında yapıştırıcı tabakalarının durumu: (a) Üst yapıştırıcı, (b) yan yapıştırıcı.....	95
Şekil 79. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının maksimum çarpışma kuvvetine olan etkisi.....	97
Şekil 80. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının toplam sönümlenen enerjiye olan etkisi	98
Şekil 81. Hibrit ön tampon sistemi bileşenlerinin toplam sönümlenen enerjiye olan katkı oranları	99
Şekil 82. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının üst yapıştırıcının sönümlediği enerjiye olan etkisi	99
Şekil 83. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının üs yapıştırıcıda meydana gelen hasar oranına olan etkisi.....	100
Şekil 84. Üst yapıştırıcı optimizasyonu sonrası optimum konfigürasyon için çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi	102
Şekil 85. Üst yapıştırıcı optimizasyonu sonrası optimum konfigürasyon için sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrisi	103
Şekil 86. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin maksimum çarpışma kuvvetine olan etkisi	105
Şekil 87. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin toplam sönümlenen enerjiye olan etkisi	106
Şekil 88. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin yapıştırıcı tarafından sönümlenen enerjiye olan etkisi	107
Şekil 89. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin yapıştırıcıda meydana gelen hasara olan etkisi.....	109

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. IM7/8552 mekanik özellikleri.....	44
Tablo 2. Kompozit ön tapmpon girişinin malzeme modelinde kullanılan fiziksel olmayan parametreler	45
Tablo 3. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri.....	51
Tablo 4. Üst yapıştırıcı için optimizasyon parametreleri	58
Tablo 5. Yan yapıştırıcı için optimizasyon parametreleri	58
Tablo 6. Plastik şekil verme yöntemlerinin enerji sönümleyici tüpün darbe performansına olan etkisi	69
Tablo 7. Optimizasyon sonrası elde edilen kalınlık dağılımı değerleri	71
Tablo 8. Haddeleme işlemi sonrası enerji sönümleyici tüpte elde edilen kalınlık dağılımı	74
Tablo 9. Tüm seçenekler için elde edilen çarpışma kuvveti ve sönümlenen enerji miktarları	83
Tablo 10. Farklı yapıştırıcıların kullanıldığı hibrit ön tampon sistemlerinin darbe performanslarının karşılaştırılması	92
Tablo 11. Üst yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen sonuçlar	96
Tablo 12. Yan yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen sonuçlar	104

SEMBOLLER DİZİNİ

b	: Kenar uzunluğu
C, P	: Şekil değiştirme hızı parametreleri
D	: Çap
E	: Elastisite Modülü
E_p	: Plastik sertleşme modülü
E_{top}	: Sönümlenen toplam enerji miktarı
ESV	: Enerji sönümleme verimliliği
F_{maks}	: Maksimum çarpışma kuvveti
F_{ort}	: Ortalama çarpışma kuvveti
F_{ver}	: Çarpışma kuvveti verimliliği
G	: Kayma modülü
G_{IIC}, G_{IIC}	: Yapıştırıcı kırılma enerjileri
h_y	: Yapıştırıcı yüksekliği
L_c	: Enerji sönümleyici tüp boyu
N_c	: Köşe sayısı
N_T	: T şekilli köşe elemanı sayısı
N_0	: Artı şekilli köşe elemanı sayısı
Q_{MAX}	: Maksimum nominal yük
R	: Yarıçap
r_{tk}	: Tampon kirişi yarıçapı
S_{12}, S_{23}	: Kayma dayanımları

t	: Cidar kalınlığı
TYM	: Tepki yüzeyi metodolojisi
t_n^0, t_s^0	: Yapıştırıcı çekme ve kayma dayanımları
$t_{\bar{u}}$	: Üst yapıştırıcı kalınlığı
t_y	: Yan yapıştırıcı kalınlığı
v_0	: Başlangıç hızı
X_C, X_T	: Boylamasına bası ve çeki dayanımları
Y_C, Y_T	: Enlemesine bası ve çeki dayanımları
β	: Deformasyon sertleşmesi parametresi
ε_p^{eff}	: Efektif plastik şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}$	: Şekil değiştirme hızı
ν	: Poisson oranı
σ_0	: Akma gerilmesi
σ_y	: Dinamik akma gerilmesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde 2020 yılında 365.005 adet trafik kazası meydana gelmiş olup kazaya karışan vatandaşlarımızın %41'i ya yaralanmış ya da hayatını kaybetmiştir [1]. Benzer şekilde 2019 yılında yayınladığı raporda Avrupa Birliği Yol Güvenliği Komisyonu, Avrupa Birliği ülkeleri için bu oranı %81 olarak belirtmiştir [2]. Dahası ölüm yahut yaralanma meydana gelen bu kazaların %81'ini otomobil kazaları oluşturmaktadır. Çarpışmanın önden meydana geldiği böyle bir seçenek göz önünde bulundurulduğunda otomobillerde çarpışmadan kaynaklı darbeyi karşılayacak ilk kısım ön tampon sistemidir (Şekil 1).



Şekil 1. Otomobil ön tampon sistemi [3].

Otomobil ön tampon sistemi üç bileşenden meydana gelmektedir: Kapak, tampon kirişi ve ince cidarlı enerji sönümleyici tüpler. Kapak darbe performansına katkıda bulunmaz. Birincil amacı hava direncini mümkün olduğunca düşürmektir. Enerji

sönümleyici tüp yüksek miktardaki darbe enerjisini eksenel deformasyonla, tampon kirişi ise düşük miktardaki darbe enerjisini yanal deformasyonla sönümler [4]. Ön tampon sisteminin yüksek hızda meydana gelen darbeden kaynaklı enerjinin en az %15'ini, düşük hızda meydana gelen darbeden kaynaklı enerjinin ise tamamını sönümlemesi gerekmektedir [5]. Dahası, tampon kirişinin de ön tampon sisteminin sönümlendiği toplam enerji miktarının en az %25'ini sönümlemesi gerekmektedir. Dolayısı ile otomobil ön tampon sisteminin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken birtakım faktörler bulunmaktadır: Öncelikle ön tampon sistemi çarpışma esnasında otomobilin diğer bileşenlerini koruyabilecek kadar dayanıma sahip olmalıdır. Yeterli dayanıma sahip olmasının yanı sıra darbe enerjisini sönümleyerek yolcu ve yayaları koruyabilmek adına yeterli deformasyon kabiliyetine de sahip olmalıdır. Otomobillerin karbon salınım oranlarına getirilen sınırlandırmalar ve her ekstra ağırlığın karbon salınımına yaptığı katkı göz önünde bulundurulduğunda ağırlığı mümkün olduğunca az olmalıdır. Son olarak ise aerodinamik gereksinimlere uygun yapıda olması gerekmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında otomobil ön tampon sisteminin en önemli iki elemanı olan enerji sönümleyici tüpler ve tampon kirişi ele alınacaktır.

1.2. İnce Cidarlı Enerji Sönümleyici Tüpler

Metalik ve kompozit malzemelerin enerji sönümleme mekanizmaları göz önünde bulundurulduğunda aralarında önemli ölçüde farklılık olduğu bilinmektedir. Kompozit malzemeler daha gevrek bir yapıya sahip olduğundan enerjiyi delaminasyon, fiber kopması ve matris çatlaması gibi mekanizmalar yardımı ile sönümlerken [6] metalik malzemeler plastik deformasyon yoluyla enerji sönümlerler.

Çalışmanın bu kısmında metalik enerji sönümleyici tüpler incelenecek olup hangi faktörlerin bu enerji sönümleyicilerin darbe performansını nasıl etkilediğine ilişkin bilgiler verilecektir. Enerji sönümleyici tüplerin performansını etkileyen temel parametreler malzeme tipi, geometri ve yükleme çeşididir. Genellikle ince cidarlı olarak imal edilen bu yapılar için en sık kullanılan malzemeler ise alüminyum alaşımları, çelik ve fiber takviyeli kompozitlerdir.

Darbe yüküne maruz elemanların performanslarının belirlenmesinde kullanılan birtakım parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerden ilki sönümlenen toplam enerji miktarıdır ve çarpışma kuvveti tarafından yapılan işi ifade etmektedir.

$$E_{top} = \int_0^{\delta_{maks}} F d\delta \quad (1)$$

İkinci önemli parametre çarpışma esnasında eksenel yönde meydana gelen maksimum çarpışma kuvvetidir (F_{maks}). Bu kuvvetin otomobilin diğer parçalarını etkilemeyecek şekilde olabildiğince düşük olması gerekmektedir. Ortalama çarpışma kuvveti (F_{ort}) olarak ifade edilebilecek olan üçüncü parametre toplam sönümlenen enerjinin toplam yer değiştirmeye oranıyla elde edilmektedir.

$$F_{ort} = \frac{\int_0^{\delta_{maks}} F d\delta}{\delta_{maks}} \quad (2)$$

Dördüncü parametre çarpışma kuvveti verimliliği (F_{ver}) ve ortalama çarpışma kuvvetinin maksimum çarpışma kuvvetine oranı şeklinde ifade edilmektedir.

$$F_{ver} = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (3)$$

Beşinci ve son parametre olan enerji sönümleme verimliliği (ESV) ise birim kütle tarafından sönümlenen enerji miktarını ifade etmektedir.

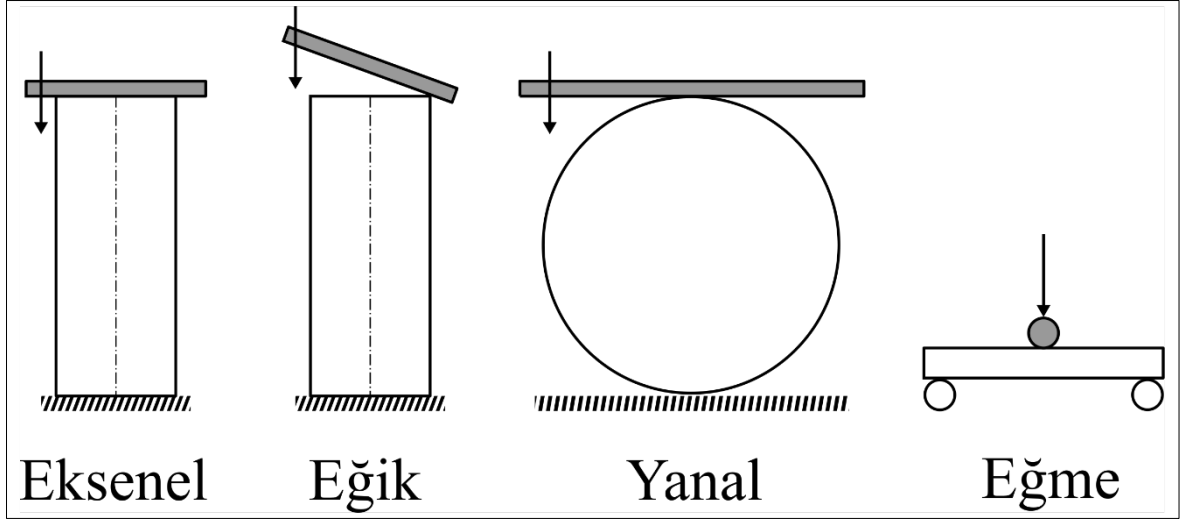
$$ESV = \frac{E_{top}}{m} \quad (4)$$

1.2.1. Enerji Sönümleyici Tüplerde Yükleme Çeşitleri

Otomobil ön tampon sistemi göz önünde bulundurulduğunda, enerji sönümleyici tüplerin genellikle çelik ve alüminyum alaşımlarından imal edildiği görülmektedir. Özellikle alüminyum alaşımları ağırlığın önemli ölçüde azalmasını sağladıklarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji sönümleyici tüp malzemesinin mekanik özellikleri darbe davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Metalik malzemeler genellikle yükleme hızına bağlı olarak statik ve dinamik şartlar altında farklı mekanik özellikler sergilerler. Çelik, alüminyum ve magnezyum gibi malzemeler deformasyon hızının artması ile birlikte daha yüksek akma ve kopma mukavemeti sergilerler. Bu davranışın enerji sönümleyici tüpün sönümlediği enerji miktarını artırdığı gözlemlenmiştir [7].

İnce cidarlı enerji sönümleyici tüplerde enerji sönümleyici geometrisi ve yükleme tipi darbe performansını önemli ölçüde etkileyen parametrelerdir. Bu parametreler enerji sönümleyici tüpün ne kadarlık bir kısmının plastik deformasyona uğrayarak enerji sönümlemeye katkıda bulunacağını doğrudan belirler. Bu yapılar göz önünde bulundurulduğunda eksenel, eğik, yanal ve eğme olmak üzere dört farklı yükleme çeşidinden bahsedilebilir (Şekil 2).

Çalışmanın kapsamını doğrudan ilgilendirmesi sebebiyle bu kısımda eksenel yüklemeye maruz enerji sönümleyici tüpler üzerinde durulacaktır. Eksenel yükleme durumunda enerji sönümleyici tüp geometrisinin büyük bir kısmı plastik deformasyona uğradığından yanal yüklemeye maruz haldeki durumuna kıyasla 10 kat daha fazla enerji sönümlemektedir [8]. Eksenel yüklemeye maruz enerji sönümleyici tüpler geometrik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda birçok farklı konfigürasyona sahip olabilmektedir. Çalışmanın takip eden kısımda ana hatlarıyla farklı geometrik konfigürasyonların darbe performansına olan etkisine işaret edilerek önem arz eden noktalar detaylandırılacaktır.



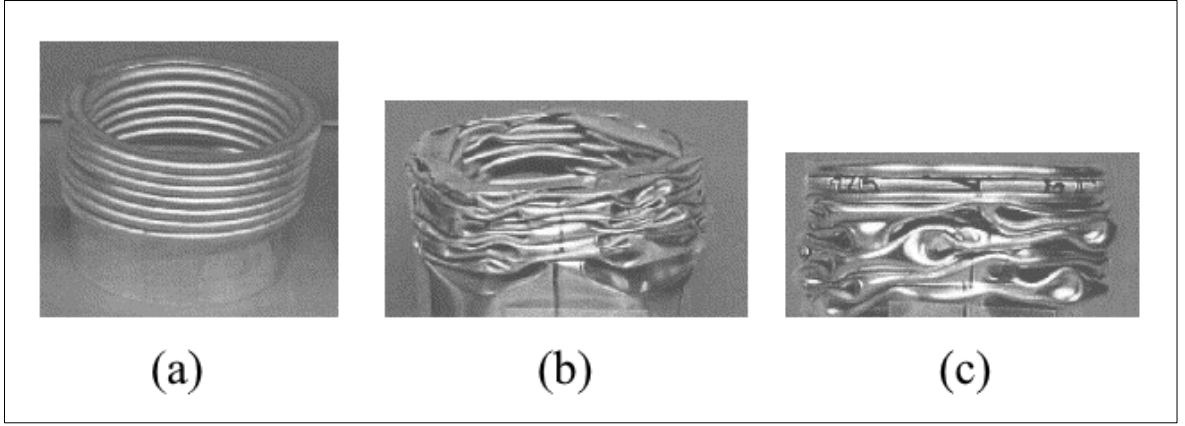
Şekil 2. Enerji sönümleyici tüplerde yükleme çeşitleri

1.2.2. Silindirik ve Kare Kesitli Enerji Sönümleyici Tüpler

Silindirik enerji sönümleyici tüplerin darbe performanslarının değerlendirilmesi bakımından gerçekleştirilen ilk çalışmaların mazisi oldukça eskiye dayanmaktadır [9–12]. Bu ilk araştırmacılar silindirik enerji sönümleyicilerin eksenel deformasyonu için analitik modeller oluşturmaya çalışmışlardır.

Eksenel yüklemeye maruz silindirik enerji sönümleyicilerde simetrik, simetrik olmayan ve karma olmak üzere üç farklı deformasyon şekli bulunmaktadır (Şekil 3). Gerçekleştirilen çalışmalar silindirik enerji sönümleyici tüplerin akma gerilmesinin (σ_0), çapının kalınlığına oranının (D/t) ve uzunluğunun kalınlığına oranının (L/t) bu deformasyon şekillerinin ortaya çıkışında önemli ölçüde belirleyici olduğunu göstermiştir. Bu deformasyon şekillerini göz önünde bulundurarak birçok araştırmacı her bir deformasyon modu için ayrı ayrı teorik modeller geliştirmeye çalışmıştır. Guillow vd.'nin çalışması bu bağlamda dikkat çekicidir [13]. Bu çalışmada ortalama çarpışma kuvveti deformasyon şekline bağımsız olmak üzere ampirik olarak şu şekilde ifade edilmiştir:

$$F_{ort} = 18,075\sigma_0 t^2 \left(\frac{D}{t}\right)^{0,32} \quad (5)$$



Şekil 3. Eksenel yüklemeye maruz silindirik enerji sönümleyici tüpün deformasyon şekilleri: (a) Simetrik, (b) simetrik olmayan, (c) karma [13].

Geometrik parametrelere ek olarak yükleme hızının da deformasyon şeklini etkilediği belirlenmiştir [14]. Her ne kadar silindirik enerji sönümleyici tüpler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar konuyu kavrayışımızı derinleştirmiş ve müspet sonuçlar elde edilmiş olsa da silindirik enerji sönümleyici tüplerin otomobilin diğer parçalarına olan montajı oldukça problemlidir. Dolayısıyla bu problem karşısında araştırmacılar kare kesitli enerji sönümleyicilere yönelmişlerdir.

Silindirik enerji sönümleyici tüplerle kıyaslandığında kare kesitli enerji sönümleyici tüplerin daha az enerji sönümlediği bilinmektedir. Kare kesitli enerji sönümleyici tüpler %30 daha düşük performans sergilemektedir [15]. Silindirik enerji sönümleyici tüplere benzer şekilde kare kesitli enerji sönümleyici tüplerin de kesit ölçüleri (b , t) deformasyon şekli üzerinde belirleyicidir. Deformasyon şeklinden bağımsız olarak ortalama çarpışma kuvveti Wierzbicki ve Abramowicz tarafından şu şekilde ifade edilmiştir [16]:

$$F_{ort} = 9,56\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} \quad (6)$$

Sonrasında bu ifade deformasyon sertleşmesinin etkisi de hesaba katılacak şekilde güncellenmiş ve aşağıdaki formu almıştır [10]:

$$F_{ort} = 13,06\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} \quad (7)$$

Silindirik ve kare kesitli enerji sönümleyici tüpler göz önünde bulundurulduğunda bahsedilen deformasyon şekillerine ek olarak enerji sönümleyici tüpün boyutlarına bağlı olarak burkulma meydana gelebilmektedir. Fakat enerji sönümleyici tüpün stabilitesinin kaybolmasına ve darbe performansının düşmesine sebebiyet veren bu durumdan mümkün mertebe kaçınmak gerekmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar arzu edilen deformasyon şeklinin yakalanmasında itibar edilmesi gereken bir kritik boy olduğunu ortaya koymuştur. Fakat bu kritik boy nihai değildir. Akma gerilmesi ve deformasyon sertleşmesi gibi mekanik özelliklerin yanı sıra yükleme hızından da etkilenmektedir [17–21].

1.2.3. Konik Enerji Sönümleyici Tüpler

Konik enerji sönümleyici tüpün darbe davranışı üzerinde geometrik parametreler olan kesiti, kalınlık ve eğim açısı etkili olmaktadır. Konik enerji sönümleyici tüpler, düz enerji sönümleyici tüplere nazaran eğik yüklerden kaynaklı darbe enerjisini sönümlemede daha kabiliyetli oldukları için tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra daha stabil plastik deformasyon davranışı göstermekte ve daha düşük maksimum çarpışma kuvveti meydana getirmektedir. Ek olarak eğim açısı var olan tasarım kriterlerine bir parametre daha ekleyerek araştırmacıların etki alanını genişletmektedir [7] Fakat aynı kesit alanına, uzunluğa ve kalınlığa sahip biri düz diğeri konik iki enerji sönümleyici tüp göz önünde bulundurulduğunda konik enerji sönümleyici tüpün ağırlığının düz enerji sönümleyici tüpe göre daha fazla olacağı açıktır. Dolayısı ile konik enerji sönümleyici tüpün enerji sönümleme verimliliği daha düşük olmaktadır. Bu sebeple ağırlığın önemli olduğu ve mümkün olduğunca düşük tutulması gereken uygulamalarda düz enerji sönümleyici tüp kullanmanın daha uygun olduğu belirtilmiştir [22]. Silindirik, kare ve altıgen kesit alanına sahip konik enerji sönümleyici tüplerin enerji sönümleme davranışlarının kıyaslandığı bir başka çalışmada ise silindirik kesit alanına sahip enerji sönümleyici tüpün enerji sönümleme verimliliğinin daha iyi olduğu belirlenmiştir [23].

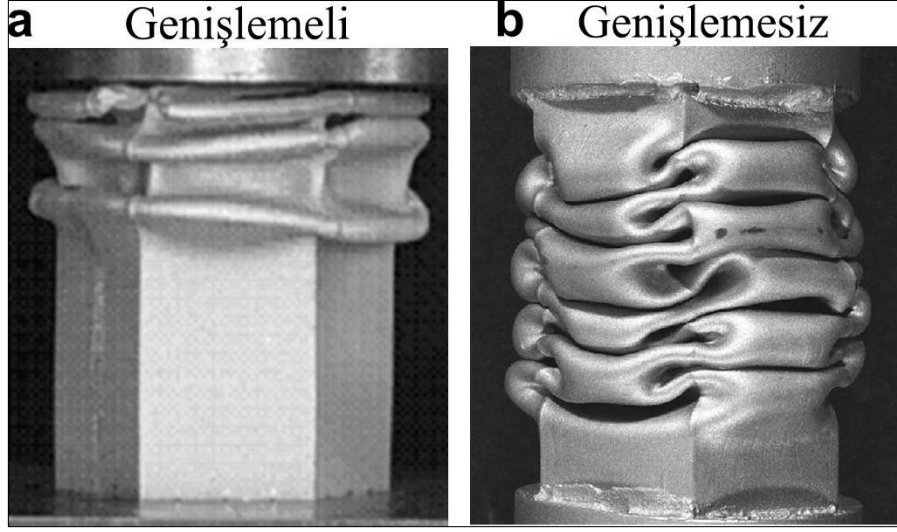
1.2.4. Çokgen Enerji Sönümleyici Tüpler

Kare kesitli enerji sönümleyici tüplerde deformasyonun özellikle köşelerde yoğunlaştığı bilinmektedir. Bu noktadan hareketle araştırmacılar daha fazla köşe sayısına sahip enerji sönümleyici tüpün plastik deformasyon miktarının ve bağlı olarak sönümlenen enerji miktarının artmasına katkıda bulunacağını varsayarak çokgen kesitli enerji sönümleyici tüpler üzerine yapılan çalışmaları başlatmışlardır.

Çalışmaların büyük çoğunluğunda altıgen ve sekizgen kesitli enerji sönümleyici tüplerin enerji sönümleme performansının arttığı belirtilmiştir. Abramowicz ve Wierzbicki altıgen kesitli enerji sönümleyici tüpün ortalama çarpışma kuvvetini şu şekilde belirtmiştir [24]:

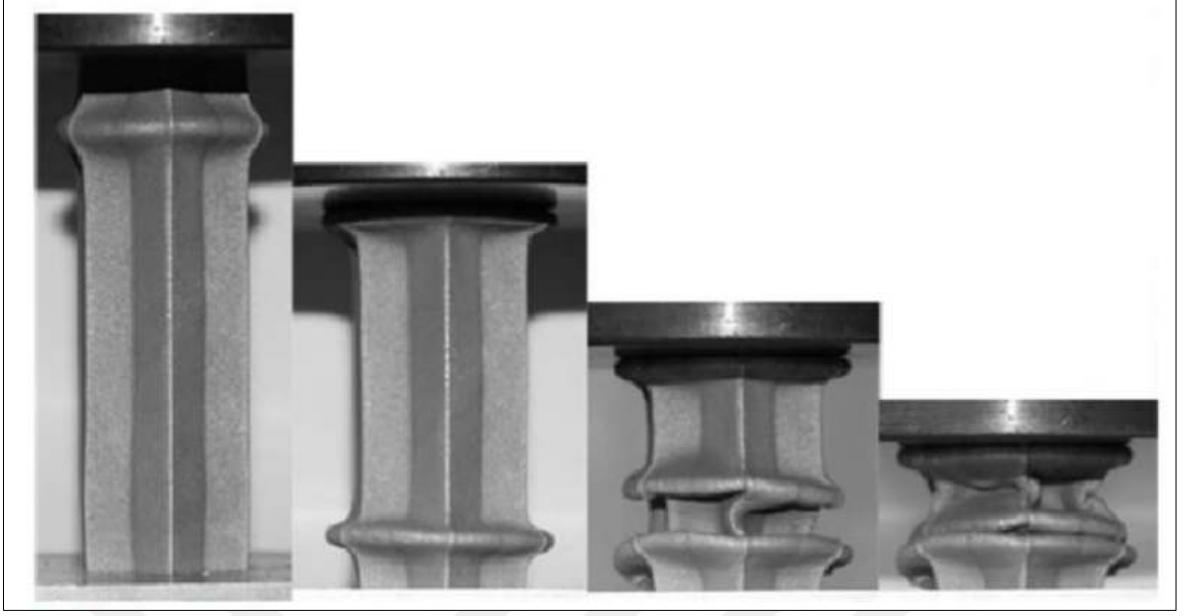
$$F_{ort} = 20,23\sigma_0 b^{0,4} t^{1,6} \quad (8)$$

Çokgen enerji sönümleyici tüplerin deformasyon davranışı temel olarak enerji sönümleyicinin duvarları arasındaki açı tarafından belirlenmektedir. 90°'den küçük açılarda daha çok genişlemesiz (*inextensional*) deformasyon, 90 – 120° arasında karma deformasyon ve 120° üzerinde genişlemeli (*extensional*) deformasyon meydana gelmektedir [25].



Şekil 4. Altıgen kesitli enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışı: (a) Genişlemeli deformasyon, (b) genişlemesiz deformasyon [25].

Ayrıca enerji sönümleme verimliliğinin en iyi $90 - 120^\circ$ arasında elde edildiği belirtilmiş hatta bazı araştırmacılar 11'in üzerindeki köşe sayısının enerji sönümleme verimliliğini daha fazla artırmadığını gözlemlemiştir [15,26]. Bu durum dışbükey enerji sönümleyici tüpün köşe sayısı belli bir miktarın üzerine geçtiğinde darbe esnasında enerji sönümleyicinin duvarları arasındaki açıyı muhafaza edememesi ile ilişkilendirilmiş [27] ve sonuç olarak içbükey çokgen enerji sönümleyici tüp geometrilerinin ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir (Şekil 4).



Şekil 5. Yıldız şekilli içbükey çokgen enerji sönümleyici tüpün aksenal yük altında deformasyon davranışı [28].

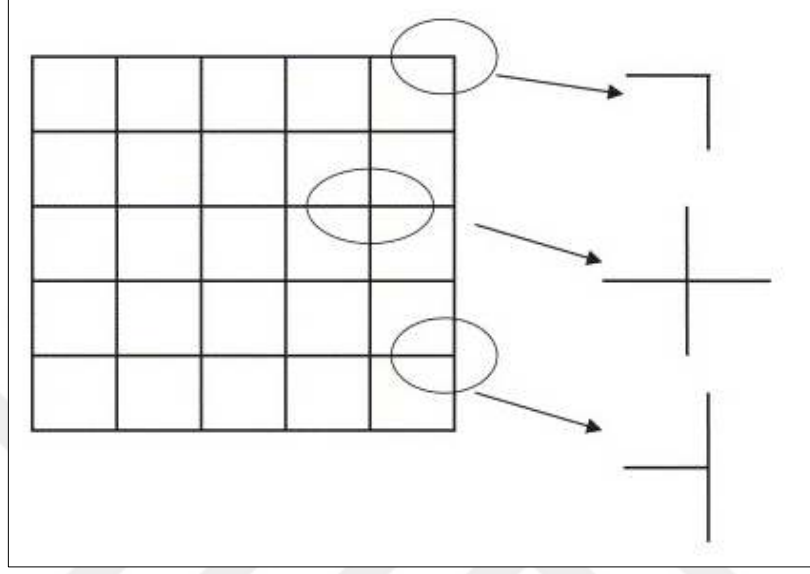
1.2.5. Çok Hücreli Enerji Sönümleyici Tüpler

Köşe sayısını artırmanın sönümlenen enerji miktarını artırdığı yaklaşımının bir diğer yansıması çok hücreli enerji sönümleyici tüplerdir. Bu enerji sönümleyici tüplerde iç kısma köşe sayısını artırma maksadı ile hücreler yerleştirilmiştir ve enerji sönümleyici tüpün sönümlendiği enerji miktarı kullanılan köşe elemanı sayısı ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 5-6). Statik yükleme altında kare kesitli çok hücreli enerji sönümleyici tüpün ortalama çarpışma kuvveti şu şekilde ifade edilmiştir [29]:

$$F_{ort} = \sigma_0 t \sqrt{(N_C + N_0 + N_T) \times \pi \times L_C \times t} \quad (9)$$

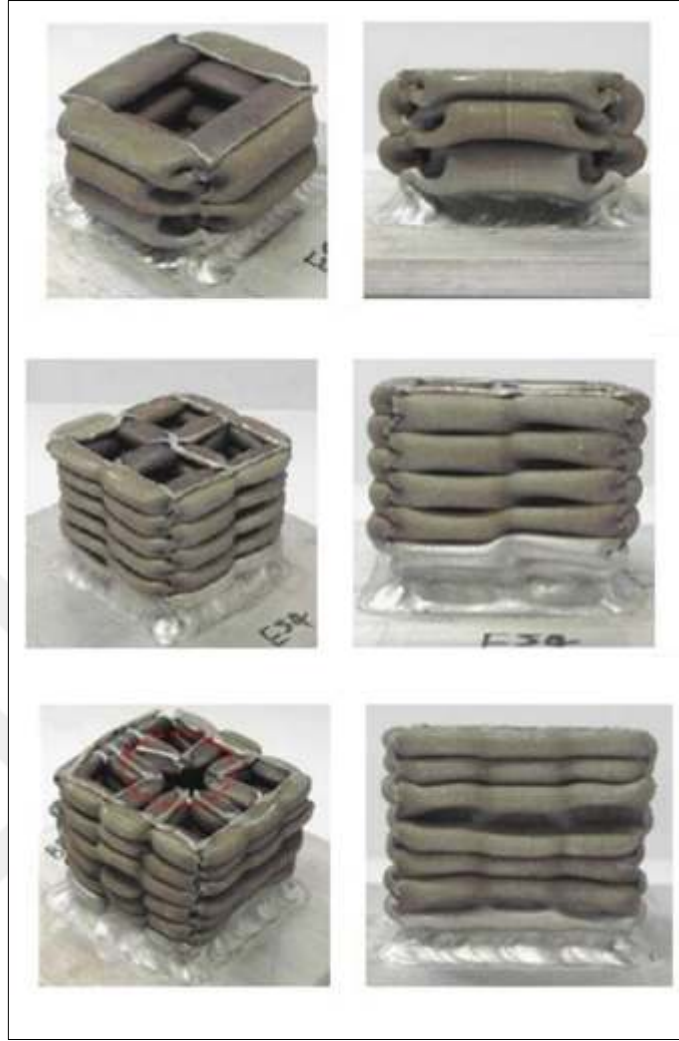
Bu eşitlikte N_C köşe sayısını, N_0 “artı” şeklindeki köşe elemanı sayısını, N_T “T” şeklindeki köşe elemanı sayısını, t kalınlığı ve L_C enerji sönümleyicinin uzunluğunu ifade

etmektedir. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere köşe elemanı sayısını artırmak sönümlenen enerji miktarını artırdığı gibi aynı zamanda ortalama çarpışma kuvvetini de artırmaktadır.



Şekil 6. Çok hücreli enerji sönümleyici tüplerde kullanılan köşe elemanı çeşitleri [29].

Farklı kesit şekillerine sahip çok hücreli enerji sönümleyici tüpler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar bu yapıların enerji sönümleme verimliliklerinin yüksek olduğunu göstermiştir. Kare kesitli enerji sönümleyici tüp göz önünde bulundurulduğunda tek hücreli enerji sönümleyici tüpe kıyasla enerji sönümleme verimliliğindeki artış %220'ye kadar ulaşabilmektedir [30]. Dahası bu durum, verimlilikteki artışta farklılıklar olmakla birlikte sekizgen, altıgen, kare ve üçgen kesitli çok hücreli enerji sönümleyici tüpler için de geçerlidir [31].



Şekil 7. Tek ve çok hücreli kare kesitli enerji sönümleyici tüpün aksenal yük altında deformasyon davranışı [32].

1.2.6. Değişken Kalınlığa Sahip Enerji Sönümleyici Tüpler

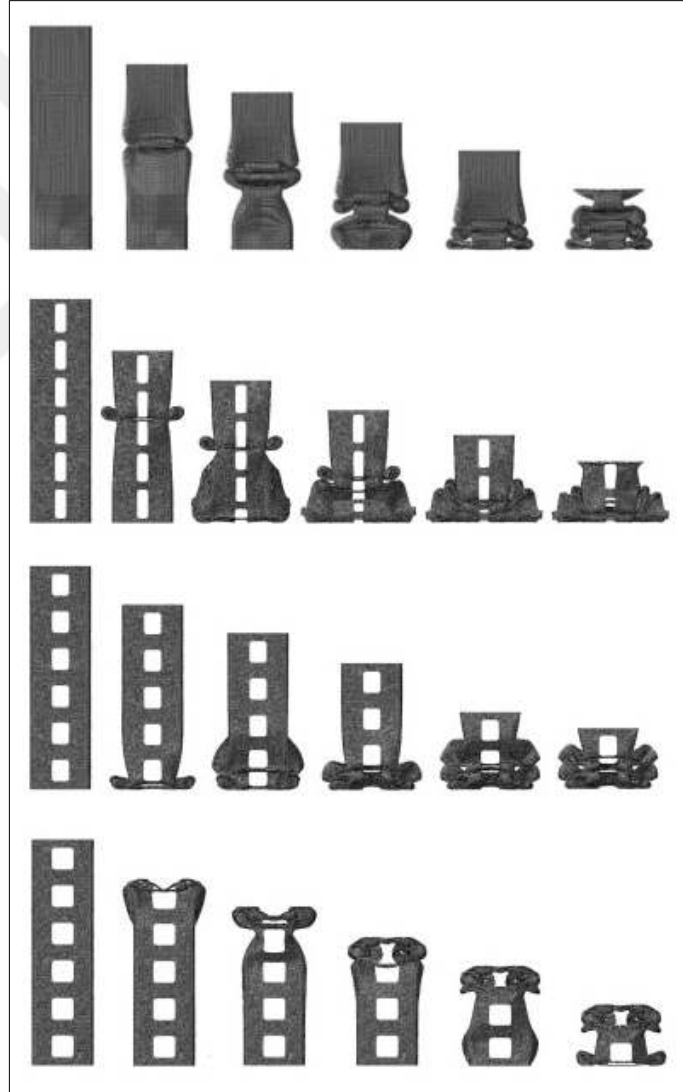
Değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpler temel olarak malzeme dağılımını uzunluk boyunca kontrol edildiği yapılardır. Konik enerji sönümleyici tüplerdeki eğim açısına benzer olarak değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüplerin kalınlık dağılımını ifade eden ekstra bir parametreye sahip olması araştırmacılara farklı tasarımlar ortaya koyabilme imkânı tanımıştır [33]. Buradaki kalınlık dağılımı uzunluk boyunca değişmektedir.

Ana hedef başlangıçta meydana gelen maksimum çarpışma kuvvetinin düşürülmesidir. Bu bağlamda doğrusal olmayan kalınlık dağılımı enerji sönümleyici tüpün kritik bölgelerinde ayarlamalar yapılarak darbe performansının optimize edilmesine imkân sağladığından daha fazla tercih edilmiştir. Çünkü enerji sönümleyici tüpün bir bölgesinde diğer bölgelerine nispeten daha düşük kalınlıklar kullanmak plastik deformasyonun bu bölgeden başlamasını sağlamakta ve daha düşük maksimum çarpışma kuvveti meydana getirmektedir. Lakin burada göz önünde bulundurulması gereken önemli bir başka husus bulunmaktadır. Bu yaklaşım başlangıçta meydana gelen maksimum çarpışma kuvvetinin düşürülmesini sağlamakta fakat sonrasında takip eden aşamalarda meydana gelen çarpışma kuvvetini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu husus şu şekilde açıklanabilir: Sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp göz önünde bulundurulduğunda kalınlık sabit olduğundan başlangıçta meydana gelen maksimum çarpışma kuvveti plastik deformasyonu tek seferde başlatmakta ve sonrasında kalınlık sabit olduğundan enerji sönümleyici tüp tamamen deforme olana kadar tepki kuvveti bir daha yükselmemektedir. Fakat değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp göz önünde bulundurulduğunda plastik deformasyon kalınlığın en düşük olduğu bölgeden başlayacağı için başlangıçta meydana gelen maksimum çarpışma kuvveti nispeten düşüktür. Fakat bu bölge tamamen deforme olduğunda bir sonraki bölgenin kalınlığı daha fazla olduğundan plastik deformasyonun tekrar başlayabilmesi için ek kuvvet gerekmektedir. Bu ise her bir kalınlık bölgesinde kalınlığın artışı ile birlikte çarpışma kuvvetinin giderek artması anlamına gelmektedir [34]. Sönümlenen enerji miktarı açısından değerlendirildiğinde ise değişken kalınlığın sönümlenen enerji miktarını %120'ye varan oranlarda artırdığı belirlenmiştir. İkinci bir hedef olarak ise burkulma ihtimalinin önüne geçilmek istenmesinden bahsedilebilir. Bu amaç için gerçekleştirilen ve değişken kalınlığın burkulma ihtimalini düşürdüğünü bildiren çalışmalar da mevcuttur [35].

1.2.7. Deformasyon Tetikleyici Mekanizmalar

Darbe başlangıcında meydana gelen maksimum çarpışma kuvveti enerji sönümleyici tüpte plastik deformasyonun başlatılması için gereken kuvvettir. Bu kuvvetin mümkün olduğunca azaltılması ihtiyacı araştırmacıları enerji sönümleyici tüp üzerinde deformasyon kolaylaştırıcı/tetikleyici mekanizmalar oluşturma yönüne sevk etmiştir. Bu amaca enerji

sönümleyici tüp geometrisi üzerinde yapılacak radikal değişikliklerle ulaşılabileceği gibi delik açma ve girinti oluşturma gibi daha basit yöntemler kullanılarak da ulaşılabilmektedir (Şekil 7). Dolayısı ile bu tetikleyici mekanizmaları kullanan enerji sönümleyici tüpler arasında standart bir konfigürasyondan bahsetmek mümkün değildir. Enerji sönümleyici tüpler üzerindeki deformasyon tetikleyiciler yükleme esnasında başlangıçtaki gerilmeleri artırarak deformasyonu kolaylaştırmaktadır [36]. Ayrıca aynı yöntem daha stabil bir deformasyon şekli elde etmek amacı ile de tercih edilmektedir [37].

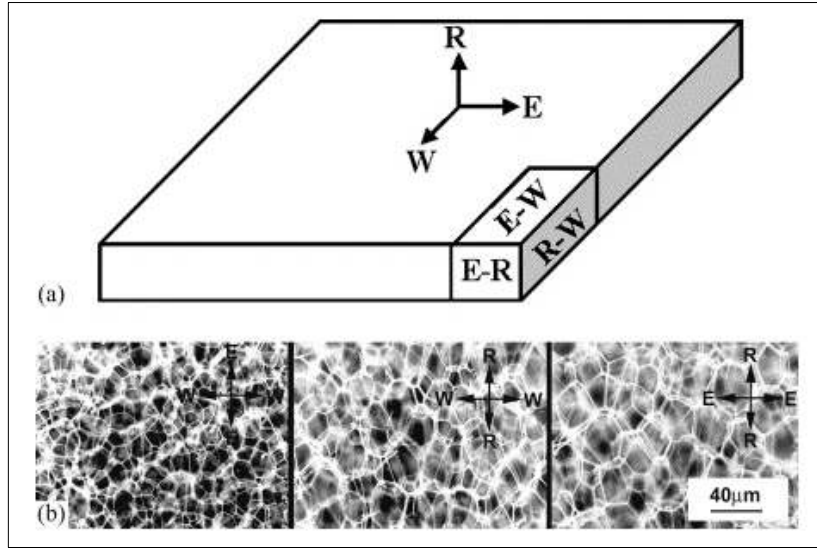


Şekil 8. Deformasyon tetikleyici mekanizmaların kare kesitli enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışına etkisi [38].

1.2.8. Dolgulu Enerji Sönümleyici Tüpler

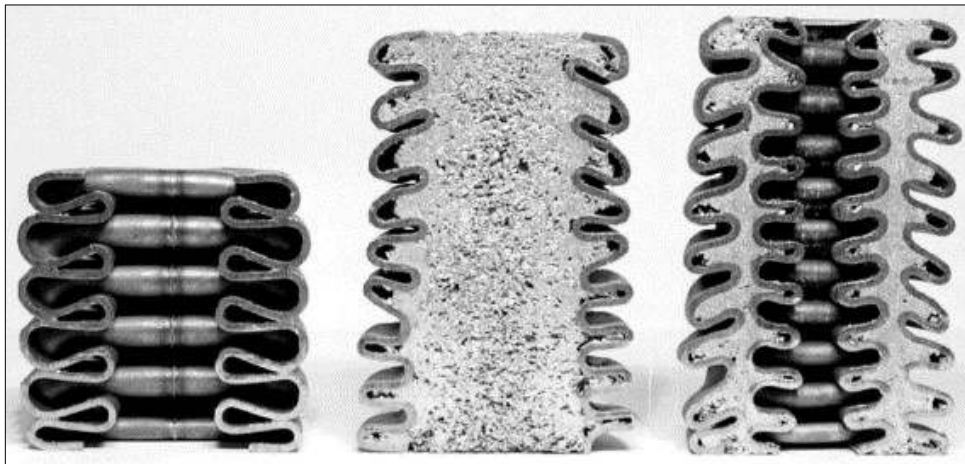
Enerji sönümleyici tüplere minimum ağırlıkta maksimum enerji sönümleme kabiliyeti kazandırmanın bir yolu da dolgu malzemesi kullanmaktır. Bu amaçla tercih edilen malzemelerinin başlıcaları fiber takviyeli poliamid [39], poliüreatan [40] ve metal köpüklerdir [41]. Dolgu malzemesinin mekanik özellikleri hücreli mikro yapıya, dolgu malzemesinin yoğunluğuna ve enerji sönümleyici malzeme tipine bağlıdır [42].

Bu dolgu malzemeleri oldukça düşük çarpışma kuvveti sergilemelerinin yanı sıra deformasyon süresince çarpışma kuvveti oldukça sabit bir trende sahiptir. Dolayısı ile dolgu malzemesi kullanımı ağırlığı ve çarpışma kuvvetini fazlaca etkilemeden sönümlenen enerji miktarını artırma yolunda oldukça etkili bir yöntemdir. İçi boş enerji sönümleyiciler ile kıyaslandığında dolgu malzemesi kullanımı enerji sönümleme verimliliğini artırmakta ve burkulma ihtimalini azaltmaktadır. Ayrıca deformasyon şekli daha sıkı hale gelirken oluşan kat sayısı artmaktadır. Darbe davranışındaki bu değişikliklerin temel sebebi enerji sönümleyici tüp ve dolgu malzemesi arasındaki etkileşimdir. Dolgu malzemesi kullanımı içedönük ve dışadönük deformasyona direnç göstermekte ve kat boyunun azalarak kat sayısının artmasına sebebiyet vermektedir. Bir diğer etken ise enerji sönümleyici ve dolgu malzemesi arasındaki sürtünmedir [43,47]. Dolayısı ile dolgulu enerji sönümleyici tüpün ürettiği çarpışma kuvveti sadece köpük ya da boş enerji sönümleyici tüp kullanıldığında üretilen çarpışma kuvvetinden daha yüksek olmaktadır [48].

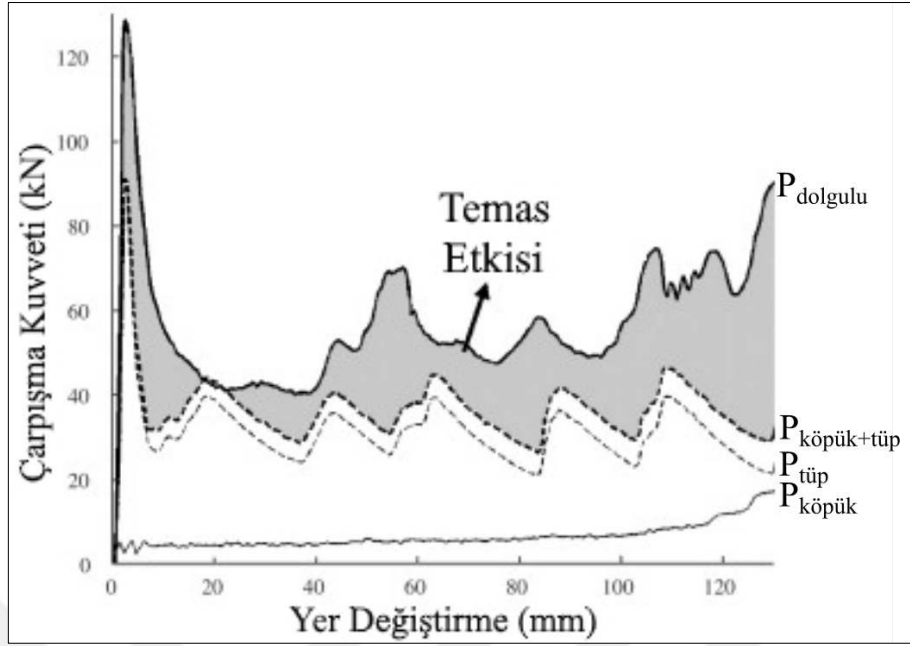


Şekil 9. Dolgu malzemesi iç yapısı [43].

Enerji sönümleyici tüplerde dolgu malzemesi kullanımı Reid vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile birlikte başlamıştır [44,45]. Bu çalışmalarda kare ve dikdörtgen kesitli enerji sönümleyici tüpler poliüretan köpük ile doldurularak statik ve dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Sonrasında çalışmaların bu yönde hız kazanması ile birlikte dolgu malzemesi dairesel [43], altıgen ve sekizgen [46] gibi farklı kesit alanlarına sahip enerji sönümleyici tüplere de uygulanmıştır.



Şekil 10. Dolgu malzemesinin enerji sönümleyici tüpün deformasyon davranışına etkisi [46].



Şekil 11. Enerji sönümleyici tüpte dolgu malzemesi kullanımının çarpışma kuvvetine etkisi [48].

1.3. Tampon Kirişi

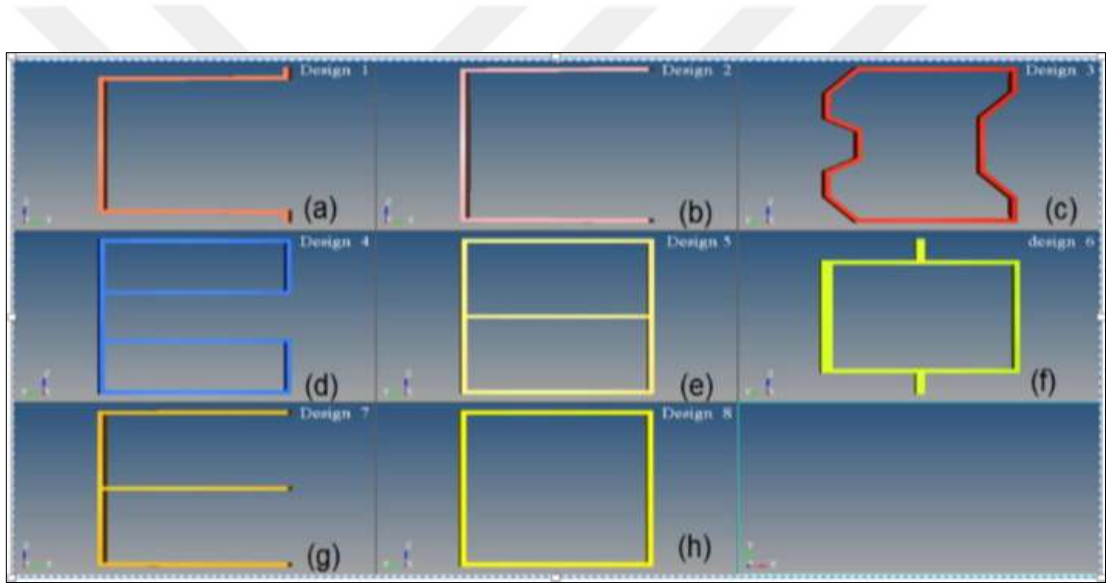
Tampon kirişinin darbe performansını ve bilhassa sönümlediği enerji miktarını etkileyen temel faktörler kesit şekli, iç destekler, kalınlık, tampon kirişi şekli ve malzeme çeşididir. Çalışmanın bu kısmında her bir faktör ana hatlarıyla ele alınacak ve darbe davranışını ne ölçüde etkilediğinden bahsedilecektir.

1.3.1. Kesit Şeklinin Etkisi

Tampon kirişinin kesit şeklinin optimize edilmesi; dayanımı, stabiliteyi ve eğilmeye karşı direnci artırmaktadır [49]. Fakat tampon kirişinin kesit şekli göz önünde bulundurulduğunda maalesef enerji sönümleyicilerde olduğu gibi kare, altıgen, dairesel gibi standart şekillerden bahsetmek mümkün değildir. Araştırmacılar problemin gereksinimlerine bağlı olarak farklı tasarımlar ortaya koymaktadır. Yine de yaygın olarak

araştırmaya konu olmaları sebebiyle birkaç kesit şeklinden bahsedilebilir. Bunlar “açık şapka”, “C”, “haddelenmiş”, “açık B”, “kapalı B”, “kapalı şapka”, “E” ve “kare” kesitlerdir (Şekil 12)

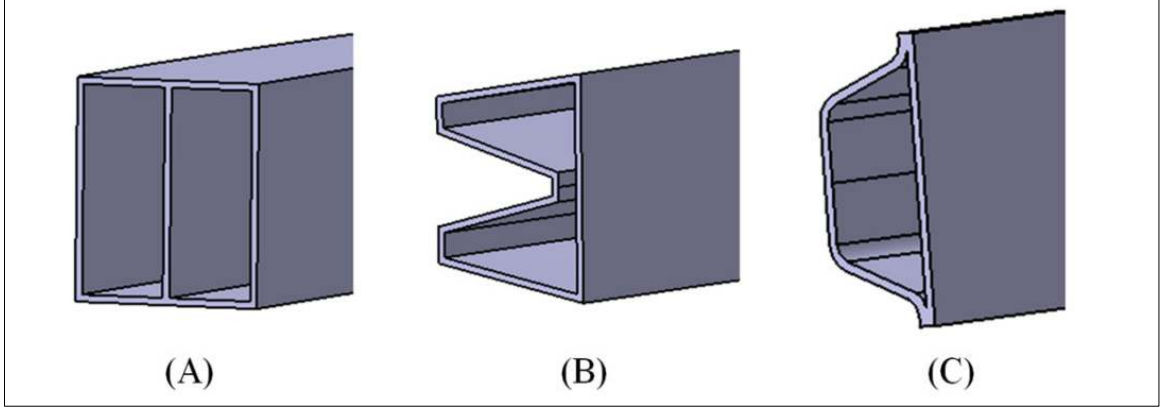
Godara ve Nagar karbon fiber kompozit tampon kirişi için farklı hızlar altında tüm bu kesit şekillerinin etkisini incelemişlerdir [50]. Çalışma sonunda elde edilen bulgular aynı tampon kirişinin hız arttıkça gerilme ve yer değiştirme miktarının arttığını göstermiştir. Ayrıca meydana gelen maksimum yer değiştirme tasarım kriteri olarak göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonucun “açık şapka” olarak bilinen kesit alanından elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 12. Tampon kirişinde kullanılan farklı kesit şekilleri: (a) Açık şapka kesit, (b) C kesit, (c) haddelenmiş kesit, (d) açık B kesit, (e) kapalı B kesit, (f) kapalı şapka kesit, (g) E kesit ve (h) kare kesit [50].

Fakat bahsedildiği gibi çalışmalarda kullanılan kesit şekilleri Şekil 12’de verilenlerle sınırlı değildir. Çalışmanın kapsamına bağlı olarak farklı tasarımlar da mevcuttur. Liu vd. çalışmalarında başlangıç aşamasında üç farklı konfigürasyon (Şekil 13) ortaya koymuş ve enerji sönmüleme performanslarını değerlendirmiştir [51]. Sönümlenen enerji göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonuç “kapalı B” kesit şeklinden (Şekil 13-a) elde edilmiştir. Sönümlenen enerji ve ağırlığın azaltılması göz önünde bulundurulduğunda ise karbon fiber

kompozit malzemenin enerji sönümleme kabiliyeti sınırlı olduğundan alüminyumla birlikte kullanılması gerektiği belirtilmiştir.



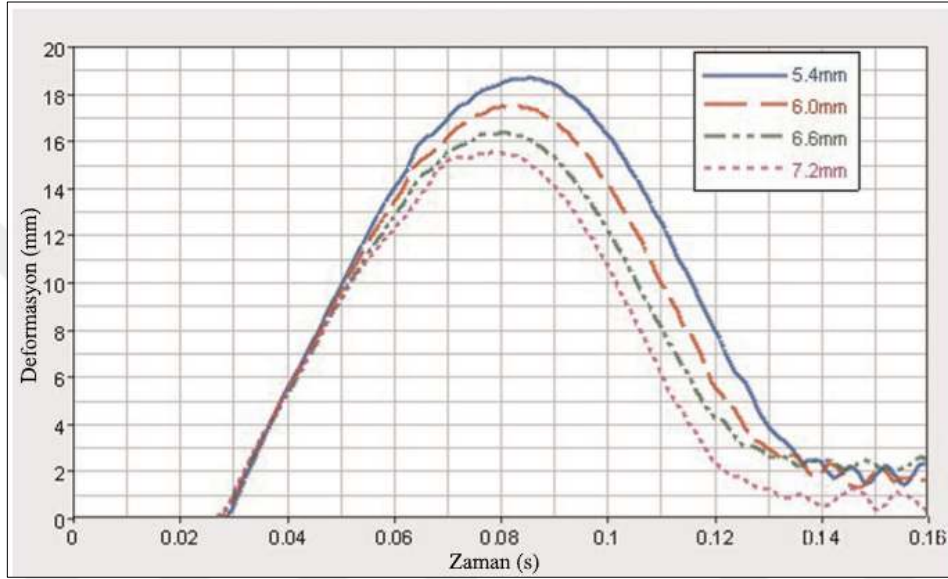
Şekil 13. Tampon kirişi kesiti için alternatif şekiller [51].

Ancak tampon kirişi kesit şekline ilişkin çalışmaların daha çok deneme yanılma yolu ile ilerlediği görülmektedir. İlk aşamada belirlenen kesit şekillerinin neye dayanarak belirlendiği yayınların büyük çoğunluğunda belirtilmemiş ve temellendirilmemiştir. Bu durum ise optimizasyon öncesi önerilen konfigürasyonların keyfi olduğu izlenimini uyandırmaktadır. Dolayısı ile araştırılan konu aynı olmakla birlikte bir hayli çok konfigürasyon ortaya çıkmakta [4,52,53] ve tüm bulguların süzülüp uygun kesit şeklinin ne gibi özelliklere sahip olması gerektiğinin belirlenmesi imkansız hale gelmektedir. Bu duruma karşıt bir örnek oluşturan sınırlı sayıdaki çalışmalardan biri olarak Kim vd.'nin çalışmasından bahsedilebilir [54]. Bu çalışmada kesit şekli kapsamında en önemli parametrenin tampon kirişinin yüksekliği olduğundan bahsedilmiş, sönümlenen enerji miktarını önemli ölçüde etkilediğini ve tampon kirişinin çarpılmasını engellediğini belirtmiştir.

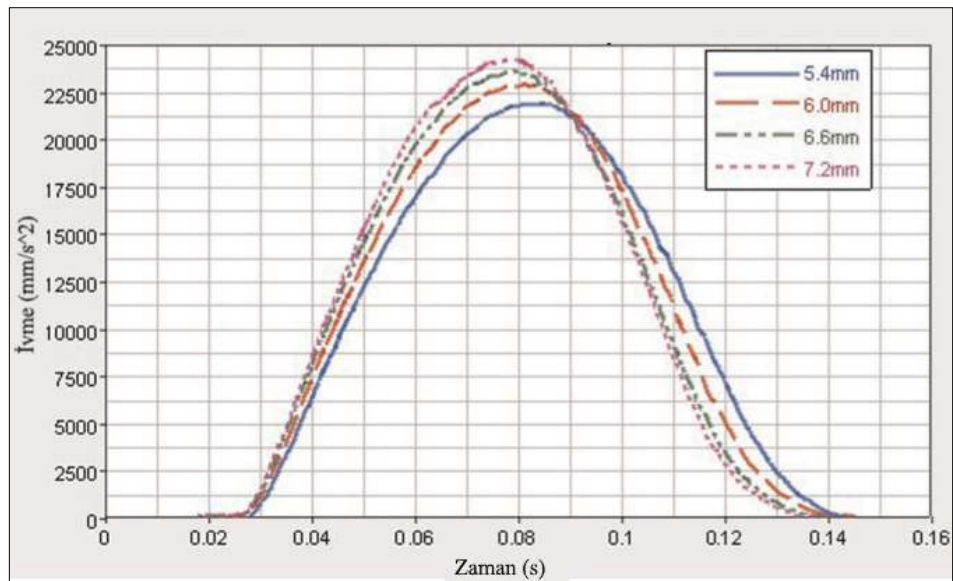
1.3.2. Kalınlığın Etkisi

Kullanılan malzeme çeşidinden bağımsız olarak kalınlığın artırılması ya da azaltılmasının tampon kirişinin darbe davranışını etkilediği bilinmektedir. Kalınlığı artırmak her ne kadar meydana gelen deformasyon miktarını düşürse de (Şekil 14) tampon kirişinin

rijitliğinde meydana gelen artış ivmelenmeyi ve bağlı olarak ortaya çıkan çarpışma kuvvetini artırmaktadır (Şekil 15). Kalınlığın artırılması darbe esnasında araca daha fazla kinetik enerji transferi olmasına sebebiyet vermekte plastik şekil değiştirme kaynaklı sönümlenen enerji miktarı azalmaktadır [55].



Şekil 14. Karbon fiber tampon kirişi için kalınlığın deformasyona olan etkisi [56].



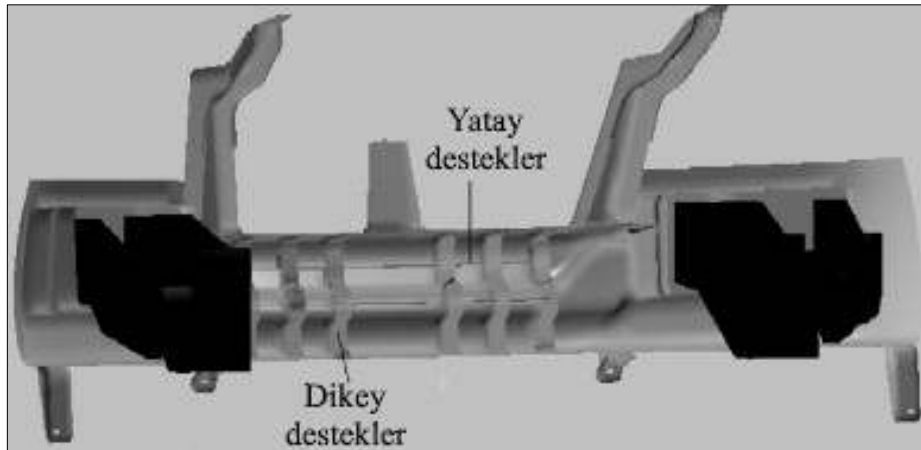
Şekil 15. Karbon fiber tampon kirişi için kalınlığın ivmelenmeye olan etkisi [56].

Her ne kadar ilk bakışta kalınlığın artırılmasının darbe performansını olumlu etkileyeceği düşünülse de darbe performansı göz önünde bulundurulduğunda daha fazla kalınlığın daha iyi sonuçlar vereceği düşüncesi yanlıştır. İvmelenmenin mümkün olduğunca azaltılması oldukça önemlidir. Çünkü ivmeye bağlı olarak çarpışma kuvvetinde meydana gelen artış hasarın otomobilin diğer parçalarına ve hatta yolculara sirayet etmesine sebebiyet verebilir. Dolayısı ile ağırlığın azaltılması ve darbe performansı birlikte düşünüldüğünde kalınlığın mümkün olduğunca düşük tutulmasının daha iyi sonuç verdiği görülmektedir [56].

Kalınlığın tüm tampon kirişi için artırılmasının yanı sıra bir diğer yaklaşım ise tampon kirişindeki kritik bölgelerin tespiti ve bu bölgelerin yerel olarak ikmal edilmesidir. Bu sayede hem ağırlığın ve bağlı olarak ivmelenme ve çarpışma kuvvetinin orantısız artışı önlenmekte hem de kritik bölgelerin darbe performansı açısından güçlenmesi sağlanmaktadır [57,58].

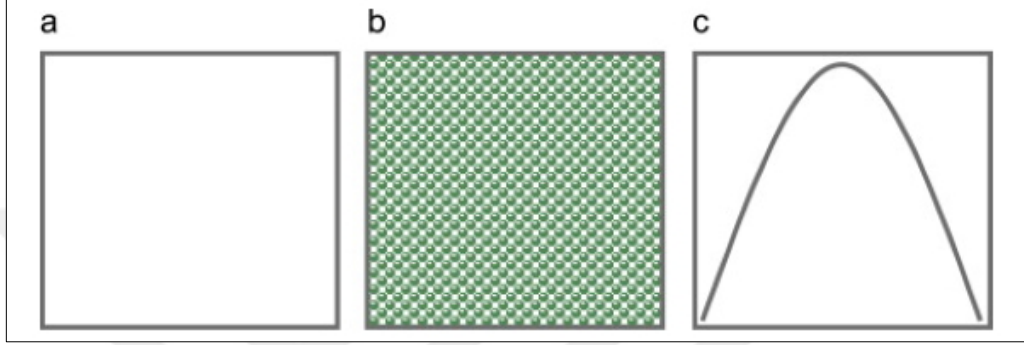
1.3.3. İç Desteklerin Etkisi

Tampon kirişinin iç destekler ile takviye edilmesi amacıyla kullanılan yapılar genel olarak tampon kirişi içerisinde kullanılan destek çubukları ve dolgu malzemeleridir.



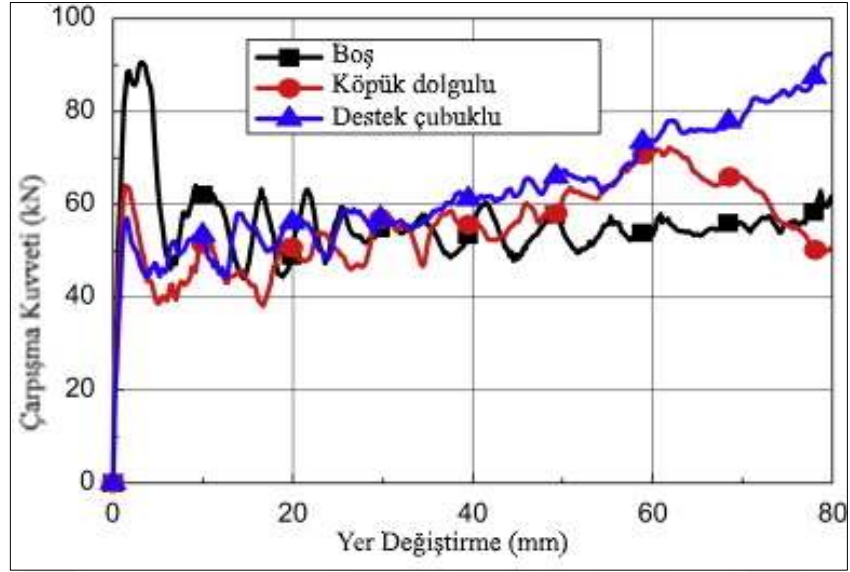
Şekil 16. Tampon kirişinin destek çubukları ile takviye edilmesi [55].

Destek çubukları az miktarda takviye malzemesi kullanılarak tampon kirişinin rijitliğini artırmakta ve darbe esnasında tampon kirişinin çarpılmasının önüne geçmektedir. Destek çubukları kullanıldığında deformasyonun %13-19 oranında azaldığı, maksimum çarpışma kuvvetinin %7 oranında artırdığı belirlenmiştir. [55,59].

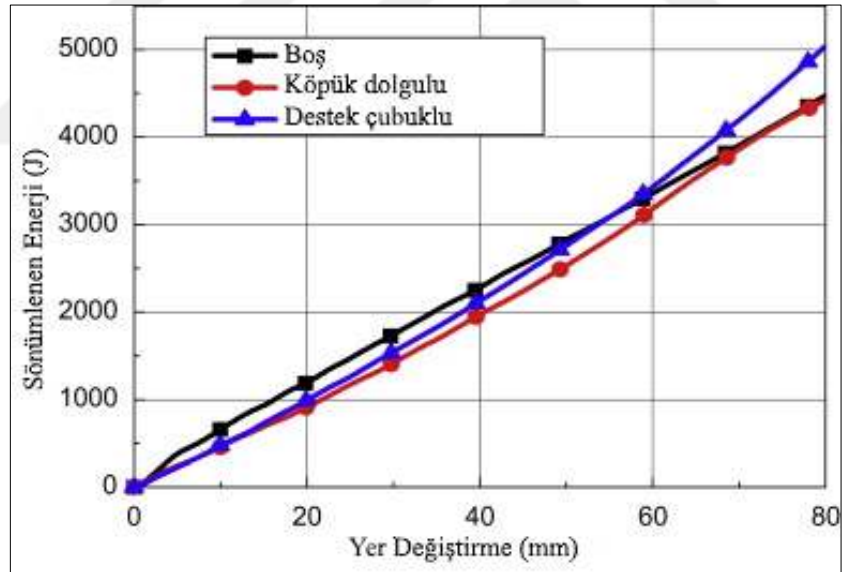


Şekil 17. Tampon kirişinde iç destek olarak kullanılabilecek yapılar: (a) Boş, (b) köpük dolgu ve (c) destek çubuğu [60].

Dolgu ve destek çubuklarının etkisinin kıyaslandığı bir diğer çalışmada [60] ise (Şekil 17) dolgu kullanılımasındansa destek çubuğu kullanımının darbe performansı açısından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Destek çubuğu kullanılarak oluşturulan tampon kirişi daha düşük miktarda çarpışma kuvveti üretmiş ve daha fazla enerji sönümlenmiştir (Şekil 18-19). Fakat aynı performansı sergileyecek şekilde tampon kirişinin destek çubuksuz olarak yeniden tasarlanmasının imalat kolaylığı açısından yararlı olacağı da belirten çalışmalar da mevcuttur [55].



Şekil 18. İç desteklerin çarpışma kuvvetine olan etkisi [60].



Şekil 19. İç desteklerin sönümlenen enerji miktarına etkisi [60].

1.3.4. Malzemenin Etkisi

Tampon kirişinde kullanılmak üzere seçilecek malzemenin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Çünkü uygun olmayan malzeme seçimi tampon kirişinin işlevsiz hale gelmesine sebebiyet verebilir. Uygun malzemenin seçimi ise tampon kirişinin ne tür yüklemelere maruz kalacağı, çevresel şartlar, elde bulunan imalat prosesleri ve maliyet gibi parametrelere bağlıdır [61]. Bu bağlamda metalik ya da kompozit malzemeler tek başlarına kullanılabileceği gibi farklı metalik malzemelerin ya da metalik ve kompozit malzemelerin birlikte kullanımı da mümkündür.

Çalışmaların ilk aşamalarında tampon kirişi malzemesi olarak çelik alaşımları yaygın şekilde kullanılmıştır fakat çevresel nedenlerle karbon salınımına getirilen sınırlandırmalar sonucu yakıt tüketiminin azaltılması ihtiyacı ağırlığın mümkün olduğunca azaltılmasını beraberinde getirdiğinden, çelik alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar azalmıştır [62]. Sonrasında alüminyum ve magnezyum gibi hafif metalik malzemelere yönelen araştırmacılar gerek maliyet yüksekliği, şekillendirilebilirliklerinin düşük oluşu ve yüzey işlemlerinin zorluğu gerekse de bu alaşımlardan imal edilen tampon kirişinin diğer parçalara montajının/kaynağının problemlili oluşu sebebi ile yeni arayışlara yönelmişlerdir [54,63]. Gelişen teknolojinin sağladığı imkanlar ile birlikte bu konudaki araştırmalar kompozit malzemelerin otomobil tampon kirişinde kullanılmasının önünü açmıştır. Kompozit malzemeler düşük ağırlıklı olmalarının yanı sıra, statik ve dinamik yükler altında sahip oldukları yüksek dayanım ve rijitlik gibi özelliklerinden dolayı da çokça tercih edilmektedir [52].

Bu bağlamda çelik, alüminyum ve magnezyum alaşımları [55,62,64] hala kullanılmaya devam ediyormuş gibi görünse de çalışmaların büyük çoğunluğu bu malzemelerden imal edilmiş tampon kirişinden elde edilen sonuçları kompozit malzemelerden imal edilen tampon kirişinin optimizasyonunda referans olarak kullanmaktadır. Termoplastik [55] ve fiber takviyeli kompozitler [52,62,64] ise güncel çalışmalarda sıkça kullanılan kompozit malzemelerdir.

Çelik, magnezyum ve alüminyum alaşımlarının kullanıldığı tampon kirişleri göz önünde bulundurulduğunda düşük elastisite modülünün rijitliği düşürdüğü, yüksek elastisite modülünün ise daha iyi darbe davranışı sergilediği görülmüştür. Tüm bu faktörler bir arada

düşünüldüğünde metal alaşımları arasında alüminyumun kullanılması daha avantajlı görünmektedir [55]. Fakat fiber takviyeli kompozit göz önünde bulundurulduğunda çelikten imal edilmiş tampon kirişi ile kıyaslandığında, tampon kirişinde meydana gelen ağırlık, deformasyon ve çarpışma kuvveti önemli ölçüde azalmaktadır [62]. Fakat karbon fiber kompozit tek başına kullanıldığında metalik tampon kirişine kıyasla daha az enerji sönümlemektedir. Dolayısı ile sönümlenen enerji miktarı da göz önünde bulundurulduğunda metalik ve kompozit malzemelerin birlikte kullanıldığı ya da tampon kirişinin dolgu malzemeleri ile takviye edildiği hibrit sistemler kullanılması daha avantajlı görünmektedir [64].

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Otomobil ön tampon sistemi üzerine gerçekleştirilen ve bilimsel literatürde mevcut çalışmalar gözden geçirildiğinde bir takım önemli eksikliklere işaret edilebilir: Öncelikle çalışmaların büyük bir çoğunluğu ön tampon sistemini bir bütün olarak incelemek yerine ya enerji sönümleyici tüpü ya da ön tampon sistemini tek başına incelemektedirler. Enerji sönümleyiciyi tüpü inceleyen çalışmalar gelişen teknolojiden faydalanarak farklı geometriler, değişken kalınlık gibi birçok farklı tasarım ortaya koymaktadır. Özellikle değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpler deformasyonun kontrol edilebilmesine müsaade ederek darbe performansını önemli ölçüde artırabilmektedir. Fakat burada gözden kaçırılan önemli bir nokta, bu tarz geometrilerin nasıl imal edileceği ve imalat proseslerinin enerji sönümleyici tüpün darbe performansını nasıl etkileyeceğidir. Ancak bilimsel çalışmaların bir kısmı enerji sönümleyici tüp geometrisinin imalatını çalışmalarına dahil etmekle birlikte genellikle sadece derin çekme işlemini dikkate almaları sebebi ile çok kısıtlı bir çerçevede kaldıkları söylenebilir. Halbuki gerçek geometriyi elde edebilmek için birçok farklı imalat prosesi gerekmektedir. Ayrıca, kalınlık optimizasyonu yapan çalışmalarda ise bu kalınlığın nasıl elde edilebileceğine ve enerji sönümleme performansına etkisinin ne olacağına dair bir bilgiye rastlanmamıştır. Literatürdeki eksiklikler bu çalışmada enerji sönümleyici tüp geometrisinin elde edilebileceği üç farklı imalat prosesi (derin çekme, eğme ve hidroforming) kullanılarak ve değişken kalınlığın elde edilmesinde ise haddeleme işleminden yararlanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Bu sayede her bir prosesin enerji

sönümleme performansını nasıl etkilediği gerçeğe en uygun şekilde karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve en uygun proses seçilmiştir. Kısacası kalınlık dağılımı ve plastik şekil verme işlemlerinin etkileri tekil olarak değil birlikte değerlendirilerek enerji sönümleyici tüpün darbe performansı incelenmiştir.

Son yıllarda gerek enerji sönümleyici tüplerde gerekse tampon kirişinde yeni teknoloji ürünü kompozit malzemeler yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle hibrit bir ön tampon sisteminde tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantının geleneksel yöntemlerle yapılamayacağı açıktır. Mevcut çalışmalarda bir diğer eksiklik enerji sönümleyici tüp ve tampon kirişini bir arada ele alan çalışmaların enerji sönümleyici tüp ve tampon kirişi arasındaki bağlantıyı göz ardı etmesidir. Bu çalışma tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüpü bütün bir sistem olarak ele almasının yanı sıra, metalik enerji sönümleyici tüp ve kompozit tampon kirişi arasındaki bağlantı problemini de çözmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda bağlantı bölgesinde özellikle havacılık endüstrisinde yaygın olarak tercih edilen yapıştırma bağlantısı kullanılmış, farklı yapıştırıcıların performansları karşılaştırılarak uygun olanı seçilmiş ve optimize edilmiştir. Ayrıca kompozit tampon kirişinin tabaka dağılımı optimize edilerek darbe performansından ödün vermeden ağırlığının mümkün olduğunca düşürülmesi için çalışmalar da yapılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, enerji sönümleyici tüp, tampon kirişi ve tampon kirişi ile enerji sönümleyici tüp arasındaki yapıştırma bağlantısı üzerine gerçekleştirilen sayısal çalışmalar verilmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında değişken kalınlığa sahip kare kesitli enerji sönümleyici tüp bileşeni üzerinde durulmuş, kalınlık dağılımı optimize edilerek istenilen formu elde etmede kullanılacak plastik şekil verme yöntemleri, darbe karakteristiği göz önünde bulundurularak değerlendirilmiş ve en uygun prosese karar verilmiştir. İkinci aşamada kompozit tampon kirişi de sürece dahil edilerek tasarımı oluşturulduktan sonra kompozit tampon kirişinin optimizasyonu sonrası elde edilen tabaka kalınlığı ve yönelimi darbe performansı çelik tampon kirişininki ile kıyaslanmıştır. Son aşama kompozit tampon kirişi ile çelik enerji sönümleyici tüpün yapıştırıcı ile birbirine bağlanmasını içermektedir. Çözümlemeyen geleneksel bağlantı uygulamaları (kaynak) kompozit-çelik bağlantısı için uygun olmadığından; çözülebilir bağlantı çeşitleri ise delme işlemi sonrası gerilme yığılmalarına sebebiyet verdiği için, enerji sönümleyici tüp ile tampon kirişi arasında yapıştırma bağlantısı kullanılmış ve ön tampon sisteminin darbe performansı göz önünde bulundurularak bağlantı bölgesi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm sonlu elemanlar analizleri ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

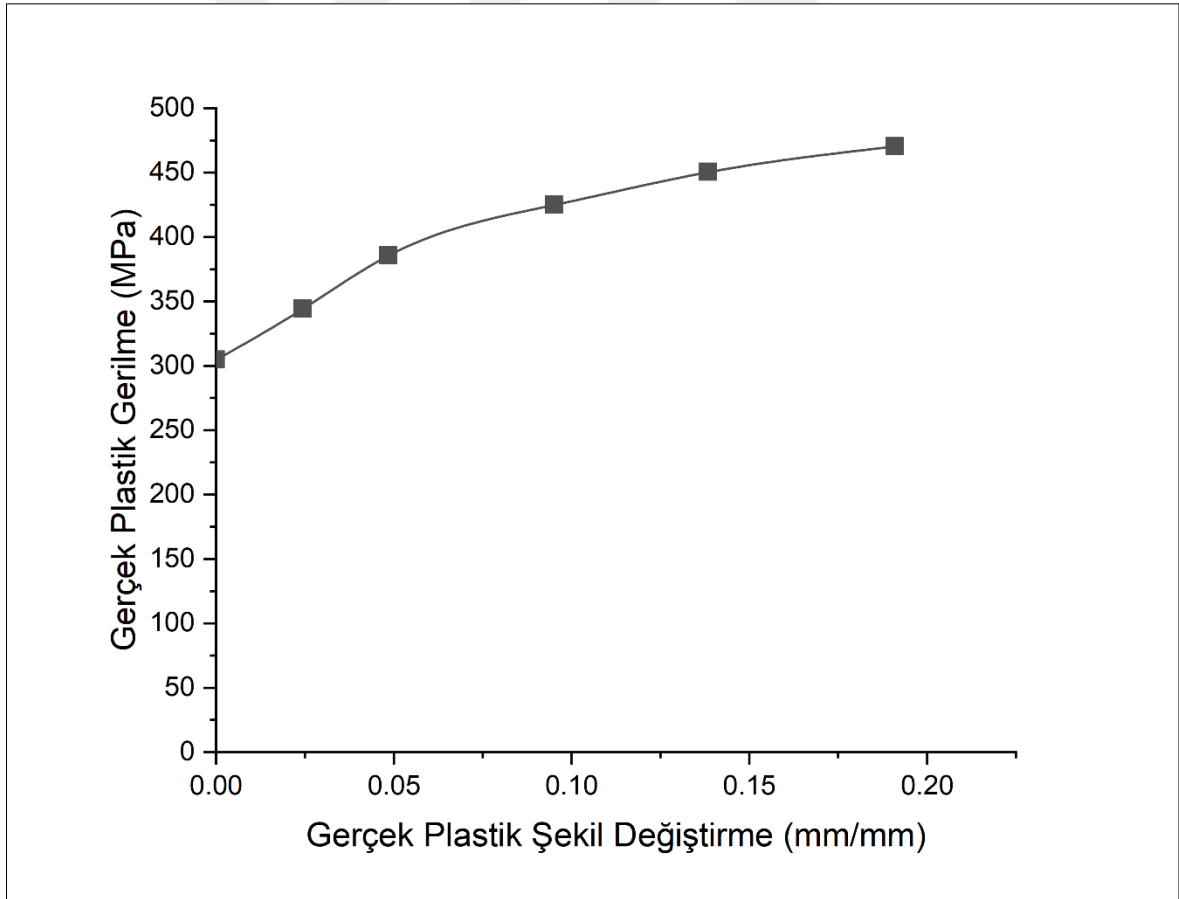
2.1. Enerji Sönümleyici Tüp Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar

Otomobil ön tampon sisteminde bulunan enerji sönümleyici tüp bileşeni üzerindeki çalışmalar beş aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk aşamada derin çekme, hidroforming ve köşe bükme proseslerinin enerji sönümleyici tüpün darbe performansı üzerine olan etkisi araştırılmış ve uygun olan proses seçilmiştir. İkinci aşamada enerji sönümleyici tüpün kalınlığı optimize edilmiştir. Üçüncü aşamada iş parçasına haddeleme uygulanarak belirlenen optimum kalınlık değeri elde edilmiştir. Dördüncü aşamada optimum kalınlığa

sahip iş parçasına derin çekme yöntemi ile nihai formu kazandırılmıştır. Beşinci ve son aşamada ise nihai formu elde edilen ve tampon sisteminde kullanılacak enerji sönümleyici tüpün darbe performansı kendi içerisinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2.1.1. Enerji Sönümleyici Tüp Malzemesi ve Malzeme Modeli

Çalışma kapsamında enerji sönümleyici tüp malzemesi olarak düşük karbonlu çelik alaşımı ($E = 207 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$) kullanılmıştır. Malzemenin gerçek plastik gerilme – şekil değiştirme eğrisi Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. Enerji sönümleyici tüp malzemesinin gerçek plastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [65].

Şekil değiştirme hızının etkisinin hesaba katabilmesi için [66–69] elastoplastik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Şekil değiştirme hızının etkisi Cowper-Symonds modeli [70] kullanılmış ve sayısal analizlere dahil edilmiştir. Cowper-Symonds denklemi:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff}) \right] \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte σ_y dinamik akma gerilmesini, σ_0 akma gerilmesini, $\dot{\epsilon}$ şekil değiştirme hızını, C ve P şekil değiştirme hızı parametrelerini ifade etmektedir. Ayrıca β deformasyon sertleşmesi parametresini, ε_p^{eff} efektif plastik şekil değiştirmeyi ve E_p plastik sertleşme modülünü ifade etmektedir. Şekil değiştirme hızının etkisi sonlu elemanlar analizine aşağıdaki formda dahil edilmiştir [71]:

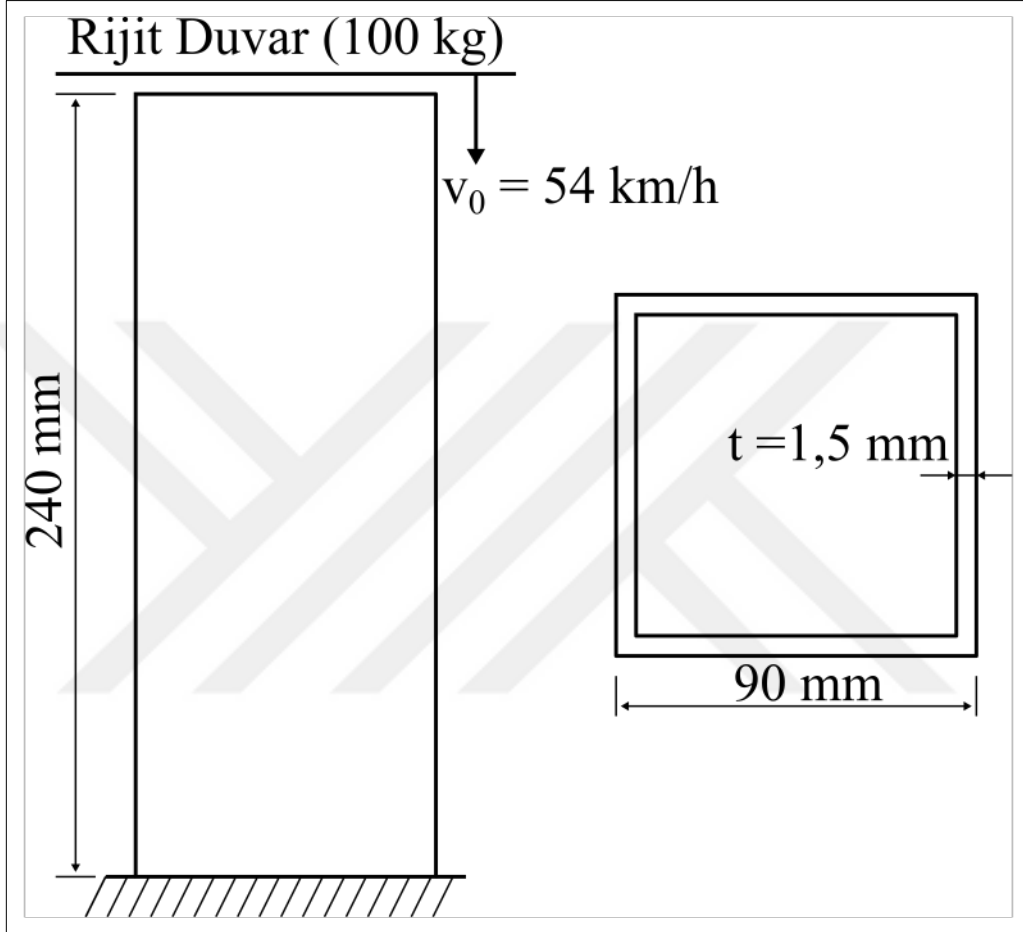
$$1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \quad (11)$$

Yukarıdaki ifade temel olarak C ve P parametrelerini kullanarak akma gerilmesini ölçeklendirmektedir. Çalışma kapsamında C ve P parametreleri $6,844 \text{ (ms)}^{-1}$ ve 3.91 olarak seçilmiştir [23].

2.1.2. Enerji Sönümleyici Tüp Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Modeli

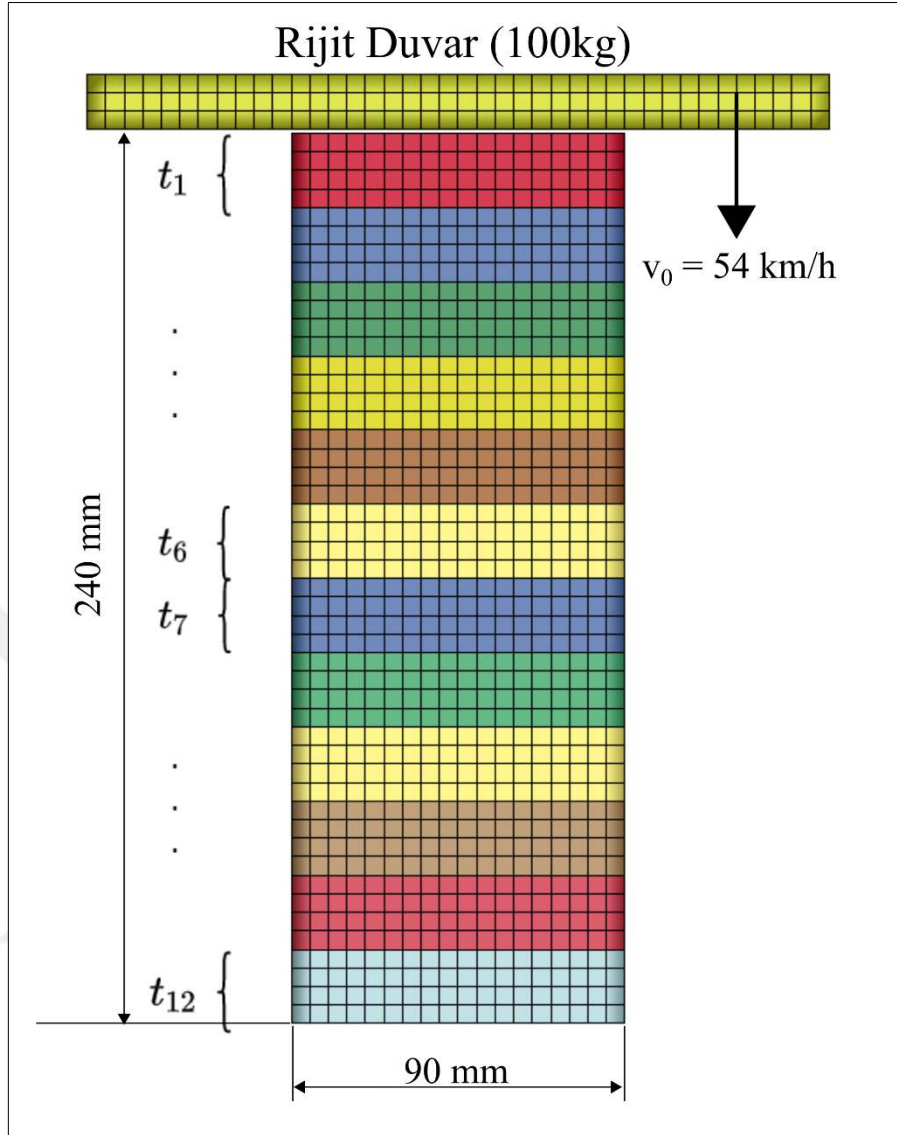
Enerji sönümleyici tüpün başlangıç durumundaki geometrisi Şekil 21’de verilirken sonlu elemanlar modeli detayları Şekil 22’de gösterilmiştir. Başlangıç durumunda kare kesitli enerji sönümleyici tüpün kalınlığı uzunluğu (yüksekliği) boyunca sabit ve 1,5 mm’dir.

Kenar uzunluğu 90 mm olup boyu 240 mm'dir. Kütlesi ise yaklaşık olarak 1 kg'a karşılık gelmektedir.



Şekil 21. Enerji sönümleyici tüpün başlangıç geometrisi

Enerji sönümleyici tüp üzerinde kalınlık optimizasyonu gerçekleştirileceği için, uzunluğu boyunca 12 kısma ayrılmıştır. Bu ayrım yapılırken her bir bölgenin uzunluğu, kalınlığının darbe performansına olan etkisinin net olarak belirlenebilmesi ve bilgisayarın işlem yükünün lüzumsuz yere artırılmaması gözetilerek belirlenmiştir.



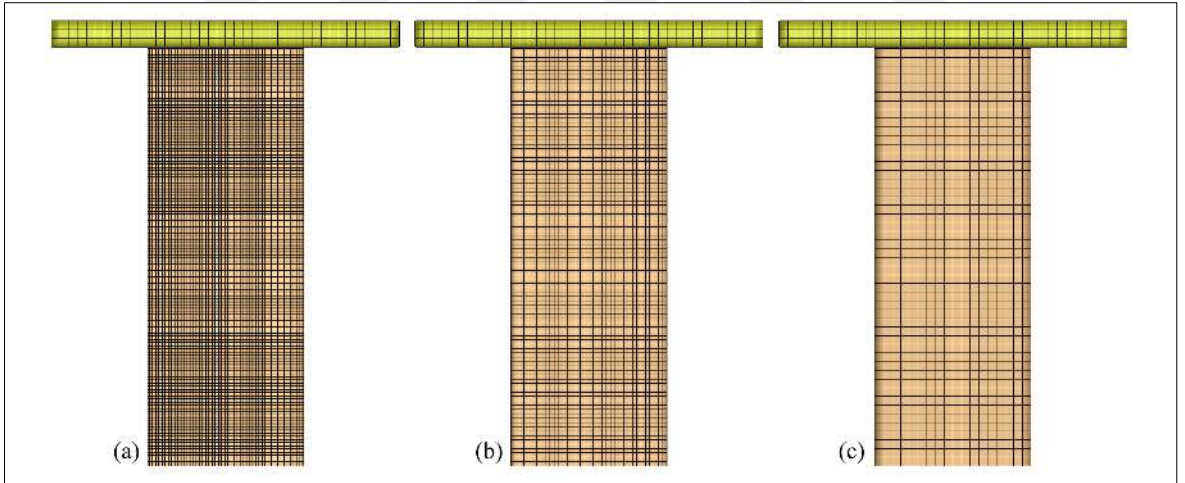
Şekil 22. Enerji sönümleyici tüp sonlu elemanlar modeli

Enerji sönümleyici tüp 5x5 mm boyutlarında *Belytschko-Tsay* kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiş ve kalınlık boyunca 5 entegrasyon noktası seçilmiştir. Alttan sabitlenen enerji sönümleyici tüpe 100 kg kütleli katı rijit duvar 54 km/h hızında darbe uygulamaktadır [72]. Darbe analizi esnasında meydana gelmesi muhtemel, gerek enerji sönümleyici tüpün kendi bölmeleri arasındaki temas, gerekse de enerji sönümleyici tüp ve rijit duvar arasındaki temas için *contact automatic single surface* kartı kullanılmıştır. Coulomb sürtünme katsayısı yatay harekete müsaade etmeyecek şekilde 0,2 olarak alınmıştır [66,73].

2.1.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması ve Eleman Boyutu Bağımlılığı

Çalışmanın doğruluğu ve elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğrulanması oldukça önemlidir. Bu sebeple ilerleyen aşamalara geçmeden önce Nagel ve Thambiratnam tarafından gerçekleştirilen, literatürde mevcut çalışma [65] tekrardan oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Doğrulama çalışmasına ek olarak, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin eleman boyutuna olan duyarlılığının belirlenmesi amacı ile 1,25, 2,5 ve 5 mm boyutlarında elemanlar kullanılarak üç farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar modelinin eleman boyutuna olan bağımlılığı belirlenmiştir. Şekil 23 bu amaçla oluşturulan sonlu elemanlar modellerini göstermektedir.



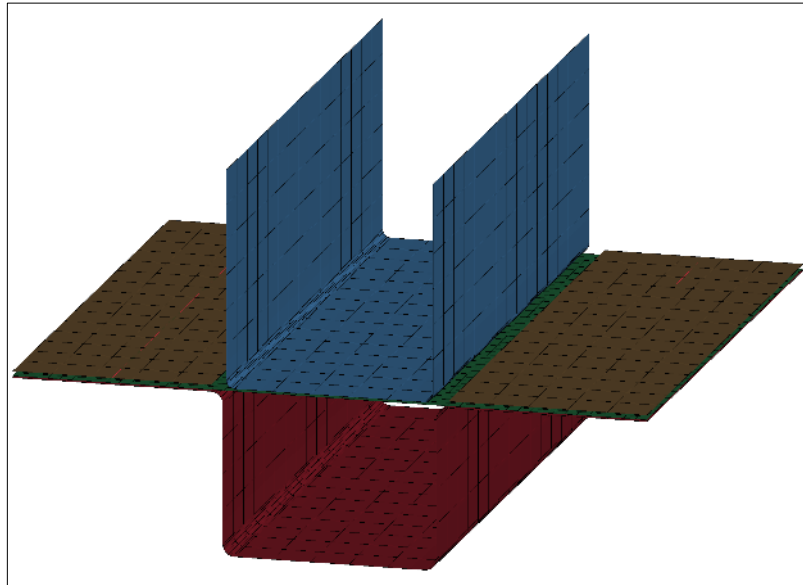
Şekil 23. Sonlu elemanlar modelinin eleman boyutu bağımlılığının belirlenmesi için oluşturulan modeller: (a) 1,25 mm, (b) 2,5 mm ve (c) 5 mm

2.1.4. İmalat Proseslerinin Darbe Performansına Olan Etkisinin Belirlenmesi

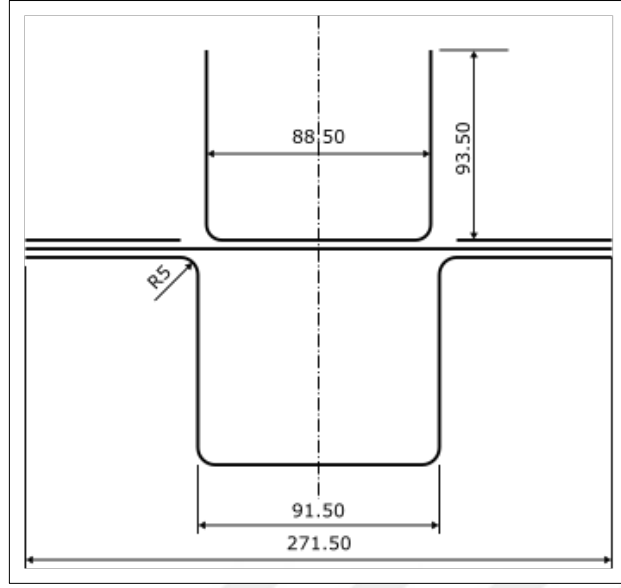
Çalışmanın bu bölümünde üretim aşamalarında kullanılan enerji sönümleyici tüpün plastik şekil verme proseslerinin enerji sönümleyici tüpün darbe performansı üzerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunun yanı sıra plastik şekil verme işlemi sonrasında iş parçası üzerinde meydana gelen artık gerilmeler ve iş parçasının kalınlık dağılımında prosese bağlı olarak meydana gelen değişikliklerin etkisinin belirlenmesi de hedeflenmiştir.

Bu sebeple derin çekme, kenar bükme ve hidroforming olmak üzere üç farklı plastik şekil verme yöntemi göz önünde bulundurularak üç ayrı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. İmalat süreci sonunda elde edilmesi gereken enerji sönümleyici geometrisi Şekil 21’de gösterilen 1,5 mm sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyicidir.

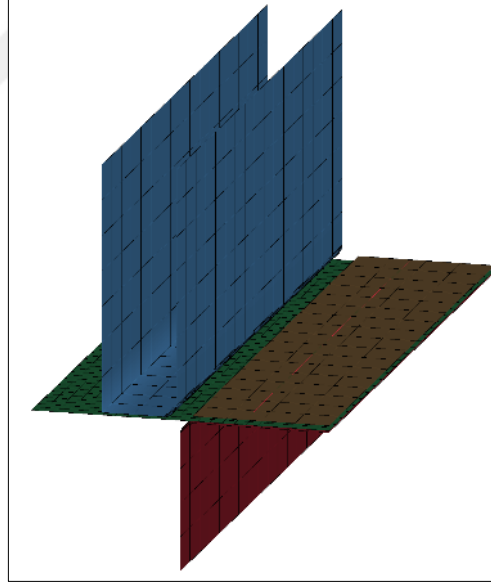
Derin çekme ve kenar bükme proseslerinin sonlu elemanlar modeli Bradley ve Zhu tarafından belirlenmiş kriterlere [74] uygun olarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli ve geometrik detaylar Şekil 24-27’de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modeli; iş parçası, kalıp, zımba ve sabitleme plakaları olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. İş parçası dahil bütün parçaların uzunluğu 240 mm’dir.



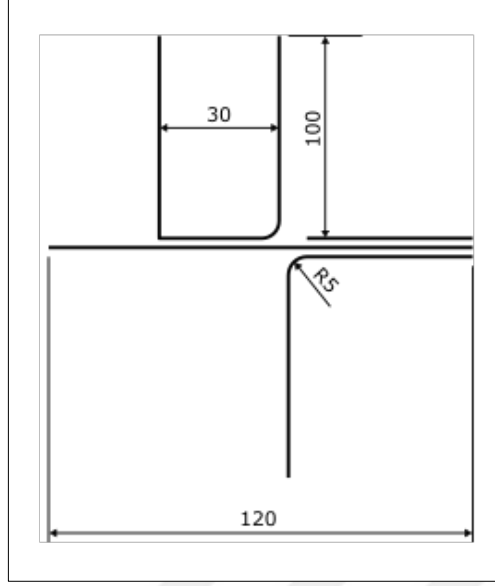
Şekil 24. Derin çekme prosesi sonlu elemanlar modeli



Şekil 25. Derin çekme prosesi geometrik detaylar (Ölçüler mm olarak verilmiştir)

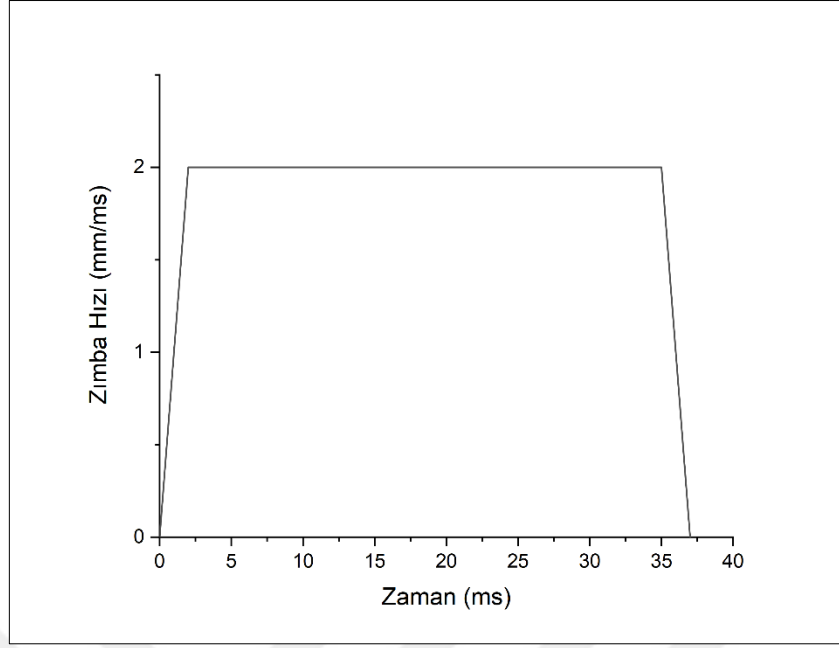


Şekil 26. Kenar bükme prosesi sonlu elemanlar modeli



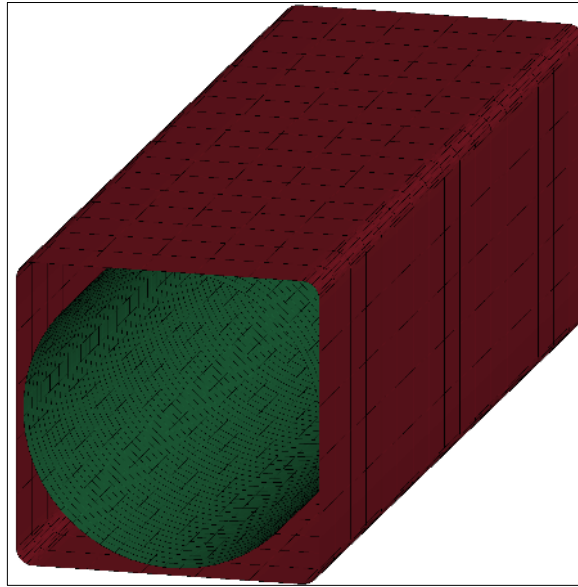
Şekil 27. Kenar bükme prosesi geometrik detaylar (Ölçüler mm olarak verilmiştir)

Zımba hızı 2 mm/ms olup hız profili Şekil 28’de verilmiştir. Zımba hareketi *boundary prescribed motion rigid* kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Tüm parçalar *Belytschko-Tsay* kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiş olup kalınlık boyunca 5 entegrasyon noktası kullanılmıştır. *Control shell* kartı kullanılarak elemanlarda meydana gelebilecek kalınlık değişimleri aktive edilmiştir. Kalıp, zımba ve sabitleme plakaları rijit olarak modellenmiş olup iş parçası için *piecewise linear plasticity* malzeme modeli kullanılmıştır. İş parçası ve diğer parçalar arasındaki temas *forming one way surface to surface* kartı kullanılarak oluşturulmuş, sürtünme katsayısı 0,1 olarak alınmıştır. Ayrıca *contact drawbead* kartı kullanılarak sabitleme plakalarında analitik olarak süzdürme çubukları oluşturulmuştur. Sabitleme plakaları iş parçasına 120 kN’luk yük uygulamaktadır [75]. *Control contact* kartı kullanılarak iş parçası için kalınlık ötelemesi aktif edilirken rijit parçaların kalınlık ötelemesi göz ardı edilmiştir. 5x5 mm boyutunda elemanlara bölünen iş parçasına *part* kartındaki *adopt* seçeneği yardımı ile belirli iterasyonlarda eleman boyutu ve yapısının tekrar düzenlenmesi özelliği eklenerek proses analizi esnasında iş parçasının formunun bozulmasının önüne geçilmiştir.

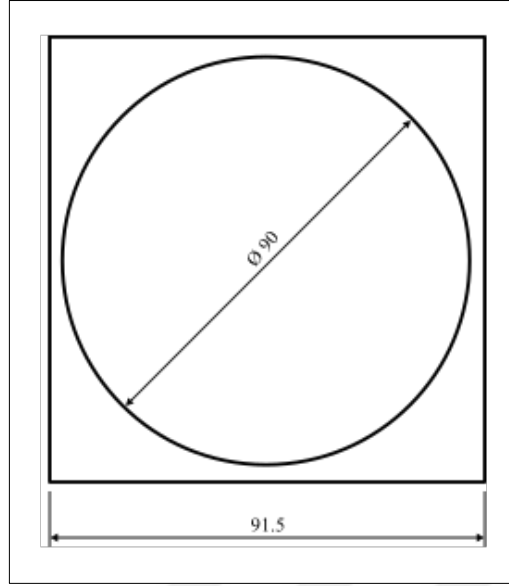


Şekil 28. Zımba hız profili

Şekil 29-30 hidroforming işleminin sonlu elemanlar modelini ve geometrik detayları göstermektedir. Sonlu elemanlar modeli temel olarak derin çekme işlemiyle aynı olmakla birlikte prosesin doğasından kaynaklı birtakım farklılıklar da mevcuttur.

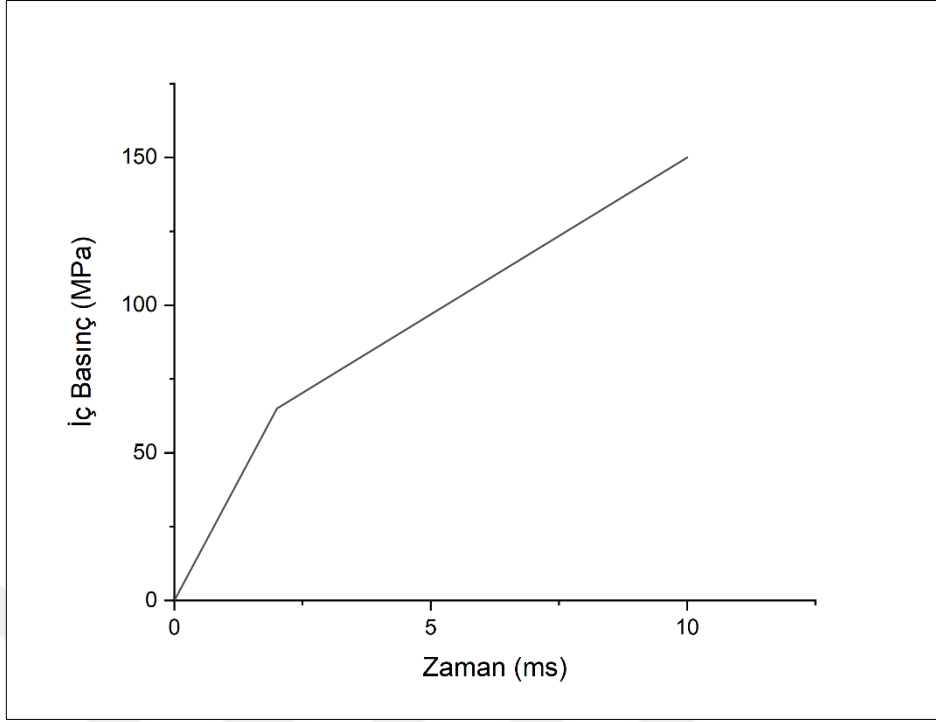


Şekil 29. Hidroforming prosesi sonlu elemanlar modeli



Şekil 30. Hidroforming prosesi geometrik detaylar (Ölçüler mm olarak verilmiştir)

Hidroforming prosesinin sonlu elemanlar modeli silindirik iş parçası ve kare kesitli kalıp olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır (Şekil 25). Derin çekme ve kenar bükme plastik şekil verme işlemlerinden farklı olarak hidroforming prosesinde iş parçasının şekillendirilmesinde su basıncı kullanılmaktadır. Bu sebeple hidroforming analizinde zımbaya ihtiyaç yoktur. Yukarıdaki proseslerden farklı olarak sonlu elemanlar modelinde iş parçasının iç yüzeyine *load segment set* kartı kullanılarak iç basınç uygulanmıştır. Şekil 31 uygulanan basınç profilini göstermektedir.



Şekil 31. Hidroforming prosesinde uygulanan iç basınç profili

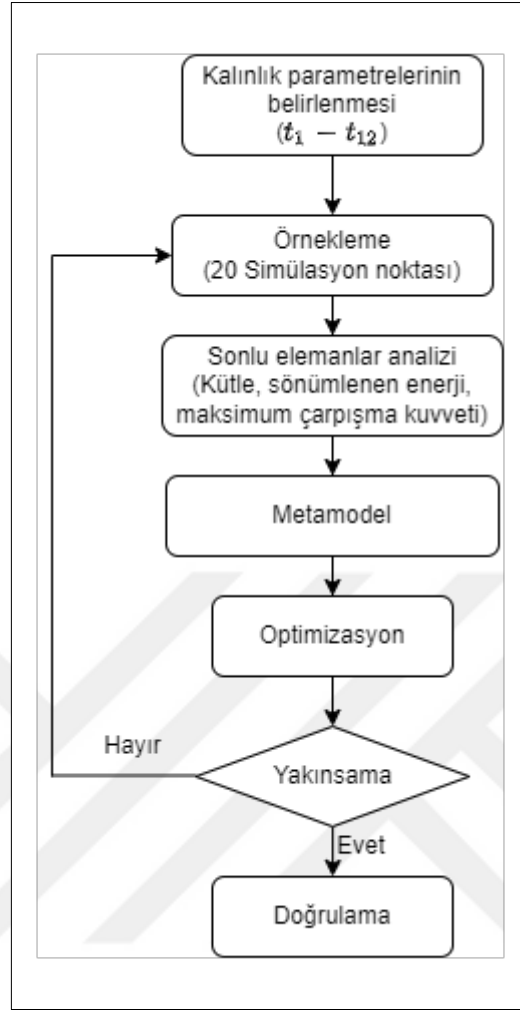
Her bir plastik şekil verme sonlu elemanlar modeline *interface springback seamless* kartı kullanılarak geri yaylanma analizi de dahil edilmiştir. Analizler sonrasında *element trim* kartı kullanılarak fazlalık parçalar budanmıştır.

Plastik şekil verme analizleri tamamlandıktan sonra *dynain* dosya transferi yöntemi kullanılarak elde edilen enerji sönümleyici tüpler üzerlerindeki artık gerilmeler, şekil değiştirmeler ve kalınlık dağılımları ile birlikte darbe analizine tabi tutularak her bir prosesin enerji sönümleyici tüpün darbe performansını nasıl etkilediği belirlenmiştir. Darbe için hazırlanan sonlu elemanlar modeli bir önceki bölümde izah edilene benzer olmakla birlikte birtakım farklılıklar da içermektedir. Bu aşamada gerçekleştirilen çalışmanın amacı plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyicinin darbe performansına olan etkisinin araştırılması olduğundan, darbe analizi simetrik sınır şartları kullanılarak enerji sönümleyici tüpün yarısı modellenmiştir. Kenar bükme ve derin çekme prosesleri göz önünde bulundurulduğunda bu durum herhangi bir problem teşkil etmemektedir. Çünkü bu prosesler ile enerji sönümleyiciyi tek parça olarak imal etmek mümkün değildir. Dolayısı ile bu prosesler kullanılarak elde edilen enerji sönümleyici tüp zaten iki adet simetrik parçadan

meydana gelmektedir. Kenar bükme ve derin çekme proseslerinden farklı olarak hidroforming prosesi enerji sönümleyici tüpü bir bütün (tek parça) olarak imkân vermektedir. Dolayısı ile bu farklılığı ortadan kaldırmak ve hazırlanan modellerin birbiri ile tutarlı olmasını sağlamak amacı ile hidroforming prosesi ile elde edilen enerji sönümleyici tüp de darbe analizi öncesinde ikiye bölünmüş ve bölme işleminden kaynaklı ek gerilmeler ve şekil değiştirmeler de darbe analizine dahil edilmiştir.

2.1.5. Enerji Sönümleyici Tüpün Kalınlık Optimizasyonu

Bu kısımda gerçekleştirilen çalışmalar ile plastik şekil verme işlemlerinin birlikte etkisi göz önünde bulundurulmadan sadece kalınlığın etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple, sabit 1,5 mm kalınlığa sahip kare kesitli enerji sönümleyici tüpün darbe analizleri gerçekleştirilip sonuçlar elde edildikten sonra LS-OPT yazılımı kullanılarak enerji sönümleyici tüpün uzunluğu boyunca kalınlık dağılımı optimize edilmiştir. Şekil 32 optimizasyon sürecinin akış diyagramını göstermektedir.



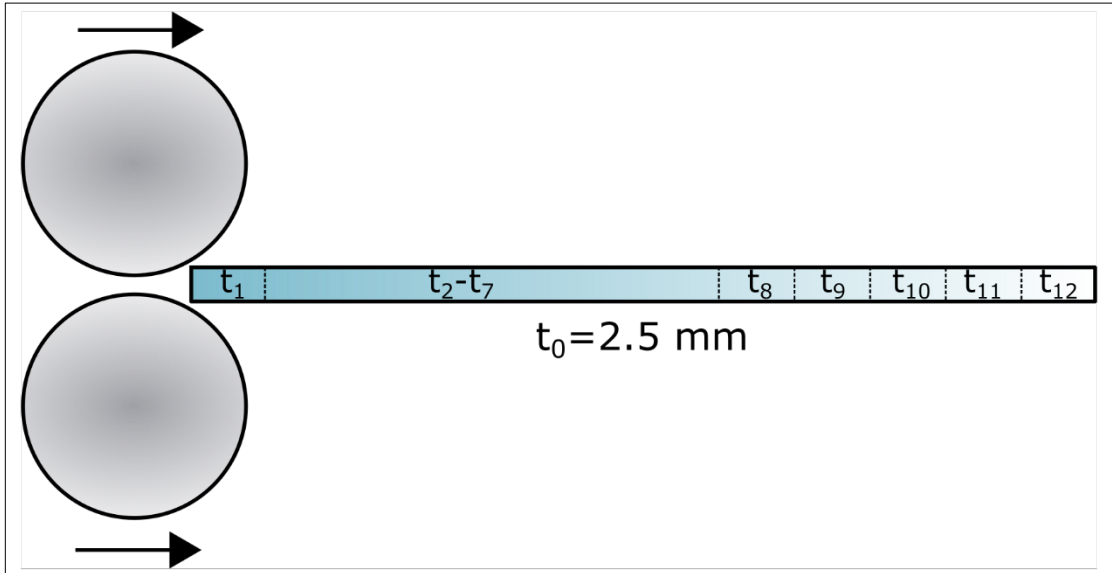
Şekil 32. Kalınlık optimizasyonu akış diyagramı

Kalınlık optimizasyonunda, uzunluğu boyunca 12 bölmeye ayrılmış olan enerji sönümleyicinin her bir bölmesi için bir kalınlık parametresi olmak üzere toplam 12 parametre tanımlanarak farklı kalınlık dağılımları için darbe analizleri gerçekleştirilmiş ve enerji sönümleyicinin ağırlığı, sönümlenen enerji miktarı ve maksimum çarpışma kuvveti hesaplanmıştır. LS-OPT; polinom, duyarlılık, ileri beslemeli sinir ağı, radyal temelli fonksiyon ağı ve Kriging olmak üzere beş farklı modelleme tekniği sunmaktadır. Fakat polinomla modelleme tekniği kullanıldığında kullanıcının polinom derecesini belirlemesi gerekmektedir ve sistematik hata ihtimali yüksektir [76]. Kriging tekniğinde uyarlama problemleri bulunmaktadır [77] ve gürültüye karşı oldukça hassastır [78]. Bahsedilen tekniklerden ayrı olarak radyal temelli fonksiyon ağı ve ileri beslemeli sinir ağı tekniklerinin herhangi bir zafiyeti bulunmamaktadır. Fakat bazı problemlerde ileri beslemeli sinir ağı

tekniklerinin daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir [79]. Dolayısıyla mevcut çalışma kapsamında kalınlık değerleri ileri beslemeli sinir ağı kullanılarak belirlenmiştir. Optimum kalınlık değerleri hesaplanırken sönümlenen enerji miktarının maksimize edilmesi, maksimum çarpışma kuvvetinin ise minimize edilmesi hedeflenmiştir. Her bir kalınlık için 20 adet simülasyon noktası seçilmiştir. Sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyicinin darbe analizinden elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak enerji sönümleyicinin ağırlığı 1 kg ve, 0-5 ms arasındaki maksimum tepki kuvveti 240 kN ile sınırlandırılmıştır.

2.1.6. Optimum Kalınlığın Haddeme ile Elde Edilmesi

Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmaların temel amacı arzu edilen enerji sönümleyici tüp formunun imalatında kullanılması gereken plastik şekil verme yöntemlerinin etkisinin incelenmesidir. Enerji sönümleyici tüpün kalınlık optimizasyonu sonrası belirlenen optimum kalınlık dağılımını elde etmek için haddeme kullanılmıştır. Bu işlem şematik olarak Şekil 33'te gösterilmiştir.



Şekil 33. Haddeme işleminin şematik illüstrasyonu

Haddeleme işleminin sonlu elemanlar modelinde tüm parçalar düzlem gerilme elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Modelin karmaşıklığının azaltılması amacı ile iş parçası sabit tutulurken hareket *boundary prescribed motion rigid* kartı kullanılarak silindirlere verilmiştir. Silindirler rijittir. İş parçası malzeme modeli olarak *piecewise linear plasticity* malzeme modeli kullanılmıştır. İş parçası ve silindirler arasındaki temas *2D automatic surface to surface* kartı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modelinde silindirler dönme hareketi yapmadığından dönme hareketini temsilen iş parçası ve silindirler arasında sürtünme olmadığı kabulü yapılmıştır.

İş parçasının başlangıç kalınlığı 2,5 mm'dir. İş parçası kalınlık optimizasyonundan elde edilen sonuçlara uygun olacak şekilde 12 parçaya bölünmüştür. Her bir bölmenin uzunluğu, hacmin korunumu göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. İş parçasının silindirler arasından her bir geçişinde maksimum %40'lık kalınlık değişimine izin verilmiş, gerektiğinde istenilen kalınlığın elde edilebilmesi adına işlem tekrarlanmıştır. Kalınlık değişikliğinin kontrol altında tutulabilmesine binaen işlem sırasında sadece ilgili bölge ile silindirler arasındaki temas aktive edilmiştir. Ek olarak, haddeleme analizinden sonra iş parçasına enerji sönümleyici formu verilmesi gerektiğinden ve bu analizler üç boyutlu olarak gerçekleştirildiğinden haddeleme sonrası iş parçası kabuk elemanlar kullanılarak tekrar oluşturulmuş ve sonrasında diğer plastik şekil verme aşamasına transfer edilmiştir.

2.1.7. Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansının Belirlenmesi

Çalışmanın bu kısmında haddeleme de dahil olmak üzere, enerji sönümleyici tüp formunu elde etmek için kullanılan tüm plastik şekil verme işlemlerinin birlikte enerji sönümleyici tüpün darbe performansına olan etkisi araştırılmıştır. Kalınlık optimizasyonu ve plastik şekil verme işlemleri sonrasında elde edilen enerji sönümleyici tüpün darbe performansı için oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 34'te gösterilmiştir. Şekil 22 ile kıyaslandığında sonlu elemanlar modelinde haddeleme analizinden sonra gerçekleştirilen plastik şekil verme işleminin doğasından kaynaklı birtakım farklılıklar bulunmaktadır.

Yeni modelde ilk modelden farklı olarak keskin köşeler bulunmamaktadır. Köşeler yuvarlatılmıştır. Ek olarak, enerji sönümleyici tüp uzunluk boyunca değişen kalınlığa sahip,

simetrik iki parçadan meydana gelmektedir. Bu iki parça birbirine 22 adet nokta kaynağı kullanılarak bağlanmıştır. Nokta kaynakları *constrained spot weld* kartı kullanılarak rijit olarak oluşturulmuştur. Bahsedilen bu farklılıklar haricinde sonlu elemanlar modelinde herhangi bir farklılık bulunmamaktadır.



Şekil 34. Değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modeli

2.2. Ön Tampon Kirişi Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar

Ön tampon kirişi üzerine yapılan çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiştir: Öncelikle kompozit malzeme kullanılarak tampon kirişi oluşturulmuş, bir önceki kısımda plastik şekil verme yöntemleri ile imal edilen enerji sönümleyici tüp de tampon kirişine bağlanarak sonlu elemanlar modeline dahil edilmiştir. Sonrasında kompozit tampon kirişinin tabaka kalınlığı ve yönelimi optimize edilmiştir. Son aşamada ise tampon kirişinin optimizasyon işlemi ile elde edilen tampon kirişinin darbe altında arzu edilen şekilde davranıp davranmadığı çelik malzemeden imal edildiği seçenek ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2.2.1. Ön Tampon Kirişi Malzemesi ve Malzeme Modeli

Çalışmada ön tampon kirişi malzemesi olarak IM7/8552 karbon fiber/epoksi kompozit malzeme kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1’de, ve diğer fiziksel olmayan parametreler ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. IM7/8552 mekanik özellikleri [80]

Özellik	Birim	Değer
E_1	MPa	165000
E_2	MPa	9000
G_{12}	MPa	5600
G_{23}	MPa	2800
X_C	MPa	1590
X_T	MPa	2560
Y_C	MPa	185
Y_T	MPa	73
S_{12}	MPa	90
S_{23}	MPa	57

Tablo 2. Kompozit ön tampon kirişinin malzeme modelinde kullanılan fiziksel olmayan parametreler [81]

Parametre	Birim	Değer
TFAIL	s	10^{-7}
EPS	mm/mm	0,55
SOFT	-	0,57
PFL	-	100
SLIMT1	-	0,01
SLIMC1	-	1,00
SLIMT2	-	0,10
SLIMC2	-	1,00
SLIMS	-	1,00
FBRT	-	0,00
YCFAC	-	2,00

Kompozit malzemeye ek olarak sonradan kıyas yapabilmek amacı ile çelik malzemeden yapılmış tampon kirişi de oluşturulmuştur. Çelik tampon kirişinde kullanılan malzeme ile enerji sönümleyici malzemesi aynıdır. Kompozit tampon kirişi için *enhanced composite damage* malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli hasar için Chang kriterini [82,83] kullanmaktadır. Chang kriteri [84]:

a) Fiber çeki durumunda,

$$\sigma_{aa} > 0 \quad \text{ise} \quad e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{x_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{s_c} \right) - 1 \quad \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (12)$$

b) Fiber bası durumunda,

$$\sigma_{aa} < 0 \quad \text{ise} \quad e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t} \right)^2 - 1 \left\{ \begin{array}{l} \geq 0 \\ < 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{hasar} \\ \text{elastik} \end{array} \quad (13)$$

c) Matris çeki durumunda,

$$\sigma_{bb} > 0 \quad \text{ise} \quad e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \left\{ \begin{array}{l} \geq 0 \\ < 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{hasar} \\ \text{elastik} \end{array} \quad (14)$$

d) Matris bası durumunda,

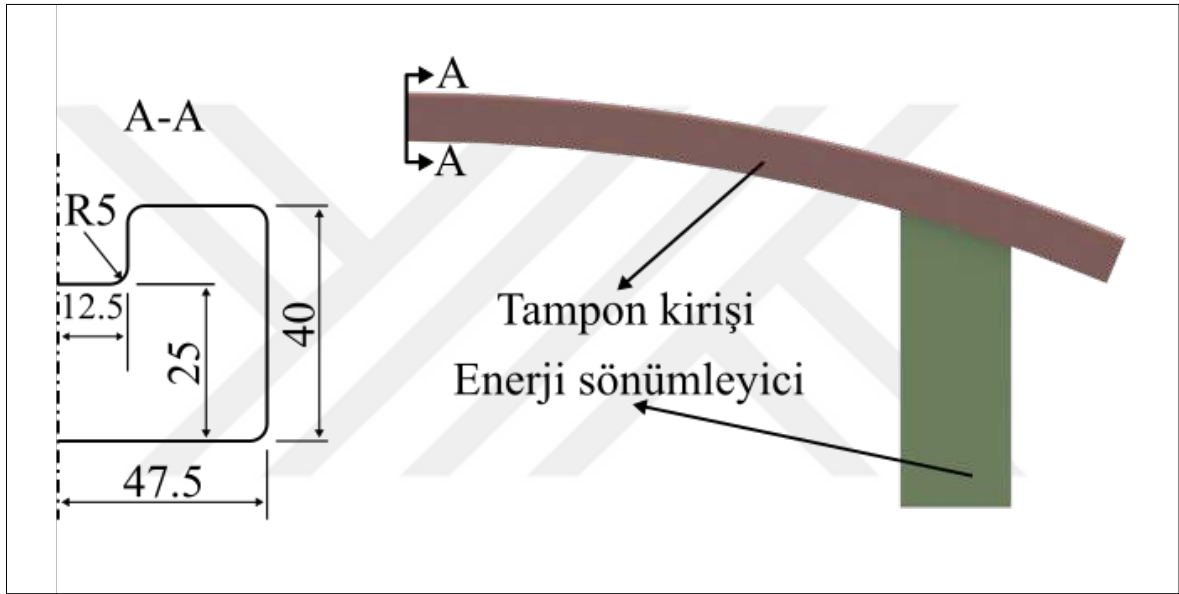
$$\sigma_{bb} < 0 \quad \text{ise} \quad e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \left\{ \begin{array}{l} \geq 0 \\ < 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{hasar} \\ \text{elastik} \end{array} \quad (15)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.2.2. Ön Tampon Kirişi Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Modeli

Ön tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp ile birlikte ön tampon sistemi geometrisi Şekil 35'te verilmiştir. Enerji sönümleyici tüp olarak bir önceki bölümde plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak imal edilen enerji sönümleyici tüp kullanılmıştır. Enerji sönümleyici tüp tampon kirişine bağlayabilmek için tampon kirişi kavisine uygun olarak uçlarından budanmıştır. Tampon kirişi yarıçapı 1480 mm'dir. Kıyaslama maksadıyla oluşturulan çelik tampon kirişinin kalınlığı 1,08 mm, kompozit tampon kirişinin optimizasyon öncesi başlangıç kalınlığı ise 2,16 mm'dir ve 16 tabakadan oluşmaktadır.

Alt kısımdan sabitlenen ön tampon sistemine 1000 kg kütleli rijit duvar 54 km/h hızında darbe uygulamaktadır. Benzer şekilde otomobilin kütlesini temsil eden 1000 kg'lık kütle ise enerji sönümleyici tüplere dağıtılmıştır. Tüm parçalar *Belytschko-Tsay* kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Enerji sönümleyici tampon kirişine *tied nodes to surface* kartı kullanılarak bağlanmıştır. Darbe esnasında meydana gelebilecek temaslar için *automatic single surface* kartı kullanılmış olup sürtünme katsayısı 0,2 olarak seçilmiştir.



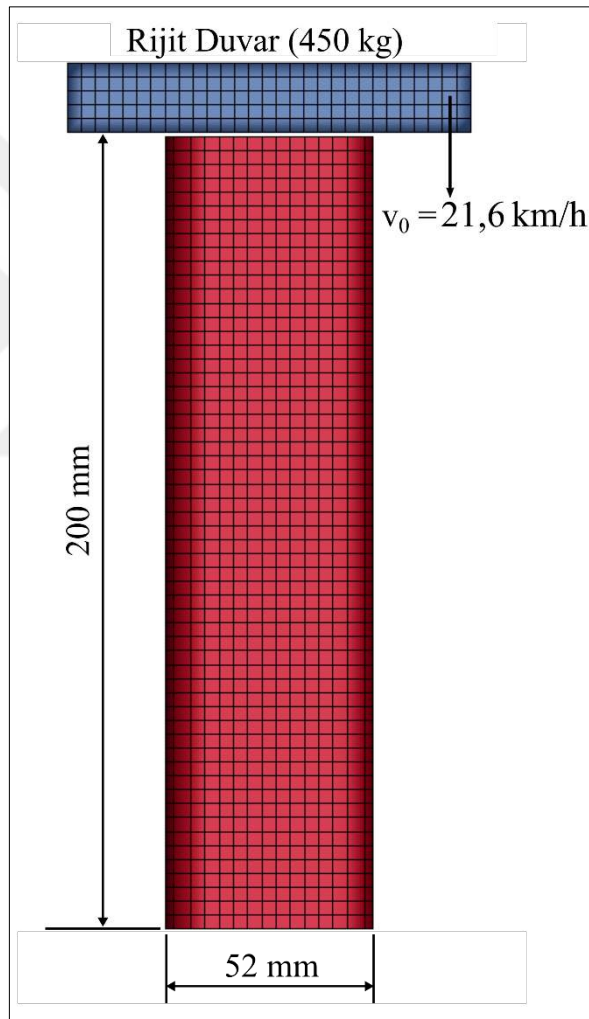
Şekil 35. Tampon kirişi geometrisi

2.2.3. Ön Tampon Kirişi Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

Tampon kirişi optimizasyonundan önce oluşturulan sonlu elemanlar modelinin ve kullanılan malzeme modelinin uygunluğunun belirlenmesi önemlidir. Literatürde IM7/8552 kompozit malzemesini tampon kirişinde kullanan ve sonuçları net olarak açıklayan çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple, kullanılan malzeme modelinin uygunluğunu test edebilmek amacı ile, en azından aynı malzemeyi enerji sönümleyici tüp için kullanan, literatürde mevcut olan bir deneysel çalışmanın [85] sonlu elemanlar modeli oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu referans çalışmada kullanılan tüm deneysel parametreler sayısal

modellemede aynen kullanılmıştır. Şekil 36 doğrulama maksadı ile oluşturulan sonlu elemanlar modelini göstermektedir.

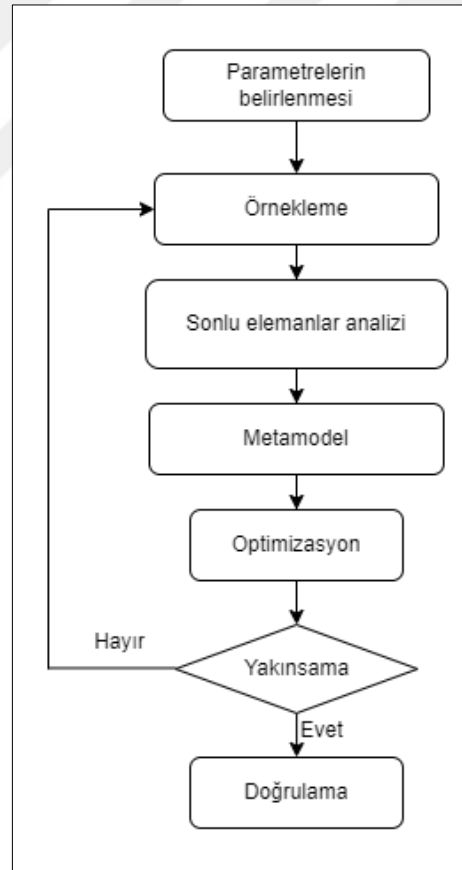
Kare kesite sahip enerji sönümleyici tüpün bir kenar uzunluğu 52 mm, boyu ise 200 mm'dir. Tabaka dağılımı $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$ olan kompozit enerji sönümleyicinin her bir tabakasının kalınlığı 0,135 mm'dir. Alt kısmından sabitlenen enerji sönümleyiciye 450 kg ağırlığındaki rijit duvar 21,6 km/h hızında darbe uygulamaktadır.



Şekil 36. Kompozit malzeme için oluşturulan doğrulama sonlu elemanlar modeli

2.2.4. Ön Tampon Kirişi Optimizasyonu

Çalışmanın bu kısmında maksimum çarpışma kuvvetini ve ağırlığı minimize etmek ve sökülünen enerji miktarını ise maksimize etmek amacı için LS-OPT yazılımı kullanılarak ileri beslemeli sinir ağı yöntemiyle tampon kirişinde kullanılan kompozit malzemenin tabaka kalınlığı ve yöneliminin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon gerçekleştirilirken tampon kirişinin çelik malzemeden imal edildiği durum göz önünde bulundurularak optimizasyon sonrasında kompozit tampon kirişinin darbe altında en az çelik tampon kirişi kadar performans göstermesi hedeflenmiştir. Şekil 37 optimizasyon sürecinin akış diyagramını göstermektedir.



Şekil 37. Kompozit tampon kirişi optimizasyonu akış diyagramı

2.3. Hibrit Ön Tampon Sistemindeki Bağlantı Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar

Kompozit tampon kirişi ve çelik enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk aşamada hibrit ön tampon sistemi, kompozit tampon kirişinin optimizasyonu esnasında göz ardı edilen kompozit tampon kirişi ve çelik enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantıyı göz önünde bulunduracak şekilde değiştirilmiş ve yapıştırma bağlantıları eklenmiştir. Farklı mekanik özelliklere sahip üç farklı yapıştırıcının performansı ön tampon sisteminin darbe davranışı göz önünde bulundurularak değerlendirilmiş ve içlerinden en uygun görülen bir tanesi seçilmiştir. Son aşamada ise seçilen yapıştırıcının geometrik özellikleri optimize edilerek hibrit ön tampon sistemi için en uygun konfigürasyon elde edilmeye çalışılmıştır.

2.3.1. Yapıştırıcı Malzemesi ve Malzeme Modeli

Çelik enerji sönümleyici ve kompozit tampon kirişi arasındaki bağlantıda kullanılmak amacıyla sert (Araldite® AV138), sünek (3M® DP8005) ve yüksek tokluğa sahip (Nagase Chemtex® XNR6852E-3) olmak üzere üç farklı yapıştırıcı belirlenmiştir. Sonuncu yapıştırıcının üreticisi yapıştırıcının metal/karbon fiber kompozit malzeme bağlantıları için uygun olduğunu belirttiğinden ve çalışmanın kapsamıyla birebir örtüştüğü için özellikle seçilmiştir. Tablo 3 yapıştırıcı malzemelerin mekanik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri [86–88].

Yapıştırıcı	Hız (mm/min)	E (MPa)	G (MPa)	t_n^0 (MPa)	t_s^0 (MPa)	G_{IC} (N/mm)	G_{IIC} (N/mm)
AV138	1	4890	1811	41	30,2	0,35	4,91
	100			49,1		-	-
	105000			70,2	51,7	0,35	4,91
	900000*			76,7	56,5	0,35	4,91
DP8005	1	590	159	6,3	8,4	1,1	6
	100			13	17,4	-	-
	105000			27,5	36,7	1,1	6
	900000*			31,9	42,7	1,1	6
XNR6852E-3	1	1874	665	48	45	9	72
	100	2243	645	57	44	10	80
	180000	3813	603	95	43	13	104
	900000*	4150	593	103	42	14	112

* 54 km/h için ölçeklendirme yapılmış değerler

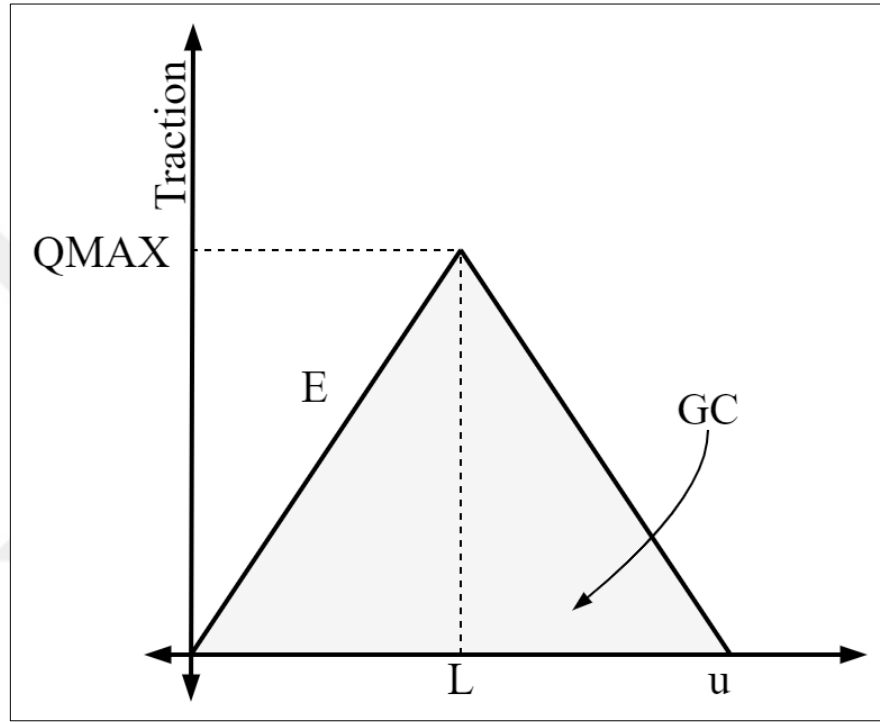
Yapıştırıcıların mekanik karakterizasyonu için kullanılan standart deneyler (Mod I ve Mod II) darbe şartlarına uygun olmadığı için uygun mekanik özellikler 54 km/h darbe hızına karşılık gelecek şekilde logaritmik olarak ölçeklendirilmiştir [86,87,89].

Çelik enerji sönümleyici ve kompozit tampon kirişi için kullanılan malzemeler ve malzeme modelleri önceki kısımlarda izah edilmiştir. Bu kısımda bir önceki tampon sistemi konfigürasyonuna ek olarak yapıştırıcılar ve enerji sönümleyici ile tampon kirişi arasındaki bağlantı elemanı bulunmaktadır. Bağlantı elemanı, enerji sönümleyici ile aynı çelik malzemeyi ve aynı malzeme modelini kullanmaktadır. Yapıştırıcı için ise *cohesive mixed mode* malzeme modeli tercih edilmiştir. Bu malzeme modelinde hasar çift doğrusal çekme-ayrılma kanunu (*traction-separation law*) kullanılarak modellenir (Şekil 38):

$$G_C = \frac{1}{2} u \times QMAX \quad (16)$$

$$L = \frac{Q^{MAX}}{E} \quad (17)$$

$$u = \frac{2GC}{EL} \quad (18)$$

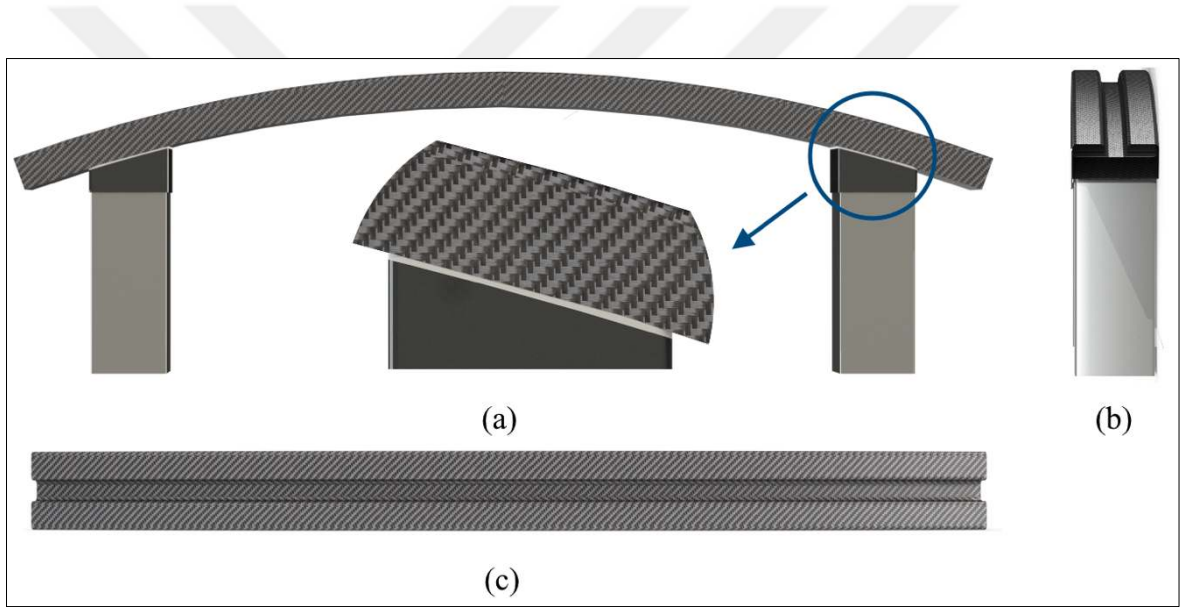


Şekil 38. Yapıştırıcı malzeme modelinde hasar için kullanılan çift doğrusal çekme-ayrılma kanunu [71].

16-18 Numaralı eşitliklerde QMAX maksimum nominal yükü, L maksimum yük esnasında meydana gelen yer değiştirmeyi, u kopma yer değiştirmesini, E elastisite modülünü ve GC kırılma enerjisini temsil etmektedir.

2.3.2. Hibrit Ön Tampon Sistemi Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Modeli

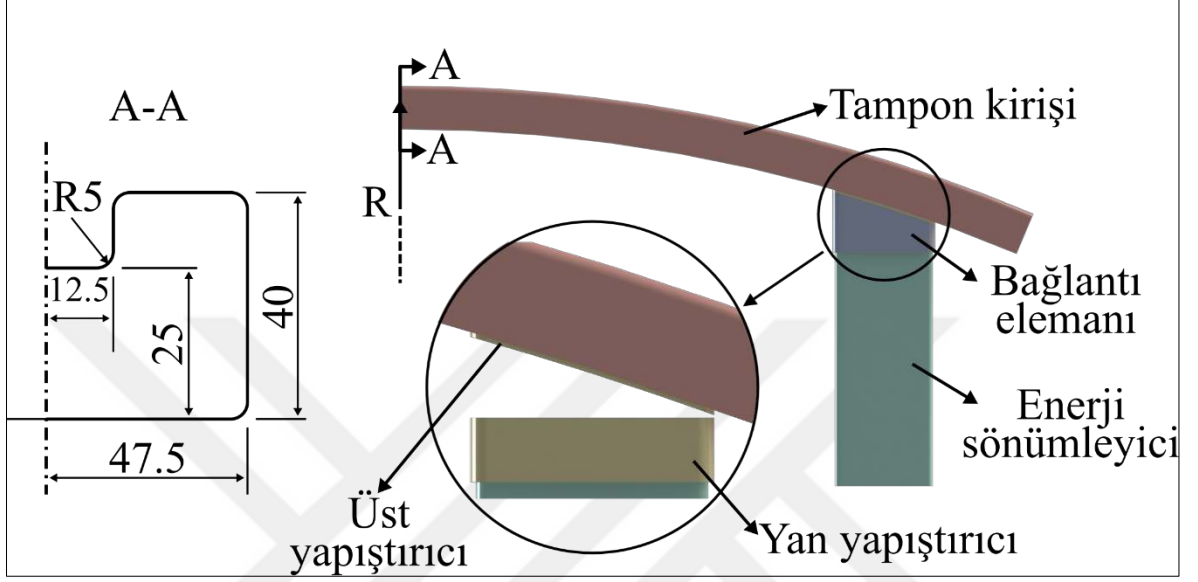
Bu bölümde hibrit ön tampon sistemi tasarımı, kompozit tampon kirişi ve çelik enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantıda (gerçek bir durumda bağlantının ihmal edilmemesi gerektiği düşünülerek) yapıştırıcı kullanılacak şekilde güncellenmiştir. Kompozit tampon kirişi, çelik enerji sönümleyici tüp, alt ve üst yapıştırıcılar ve bağlantı elemanı olmak üzere beş parçadan oluşan hibrit ön tampon sisteminin ön, yan ve üst görünüşleri Şekil 39’da gösterilmiştir.



Şekil 39. Hibrit ön tampon sistemi: (a) Ön görünüş, (b) yan görünüş ve (c) üst görünüş

Hibrit ön tampon sistemi, kompozit tampon kirişinin optimize edildiği konfigürasyona (Bölüm 2.2.2) ek olarak bir adet bağlantı elemanı ve iki adet yapıştırıcı barındırmaktadır. Kullanılan enerji sönümleyici tüp çalışmanın ilk kısmında plastik şekil verme yöntemleriyle elde edilmiş olan değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüptür. Tampon kirişi ise çalışmanın ikinci kısmında kalınlığı ve tabaka yönelimi optimize edilmiş olan kompozit tampon kirişidir. Enerji sönümleyici tüpün ince cidarlı oluşu enerji sönümleyicinin tampon kirişine doğrudan yapıştırıcı ile bağlanmasını imkânsız hale getirmektedir. Dolayısı ile yapıştırıcı uygulayabilmek için ön tampon sistemine ek olarak

bağlantı elemanı da dahil edilmiştir. Şekil 40 hibrit ön tampon sisteminin geometrik detaylarını göstermektedir.



Şekil 40. Hibrit ön tampon sistemi geometrisi

Ön tampon sisteminde yan ve üst yapıştırıcı olmak üzere iki farklı bölgede yapıştırma bağlantısı kullanılmıştır. Yan yapıştırıcı, enerji sönümleyiciyi bağlantı elemanına bağlarken üst yapıştırıcı ise tampon kirişini bağlantı elemanına bağlamakta ve böylece ön tampon sistemi oluşturulmuş olmaktadır. Yapıştırıcıların optimizasyon öncesi başlangıç kalınlığı 0,25 mm'dir.

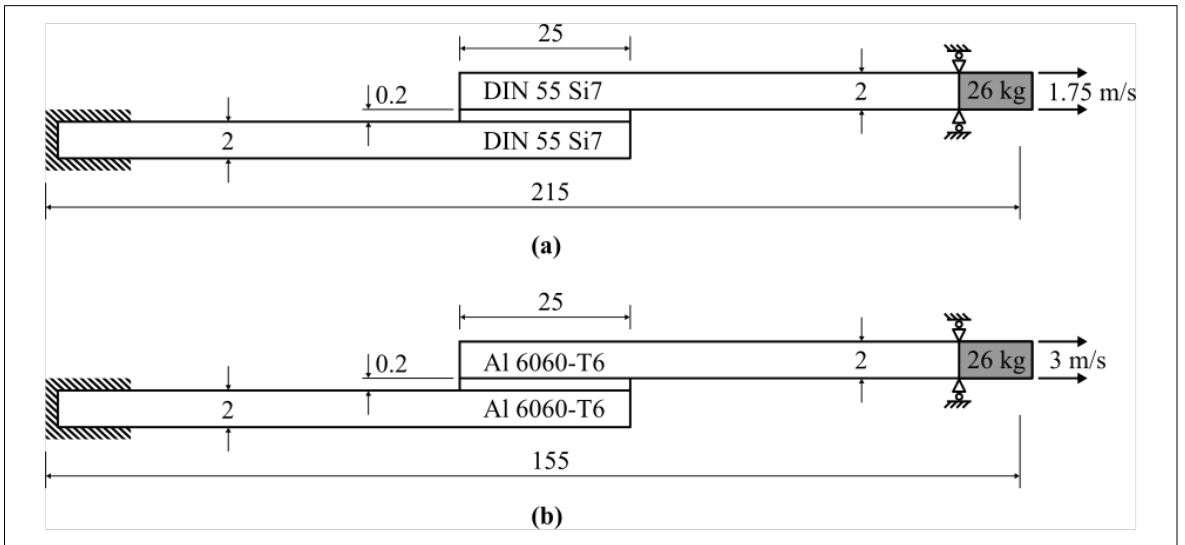
Sonlu elemanlar modeli detayları Bölüm 2.2.2'de izah edilen ile temel olarak aynı olmakla birlikte sadece yapıştırıcılar yönünden farklılık göstermektedir. Yapıştırıcılar, kabuk elemanlar ile birlikte kullanıma uygun olan sekiz düğüm noktalı kohezif elemanlar (*ELFORM #20*) kullanılarak modellenmiştir. Büyüklüğü göz önünde bulundurularak tampon kirişi haricinde tüm parçalar için 1,25 mm'lik eleman boyutu kullanılırken tampon kirişi için 5 mm'lik elemanlar kullanılmıştır. Yapıştırıcılar ile onları çevreleyen parçalar arasındaki bağlantılar *tied shell edge to surface constrained offset* kullanılarak oluşturulmuştur. Ön tampon sistemi geometrisinin oldukça büyük ve eleman sayısının

oldukça fazla olduğu ve optimizasyon için de birçok analiz gerçekleştirileceği göz önünde bulundurularak ön tampon sistemi simetrik sınır şartlarıyla çeyrek geometri olarak hazırlanmış ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.2.1. Yapıştırıcı Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

Yapıştırıcıların ön tampon sisteminde kullanılmasından önce kullanılan malzeme modelinin ve oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunun belirlenmesi çalışmanın güvenilirliği açısından zorunludur.

Doğrulama analizleri için DP8005 ve XNR6852E-3 yapıştırıcıları seçilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılması planlanan yapıştırıcıların bu şekilde gerçek bir durumda kullanıldığı bir çalışma olmadığından aynı yapıştırıcıları tek tesirli bindirme bağlantısında kullanan ve darbe performansını araştıran iki deneysel çalışmanın [86,87] sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla mukayese edilmiştir. Şekil 41 bu amaçla hazırlanan sonlu elemanlar modellerinin geometrik detaylarını ve sınır şartlarını göstermektedir.

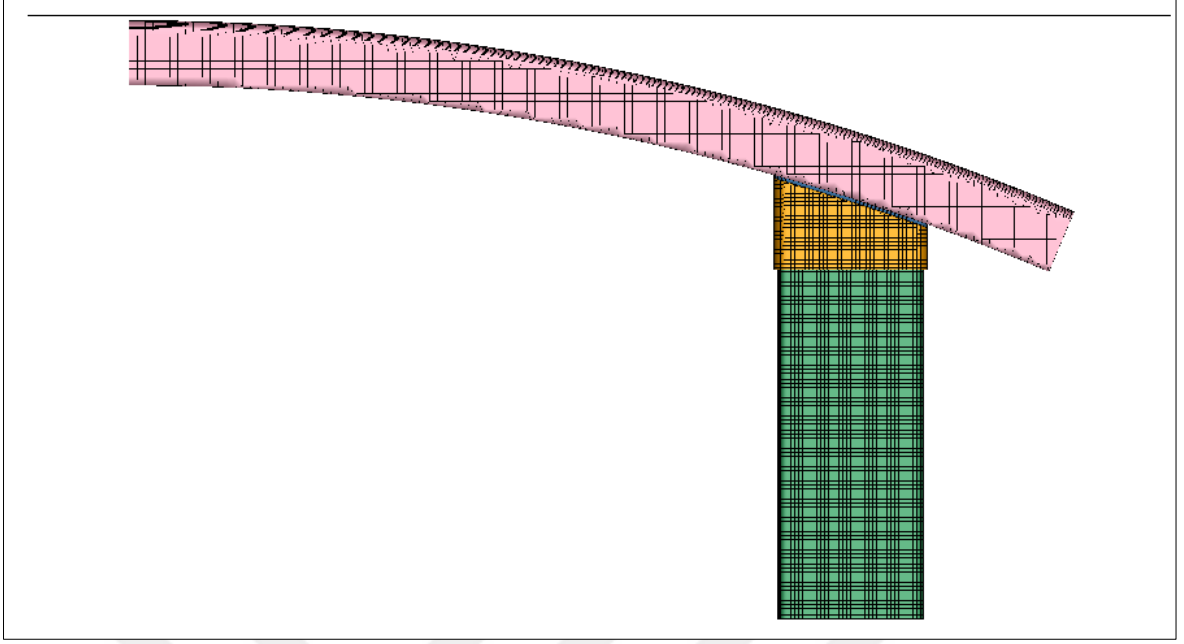


Şekil 41. Yapıştırıcı doğrulama sonlu elemanlar modeli geometrik detayları ve sınır şartları; (a) DP8005 [87], (b) XNR6852E-3 [86].

Doğrulama analizlerinde birbirine bağlanan ana malzemeler ve yapıştırıcı referans çalışmalara uygun olarak katı modellenmiştir. Doğrulama analizlerinde yapıştırıcı ve ana malzeme ara yüzeyi arasındaki bağlantı için iki alternatif göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan ilki yapıştırıcı ve ana malzemenin ortak düğüm noktaları kullandığı, ara yüzeyde ekstra bir bağlantıya ihtiyaç duymayan bağlantı tipidir. Diğeri ise ara yüzeyde *tied contact* kullanılmasıdır. Bu iki alternatif kullanılarak gerçekleştirilen doğrulama analizlerinde sonuçlar aynı olarak elde edildiğinden, tüm parçalar katı olarak modellendiğinde ara yüzeydeki bağlantı tipinin sonucu etkilemediği belirlenmiştir. Fakat hibrit ön tampon sisteminde katı yapıştırıcılar kabuk olarak modellenen bileşenleri birbirine bağlamaktadır. Katı yapıştırıcı ve kabuk bileşenlerin ara yüzeyindeki bağlantı ise ara yüzeydeki bağlantı tipinden oldukça etkilenmektedir. Dolayısı ile bu ara yüzeyde kullanılacak uygun bağlantı tipinin belirlenmesi amacı ile doğrulama analizleri kabuk ana malzemeler kullanılarak tekrar oluşturulmuş ve kabuk/katı bağlantısına müsaade eden ortak düğüm noktası kullanımı (*shared nodes*), *tied shell edge to surface constrained offset* ve *tied shell edge to surface* olmak üzere üç farklı bağlantı tipi DP8005 yapıştırıcısında denenmiş ve deneysel sonuçlarla en uygun sonucu veren bağlantı tipi seçilmiştir.

2.3.2.2. Yapıştırıcıların Performansının Değerlendirilmesi

Yapıştırıcılar için gerçekleştirilen doğrulama analizlerinden sonra her bir yapıştırıcı hibrit ön tampon sisteminde üst ve yan yapıştırıcı olarak kullanılarak darbe performansları değerlendirilmiş ve en uygun olanı seçilmiştir. Şekil 42 bu amaçla oluşturulan sonlu elemanlar modelini göstermektedir.



Şekil 42. Hibrit ön tampon sistemi sonlu elemanlar modeli

2.3.2.3. Yapıştırıcıların Optimizasyonu

Yapıştırıcılar arasından en uygun olanı belirlendikten sonra oluşturulan hibrit ön tampon sisteminin darbe özellikleri de göz önünde bulundurularak üst ve yan yapıştırıcıların geometrik özellikleri optimize edilmiştir.

Optimizasyon istatistiksel ticari bir paket program olan Minitab yardımı ile tepki yüzeyi metodolojisi (TYM) (*Response surface methodology, RSM*) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 4 ve Tablo 5 üst ve yan yapıştırıcılar için bu amaçla oluşturulan merkezi karma tasarımları (*central composite design*) göstermektedir.

Yapıştırıcıların tasarımı göz önünde bulundurulduğunda temel olarak üç farklı geometrik parametre bulunmaktadır: Yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı genişliği ve yapıştırıcı uzunluğu. Fakat mevcut ön tampon sisteminde, üst yapıştırıcı göz önünde bulundurulduğunda, yapıştırıcı tabakasının genişliği ve uzunluğu doğrudan enerji sönümleyicinin kesit ölçüsüne bağımlı olduğu görülmektedir. Dolayısı ile üst yapıştırıcının optimizasyonu için parametre sayısı bire düşmektedir. Fakat gerçekleştirilen ön çalışmalar tampon kirişi yarıçapının (eğriliğinin) üst yapıştırıcının davranışını dolayısı ile de ön tampon

sisteminin darbe performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bundan dolayı üst yapıştırıcının optimizasyonunda yapıştırıcı kalınlığı ($t_{\bar{u}}$) ve tampon kirişi yarıçapı (r_{tk}) olmak üzere iki parametre bulunmaktadır.

Tablo 4. Üst yapıştırıcı için optimizasyon parametreleri

Seçenek	Yapıştırıcı Kalınlığı ($t_{\bar{u}}$) (mm)	Tampon Kirişi Yarıçapı (r_{tk}) (mm)
Seçenek 1	0,5	1680
Seçenek 2	0,25	1880
Seçenek 3	0,25	1480
Seçenek 4	0,5	1960
Seçenek 5	0,75	1480
Seçenek 6	0,15	1680
Seçenek 7	0,75	1880
Seçenek 8	0,85	1680
Seçenek 9	0,5	1400

Tablo 5. Yan yapıştırıcı için optimizasyon parametreleri

Seçenek	Yapıştırıcı Kalınlığı (t_y) (mm)	Yapıştırıcı Yüksekliği (h_y) (mm)
Seçenek 1	0,25	25
Seçenek 2	0,15	35
Seçenek 3	0,15	15
Seçenek 4	0,25	45
Seçenek 5	0,35	15
Seçenek 6	0,1	25
Seçenek 7	0,35	35
Seçenek 8	0,45	25
Seçenek 9	0,25	10

Üst yapıştırıcı için bahsedilen bu durum bir ölçüye kadar yan yapıştırıcı için de geçerlidir. Yan yapıştırıcının genişliği enerji sönümleyicinin kesit ölçüsüne bağlıdır. Dolayısı ile yan yapıştırıcının optimizasyonunda yapıştırıcı kalınlığı (t_y) ve yapıştırıcı yüksekliği (h_y) olmak üzere iki parametre bulunmaktadır. Ayrıca darbe performansının değerlendirilmesinde kullanılacak dört çıktı bulunmaktadır: Üst/yan yapıştırıcıda hasara uğrayan eleman yüzdesi, maksimum çarpışma kuvveti, ön tampon sisteminin sönümlediği toplam enerji miktarı ve üst/yan yapıştırıcı tarafından sönümlenen enerji miktarı. Optimizasyonda ilk iki parametrenin minimize edilmesi ve son iki parametrenin maksimize edilmesi hedeflenmiştir. Tüm analizler maksimum çarpışma kuvveti elde edilene kadar sürdürülmüş olup maksimum çarpışma kuvveti elde edildiğinde analizler durdurulmuştur.



3. BULGULAR VE İRDELEME

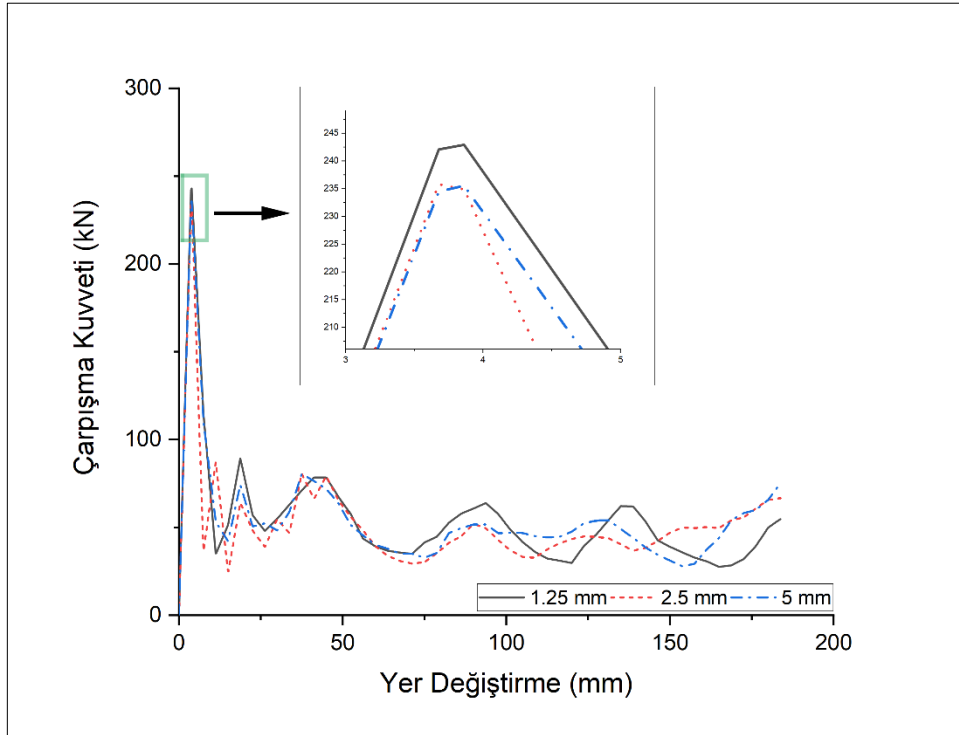
Tez çalışmasının bu kısmında enerji sönümleyici, tampon kirişi ve tampon kirişi ile enerji sönümleyici arasındaki bağlantı göz önünde bulundurularak üç aşamada gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bulgular irdelenmiştir.

3.1. Enerji Sönümleyici Tüp Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

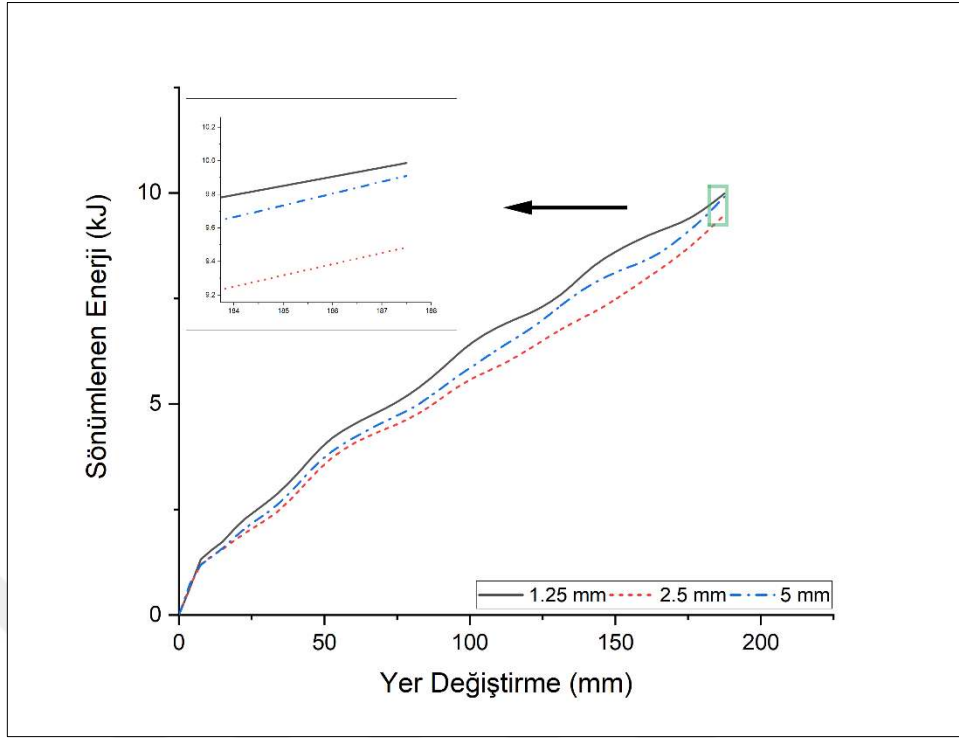
Enerji sönümleyici üzerine gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar altı aşamada incelenmiştir: İlk aşamada sonlu elemanlar doğrulama modelinden elde edilen sonuçlar incelenmiş ve sonlu elemanlar modelinin eleman boyutuna olan bağımlılığı belirlenmiştir. İkinci aşamada sabit 1,5 mm kalınlığa sahip üzerinde herhangi bir plastik şekil verme etkisi bulunmayan enerji sönümleyicinin darbe davranışı belirlenerek ilerleyen aşamalar için referans olarak kullanılmıştır. Üçüncü aşamada enerji sönümleyici geometrisini elde etmek için kullanılabilecek plastik şekil verme yöntemlerinden derin çekme, köşe bükme ve hidroforming proseslerinin enerji sönümleyicinin darbe performansını nasıl etkilediği belirlenmiştir. Dördüncü aşamada enerji sönümleyicinin kalınlık optimizasyonundan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Beşinci aşamada optimizasyon sonucu elde edilen kalınlık dağılımının haddeleme yöntemi kullanılarak elde edilen bulgular irdelenmiştir. Altıncı ve son aşamada ise haddeleme ve derin çekme plastik şekil verme yöntemleriyle imal edilen kare kesitli, değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyicinin darbe performansı belirlenmiş ve başlangıçtaki konfigürasyonla karşılaştırılmıştır.

3.1.1. Enerji Sönümleyici Tüpün Sonlu Eleman Boyutu Bağımlılığına Ait Bulgular

Bu bölümde enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modelinin eleman boyutuna olan bağımlılığının belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinin sonuçları verilmiştir. Şekil 43'te verilen çarpışma kuvveti-yer değiştirme grafiği incelendiğinde, sonlara doğru meydana gelen küçük farklılıklar haricinde her bir eleman boyutu için eğrilerin oldukça uyumlu olduğu ve maksimum çarpışma kuvvetlerinin (MÇK) neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Aynı davranışın Şekil 44'te verilen enerji sönümleme eğrileri için de geçerli olduğu söylenebilir. Şekilden de görülebileceği üzere farklı eleman boyutları için elde edilen toplam sönümlenen enerji miktarları arasında ihmal edilebilecek kadar küçük bir farklılık bulunmaktadır. Dolayısı ile elde edilen sonuçlar ışığında enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modelinin incelenen eleman boyutları arasında fazla fark olmadığından enerji sönümleyici tüp üzerine gerçekleştirilen bundan sonraki çalışmalarda 5 mm eleman boyutu kullanılmıştır.

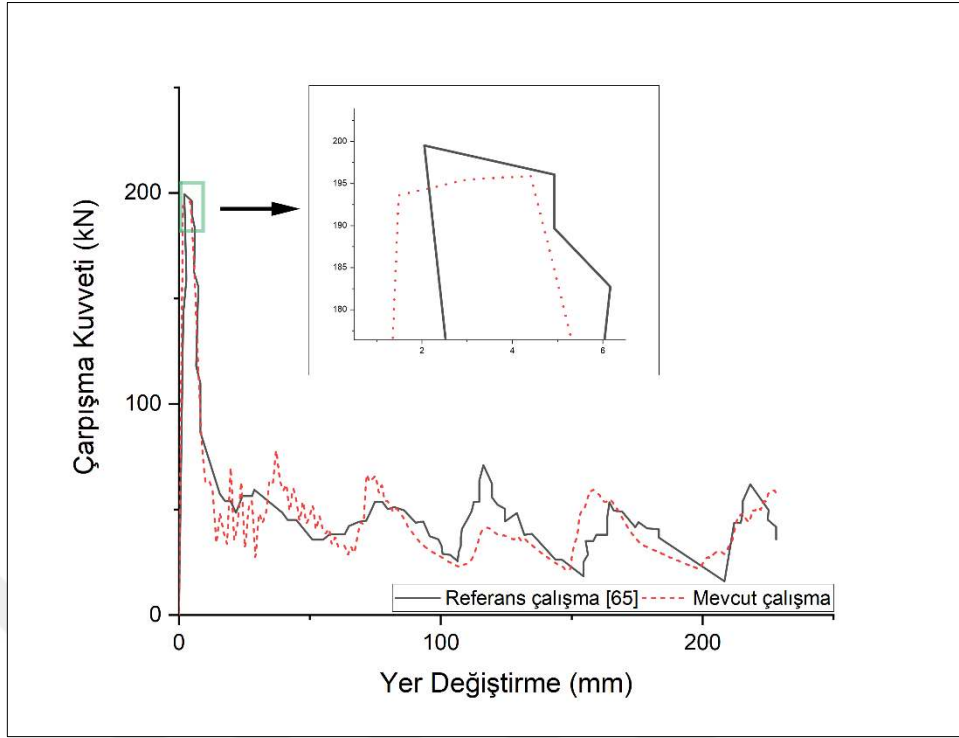


Şekil 43. Enerji sönümleyici tüpten elde edilen çarpışma kuvvetinin seçilen sonlu eleman boyutuna bağımlılığı



Şekil 44. Enerji sönümleyici tüpte sönümlenen enerjinin seçilen sonlu eleman boyutuna bağımlılığı

Eleman boyutunun etkisinin incelendiği sonuçlara ek olarak Şekil 45 enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modeli doğrulama analizinden elde edilen sonucu literatürdeki sonuç [65] ile kıyaslamalı olarak göstermektedir. Çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri başlangıçta her ne kadar oldukça uyumlu görünse de bu uyum ilerleyen kısımlarda bir miktar bozulmaktadır. Bu duruma sebep olabilecek muhtemel etmenlerden biri referans çalışma ve doğrulama modelinin farklı sonlu elemanlar modeli yazılımı kullanmasıdır. Bir diğer etmen ise mevcut çalışma modelinde elde edilen verilerin daha kısa aralıklarla çizdirilmiş olmasıdır. Fakat en önemli parametrelerden biri olan maksimum çarpışma kuvveti her iki çalışmada da neredeyse eşdeğer olduğundan oluşturulan sonlu elemanlar modelinin yeterli doğrulukta ve bundan sonraki analizlerde kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

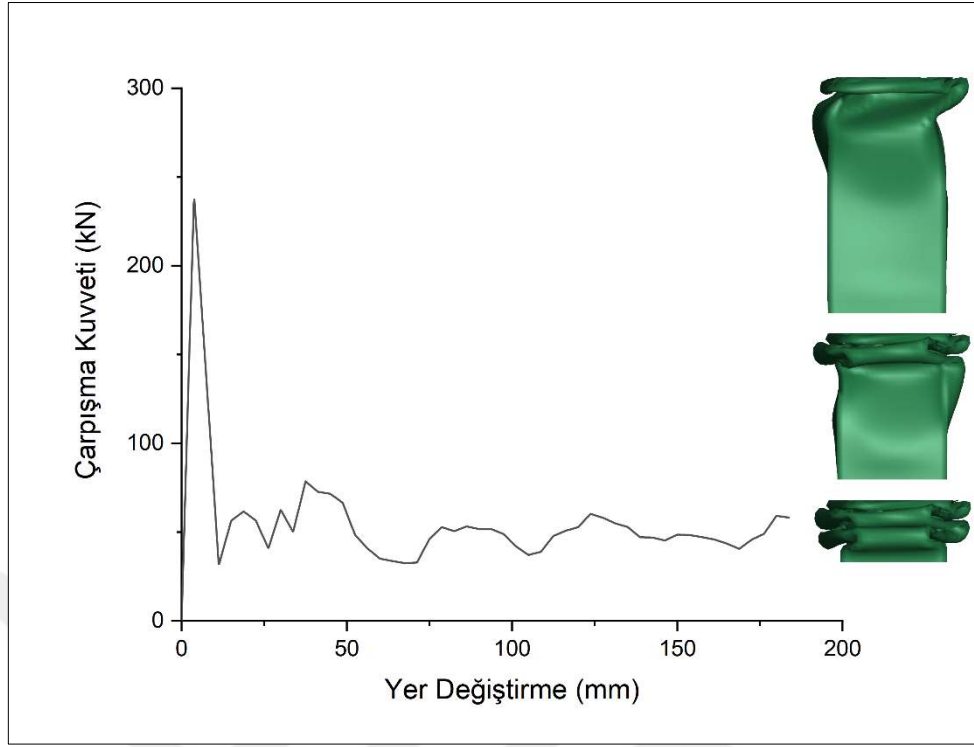


Şekil 45. Enerji sönümleyici tüpün sonlu elemanlar modelinin doğrulanması sonuçları

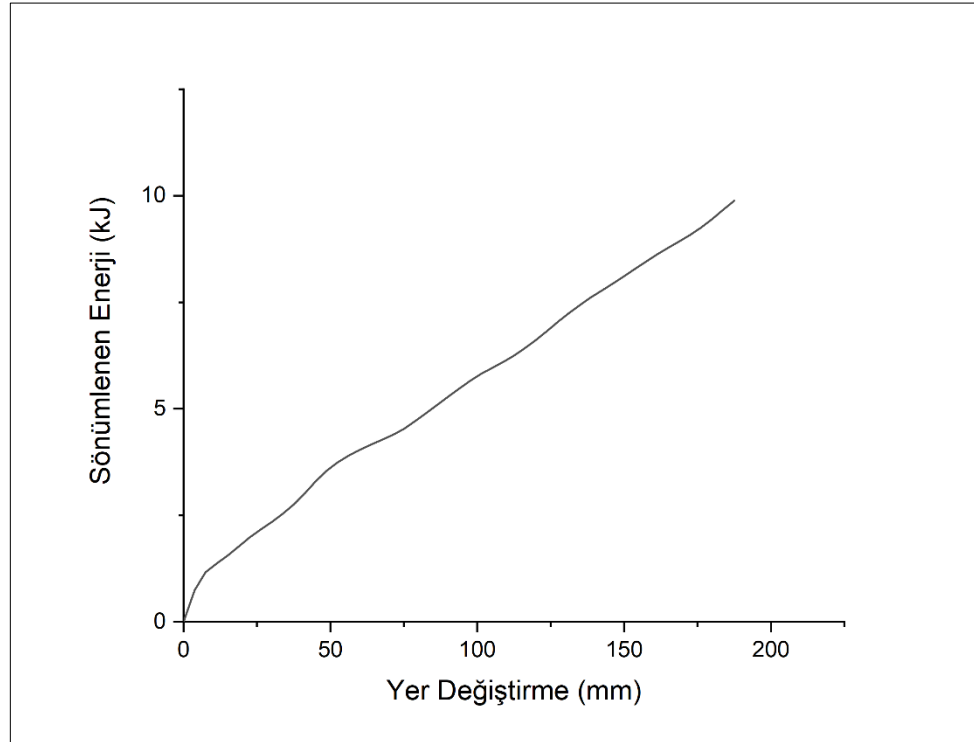
3.1.2. Sabit Kalınlığa Sahip Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı

Şekil 46 ve Şekil 47 sabit 1,5 mm kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün darbe analizinden elde edilen sonuçları göstermektedir. Tek parçadan oluşan enerji sönümleyici üzerinde herhangi bir plastik şekil verme işlemi etkisi bulunmamaktadır.

Şekil 46'dan görüleceği üzere sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün darbe analizi sonrasında meydana gelen maksimum çarpışma kuvveti 240 kN olarak elde edilirken, Şekil 47 enerji sönümleyici tüpün 9.9 kJ enerji sönümlediğini göstermektedir.



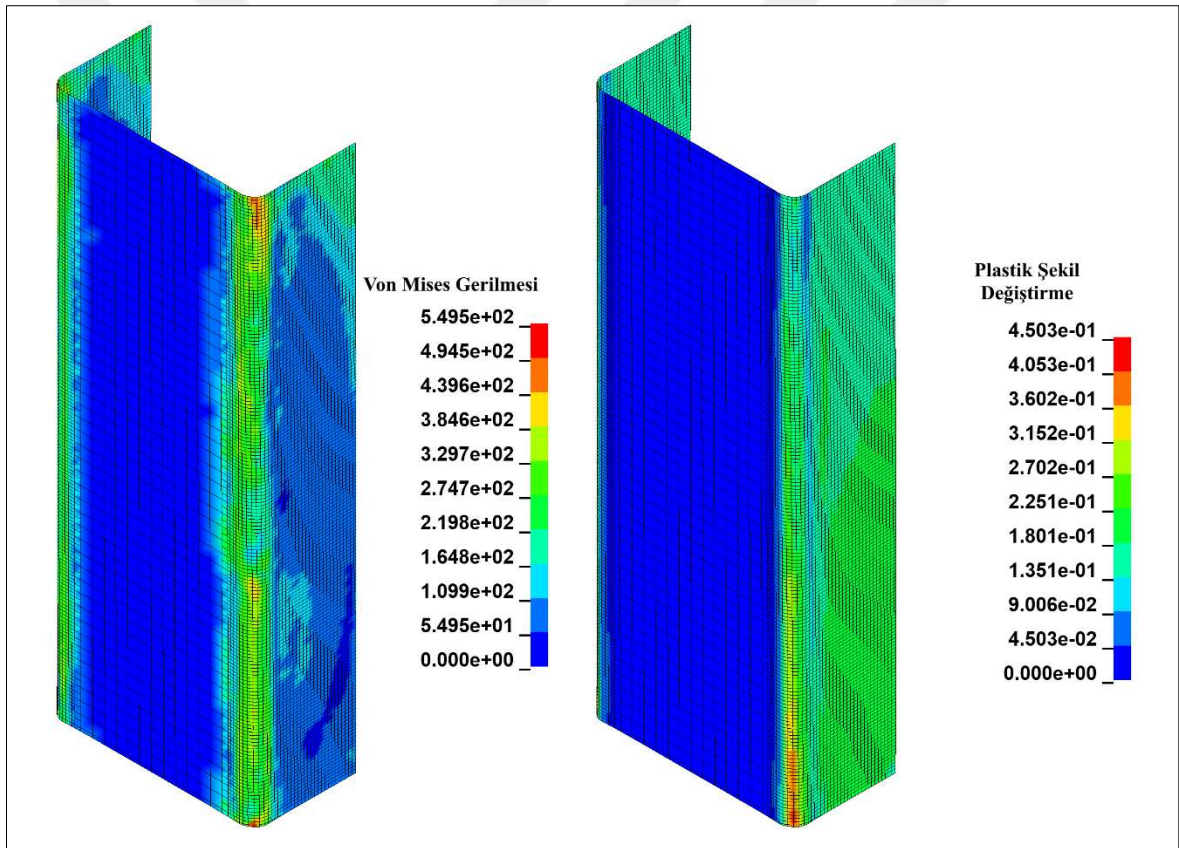
Şekil 46. Sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpten elde edilen çarpışma kuvveti eğrisi



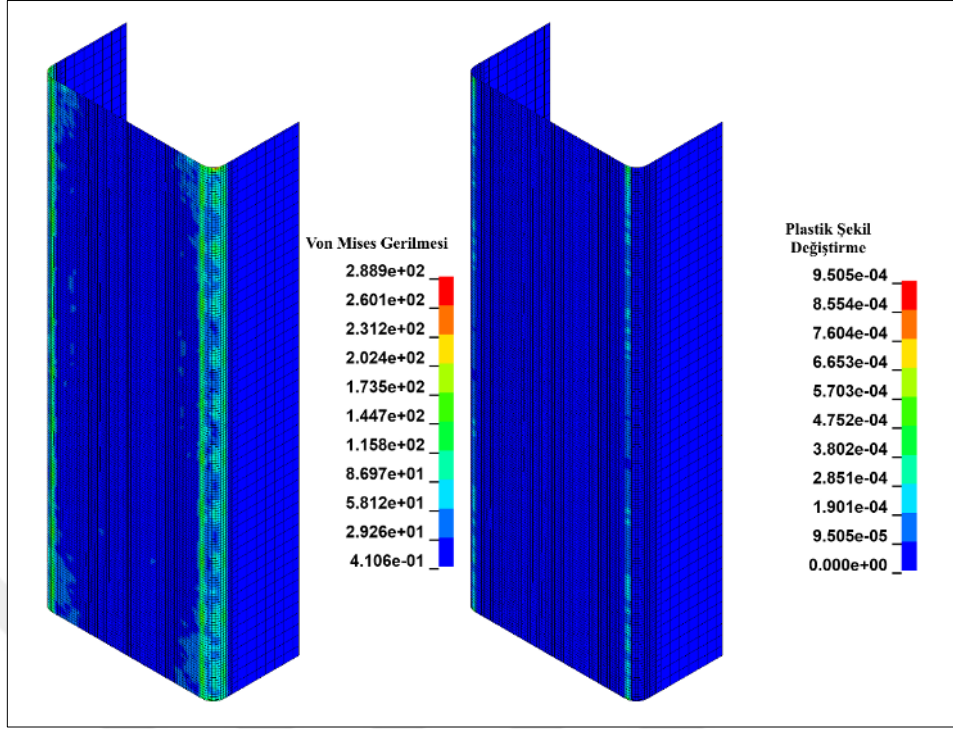
Şekil 47. Sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpten elde edilen enerji miktarı

3.1.3. Plastik Şekil Verme İşlemlerinin Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı Üzerindeki Tekil Etkileri

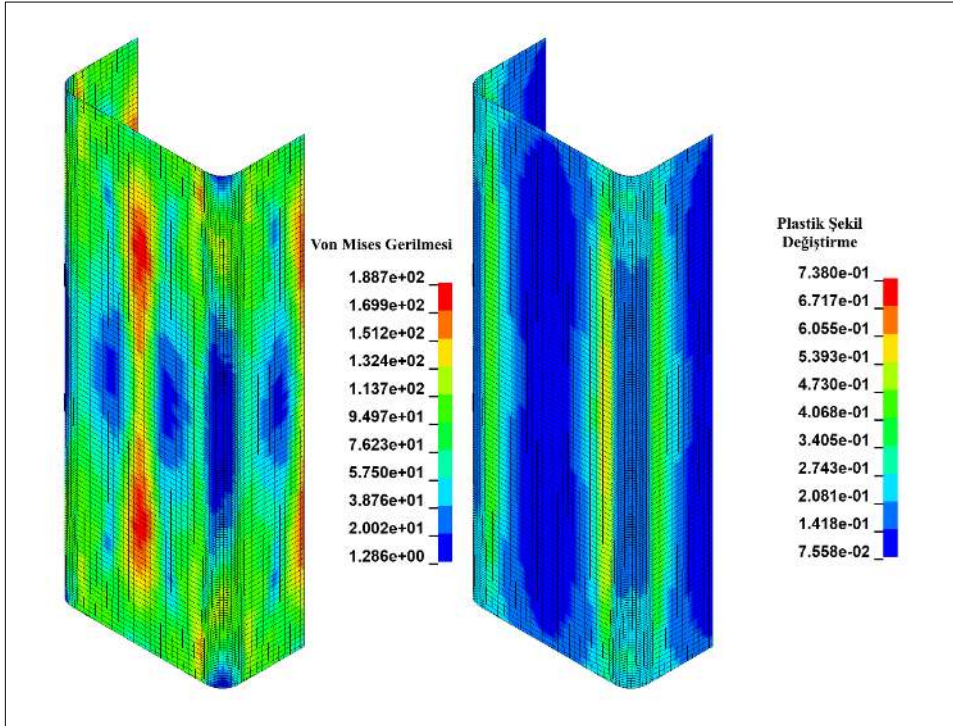
Şekil 48-50 derin çekme, kenar bükme ve hidroforming analizleri sonrası iş parçası üzerindeki von Mises gerilmelerini ve plastik şekil değiştirme miktarlarını göstermektedir. Derin çekme, kenar bükme ve hidroforming analizi sonrasında iş parçasında meydana gelen von Mises gerilmeleri sırası ile 549,5, 288,9 ve 188,7 MPa olarak elde edilirken, plastik şekil değiştirme miktarları ise 0,45, 0,00095 ve 0,73 olarak elde edilmiştir.



Şekil 48. Derin çekme işlemi sonrasında elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri



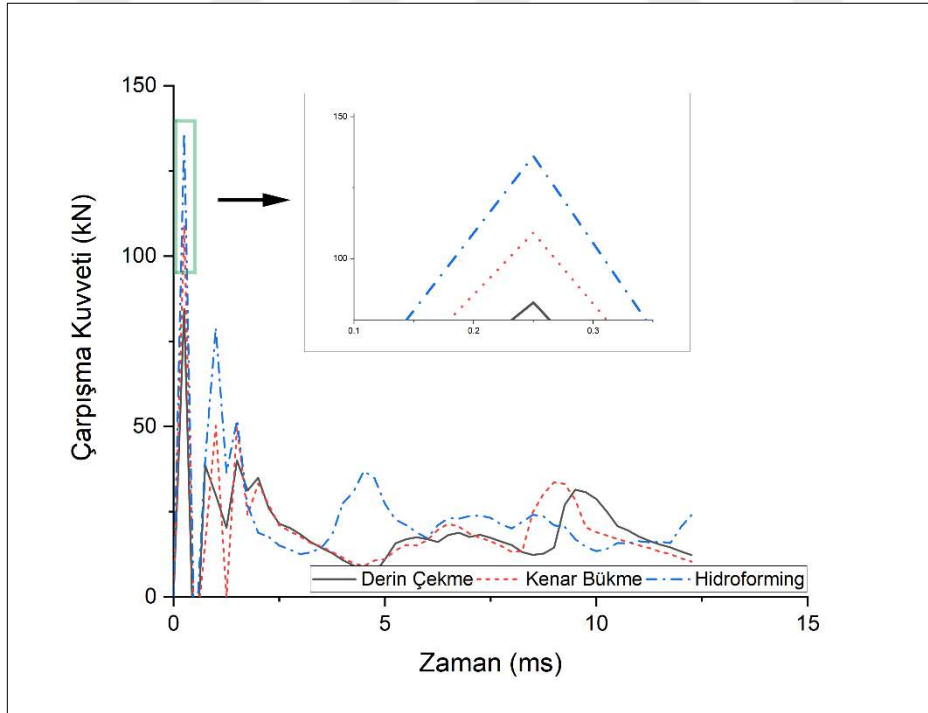
Şekil 49. Kenar bükme işlemi sonrasında elde edilen gerilme ve şekil değişirme değerleri



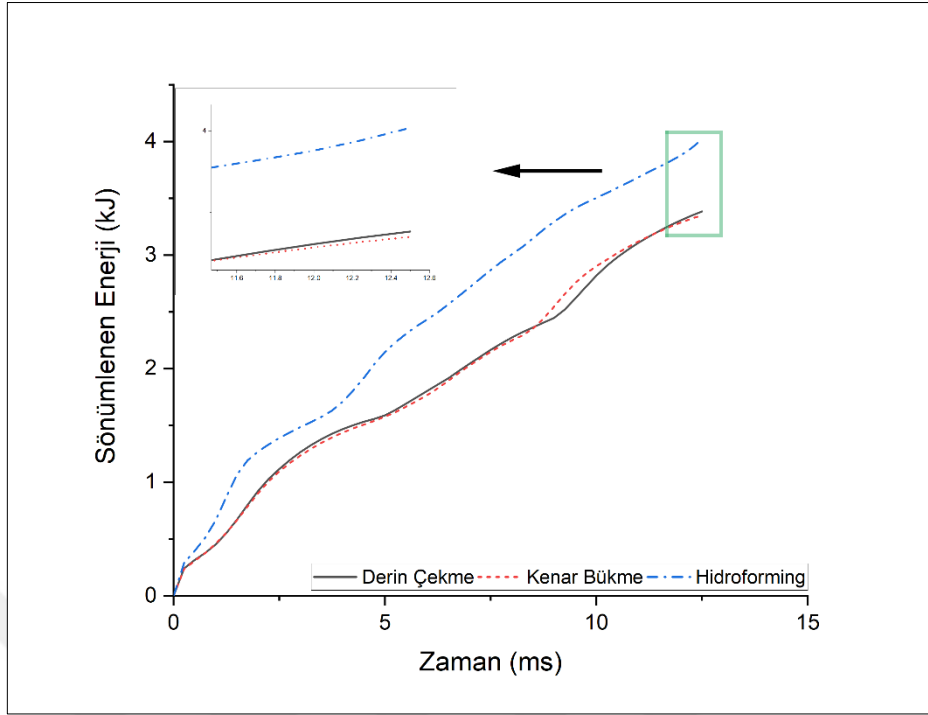
Şekil 50. Hidroforming işlemi sonrasında elde edilen gerilme ve şekil değişirme değerleri

Derin çekme, kenar bükme ve hidroforming prosesleri kullanılarak elde edilmiş enerji sönümleyici tüplerin sonlu elemanlar darbe analizlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 51-52’de verilmiştir.

Derin çekme, kenar bükme ve hidroforming ile elde edilmiş enerji sönümleyici tüplerin sonlu elemanlar analizlerinden maksimum çarpışma kuvveti için sırası ile 84, 109 ve 136 kN olarak, sönümlenen enerji miktarı ise 3.38, 3.35 ve 4 kJ olarak elde edilmiştir. Derin çekme ile imal edilen enerji sönümleyici tüp ile kıyaslandığında kenar bükme ile elde edilen enerji sönümleyici tüpün %30, hidroforming ile imal edilen enerji sönümleyicinin %62 oranında daha fazla çarpışma kuvveti gösterdiği görülmektedir. Her ne kadar hidroforming ile üretilen enerji sönümleyici tüp diğerlerinden bir miktar daha fazla enerji sönümlese de aradaki %62’lik çarpışma kuvveti farkı bu fazlalığı önemsiz kılmaktadır. Dolayısı ile bu üç plastik şekil verme işlemi arasından darbe yüklemesi için en uygun olanı derin çekme olarak belirlenmiştir.



Şekil 51. Plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvvetine etkisi

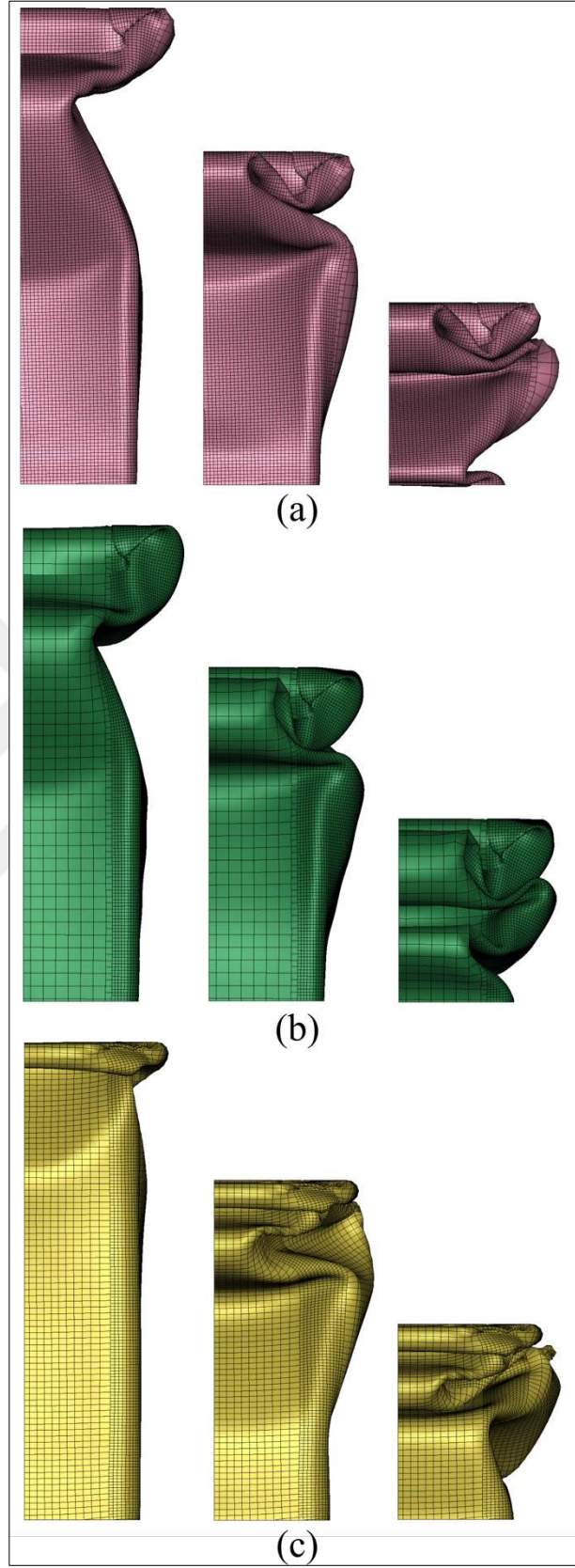


Şekil 52. Plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyici tüpün sönümlediği enerji miktarına olan etkisi

Ayrıca Tablo 6’da derin çekme, kenar bükme ve hidroforming prosesleri kullanılarak elde edilmiş enerji sönümleyici tüplerin sonlu elemanlar darbe analizlerinden elde edilen sonuçlar maksimum çarpışma kuvveti ve sönümlenen enerji cinsinden karşılaştırmalı olarak gösterilirken, Şekil 53 darbe esnasında enerji sönümleyici tüplerde meydana gelen deformasyonları göstermektedir.

Tablo 6. Plastik şekil verme işlemlerinin enerji sönümleyici tüpün darbe performansına olan etkisi

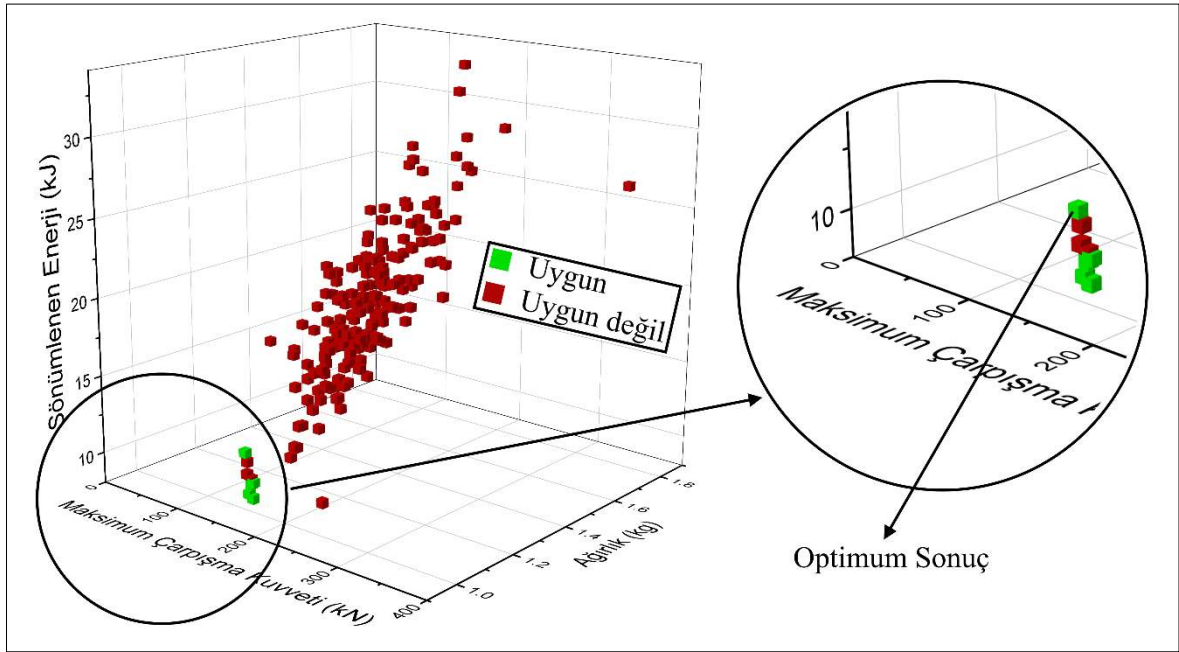
Plastik Şekil Verme Yöntemi	Maksimum Çarpışma Kuvveti (kN)	Sönümlenen Enerji Miktarı (kJ)
Derin Çekme	84	3,38
Kenar Bükme	109	3,35
Hidroforming	136	4,00



Şekil 53. (a) Derin çekme, (b) kenar bükme ve (c) hidroforming ile elde edilen enerji sönmleyici tüplerde darbe yüklemesi sonucu oluşan deformasyonlar

3.1.4. Kalınlık Optimizasyonunun Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Performansı Üzerindeki Tekil Etkisi

Optimizasyon sonrası elde edilen serpmeye diyagramı Şekil 54'te gösterilirken, elde edilen optimum kalınlık dağılımı verileri Tablo 7'de verilmiştir.

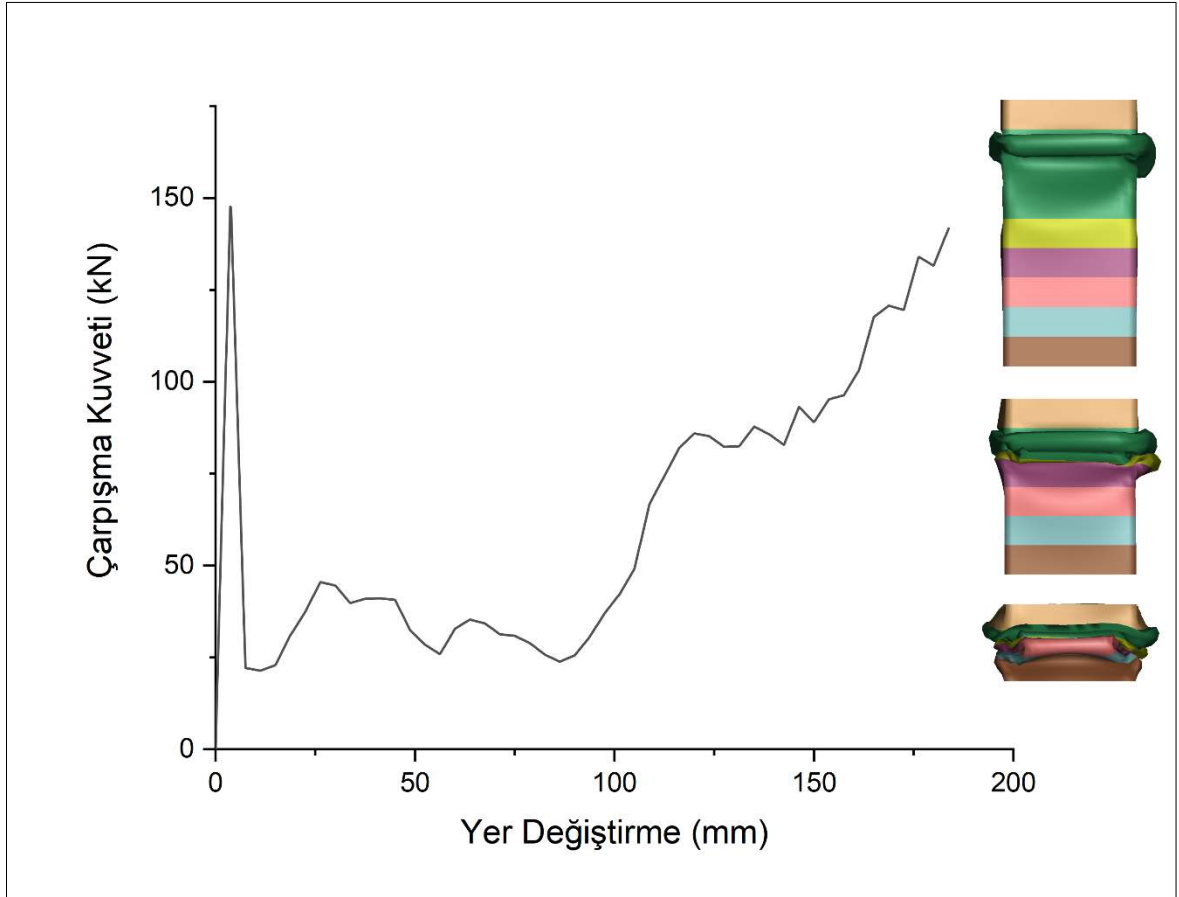


Şekil 54. Enerji sönümleyici tüpün kalınlık optimizasyonu serpmeye diyagramı

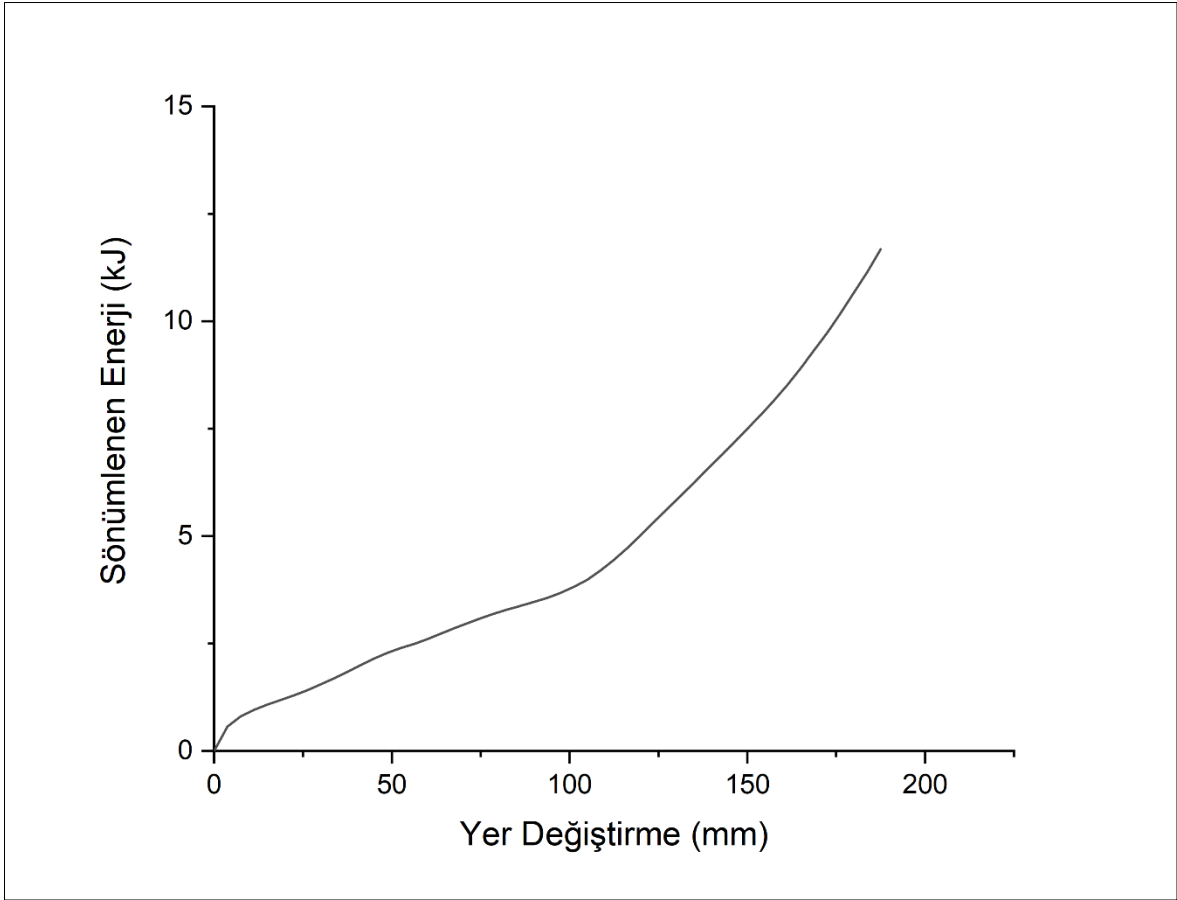
Kalınlığı optimize edilmiş enerji sönümleyici tüpün darbe davranışının gösterildiği Şekil 55 ve Şekil 56'dan da görüleceği üzere, optimizasyon sonrasında enerji sönümleyicinin maksimum çarpışma kuvveti önemli miktarda azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün darbe analizinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında (Bkz. Şekil 46-47) maksimum çarpışma kuvveti %37,5 düşürülerek 150 kN olarak elde edilmiştir. Sönümlenen enerji miktarı ise %18 oranında artırılmış ve enerji sönümleyici tüp toplamda 11,68 kJ enerji sönümlemiştir.

Tablo 7. Optimizasyon sonrası elde edilen kalınlık dağılımı değerleri

Optimum Kalınlık Değerleri (mm)						
t_1	t_2-t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
2,26	0,96	1,13	1,73	1,78	2,41	2,29



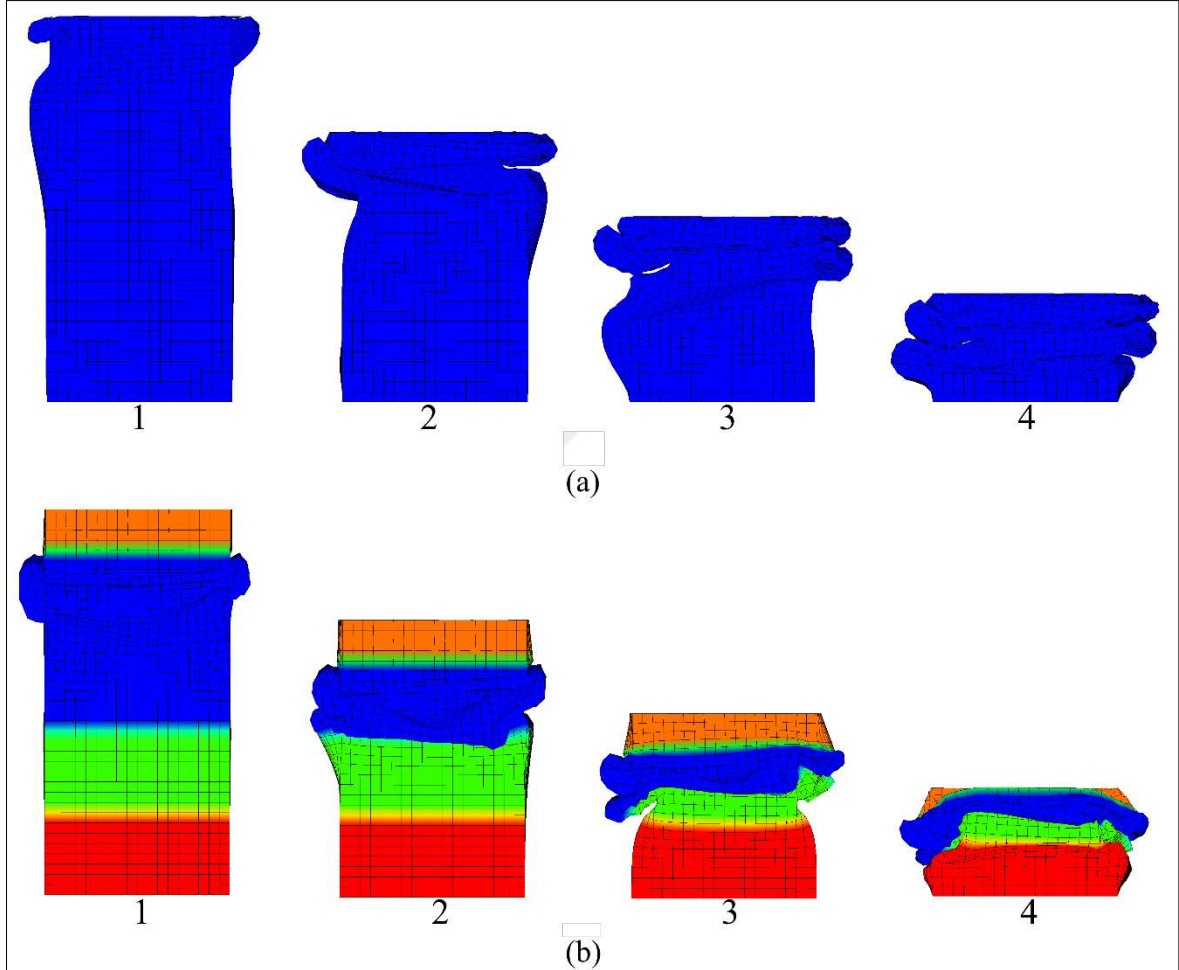
Şekil 55. Optimize edilmiş enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi



Şekil 56. Optimize edilmiş enerji sönümleyici tüpün sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrisi

Enerji sönümleyici tüpün kalınlık optimizasyonu sonrası elde edilen ve yukarıda bahsedilen olumlu gelişmelerin yanı sıra başka bir noktada daha önemli bir değişiklik daha bulunmaktadır. Kalınlığı optimize edilmiş enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti-yer değiştirme grafiği incelendiğinde (Şekil 55) sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpten farklı olarak deformasyon miktarı 130 mm'yi aştığında çarpışma kuvvetinin kayda değer şekilde arttığı görülmektedir. Değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün doğasından kaynaklı olan bu durum ne yazık ki kaçınılmazdır. Kalınlık sabitken deformasyonun başlaması için gereken kuvvete tek bir seferde erişmek yeterlidir. Fakat değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpte deformasyon, kalınlığın nispeten düşük olduğu bölgede (t_2-t_7) başlamakta (Şekil 57-b(1)) sonrasında bu bölge tamamen deforme olmadan (Şekil 57-b(2)) çarpışma kuvveti başka bir pik yapmamaktadır. Kalınlığın düşük olduğu bölge tamamen deforme olduktan sonra ise kalınlığın daha yüksek olduğu bölgelerde (t_8-t_{12})

deformasyonun başlatılabilmesi için daha yüksek kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 57-b(3-4)).



Şekil 57. Kare kesitli enerji sönmleyici tüpün deformasyon davranışı: (a) Sabit kalınlık; (b) optimize edilmiş kalınlık

3.1.5. Plastik Şekil Verme ve Kalınlık Optimizasyonunun Enerji Sönmleyici Tüpün Darbe Performansı Üzerindeki İkili Etkisi

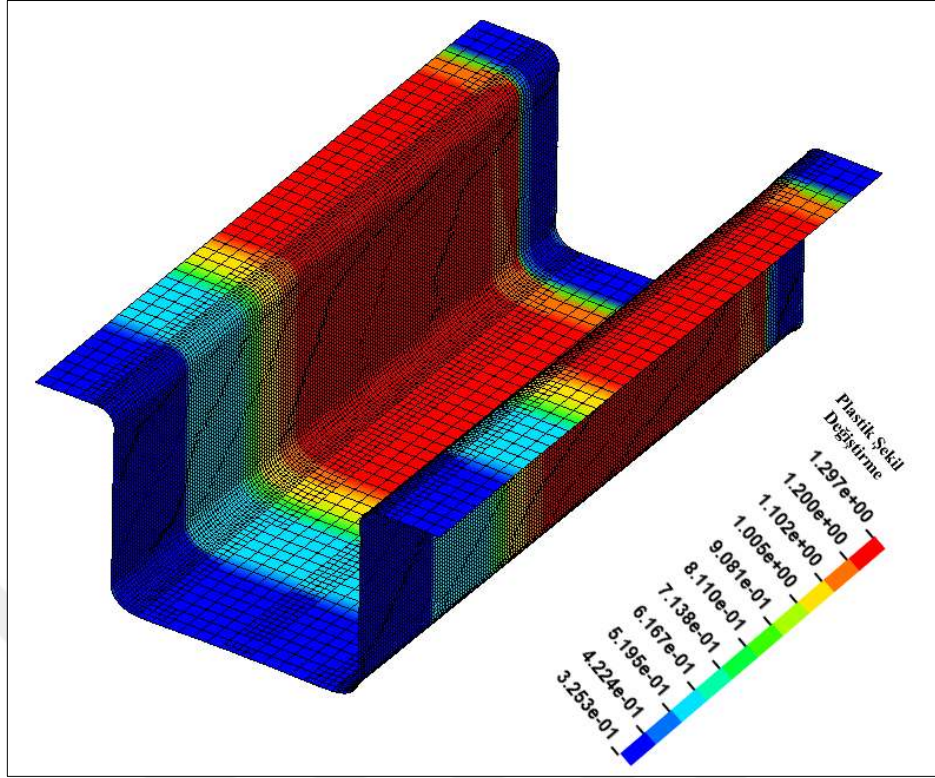
Yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi kalınlık optimizasyonu gerçek prosesler kullanılarak yapılır. Bu çalışmada da enerji sönmleyici tüpün kalınlık optimizasyonundan elde edilen sonuçlara uygun kalınlık dağılımının elde edilmesi için haddeleme işlemi

yapılmıştır. Tablo 8 haddeleme sonrası her bir bölge için elde edilen kalınlığı göstermekte ve elde edilen kalınlık dağılımının optimizasyondan elde edilen kalınlık dağılımıyla (Tablo 7) uyum gösterdiği açıkça görülmektedir.

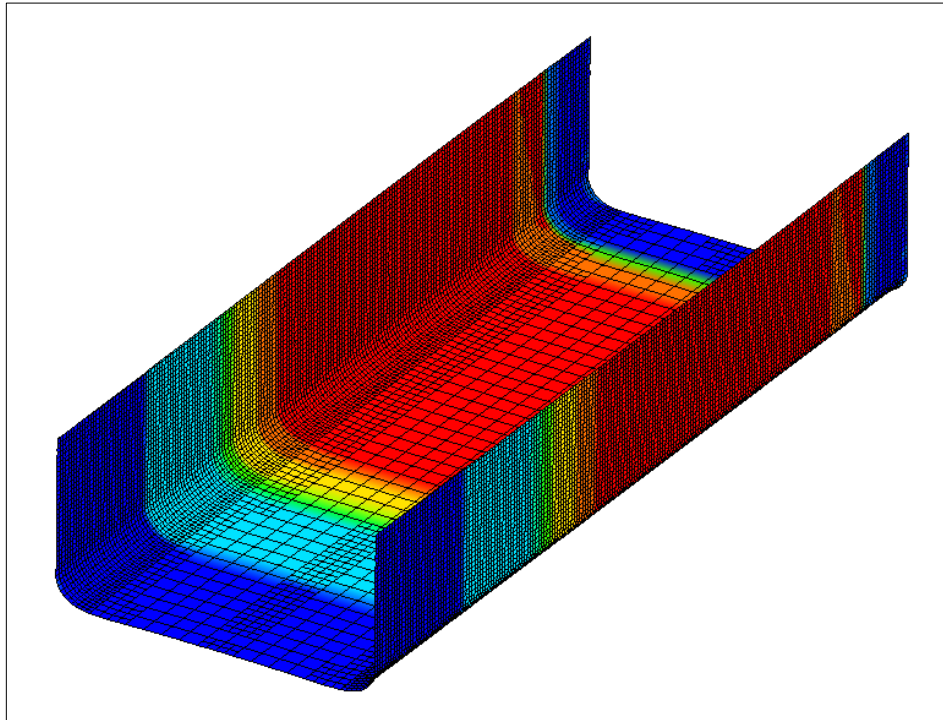
Tablo 8. Haddeleme işlemi sonrası enerji sönümleyici tüpte elde edilen kalınlık dağılımı

Haddeleme işlemi sonrası kalınlık dağılımı ($\pm 0,02$ mm)						
t_1	t_2-t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
2,28	0,98	1,14	1,74	1,78	2,40	2,32

Haddeleme işlemiyle istenen değişken kalınlık dağılımı elde edilen enerji sönümleyici tüp analizine plastik şekil verme işlemi etkisini de ilave etmek için enerji sönümleyici tüp derin çekme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece hem kalınlık optimizasyonu hemde plastik şekil verme işlemlerinin etkisi birlikte değerlendirilerek enerji sönümleyici tüpün darbe performansı analiz edilmiştir. Şekil 58 derin çekme analizi sonrasında iş parçası üzerindeki plastik şekil değiştirmeleri gösterirken Şekil 59 derin çekme analizini takiben gerçekleştirilen geri yaylanma ve budama işlemleri sonrasında iş parçasının son halini göstermektedir.



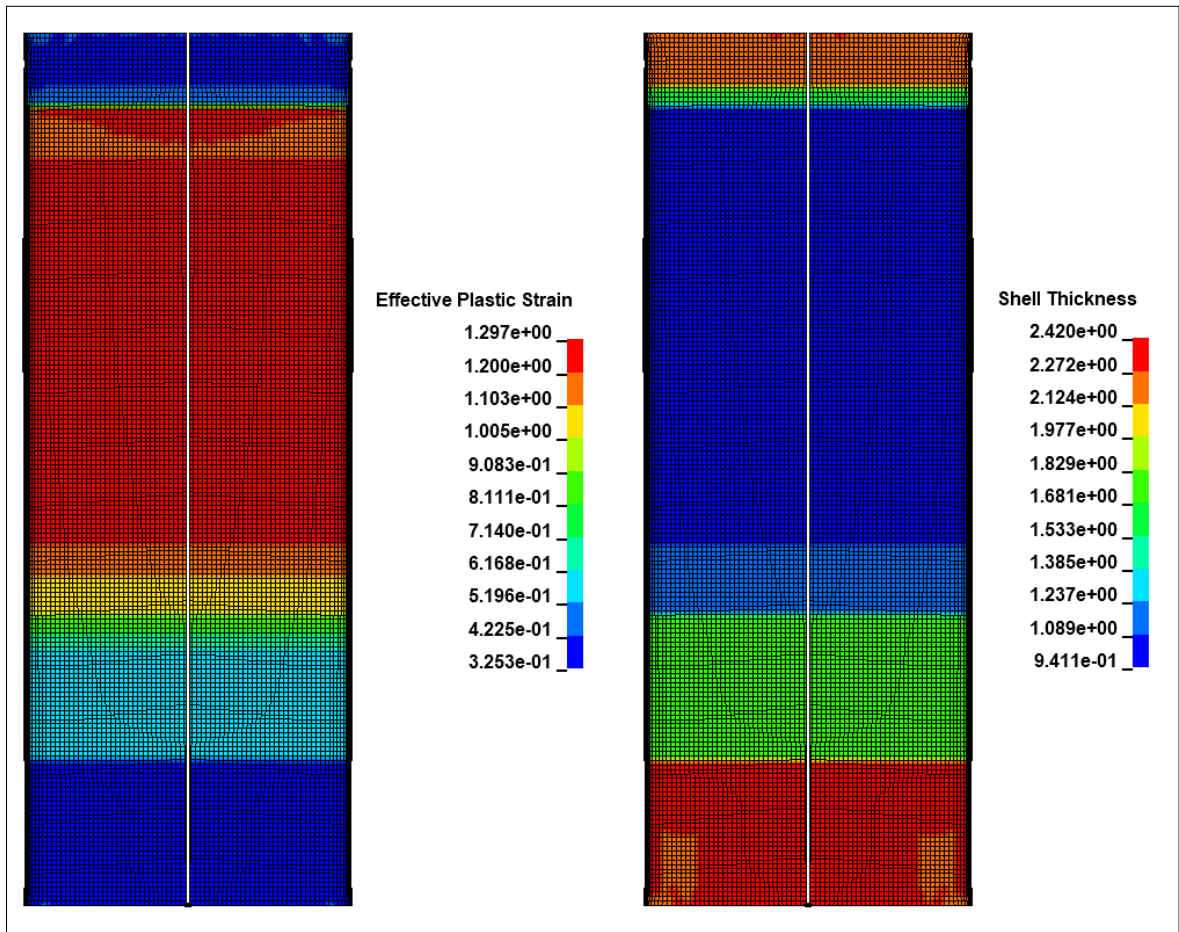
Şekil 58. Derin çekme analizi sonrası iş parçası üzerinde meydana gelen plastik şekil değiştirmeler



Şekil 59. Budama işlemi sonrası iş parçasının nihai formu

3.1.6. Plastik Şekil Verme Yöntemleri ile İmal Edilmiş Değişken Kalınlığa Sahip Enerji Sönümleyici Tüpün Darbe Davranışı Bulguları

Şekil 60 haddeleme ve derin çekme ile imal edilmiş değişken kalınlığa sahip kare kesitli enerji sönümleyici tüpün darbe analizi öncesi plastik şekil değiştirme durumunu ve kalınlık dağılımını göstermektedir.

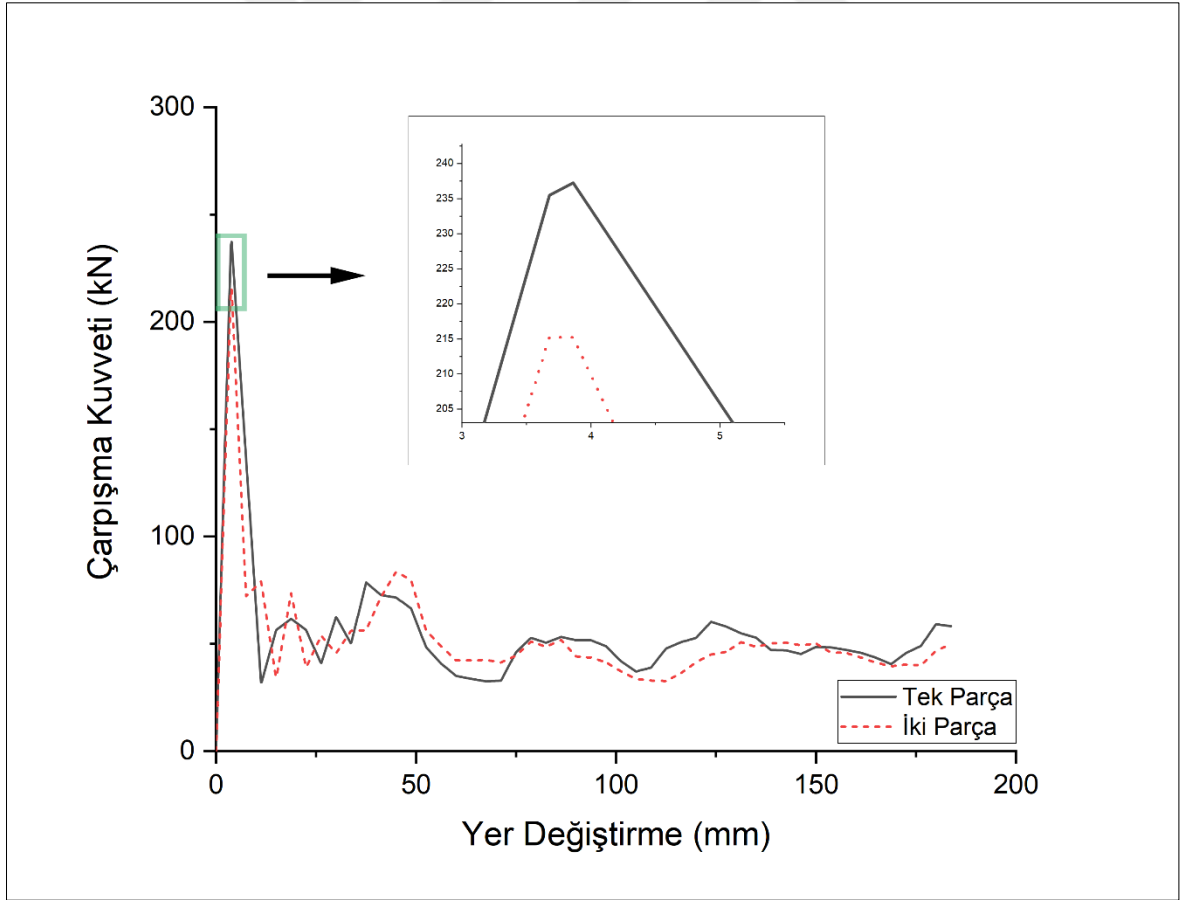


Şekil 60. Enerji sönümleyici tüpün plastik şekil değiştirme ve kalınlık dağılımı

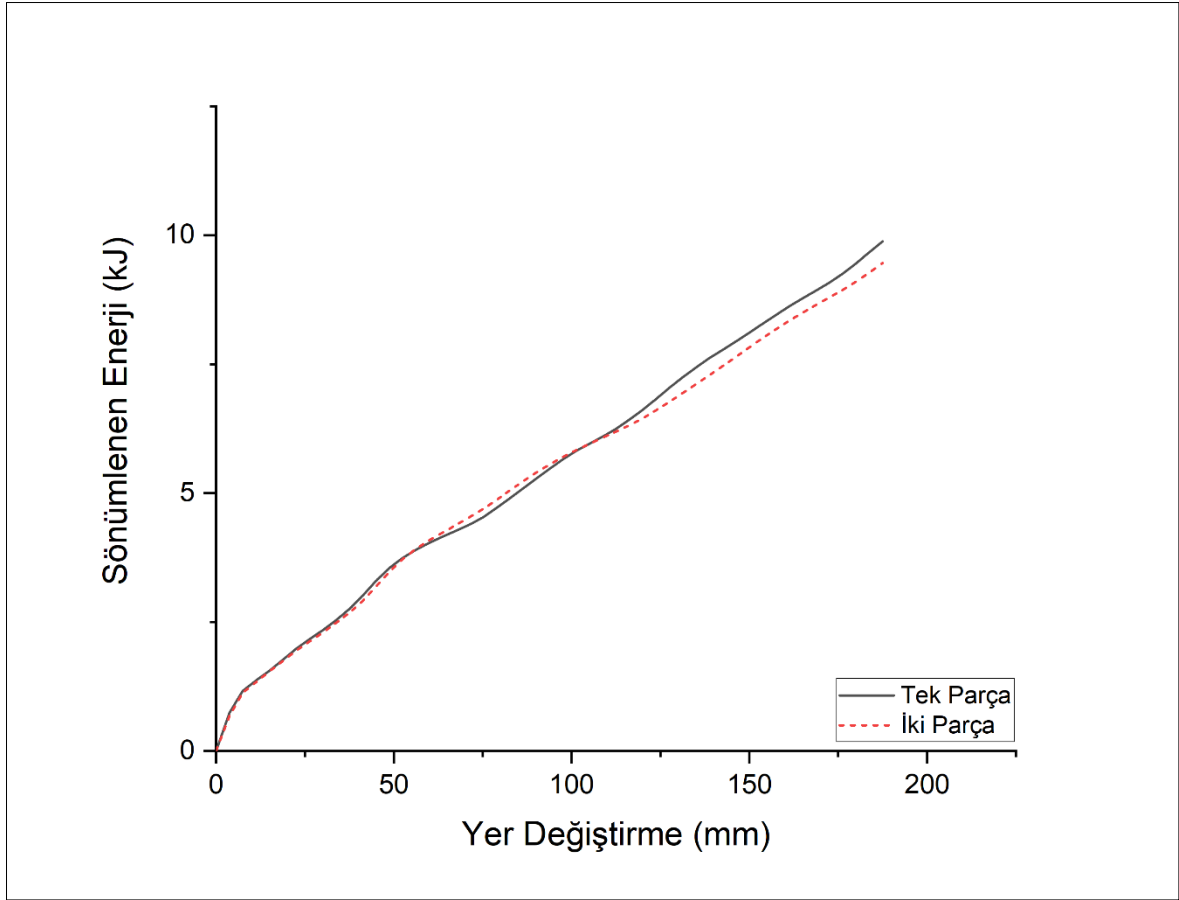
Daha önceden de bahsedildiği ve şekilden de görülebileceği üzere enerji sönümleyici tüp, uygulanan plastik şekil verme yöntemleri sebebiyle simetrik iki parçadan oluşmaktadır. Dolayısı ile başlangıçta analizi gerçekleştirilen sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp

tek parça olduğundan, darbe analizinden elde edilen sonuçların (Şekil 46-47) bu sonuçlarla karşılaştırılmasının uygun olmayacağı düşünülerek sabit 1,5 mm kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün iki parçalı halinin de sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek hem tek parçalı haliyle kıyaslanmış, hem de çalışma sonunda üretilen değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpten elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Şekil 61-62 bu amaçla gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçları göstermektedir.

İki parçalı enerji sönümleyici tüpte sivri köşeler bulunmadığından maksimum çarpışma kuvveti %9 düşerek 240 kN'dan 215 kN'a gerilemiştir (Şekil 61). Benzer şekilde sönümlenen enerji miktarı da %4'lük bir düşüşle 9,9 kJ'den 9,5 kJ'e gerilemiştir (Şekil 62). Elde edilen sonuçlar sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüpün tek parçalı ya da iki parçalı oluşunun darbe performansını önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir.



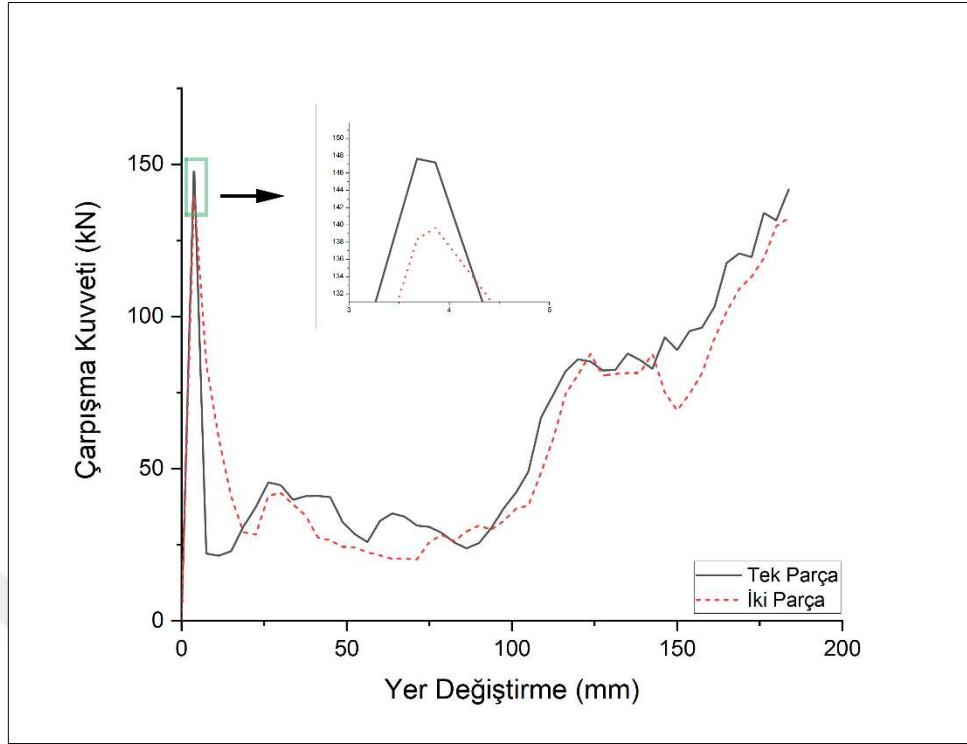
Şekil 61. Sabit kalınlığa sahip tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti dağılımı



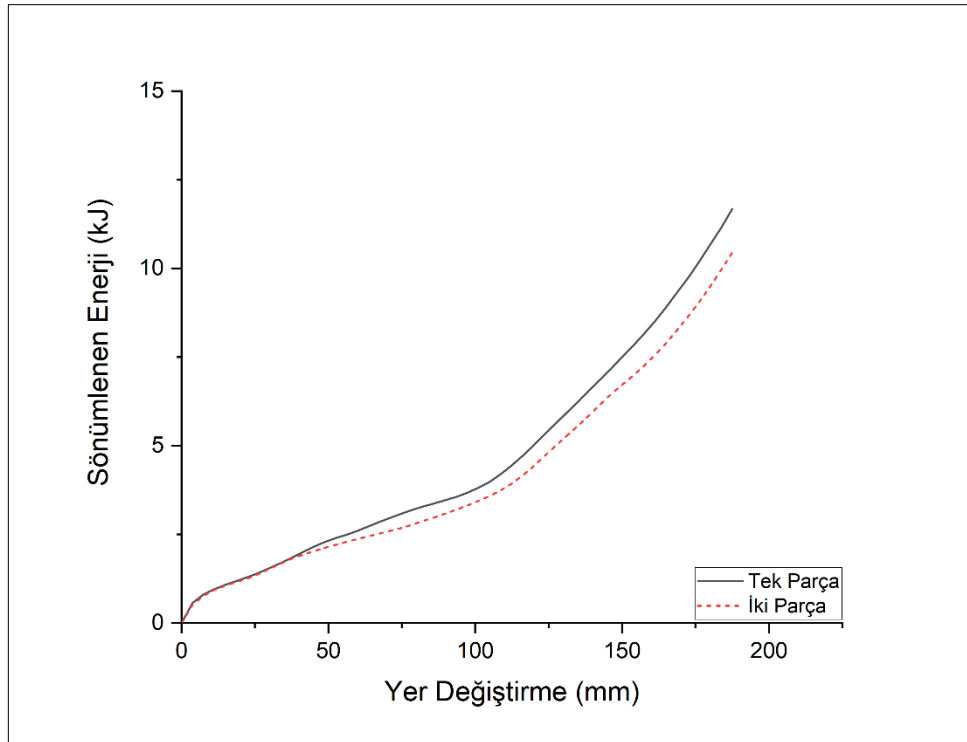
Şekil 62. Sabit kalınlığa sahip tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün enerji sönümleme kapasitesi

Enerji sönümleyici tüpün kalınlık optimizasyonu da işlem gücünden tasarruf edebilmek amacı ile tek parçalı enerji sönümleyici tüp üzerinden gerçekleştirildiğinden optimum kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp de tek parçalı ve iki parçalı halinin darbe analizleri gerçekleştirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 63-64). Bu sonuçlar sadece kalınlık optimizasyonunun etkisini göstermekte olup plastik şekil verme işlemlerinin etkisini içermemektedir.

Kalınlık optimizasyonu sonrası tek parçalı enerji sönümleyici ve iki parçalı enerji sönümleyici sırası ile 150 kN ve 139 kN maksimum çarpışma kuvveti göstermiş olup 11,68 kJ ve 10,4 kJ enerji sönümlemişlerdir. Tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyicinin optimizasyon sonrası maksimum çarpışma kuvvetleri %7, sönümlenen enerji miktarları ise %11 farklılık göstermektedir.



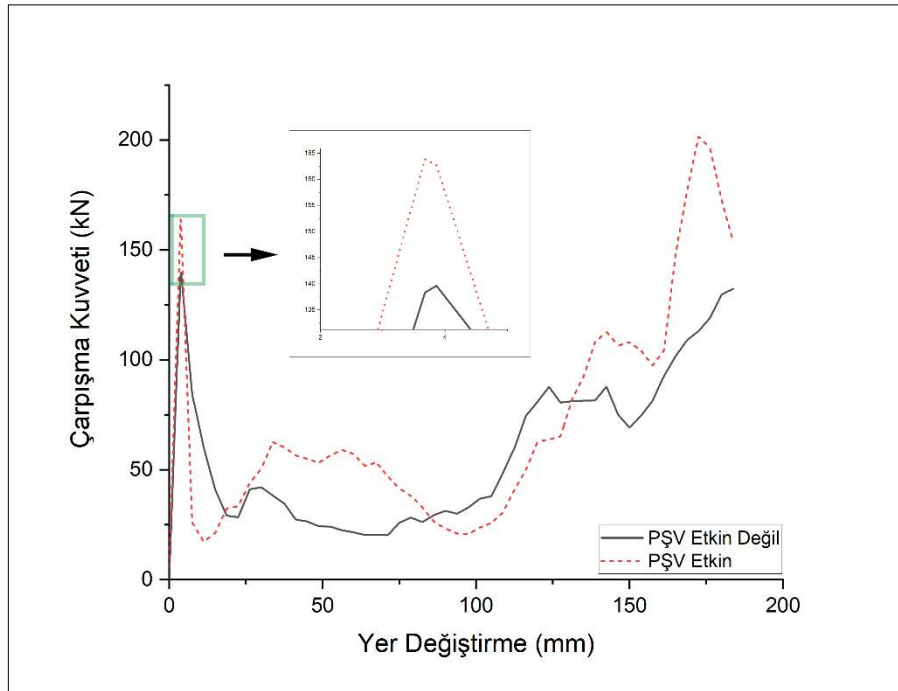
Şekil 63. Kalınlık optimizasyonu sonrası tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün çarpışma kuvveti dağılımı



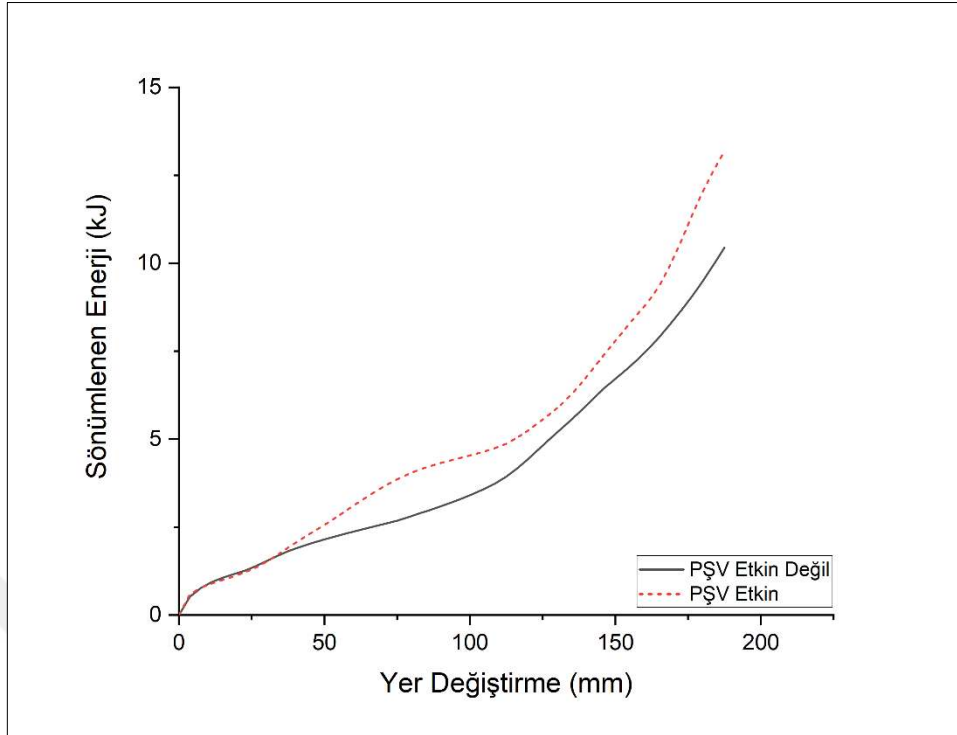
Şekil 64. Kalınlık optimizasyonu sonrası tek parçalı ve iki parçalı enerji sönümleyici tüpün enerji sönümlenme kapasitesi

İki parçalı enerji sönümleyici tüpün sadece kalınlık optimizasyonu göz önünde bulundurulduğunda, sonuçlar kalınlık optimizasyonunu takiben maksimum çarpışma kuvvetinin %35 oranında bir gerilemeyle 215 kN'dan 139 kN'a düştüğünü, sönümlenen enerji miktarının ise %9 oranında artış göstererek 9,5 kJ'den 10,4 kJ'e yükseldiğini göstermektedir. Bu sonuçlar literatürde mevcut olan çalışmaların yaklaşımıdır. Her ne kadar %35'lik tepki kuvveti düşüşü oldukça önemli bir gelişme olsa da ve sönümlenen enerji miktarında da dikkate değer bir artış yakalanmış olsa da bu yaklaşım doğru değildir ve sonuçlar yanıltıcıdır. Çünkü optimum kalınlık dağılımının ve enerji sönümleyici tüp formunun elde edilmesi için kullanılması gereken plastik şekil verme işlemlerinin etkisi dikkate alınmamıştır ve olması gereken durum aşağıda verilmiştir.

Tezin bu bölümündeki çalışmanın asıl amacı mevcut yaklaşımın hatalı sonuçlara sebebiyet verdiğini göstermek ve durumun gerçekte nasıl olduğunu ortaya koymaktır. Şekil 65-66 bu amaçla gerçekleştirilen haddeleme ile değişken kalınlığı ve enerji sönümleyici tüp formu ise derin çekme ile elde edilen kare kesitli enerji sönümleyici tüpün gerçek darbe davranışını göstermekte ve karşılaştırmaktadır. Ek olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 9'da da verilmiştir.



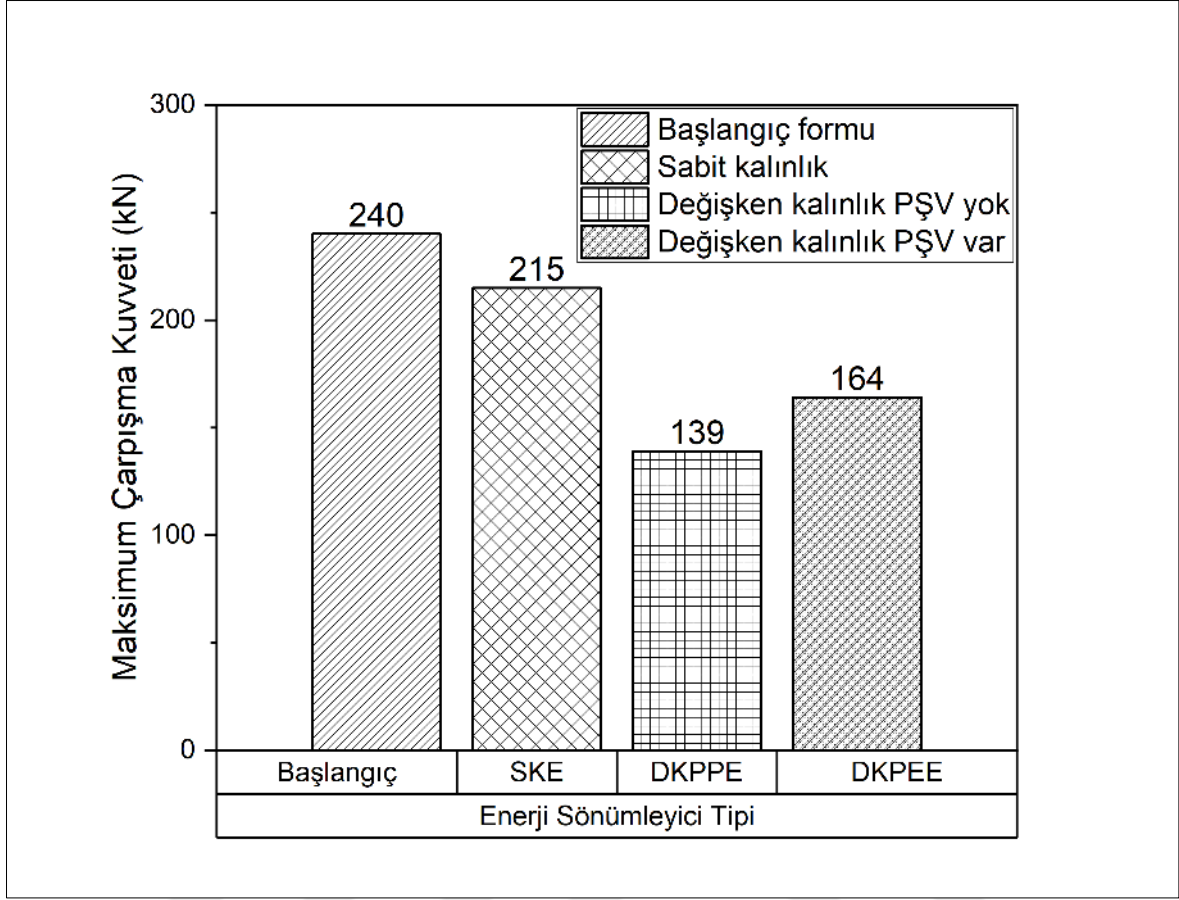
Şekil 65. Plastik şekil verme işlemlerinin çarpışma kuvvetine olan etkisi



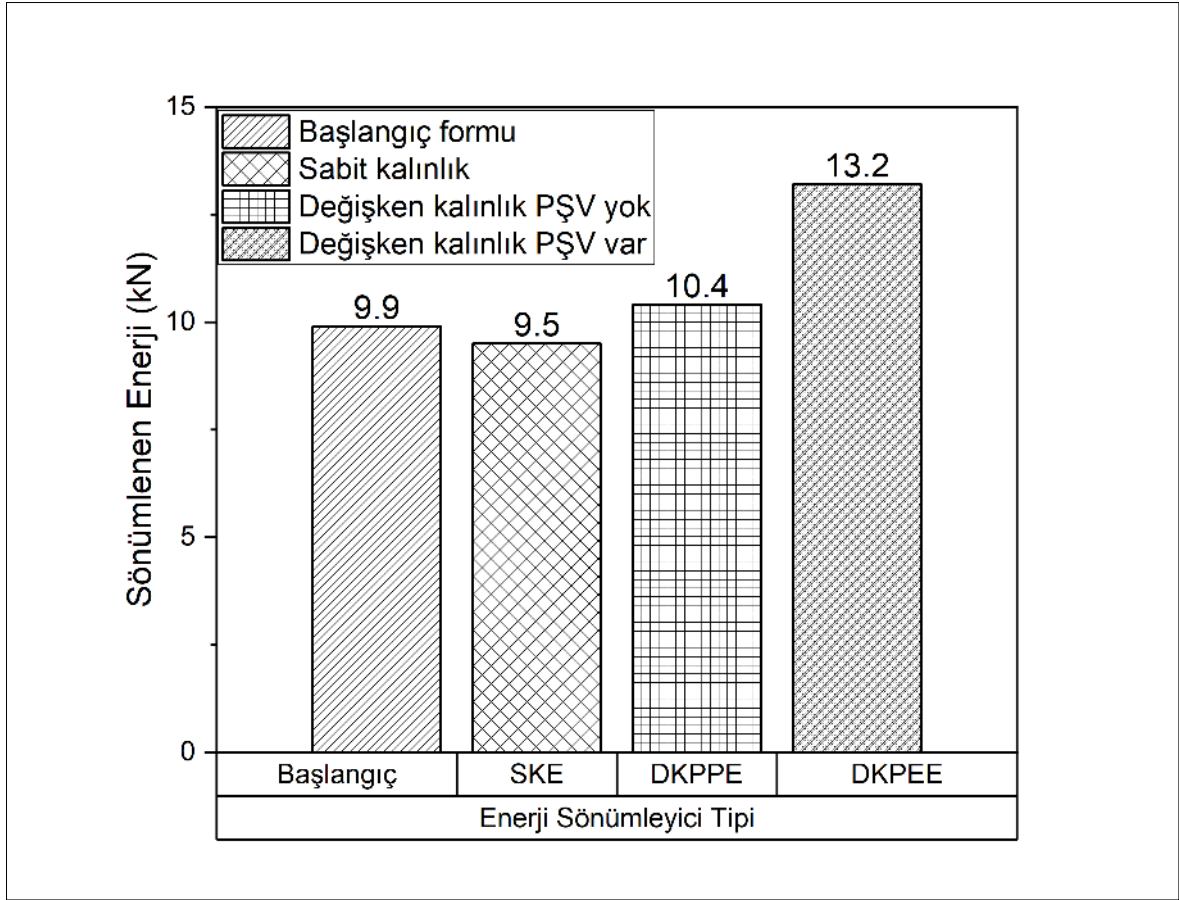
Şekil 66. Plastik şekil verme işleminin sönümlenen enerji miktarına olan etkisi

Plastik şekil verme işlemlerinin etkisi hesaba katıldığında enerji sönümleyici tüp 164 kN'luk bir maksimum çarpışma kuvveti göstermiş olup 13,2 kJ enerji sönümlemiştir. İki parçalı sabit kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp ile kıyaslandığında (215 kN ve 9,5 kJ) maksimum çarpışma kuvvetinin gerçek düşüş miktarı %25, sönümlenen enerji miktarında meydana gelen gerçek artış ise %39'dur.

Plastik şekil verme işlemlerinin hesaba katılmadığı ve katıldığı durumlarda darbe analizi sonrasında maksimum çarpışma kuvveti %18 düşüş, sönümlenen enerji miktarı ise %27 oranında artış göstermektedir. Elde edilen sonuçlar değişken kalınlık ve enerji sönümleyici tüp formunu elde etmede kullanılacak plastik şekil verme yöntemlerinin hesaba katılmadığındaki sonuçlarda büyük farklılıklar olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile darbe performansı için gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebilmesi adına hem kalınlığın hem de nihai formun verilmesi için kullanılan plastik şekil verme işlemlerinin etkisi muhakkak hesaba katılmalıdır.



Şekil 67. Tüm seçenekler için elde edilen maksimum çarpışma kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 68. Tüm seçenekler için elde edilen maksimum sönümlenen enerji miktarlarının karşılaştırılması

Tablo 9. Tüm seçenekler için elde edilen çarpışma kuvveti ve sönümlenen enerji miktarları

Enerji Sönümleyici Tipi	Kısaltma	Maksimum Çarpışma Kuvveti (kN)	Sönümlenen Enerji (kJ)
Başlangıç	-	240	9,9
Sabit kalınlık	SKE	215	9,5
Değişken kalınlık P&V yok	DKPPE	139	10,4
Değişken kalınlık P&V var	DKPEE	164	13,2

3.2. Kompozit Tampon Kirişi Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

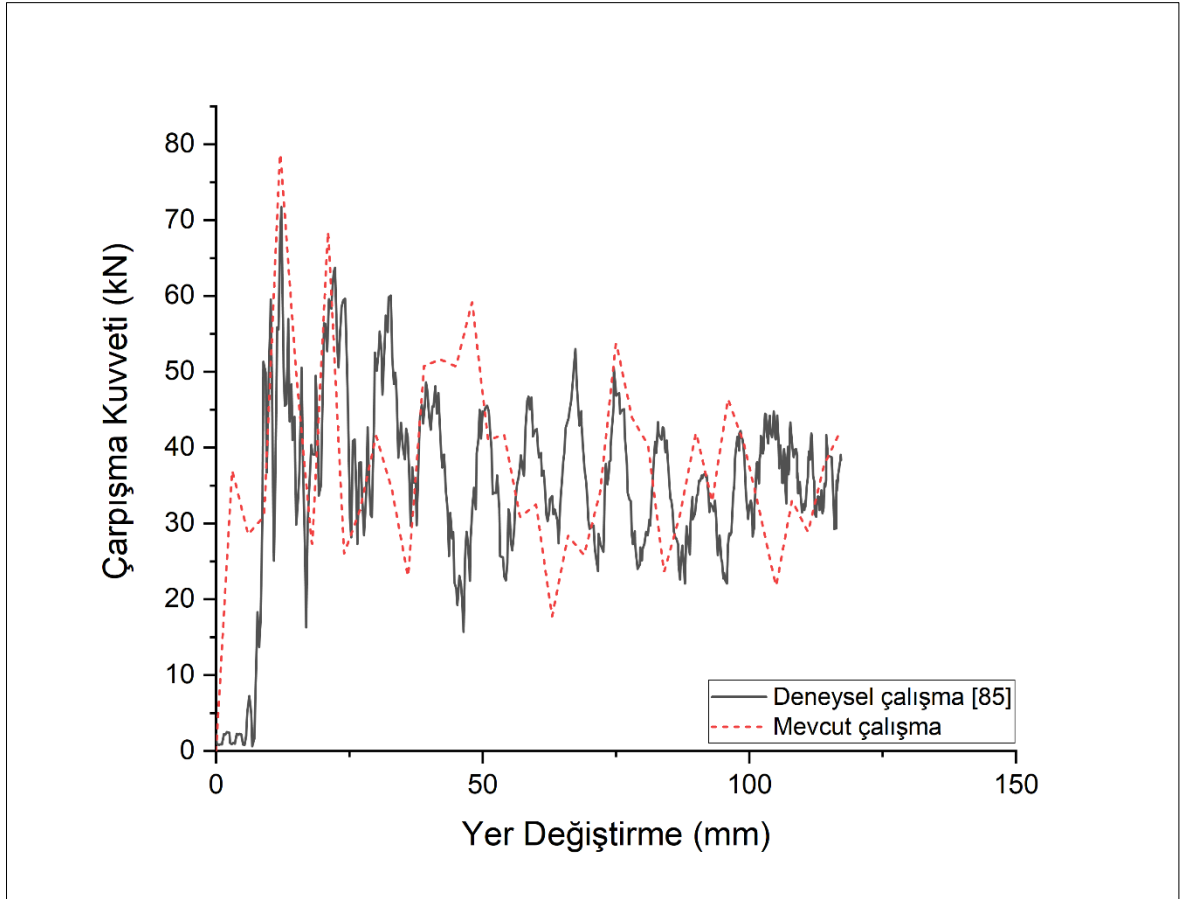
Tampon kirişi üzerine gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar iki aşamada incelenmiştir: İlk aşamada sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu göstermek amacıyla kompozit tampon kirişi ile aynı malzemeye sahip enerji sönümleyici tüp için literatürdeki mevcut deneysel çalışmanın sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İkinci aşamada değişken kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp ve kompozit tampon kirişi göz önünde bulundurularak kompozit tampon kirişinin tabaka kalınlığı ve yönelimi optimize edilmiş, optimizasyon sonrası elde edilen sonuçlar çelik malzemeden imal edilen enerji sönümleyiciden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

3.2.1. Kompozit Tampon Kirişi Doğrulama Analizi Bulguları

IM7/8552 malzemesinden yapılmış tampon kirişi için kullanılan malzeme modelinin doğrulama sonuçları Şekil 69'da verilmiştir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında 7 mm'lik deplasman değerine kadar olan bölgede meydana gelen maksimum tepki kuvvetlerinde önemli ölçüde farklılık olduğu görülmektedir. Bu bölgede meydana gelen maksimum çarpışma kuvveti, sayısal analizlerden 36,6 kN olarak elde edilirken deneysel çalışmada 10 kN'un altındadır. Aradaki fark her ne kadar büyük görünse de bu durum rahatlıkla izah edilebilir: Deneysel çalışmada numunenin darbeye maruz kalan tarafında numunenin en uç noktasına kadar kalınlığı kademeli olarak azalmakta ve deformasyonu tetikleyici bir mekanizma işlevi görmektedir. Sayısal analizde bu mekanizma mevcut olmadığından başlangıçtaki tepki kuvveti nispeten daha yüksek çıkmaktadır.

Ancak, darbe performansı değerlendirilirken en önemli parametrelerden biri olan maksimum çarpışma kuvveti göz önünde bulundurulduğunda az önce bahsedilen farklılık önemini yitirmektedir çünkü deneysel ve sayısal sonuçlar oldukça uyumludur. Maksimum çarpışma kuvveti yer değiştirme miktarı 12,25 mm'ye ulaştığında meydana gelmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmada meydana gelen maksimum çarpışma kuvvetleri sırası ile 71,7

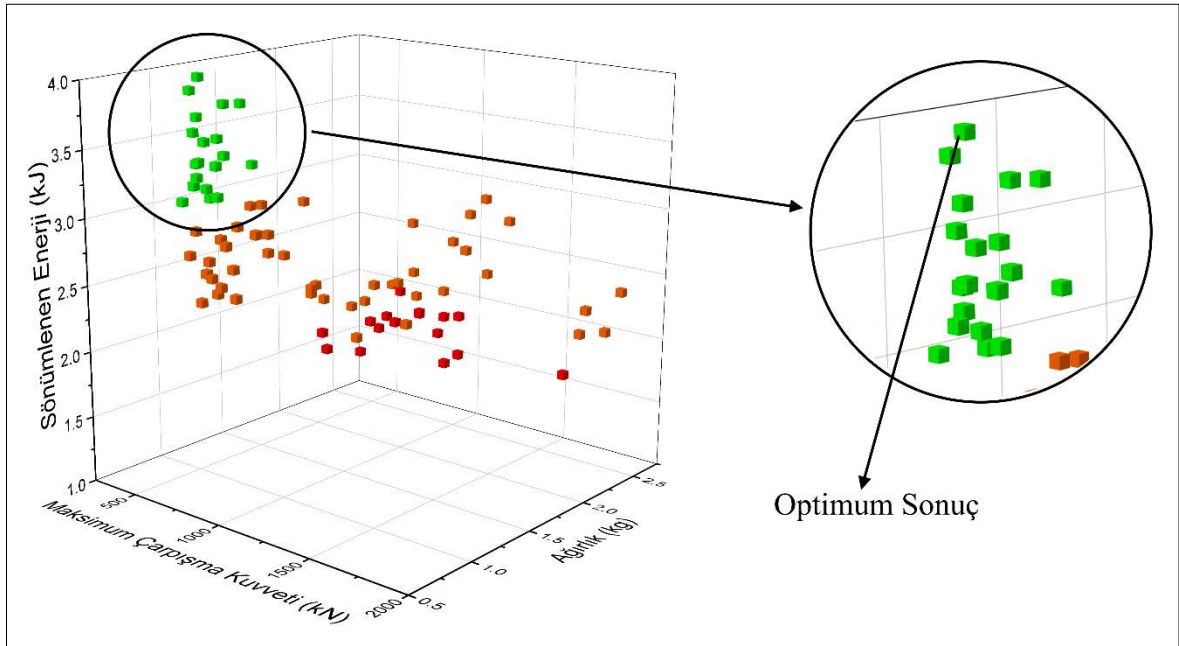
kN ve 78,7 kN'dur. Aradaki fark %10'a tekabül etmektedir ki bir sonlu elemanlar analizinin deneysel çalışmayla ne kadar uyumlu olabileceği göz önünde bulundurulduğunda bu oran oldukça tatmin edicidir. Eğrinin geri kalan kısmında da solu elemanlar modelinin geçerliliğini etkileyecek önemli bir farklılık bulunmamaktadır. Ayrıca, maksimum çarpışma kuvvetlerinin meydana geldiği deplasman değeri de tamamen örtüşmektedir. Dolayısıyla tampon kirişi için IM7/8552 malzemesi kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modelinde kullanılacak olan malzeme modelinin uygun olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 69. Kompozit tampon kirişi doğrulama modelinden elde edilen çarpışma kuvveti dağılımı

3.2.2. Kompozit Tampon Kirişi Optimizasyonu Bulguları

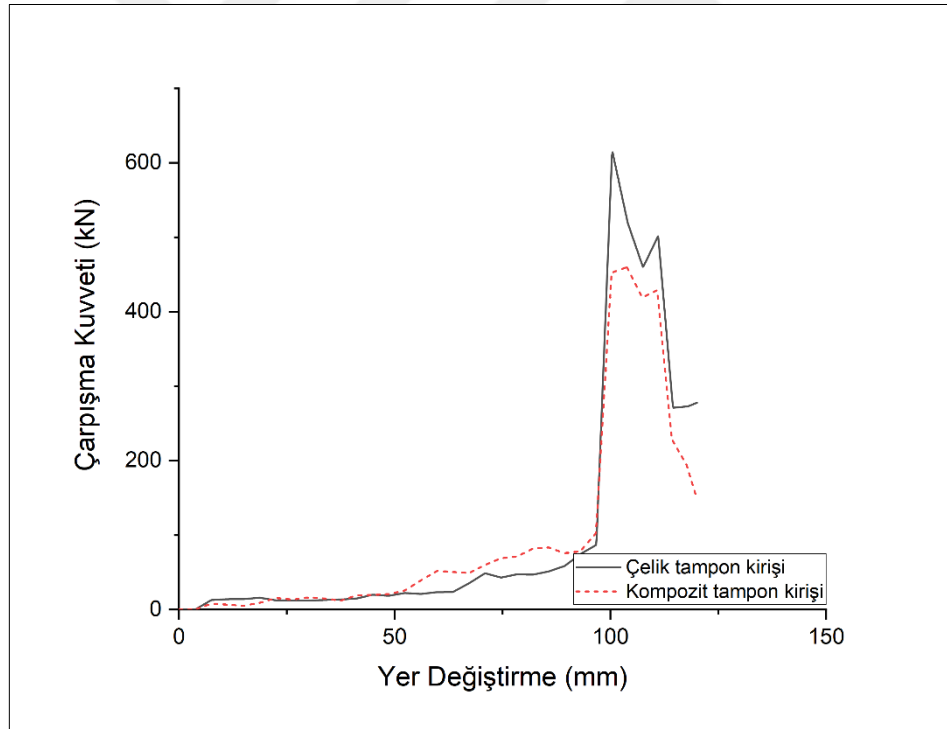
Şekil 64 tampon kirişi optimizasyonu sonuçlarını içeren serpmeye diyagramını göstermektedir. Optimizasyon sonucunda optimum tabaka yönelimi $[\pm 60/60/-45/90/-45/\pm 45]_s$ olarak elde edilirken, optimum tabaka kalınlığı 0,128 mm olarak tespit edilmiştir.



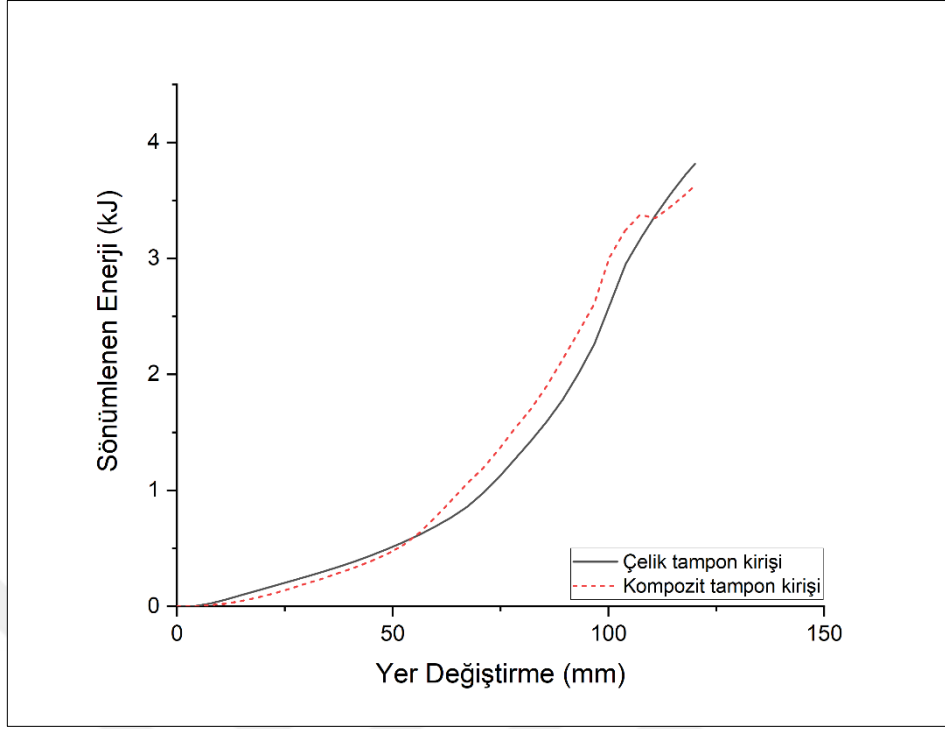
Şekil 70. Tampon kirişi optimizasyonu sonucu serpmeye diyagramı

Ön tampon sisteminin darbe performansı değerlendirilirken en önemli iki parametre olan maksimum çarpışma kuvveti ve sönümlenen enerji miktarı göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü meydana gelen tepki kuvvetinin sönümlenemeyen kısmı yayalara ve yolculara iletileceğinden maksimum çarpışma kuvvetinin mümkün olduğunca düşük olması bilhassa önem arz etmektedir. Bu iki parametre karşılaştırmalı olarak Şekil 71-72’de optimize edilmiş kompozit tampon kirişine sahip ön tampon sistemi ile çelik tampon kirişine sahip ön tampon sisteminin darbe performanslarının kıyaslanması şeklinde gösterilmiştir.

Çelik tampon kirişine ve sahip ön tampon sistemi 615 kN'luk maksimum çarpışma kuvveti üretirken, 3,8 kJ enerji sönümlenmiştir. Optimize edilmiş kompozit tampon kirişine sahip ön tampon sisteminin ürettiği maksimum çarpışma kuvveti önemli ölçüde azalarak 460 kN olarak elde edilmiştir. Aradaki fark %25'e tekabül etmektedir. Sönümlenen enerji miktarlarına bakıldığında ise %5'lik bir düşüş olduğu görülmektedir (3,6 kJ). Fakat, sönümlenen enerji miktarındaki bu düşüş miktarı önem arz edecek kadar fazla olmadığından dolayı optimize edilmiş kompozit tampon kirişine sahip ön tampon sisteminin daha iyi darbe davranışı sergilediği çıkarımında bulunulabilir. Dahası kompozit tampon kirişi kullanıldığında tampon kirişinin ağırlığı 2,87 kg'dan 1,1 kg'a düşerek %62 oranında azalmıştır. Karbon salınımı ve otomobil ağırlığı arasındaki doğrudan ilişki göz önünde bulundurulduğunda bu sonucun önemi daha iyi anlaşılabacaktır.



Şekil 71. Optimize edilmiş kompozit ve çelik tampon kirişi bulunduran ön tampon sistemlerinin çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri



Şekil 72. Optimize edilmiş kompozit ve çelik tampon kirişi bulunduran ön tampon sistemlerinin sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrileri

3.3. Hibrit Ön Tampon Sistemindeki Bağlantı Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Kompozit tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantı üzerine gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçların irdelendiği bu bölüm üç aşamadan meydana gelmektedir: İlk aşamada yapıştırıcıların sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modellerinin doğruluğu teyit edilmiştir. İkinci aşamada çalışma kapsamında göz önünde bulundurulan yapıştırıcıların hibrit ön tampon sistemindeki darbe davranışı değerlendirilerek aralarından en iyi sonucun elde edildiği yapıştırıcı belirlenmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise hibrit ön tampon sisteminin darbe davranışı göz önünde bulundurularak seçilen yapıştırıcı için optimizasyon sonuçlarına yer verilmiştir.

3.3.1. Yapıştırıcı Doğrulama Analizi Bulguları

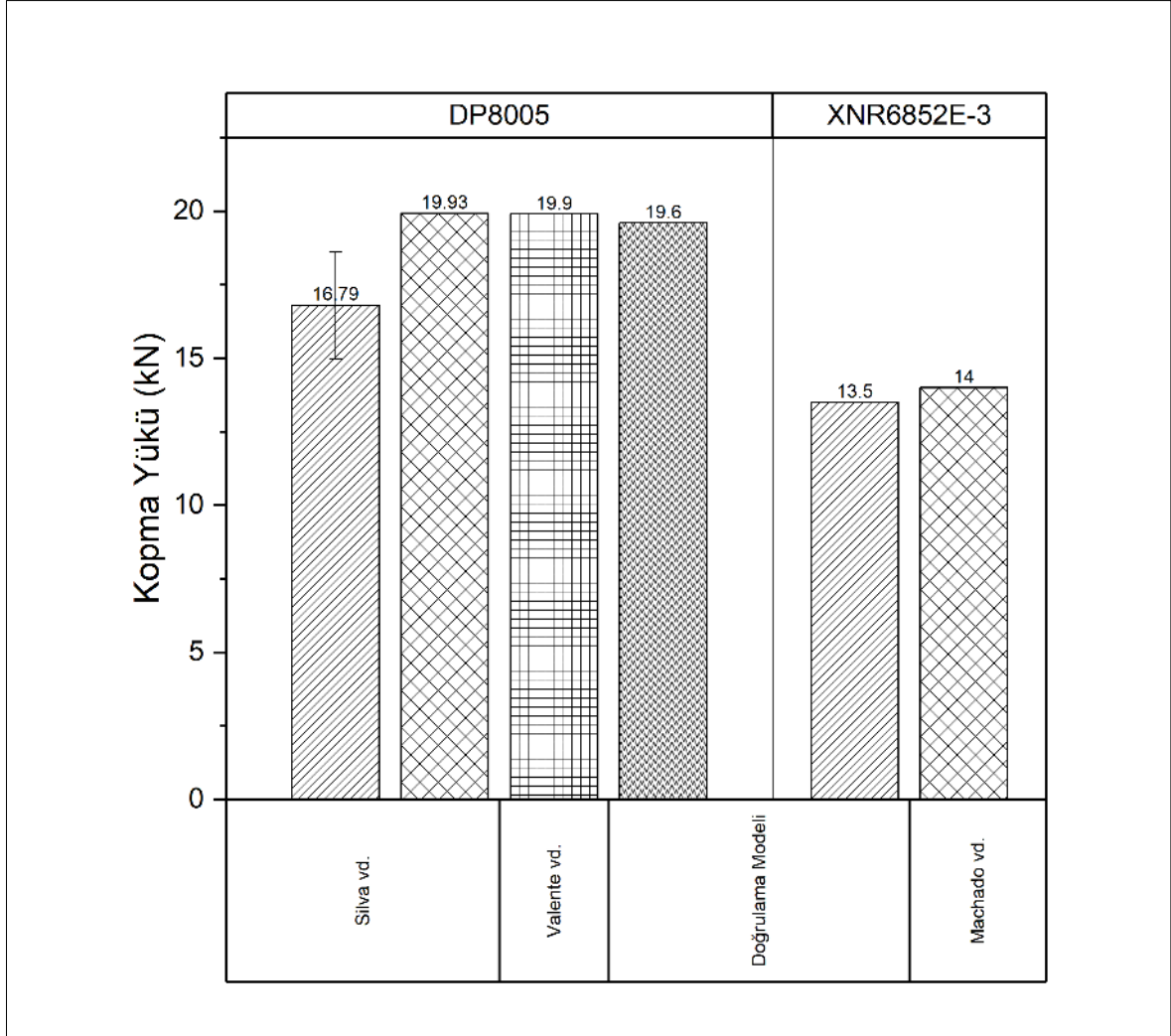
Şekil 73 Hibrit ön tampon sistemindeki tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüpün bağlantısı için kullanılan DP8005 ve XNR6852E-3 yapıştırıcılarının doğrulama analizlerinden elde edilen sonuçların, literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmasını göstermektedir.

İlk olarak DP8005 göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmadaki doğrulama modelinden elde edilen kopma yükünün mevcut sayısal sonuçlarla [87,88] oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçla [88] karşılaştırıldığında ise kopma yüklerinde bir miktar farklılık bulunmaktadır. Deneysel kopma yükü ile doğrulama analizinden elde edilen kopma yükü arasındaki fark %17'ye tekabül etmektedir. Bu farklılığın en önemli sebebi sonlu elemanlar modelinin yapıştırma bağlantısı uygulanırken meydana gelebilecek kusurları (en önemlisi yapıştırıcı tabakasında bulunan hava kabarcıkları) barındırmamasıdır. Ayrıca, karşılaştırma yapılan deneysel kopma yükü ortalama değerdir (16,79 kN). Eğer bağlantının mükemmel en yakın olduğu durumun, deneysel kopma yükünün en fazla olduğu durum (18,6 kN) olduğu kabul edilirse aradaki fark %5'e düşmektedir ve bu oran sonlu elemanlar modelinin doğruluğunun tasdiki için yeterlidir.

İkinci yapıştırıcı olan XNR6852E-3 dikkate alınığında ise sonlu elemanlar analizinden 13,5 kN'luk kopma yükü elde edilmiştir ve bu değer Machado vd.'nin [86] sonucuyla (14 kN) oldukça uyumludur. Dahası Machado vd. tarafından bahsedilen “yapıştırıcı tabakasından önce alt plakanın prematüre olarak kopması” olguduna doğrulama analizinde de rastlanmıştır. Dolayısı ile elde edilen sonuçlar ışığında oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Yapıştırıcı ve ana malzeme ara yüzeyinde kullanılan bağlantı tipinin etkisinin test edilmesi için oluşturulan katı yapıştırıcı ve kabuk ana malzemeye sahip doğrulama modellerinden elde edilen sonuçlar ise katı yapıştırıcı/katı ana malzeme konfigürasyonundan farklı olarak ara yüzey bağlantı tipinin kopma yükünü önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. DP8005 yapıştırıcısı için kopma yükü, düğüm noktaları orta kullanıldığında 26 kN, *tied shell edge to surface* kullanıldığında 22 kN ve *tied shell edge to surface constrained offset* kullanıldığında 16.7 kN olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile hibrit ön tampon sisteminde katı yapıştırıcının kabuk tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüpü

bağlayacağı göz önünde bulundurularak çalışmanın devam eden kısmında ara yüzeyde *tied shell edge to surface constrained offset* bağlantı tipi tercih edilmiştir.



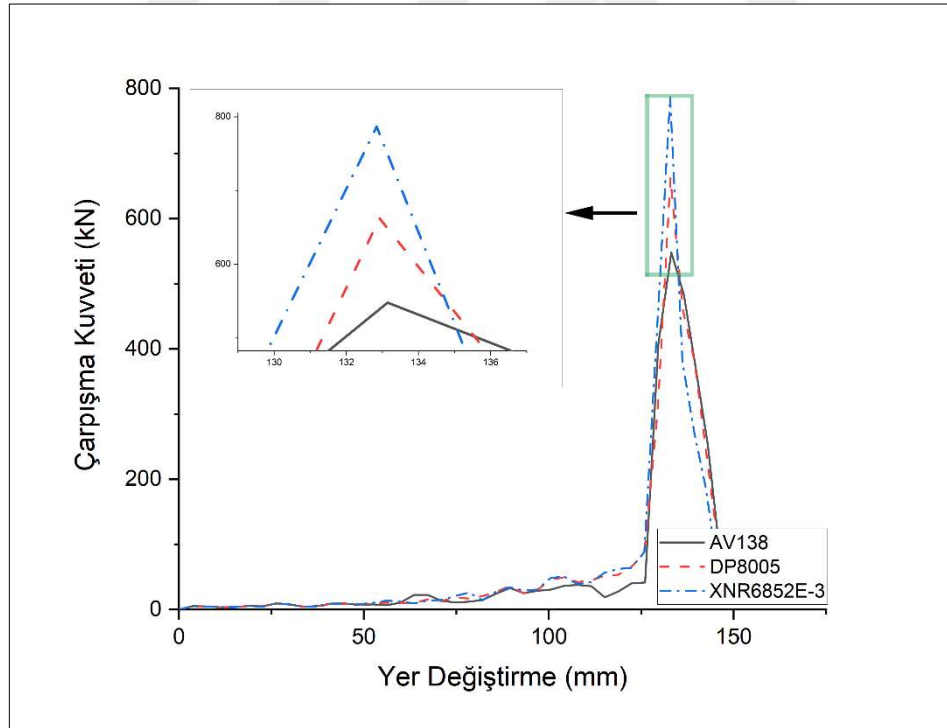
Şekil 73. DP8005 ve XNR6852E-3 yapıştırıcıları için doğrulama analizi sonuçları

3.3.2. Farklı Yapıştırıcıların Kullanıldığı Hibrit Ön Tampon Sistemlerinin Darbe Performansının Karşılaştırılması

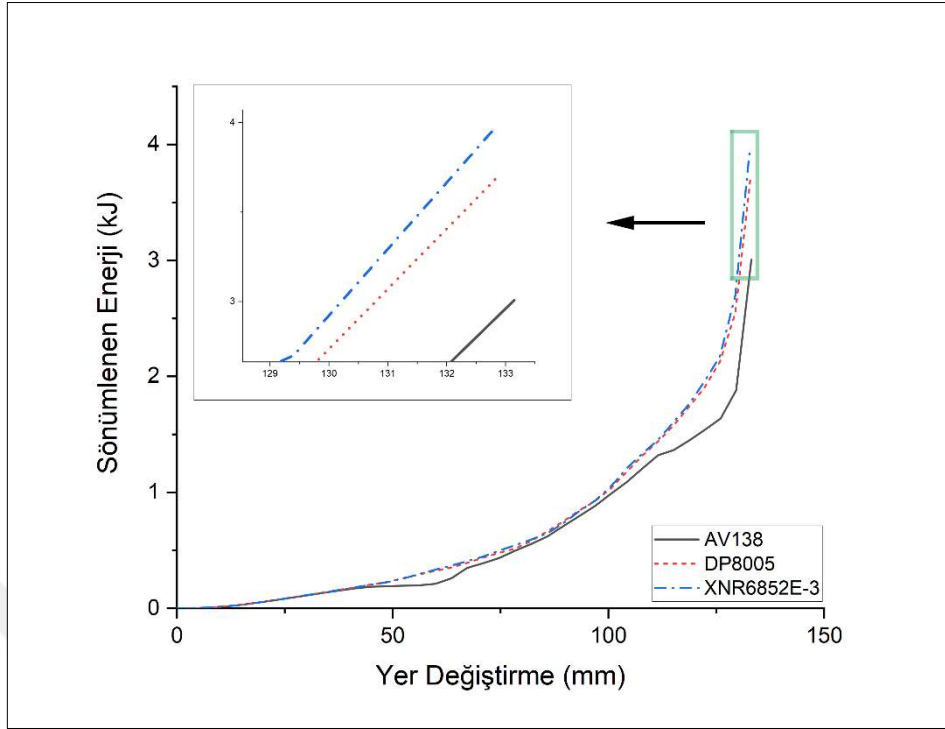
Yapıştırıcıların hibrit ön tampon sisteminde darbe performansının değerlendirilmesi için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak çarpışma kuvveti

cinsinden Şekil 74'te verilirken, Şekil 75 ise sönümlenen enerjiyi göstermektedir. Ayrıca Tablo 10 da elde edilen sonuçlar kıyaslamalı olarak gösterilmektedir.

Yapıştırıcıların kullanıldığı ön tampon sisteminden elde edilen sonuçlara bakıldığında maksimum çarpışma kuvvetlerinin birbirinden oldukça farklılık gösterdiği görülmektedir. AV138, DP8005 ve XNR6852E-3 yapıştırıcıları için çarpışma kuvvetleri sırası ile 548, 662 ve 787 kN olarak elde edilirken her bir ön tampon sistemi 3,01, 3,72 ve 3,98 kJ enerji sönümlemiştir. Kompozit tampon kirişinin optimize edildiği ön tampon sistemi konfigürasyonundan (Şekil 71-72) farklı olarak yapıştırıcılar ve bağlantı elemanının da dahil olmasıyla birlikte yapıştırıcının kullanıldığı her bir durumda maksimum çarpışma kuvvetinde önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu artışın temel sebebi ekstra bileşenlerin ön tampon sistemine dahil olmasıdır. Her bir ekstra bileşen, toplam ağırlığı artırarak meydana gelen maksimum tepki kuvvetine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 74. AV138, DP8005 ve XNR6852E-3 Yapıştırıcıları için hibrit ön tampon sistemi çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi



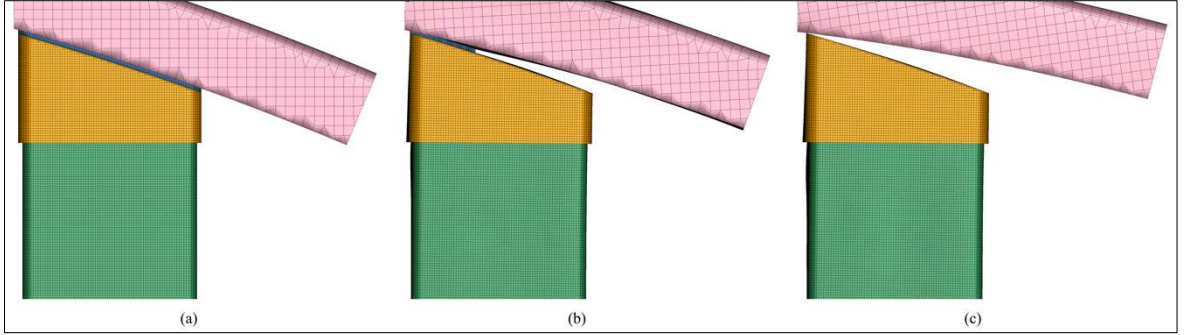
Şekil 75. AV138, DP8005 ve XNR6852E-3 Yapıştırıcıları için hibrit ön tampon sistemi sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrisi

Tablo 10. Farklı yapıştırıcıların kullanıldığı hibrit ön tampon sistemlerinin darbe performansının karşılaştırılması

Sonuç	AV138	DP8005	XNR6852E-3
Üst yapıştırıcı hacimsel hasar (%)	100	33,1	11,6
Yan yapıştırıcı hacimsel hasar (%)	100	78,7	22,9
Maksimum çarpışma kuvveti (kN)	548	662	787
Sönümlenen enerji (kJ)	3,01	3,72	3,98

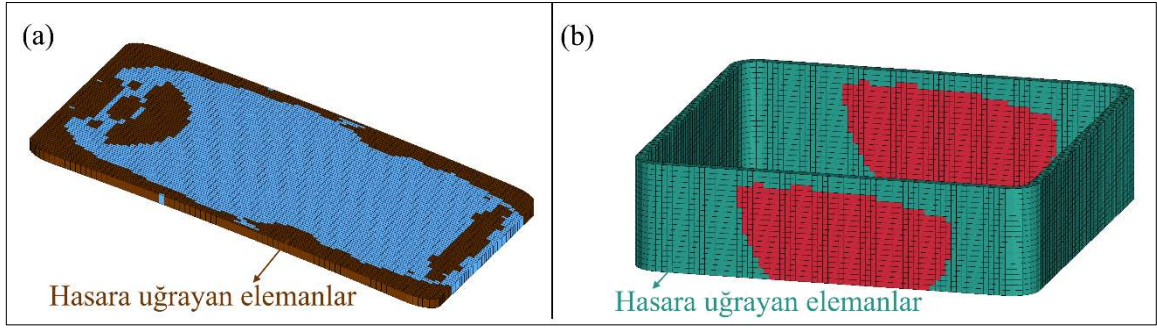
Yapıştırıcı olarak AV138'in kullanıldığı ve en düşük maksimum çarpışma kuvvetinin elde edildiği seçenek göz önünde bulundurulduğunda, sonuçların izahı kolaylaşmaktadır. Her ne kadar maksimum çarpışma kuvveti diğer yapıştırıcılara nazaran

daha düşük elde edilmişse de bu duruma darbe esnasında üst yapıştırıcısının tamamen hasara uğraması sebebiyet vermektedir. Darbe esnasında tampon kirişinin yarıçapı (eğriliği) üst yapıştırıcısının dış kısmından kalkmasına sebebiyet vermektedir (Şekil 76-b). AV138 doğası gereği gevrek bir yapıştırıcı olduğundan yeterli deformasyon kabiliyetine sahip değildir. Dolayısı ile yapıştırıcı tabakası çarpışma kuvvetindeki artışla birlikte kademeli olarak hasara uğramaktadır. Daha da önemlisi maksimum tepki kuvvetine ulaşıldığında üst yapıştırıcı tabakasının çoktan devre dışı kalmış olmasıdır (Şekil 76-c). Bu seçenekte maksimum tepki kuvveti meydana geldiğinde tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp arasında yapıştırıcı bağlantısı yoktur. Dolayısı ile maksimum tepki kuvveti nispeten düşük gelmektedir. Ulaşılan bu sonuç ile, tampon kirişi yarıçapının, üst yapıştırıcısının deformasyon davranışı üzerinden tampon sisteminin darbe davranışını önemli ölçüde etkilediğine karar verilmiş ve tampon kirişi yarıçapı üst yapıştırıcısının optimizasyonuna parametre olarak eklenmiştir.



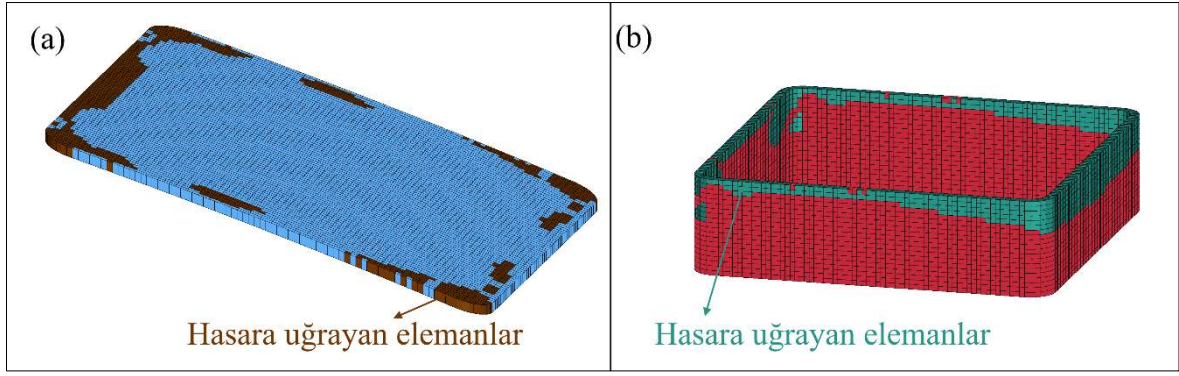
Şekil 76. Hibrit ön tampon sisteminde tampon kirişi yarıçapının AV138 yapıştırıcısının deformasyon davranışına olan etkisi: (a) Başlangıç durumu, (b) hasar ilerlemesi ve (c) yapıştırıcının devre dışı kalması

Benzer bir durum DP8005 yapıştırıcısı için de geçerlidir. Bağlantı noktasında DP8005 kullanıldığında üst ve yan yapıştırıcı tabakasındaki elemanların sırası ile %33,1 ve %78,7'si hasara uğramıştır (Şekil 77). Ancak DP8005'in sünek bir yapıştırıcı olması AV138'den daha iyi bir performans sergilemesini sağlamasına rağmen gerekli dayanımı gösterememiştir.



Şekil 77. DP8005 kullanıldığında yapıştırıcı tabakalarının durumu: (a) Üst yapıştırıcı, (b) Yan yapıştırıcı

Son olarak XNR6852E-3 kullanıldığında, üst yapıştırıcı tabakasının elemanlarının %11,6'sı, yan yapıştırıcı tabakasının elemanlarının %22,9'u hasara uğramıştır (Şekil 78). Her üç yapıştırıcı da karşılaştırıldığında en iyi sonuç XNR6852E-3 kullanılan ön tampon sisteminden elde edilmiştir. AV138 ve DP8005 ile kıyaslandığında yapıştırıcıda meydana gelen hasar bakımından önemli bir gelişme olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi XNR6852E-3'ün hem yeterli deformasyon kabiliyetine sahip olması hem de dayanımının yüksek olmasıdır. Tüm bu olumlu gelişmelerin yanı sıra ne yazık ki en yüksek maksimum çarpışma kuvveti de XNR6852E-3 kullanılan hibrit ön tampon sisteminden elde edilmiştir. Bu değer DP8005 ile kıyaslandığında maksimum çarpışma kuvvetindeki artış miktarı %19'a tekabül etmektedir. Maksimum çarpışma kuvvetinin önemi göz önünde bulundurulduğunda bu durum önemli bir zafiyettir. Fakat çalışmanın bu bölümünün temel amacı yapıştırma bağlantısının otomobil ön tampon sisteminde kullanılabilirliğinin belirlenmesi olduğundan yapıştırıcı performansına bakılarak en iyi sonucun XNR6852E-3'ten elde edildiği sonucuna ulaşılmış ve maksimum çarpışma kuvveti ile ilgili kaygılar XNR6852E-3'ün optimizasyonunun gerçekleştirildiği bir sonraki bölüme devredilmiştir.



Şekil 78. XNR6852E-3 kullanıldığında yapıştırıcı tabakalarının durumu: (a) Üst yapıştırıcı, (b) Yan yapıştırıcı

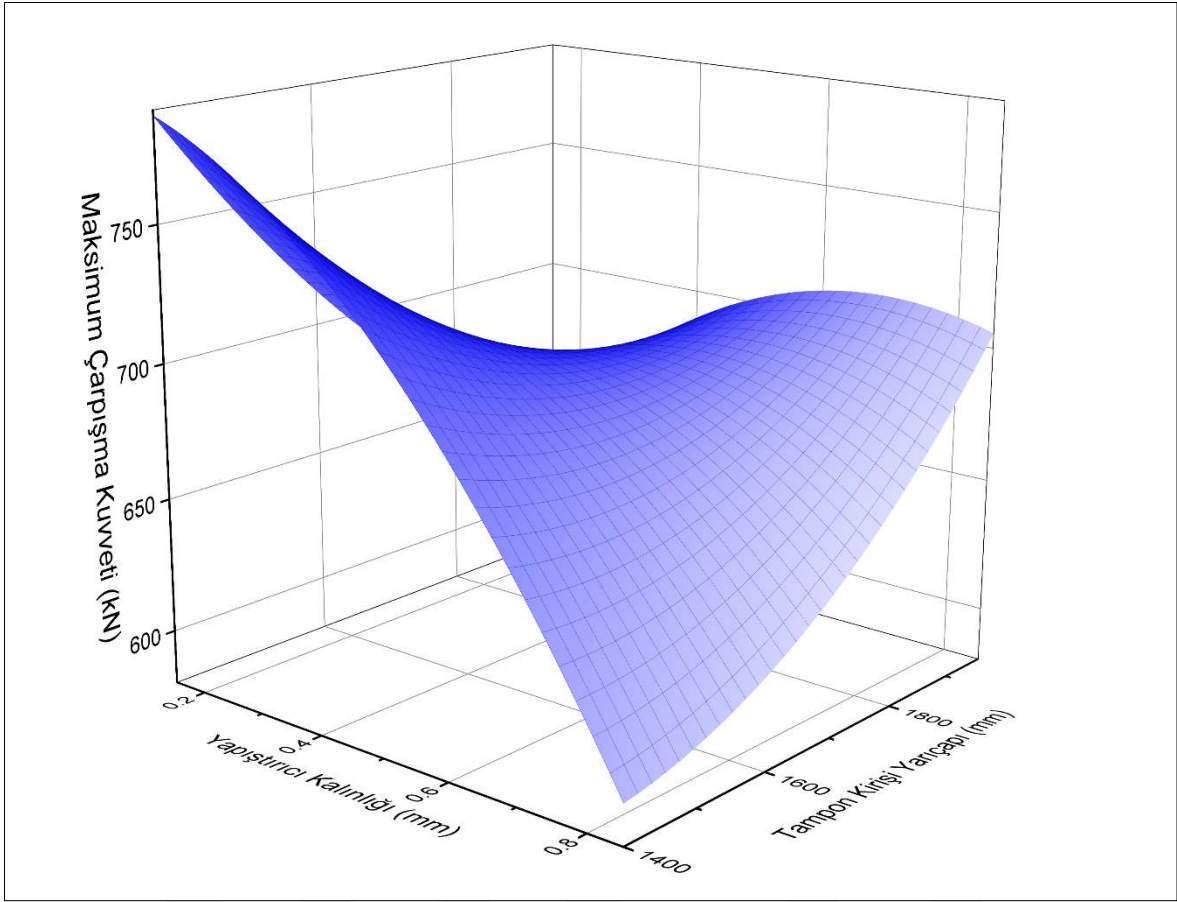
3.3.3. Yapıştırıcıların Optimizasyonundan Elde Edilen Bulgular

Tablo 11 üst yapıştırıcının optimizasyonu için gerçekleştirilen analizlerden elde eden sonuçları göstermektedir. Optimizasyonda kullanılan tüm seçenekler göz önünde bulundurulduğunda üst yapıştırıcıdaki hasar %9-34,1 oranında, maksimum çarpışma kuvveti 619-787 kN aralığında, üst yapıştırıcının sönmülediği enerji miktarı 0,024-0,076 kJ aralığında ve hibrit ön tampon sisteminin sönmülediği enerji miktarı ise 1,93-4,15 kJ arasında değişmektedir.

Tablo 11. Üst yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen sonuçlar

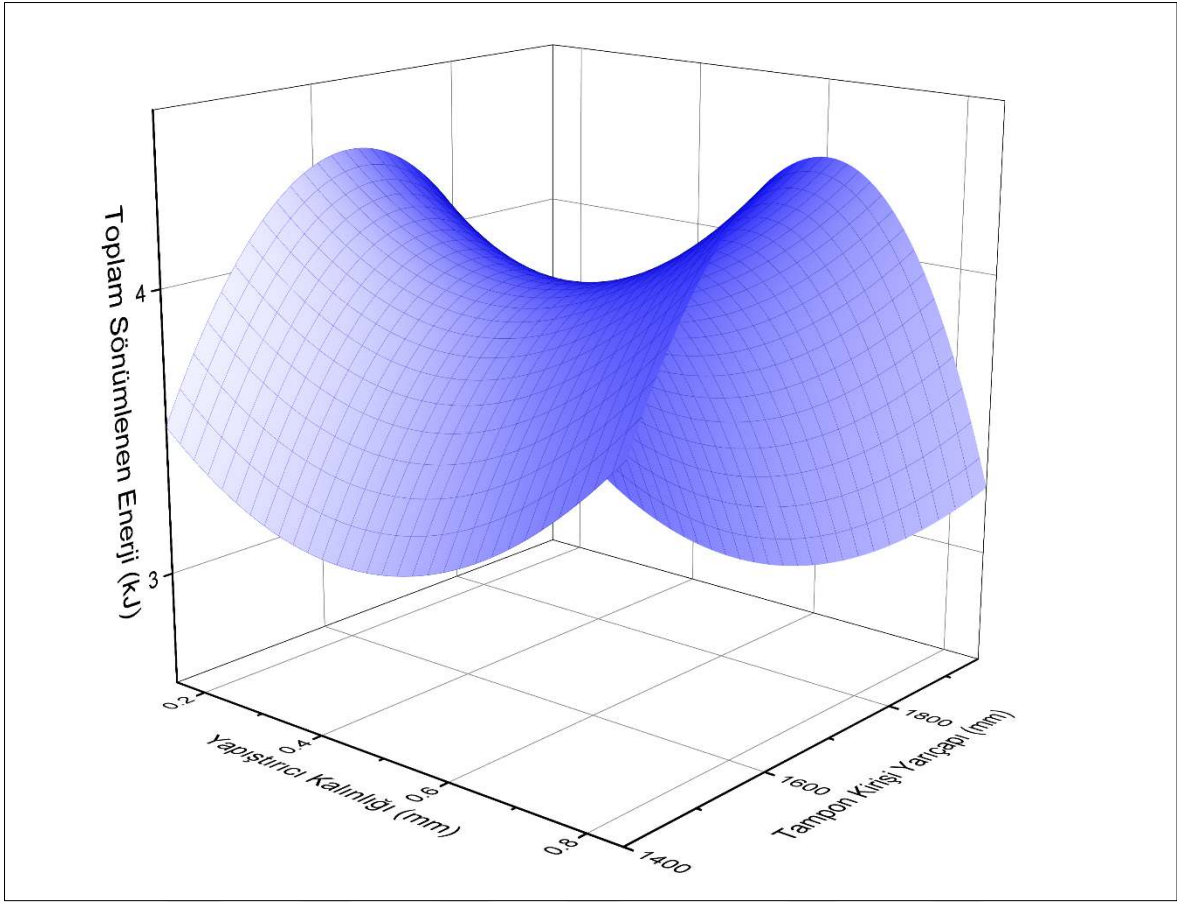
Seçenek	Üst yapıştırıcı hacimsel hasar (%)	Maksimum çarpışma kuvveti (kN)	Yapıştırıcının sönümlendiği enerji (kJ)	Tampon sisteminin sönümlendiği enerji (kJ)
Seçenek 1	12,8	690	0,067	4,01
Seçenek 2	16,4	619	0,065	4,15
Seçenek 3	11,6	787	0,047	3,98
Seçenek 4	14,6	776	0,047	1,93
Seçenek 5	16,8	656	0,076	4,2
Seçenek 6	9,0	688	0,057	3,9
Seçenek 7	15,5	623	0,056	4,29
Seçenek 8	16,0	656	0,073	4,07
Seçenek 9	34,1	676	0,024	3,12

Maksimum çarpışma kuvveti dikkate alındığında en iyi sonucun Seçenek-2'den elde edildiği görülmektedir. Maksimum çarpışma kuvveti dikkate alındığında en iyi sonucun Seçenek-2'den elde edildiği görülmektedir. Tablo 4'te tampon kirişi yarıçapı 1880 mm ve üst yapıştırıcı kalınlığı 0,25 mm olan ön tampon sistemi 619 kN'luk maksimum çarpışma kuvveti sergileyen bu seçenekte mevcuttur. En kötü sonuç ise Seçenek-3'ten elde edilmiştir; 1480 mm tampon kirişi yarıçapı ve 0,25 mm üst yapıştırıcı kalınlığına sahip ön tampon sistemi 787 kN'luk maksimum çarpışma kuvveti üretmiştir.



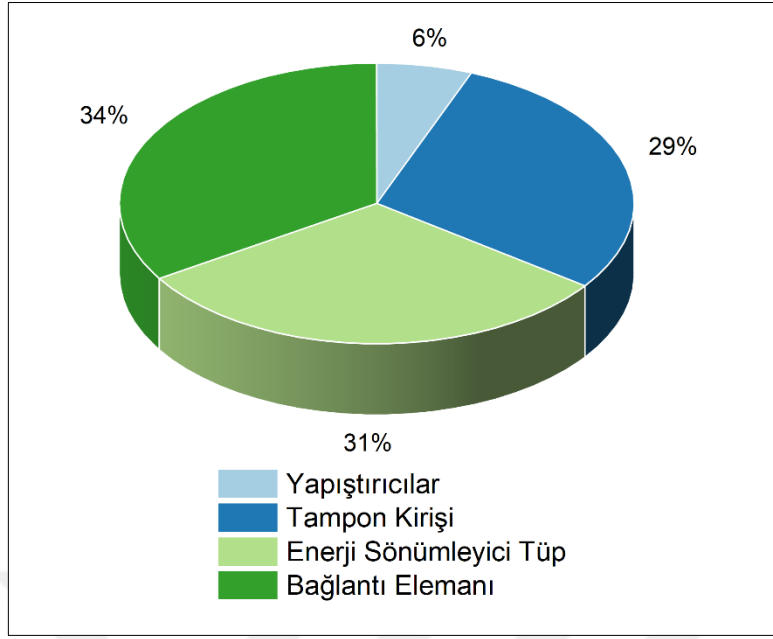
Şekil 79. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının maksimum çarpışma kuvvetine olan etkisi

Elde edilen sonuçlar en düşük maksimum çarpışma kuvvetini elde etmenin iki yolu olduğunu göstermiştir (Şekil 79). (1) Eğer tampon kirişi yarıçapı minimum ise, yapıştırıcı kalınlığı maksimum olmalıdır. Çünkü, tampon kirişi yarıçapı küçüldükçe üst yapıştırıcıyı dış kenarından daha fazla kaldırmaya zorlamaktadır. Bu durumda yapıştırıcının deformasyon kabiliyeti kritik öneme sahiptir ve yapıştırıcı kalınlığının artırılması yapıştırıcının deformasyon kabiliyetini olumlu etkilemektedir. (2) Eğer tampon kirişi yarıçapı maksimum ise, tampon kirişi yarıçapı yeterince büyük olduğunda yapıştırıcı kalınlığının etkisi fazla olmadığından (Bkz., Seçenek-1, 6 ve 8) ilk durumdaki seçim kadar kritik olmasa da daha düşük yapıştırıcı kalınlığı tercih edilebilir.

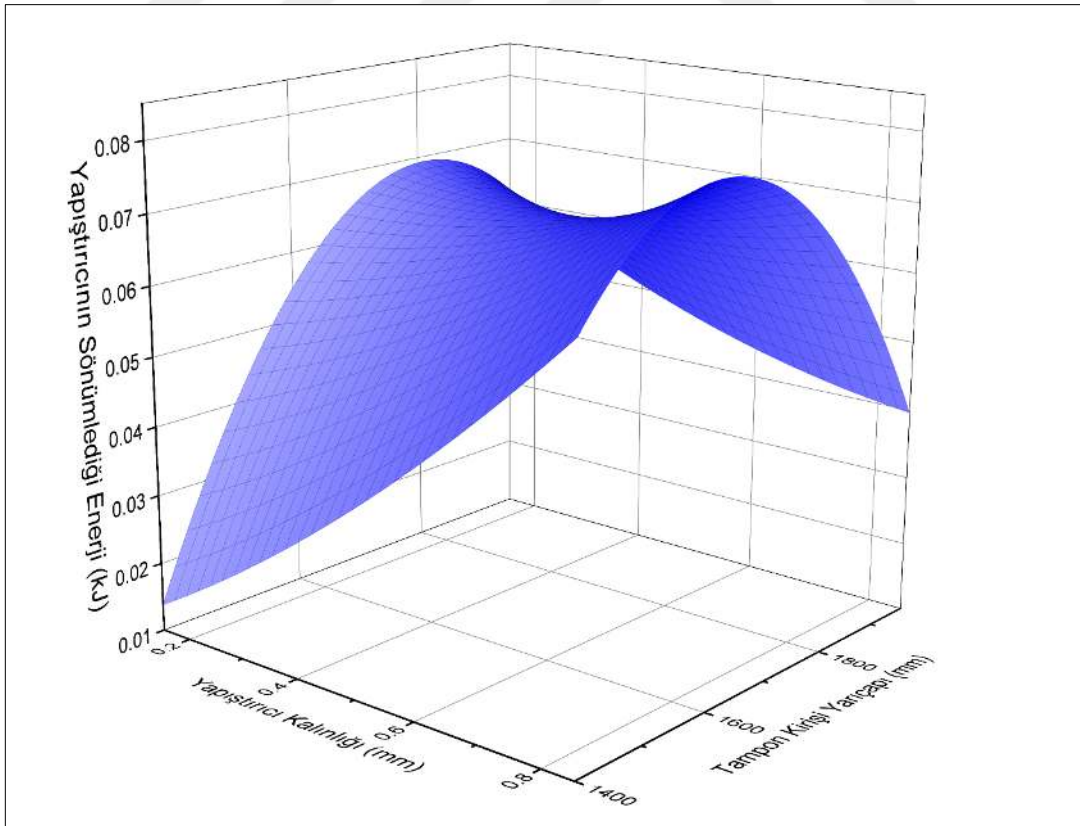


Şekil 80. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının toplam sönümlenen enerjiye olan etkisi

Ön tampon sistemi tarafından sönümlenen toplam enerji miktarına bakıldığında en iyi ve en kötü seçenek arasında oldukça büyük bir fark olduğu görülmektedir. Seçenek-7. ($t_{\bar{u}} = 0,75$ mm, $r_{tk} = 1880$ mm) ve Seçenek-4. ($t_{\bar{u}} = 0,5$ mm, $r_{tk} = 1960$ mm)'te ön tampon sistemi sırası ile 4,29 ve 1,93 kJ enerji sönümlemiştir. Sonuçlar incelendiğinde üst yapıştırıcının sönümlenen toplam enerji miktarına oldukça mütevazı bir katkıda bulunduğu görülmektedir. Üst yapıştırıcı her bir seçenekte 0,056 ve 0,047 kJ enerji sönümlerken sönümlenen toplam enerjideki payı %1,3 ve %2,4'tür. Enerji daha çok tampon kirişi, enerji sönümleyici ve bağlantı elemanı tarafından sönümlenmektedir. En iyi seçenekte, tampon kirişi toplam sönümlenen enerjinin %29'unu, enerji sönümleyici %31'ini ve bağlantı elemanı %34'ünü sönümlemektedir (Şekil 81). Bu sonuçlar ışığında yapıştırıcıların ön tampon sistemindeki temel görevinin enerji sönümlemekten ziyade ön tampon sisteminin bileşenlerini bir arada tutmak olduğu çıkarımı yapılabilir.

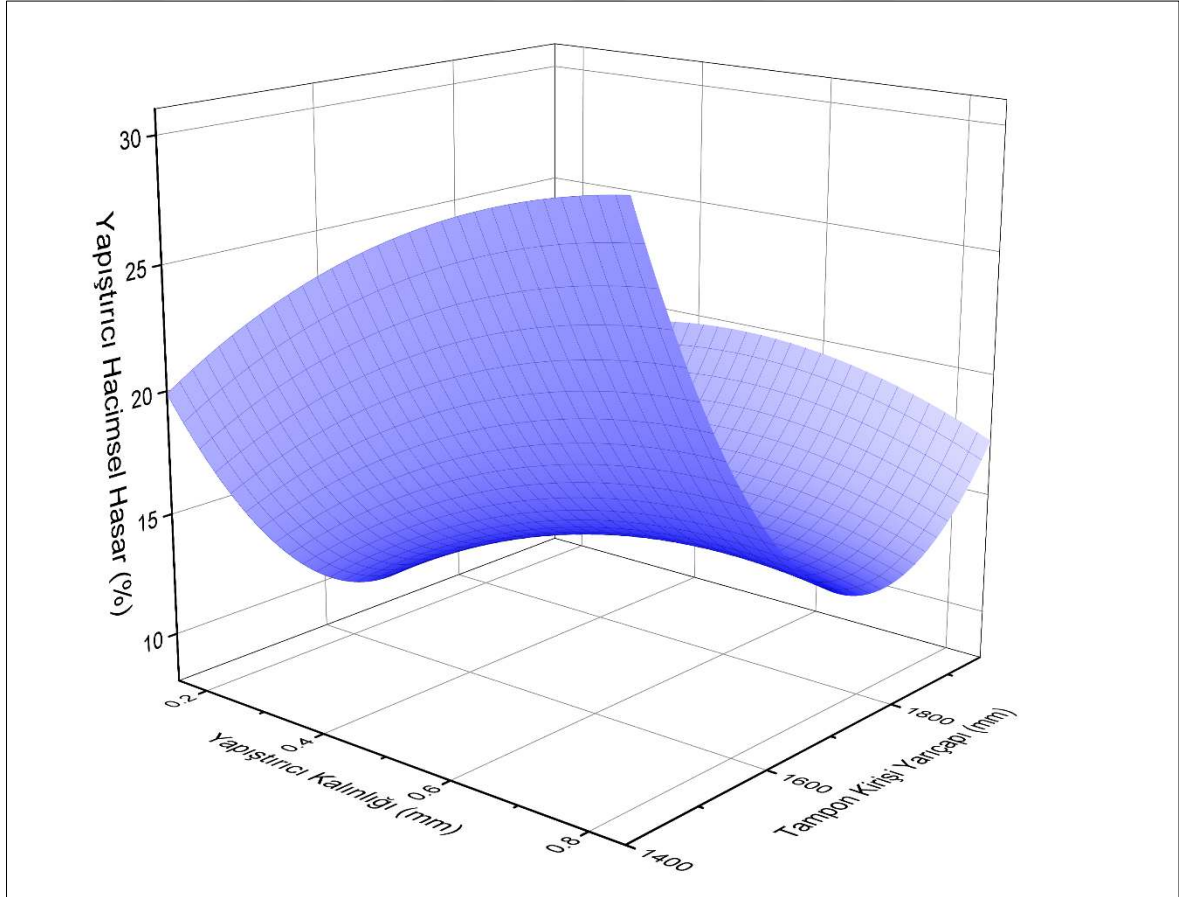


Şekil 81. Hibrit ön tampon sistemi bileşenlerinin toplam sönümlenen enerjiye katkı oranları



Şekil 82. Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının üst yapıştırıcının sönümlediği enerjiye olan etkisi

Şekil 80 ve Şekil 82 üst yapıştırıcı kalınlığı ve tampon kirişi yarıçapının ön tampon sistemi ve üst yapıştırıcı tarafından sönmömlenen enerjiye olan etkisini göstermektedir. Şekil 80'e bakılırsa, ön tampon sisteminin daha fazla enerji sönmömlenmesi istendiğinde en düşük ya da en yüksek tampon kirişi yarıçapından ziyade orta değlerler (1600-1800 mm) seçilmesinin daha uygun olduğu görölmektedir. Üst yapıştırıcı kalınlığının etkisine bakıldığında ise toplam sönmömlenen enerji göz önünde bulundurulduğunda kalınlığın dramatik bir etkisinin olmadığı görölmektedir. Fakat yapıştırıcı tarafından sönmömlenen enerjiye olan etkisi göz önünde bulundurularak (Şekil 82) kalınlığın olabildiğince yüksek tutulması gerektiği sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 83. Üst yapıştırıcı kalınlığı ve tampon kirişi yarıçapının üst yapıştırıcıda meydana gelen hasar oranına olan etkisi

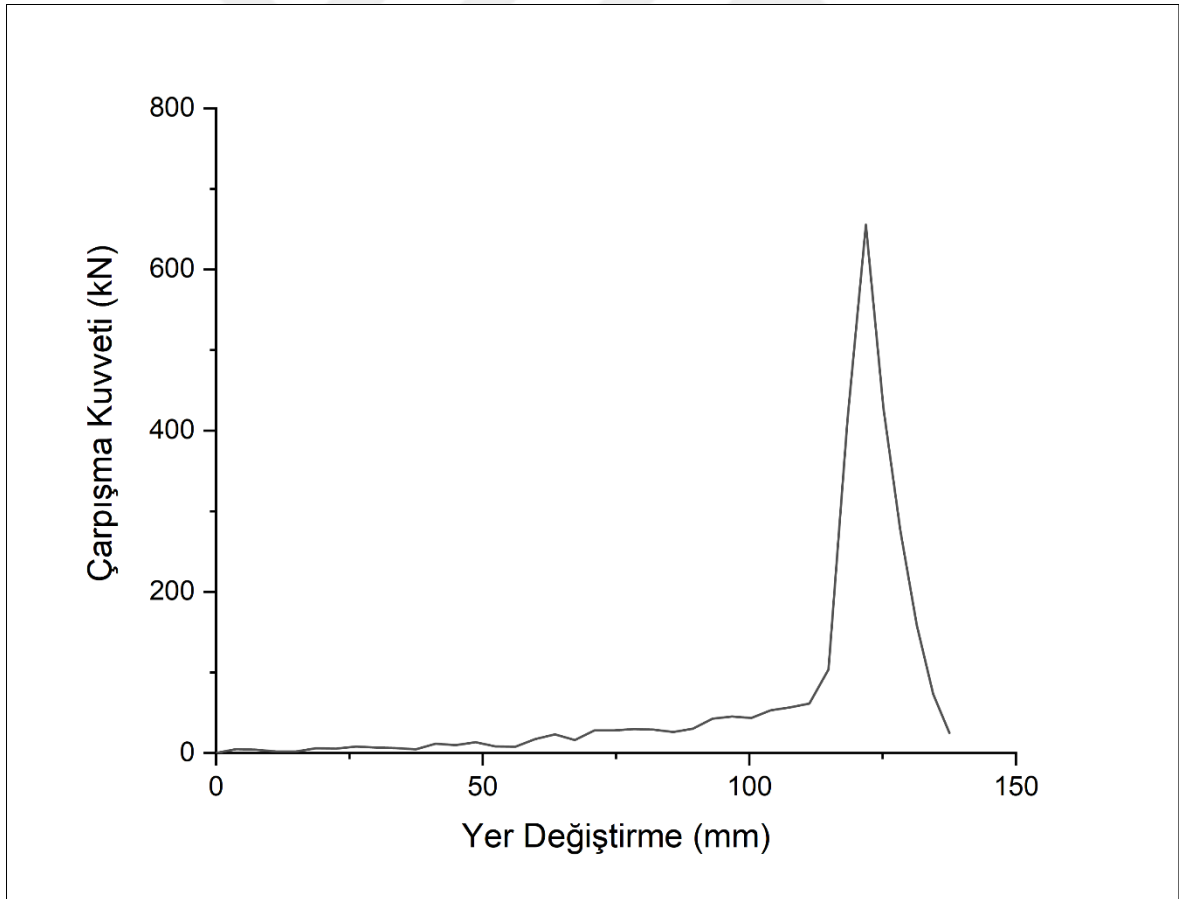
Şekil 83 üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının üst yapıştırıcıda meydana gelen hasara olan etkisini göstermektedir. Hasar oranı göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonuç Seçenek-6'dan ($t_{\bar{u}} = 0,15$ mm, $r_{tk} = 1680$ mm) elde edilmiştir. Bu durumda üst yapıştırıcı tabakasındaki elemanların sadece %9'u hasara uğramıştır. En kötü sonuç ise Seçenek 9'dan ($t_{\bar{u}} = 0,5$ mm, $r_{tk} = 1400$ mm) elde edilmiş olup yapıştırıcı tabakasının %34,1'i hasara uğramıştır.

Üst yapıştırıcı kalınlığının ve tampon kirişi yarıçapının maksimum çarpışma kuvvetine olan etkisinin tartışıldığı bölümde de bahsedildiği üzere tampon kirişi yarıçapı düşük olduğunda üst yapıştırıcıyı dış kenarından kaldırmaya zorlamakta ve yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasar artmaktadır. Tampon kirişi ön tampon sisteminde darbeye ilk maruz kalan bileşen olduğundan tampon kirişinin deformasyon davranışı diğer bileşenlerin darbe davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısı ile üst yapıştırıcıda meydana gelen hasar göz önünde bulundurulduğunda tampon kirişi yarıçapı mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır.

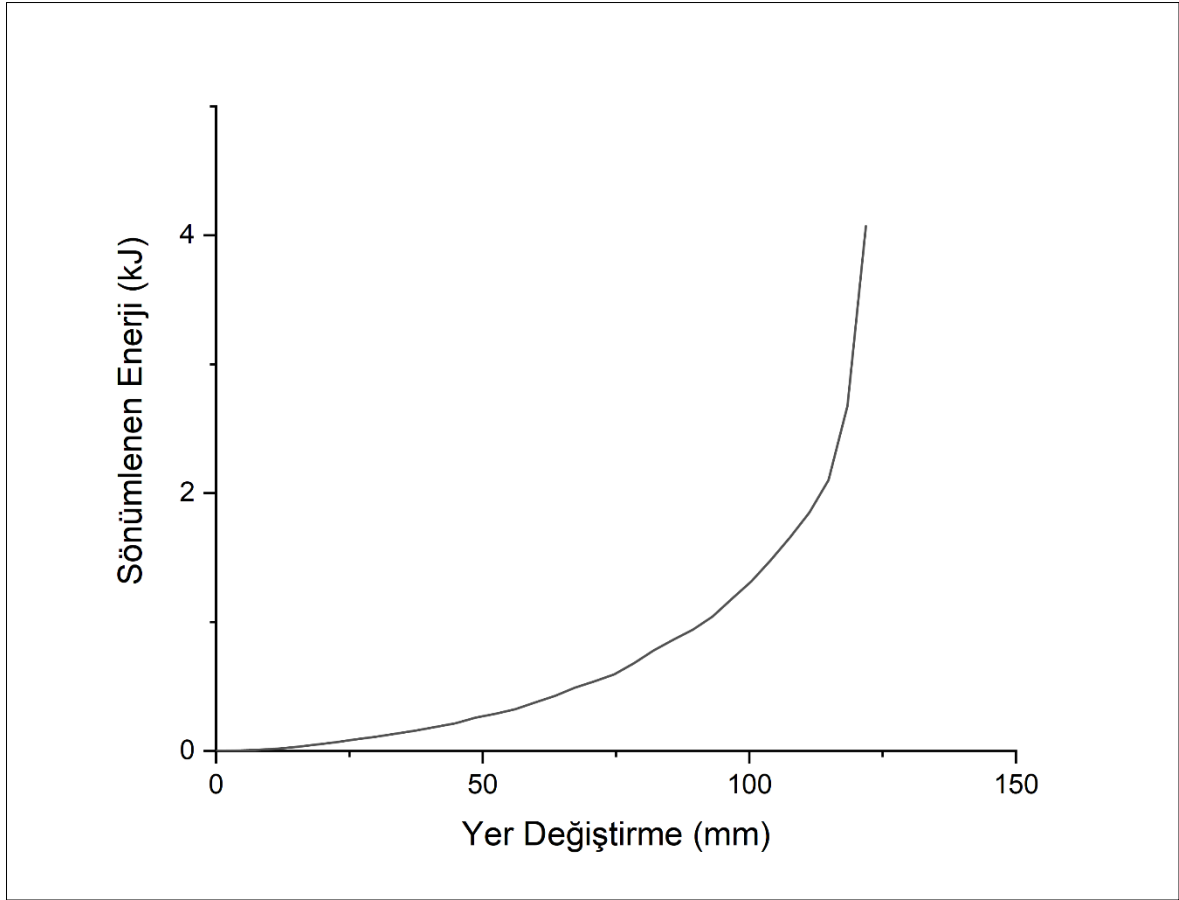
Üst yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen sonuçlar yukarıdaki gibi her bir çıktı için ayrı ayrı değerlendirildiğinde optimum parametreyi belirlemenin zor olmadığı görülmektedir. Ancak tüm çıktılar göz önünde bulundurularak optimum parametreler seçilmek istendiğinde ise durum bir miktar karmaşıklaşmaktadır. Örneğin maksimum çarpışma kuvveti göz önünde bulundurularak başlandığında daha düşük maksimum çarpışma kuvveti elde edilebilmesi için ya tampon kirişi yarıçapı maksimum ve yapıştırıcı kalınlığı minimum ya da tampon kirişi yarıçapı minimum ve yapıştırıcı kalınlığı maksimum olmalıdır. Tampon kirişi yarıçapının minimum ve yapıştırıcı kalınlığı maksimum olduğu ikinci seçenek diğer çıktılar açısından değerlendirildiğinde bu konfigürasyon her ne kadar maksimum çarpışma kuvvetini düşürse de aynı anda sönümlenen enerji miktarı da düşmekte ve yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasar artmaktadır. Hangi çıktıdan yola çıkılarak optimum parametreye karar verilmek istenirse istensin yukarıdakine benzer bir durum ortaya çıkmaktadır. Her iki optimizasyon parametresi için optimum birer değer seçip hem sönümlenen enerji miktarını artırmak hem de maksimum çarpışma kuvvetini ve üst yapıştırıcıda meydana gelen hasar oranını düşürmek mümkün değildir. Dolayısı ile optimum parametreler seçilirken Pareto verimliliği hesaba katılmalıdır.

Ön tampon sisteminde yapıştırma bağlantılarının kullanılması ile birlikte bileşen sayısının ve toplam ağırlığın artışı ile birlikte maksimum çarpışma kuvvetinde gözle görülür

bir artış meydana geldiğinden, bundan önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Dolayısı ile üst yapıştırıcının optimizasyonunda birincil hedef yapıştırıcı tabakasında aşırı hasara sebebiyet vermeden maksimum çarpışma kuvvetinin olabildiğince düşürülmesidir. Sonuç olarak üst yapıştırıcının optimizasyonu doğrultusunda optimum sonucun Seçenek-8'den elde edildiği sonucuna varılmıştır. Şekil 84-85, Seçenek-8'de hibrit ön tampon sisteminin darbe analizinden elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu durumda ön tampon sistemi 656 kN maksimum çarpışma kuvveti üretmiş olup 4,07 kJ enerji sönümlemiştir. Ayrıca hibrit ön tampon sisteminin diğer bileşenlerinden olan yapıştırıcıların performansının değerlendirildiği bölümde XNR6852E-3'ten elde edilen sonuçlar (Tablo 10) göz önünde bulundurulduğunda ise üst yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasar bir miktar artmasına rağmen maksimum çarpışma kuvveti %17 azalmış olduğu da görülmektedir.



Şekil 84. Üst yapıştırıcının optimizasyonu sonrası optimum konfigürasyon için çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrisi



Şekil 85. Üst yapıştırıcının optimizasyonu sonrası optimum konfigürasyon için sönümlenen enerji-yer değiştirme eğrisi

Tablo 12 yan yapıştırıcının optimizasyonu için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçları göstermektedir. Yan yapıştırıcının optimizasyonu için gerçekleştirilen analizlerde üst yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen optimum üst yapıştırıcı kalınlığı (0,85 mm) ve tampon kirişi yarıçapı (1680 mm) (Tablo-4) kullanılmıştır.

Optimizasyonda kullanılan tüm seçenekler göz önünde bulundurulduğunda üst yapıştırıcıdaki hasar %11,7-100,0 oranında, maksimum çarpışma kuvveti 618-845 kN aralığında, yan yapıştırıcının sönümlendiği enerji miktarı 0,003-0,14 kJ aralığında ve hibrit ön tampon sisteminin sönümlendiği enerji miktarı 2,83-4,07 kJ arasında değişmektedir.

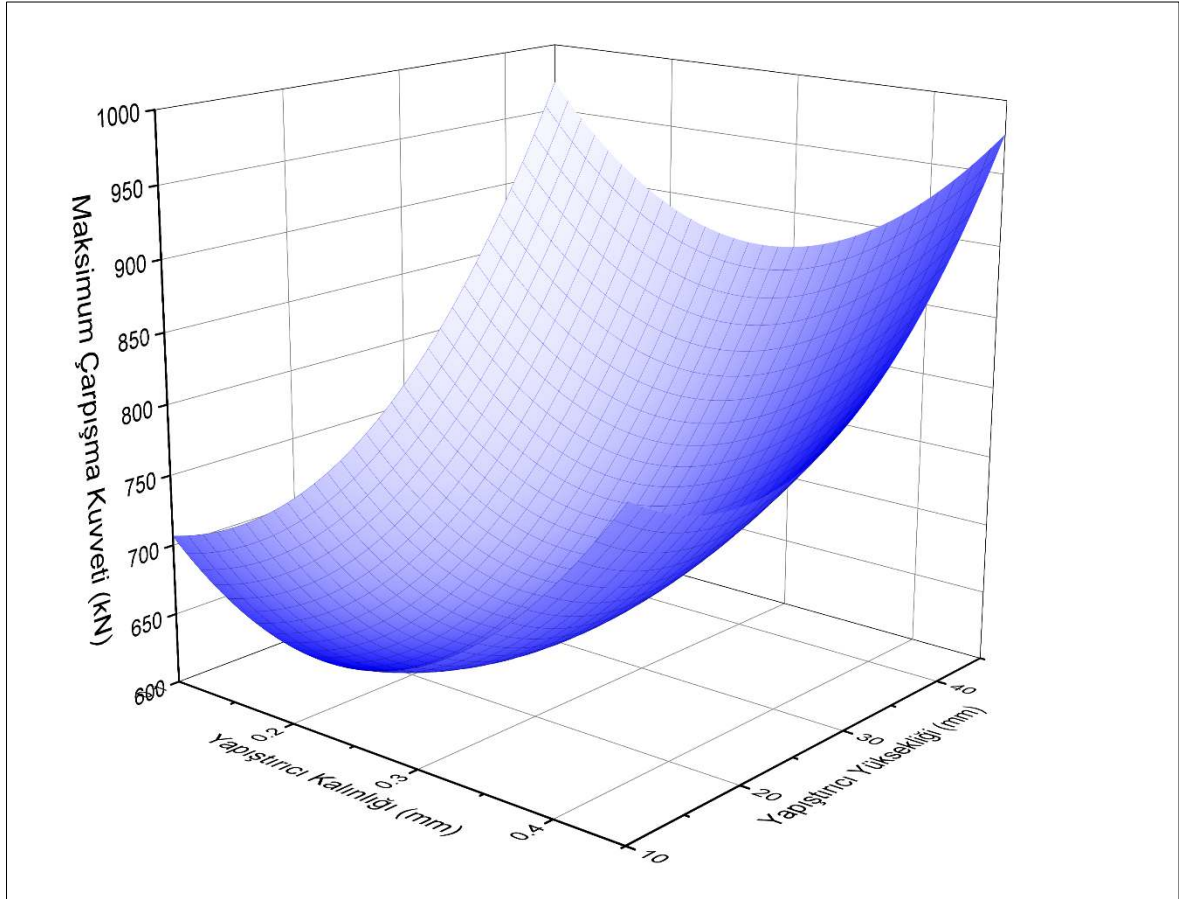
Tablo 12. Yan yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen sonuçlar

Seçenek	Yan yapıştırıcı hacimsel hasar (%)	Maksimum çarpışma kuvveti (kN)	Yapıştırıcının sönümlediği enerji (kJ)	Tampon sisteminin sönümlediği enerji (kJ)
Seçenek 1	22,5	656	0,13	4,07
Seçenek 2	15,9	833	0,0033	3,8
Seçenek 3	38,3	649	0,14	3,37
Seçenek 4	11,7	845	0,0097	3,88
Seçenek 5	35,0	618	0,15	3,28
Seçenek 6	19,3	691	0,1	3,6
Seçenek 7	16,0	768	0,013	3,85
Seçenek 8	14,1	818	0,11	3,66
Seçenek 9	100,0	712	0,022	2,83

Maksimum çarpışma kuvveti göz önünde bulundurulduğunda en yüksek maksimum çarpışma kuvveti Seçenek-4'ten ($t_y = 0,25$ mm, $h_y = 45$ mm) elde edilirken (845 kN), en düşük maksimum çarpışma kuvveti Seçenek-5'ten ($t_y = 0,35$ mm, $h_y = 15$ mm) elde edilmiştir (618 kN). Aradaki fark %36,7'ye tekabül etmektedir. Yan yapıştırıcının optimizasyonu için gerçekleştirilen bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar yapıştırıcının yüksekliği ile elde edilen maksimum çarpışma kuvvetinin büyüklüğü arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur ve Şekil 86 bu ilişkiyi göstermektedir.

Yapıştırıcı kalınlığı ne olursa olsun, yapıştırıcı yüksekliğinin artması ile birlikte elde edilen maksimum çarpışma kuvveti önemli oranda artmaktadır. Bu sonuç daha önce de çeşitli vesileler ile izah edildiği gibi şaşırtıcı değildir. Çünkü mevcut ön tampon sistemi konfigürasyonunda bağlantı elemanın yüksekliği yapıştırıcı yüksekliğine doğrudan bağlıdır. Yapıştırıcı yüksekliğindeki artışa bağlı olarak bağlantı elemanın yüksekliğinde meydana gelen artış maksimum çarpışma kuvvetini olumsuz yönde etkileyerek önemli oranlarda artmasına sebep olmaktadır. Dolayısı ile maksimum çarpışma kuvveti göz önünde bulundurulduğunda, yan yapıştırıcının dayanımından taviz vermeden en düşük yapıştırıcı yüksekliği seçilmelidir. Benzer şekilde her ne kadar yapıştırıcı yüksekliği kadar etkili olmasa

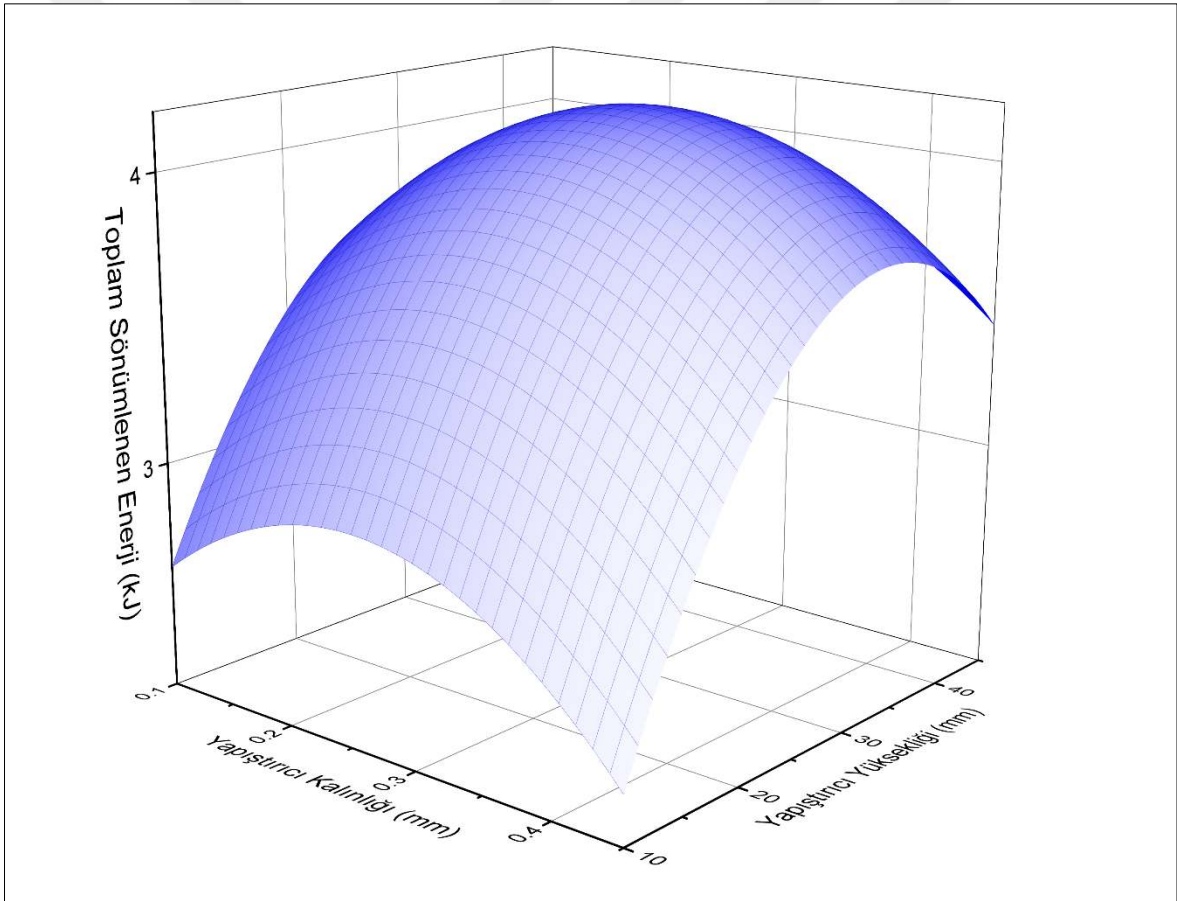
da yapıştırıcı kalınlığının da maksimum çarpışma kuvvetini bir miktar etkilediği belirlenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı maksimum ya da minimum iken nispeten daha yüksek maksimum çarpışma kuvveti elde edilirken, orta değerlerde yer alan kalınlıklarda daha düşük maksimum çarpışma kuvvetleri elde edilmiştir.



Şekil 86. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin maksimum çarpışma kuvvetine olan etkisi

Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin ön tampon sisteminin toplam sönümlendiği enerjiye ve yan yapıştırıcının sönümlendiği enerjiye olan etkisi Şekil 87-88’de gösterilmiştir. Ön tampon sistemi tarafından sönümlenen toplam enerji miktarı göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonuç Seçenek-1’den ($t_y = 0,25$ mm, $h_y = 25$ mm) elde edilirken en az enerji sönümlenen durum Seçenek-4’te ($t_y = 0,25$ mm, $h_y = 45$ mm) oluşmuştur. Her

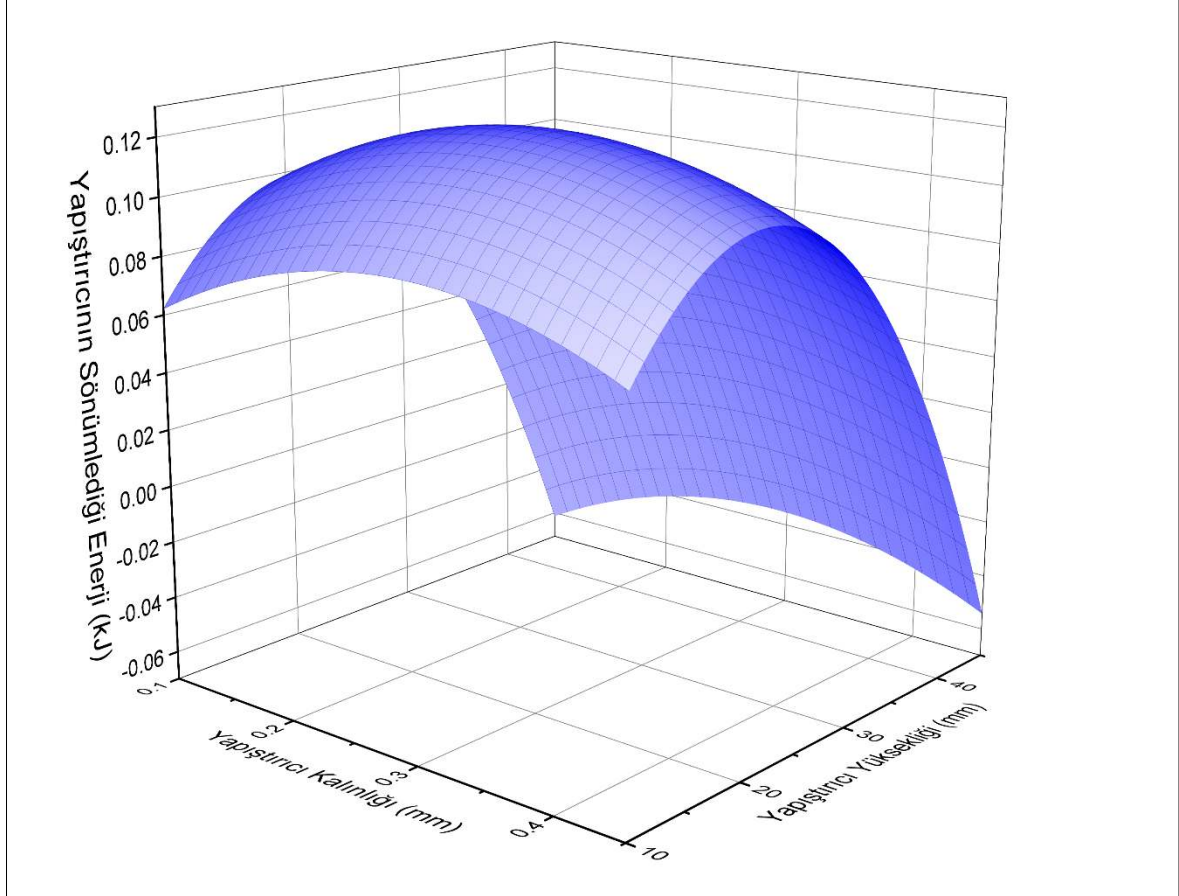
iki durumda sönümlenen toplam enerji miktarı sırası ile 4,07 ve 2,83 kJ olarak elde edilmiştir. En iyi ve en kötü durumda sönümlenen enerji miktarındaki farklılığın üst yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilene göre daha düşük olması ise dikkat çekicidir. Dahası, yan yapıştırıcı toplam sönümlenen enerji miktarına üst yapıştırıcıdan daha fazla katkıda bulunmaktadır. En iyi durumda sönümlenen toplam enerjinin %3,2'si üst yapıştırıcıdan kaynaklanmaktadır. Bu katkı da üst yapıştırıcıya benzer şekilde oldukça mütevazı bir katkıyken enerji öncelikli olarak tampon kirişi, enerji sönümleyici ve bağlantı elemanı tarafından sönümlenmiştir.



Şekil 87. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin toplam sönümlenen enerjiye olan etkisi

Şekil 87'den görüleceği üzere yapıştırıcı yüksekliği maksimum ya da minimum olduğunda ön tampon sistemi nispeten daha az enerji sönümlemektedir. Burada her ne kadar

optimizasyon parametresi yapıştırıcı yüksekliği ile karakterize edilmiş olsa da bu duruma asıl sebebiyet veren parametre bağlantı elemanının yüksekliğidir. Çünkü yapıştırıcının toplam sönümlenen enerjiye olan katkısının oldukça az olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile bu miktarda bir farklılık sadece yapıştırıcı yüksekliği ile açıklanamaz.



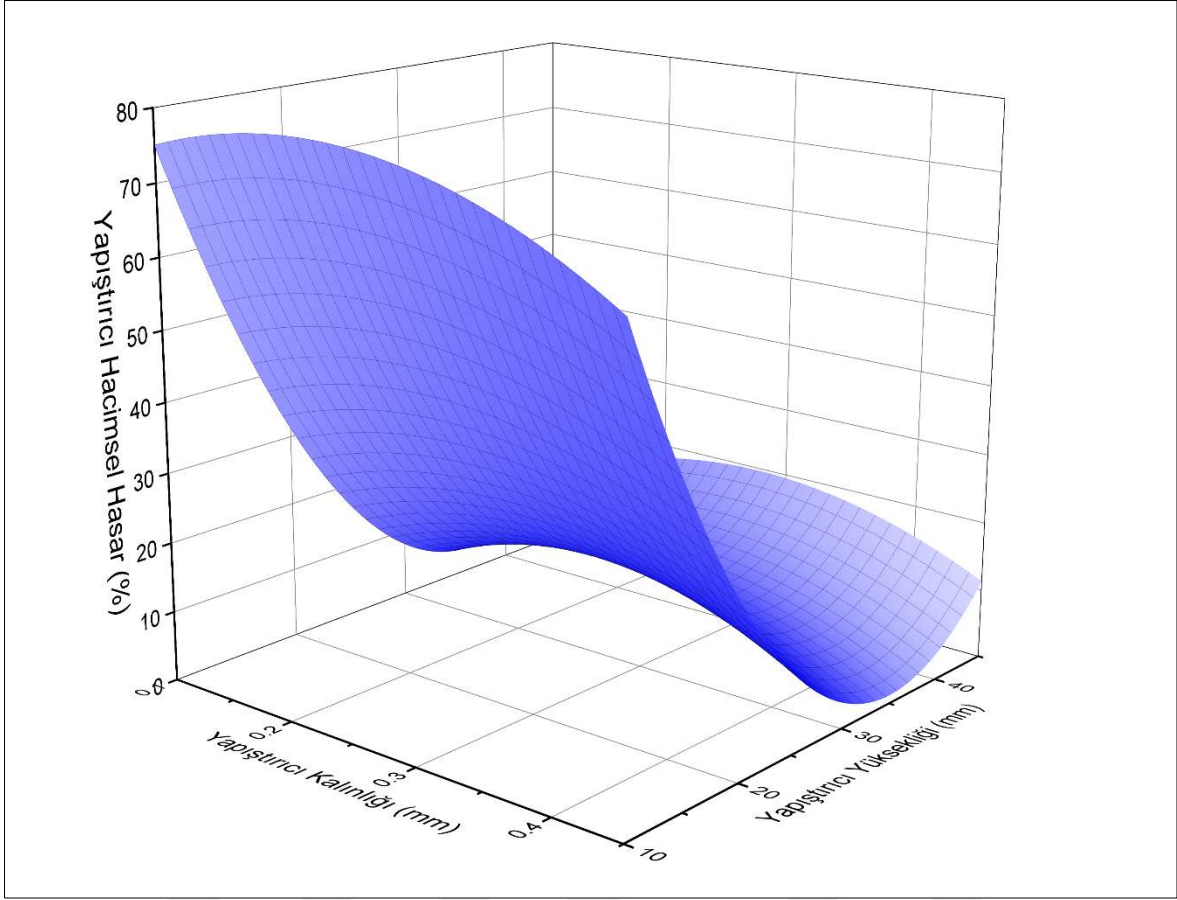
Şekil 88. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin yapıştırıcı tarafından sönümlenen enerjiye olan etkisi

Yapıştırıcı yüksekliğine bağlı olarak bağlantı elemanı yüksekliği minimum olduğunda, darbe esnasında maksimum çarpışma kuvveti meydana gelene kadar bağlantı elemanı tamamen deforme olmakta ve sönümleyebileceği maksimum enerjiyi sönümlemektedir. Fakat yüksekliğine bağlı olarak boyutu küçük olduğundan sönümlenen enerji göreceli olarak daha az olmaktadır. Yapıştırıcı yüksekliğine bağlı olarak bağlantı

elemanı yüksekliği maksimum olduğunda ise, bir önceki duruma göre daha fazla enerji sönümlemesine rağmen maksimum çarpışma kuvvetine ulaşıldığında bağlantı elemanı boyutu büyük olduğundan dolayı henüz tamamen deforme olmamıştır ve maksimum miktarda enerji sönümleyememektedir. Dolayısı ile maksimum çarpışma kuvvetine ulaşıldığında bağlantı elemanının tamamen deforme olup enerji sönümlemeye maksimum katkıda bulunduğu optimum bir yükseklik değeri vardır. Bu yükseklik ise yan yapıştırıcı yüksekliğine bağlıdır. Yan yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen sonuçlar doğrultusunda bu değer 20-30 mm bandında belirlenmiştir. Benzer bir durum yan yapıştırıcı tarafından sönümlenen enerji için de geçerlidir (Şekil 82). Sonuç olarak yapıştırıcı ve ön tampon sistemi tarafından sönümlenen enerji miktarı göz önünde bulundurulduğunda yan yapıştırıcı yüksekliğinin 20-30 mm aralığında seçilmesi daha uygundur. Yapıştırıcı kalınlığı için ise her ne kadar etkisi fazla olmasa da maksimum ve minimum değerlerin ortasında bir kalınlık seçilmesi daha uygundur.

Şekil 89 yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin yan yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasara olan etkisini göstermektedir. En iyi durumda (Seçenek-4, $t_y = 0,25$ mm, $h_y = 45$ mm) yapıştırıcı tabakasının %11,7'si hasara uğrarken en kötü durumda (Seçenek-9, $t_y = 0,25$ mm, $h_y = 10$) mm yapıştırıcı tabakası tamamen hasara uğramıştır.

Bu durumun arkasındaki sebep gayet açıktır. Kısaca bu durum temel olarak yapıştırıcı yüksekliğinden kaynaklanırken yapıştırıcı kalınlığının etkisi çok önemli değildir. Yapıştırıcı yüksekliği azaldıkça deformasyona uğrayan eleman sayısı artmakta ve dolayısıyla yapıştırıcıda meydana gelen hasar artmaktadır. Yapıştırıcı yüksekliği arttığında ise yapıştırıcı tabakası henüz tamamen deforme olmuş değildir ve dolayısı ile yapıştırıcıda meydana gelen hasar oranı azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar, 20-30 mm aralığındaki yapıştırıcı yüksekliğinin yan yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasar göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonucu verdiğini göstermiştir.



Şekil 89. Yan yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliğinin yapıştırıcıda meydana gelen hasara olan etkisi

Yan yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen bulgular toplu halde incelendiğinde yapıştırıcı kalınlığının etkisinin oldukça küçük olduğu ve hibrit ön tampon sisteminin darbe karakteristiğini belirleyen temel parametrenin yapıştırıcı yüksekliği olduğu belirlenmiştir. Yine üst yapıştırıcının optimizasyonuna benzer şekilde bir çıktıyı optimize etmek için seçilen optimum parametreler diğer çıktıları oldukça olumsuz olarak etkilemektedir.

Sonuç olarak Pareto verimliliği tekrardan göz önünde bulundurularak yan yapıştırıcının optimizasyonundan elde edilen en iyi sonucun Seçenek-1 olduğu belirlenmiştir. Nihai olarak hibrit ön tampon sisteminde kullanılan yapıştırıcılar için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum tampon kirişi yarıçapı 1680 mm, optimum üst yapıştırıcı kalınlığı 0,85 mm, optimum yan yapıştırıcı kalınlığı 0,25 mm ve optimum yan yapıştırıcı yüksekliği 25 mm olarak belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında karbon fiber kompozit tampon kirişi ve çelik enerji sönümleyici içeren bir otomobil hibrit ön tampon sistemi üzerine incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk aşamada kare kesitli çelik enerji sönümleyici tüpün kalınlık dağılımı optimize edilmiştir. Bu kalınlık dağılımına ve gerekli geometriye sahip enerji sönümleyici tüpü üretmek için kullanılabilecek plastik şekil verme prosesleri değerlendirilerek bu proseslerin enerji sönümleyici tüpün darbe performansını nasıl etkilediği belirlenmiştir. İkinci aşamada karbon fiber kompozit malzemeden imal edilmesi planlanan tampon kirişinin çelik tampon kirişine kıyasla tabaka kalınlığı ve yönelimi optimize edilerek tampon kirişinin darbe performansı iyileştirilmiş ve ağırlık önemli ölçüde azaltılmıştır. Çalışmanın üçüncü ve son aşamasını ise kompozit tampon kirişi ve çelik enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantı üzerine yapılan çalışmalar oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen hibrit ön tampon sistemindeki tampon kirişi ve enerji sönümleyici arasındaki bağlantı yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Dolayısıyla öncelikle farklı mekanik özelliklere haiz üç yapıştırıcı hibrit ön tampon sisteminde denenmiş ve darbe performansları değerlendirilerek bir tanesi seçilmiştir. Sonrasında ise, seçilen yapıştırıcı için hibrit ön tampon sisteminin darbe davranışı göz önünde bulundurularak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Farklı plastik şekil verme işlemleri farklı artık gerilme ve plastik şekil değiştirmeler meydana getirmektedir. Bu durum ise farklı imalat prosesleri kullanılarak imal edilen enerji sönümleyici tüplerin, farklı darbe davranışı sergilemesine sebep olmaktadır. Derin çekme, kenar bükme ve hidroforming prosesleri kullanılarak imal edilen enerji sönümleyici tüpler sırası ile 84, 109 ve 136 kN maksimum çarpışma kuvveti üretmiş olup 3,38, 3,35 ve 4,00 kN enerji sönümlemişlerdir. Darbe performansları göz önünde bulundurulduğunda bu üç proses arasında enerji sönümleyici tüp üretmek için en uygun prosesin derin çekme olduğuna karar verilmiştir.
2. Kalınlık optimizasyonu gerçekleştirilen çalışmalarda süregelen yaklaşımın aksine değişken kalınlığın hangi plastik şekil verme yöntemi ile elde edileceği hayli

önemlidir. Bu prosesin etkisi hesaba katılmadığında elde edilen sonuçlar yanıltıcı olmaktadır. Sabit 1,5 mm kalınlığa sahip enerji sönümleyici tüp 240 kN maksimum çarpışma kuvveti üretmiş ve 9,9 kJ enerji sönümlemiştir. Plastik şekil verme işlemlerinin etkisi hesaba katılmayıp sadece kalınlık optimizasyonu dikkate alındığında aynı enerji sönümleyici tüp 150 kN maksimum çarpışma kuvveti üretirken 11,68 kJ enerji sönümlemiştir. Bu durum maksimum çarpışma kuvvetinin %37,5 azalırken sönümlenen enerji miktarının %18 arttığını gösterse de bu sonuçlar gerçeği yansıtmamaktadır. Kısacası, her iki etki birlikte dikkate alındığında; enerji sönümleyici tüpe değişken kalınlığın haddeleme ile verilip, enerji sönümleyici tüpün de derin çekme işlemi ile üretileceği düşünülürse optimize edilmiş enerji sönümleyici tüp gerçekte 164 kN maksimum çarpışma kuvveti üretmekte ve 13,2 kJ enerji sönümlemektedir. Sonuç olarak enerji sönümleyici tüpün imalatında kullanılan plastik şekil verme prosesleri enerji sönümleyici tüpün darbe davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.

3. Karbon fiber kompozit malzeme kullanılan ön tampon kirişinde tabaka kalınlığı ve yönelimi ön tampon kirişinin darbe davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.
4. Tampon kirişinin optimizasyonu sonrasında optimum tabaka kalınlığı 0,128 mm olarak, optimum tabaka yönelimi ise $[\pm 60/60/-45/90/-45/\pm 45]_s$ olarak elde edilmiştir. Optimize edilmiş tampon kirişinin ağırlığı 1,1 kg'dır. Ön tampon sistemi ise 460 kN maksimum çarpışma kuvveti üretirken 3,8 kJ enerji sönümlemiştir. Çelik tampon kirişinden elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında ağırlık %62, maksimum çarpışma kuvveti %25 oranında azaltılmıştır.
5. Tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp arasındaki bağlantıda kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikleri hibrit ön tampon sisteminin sergilediği darbe performansı üzerinde oldukça etkilidir. Sert yapıştırıcı kullanıldığında deformasyon kabiliyetinin sınırlı oluşu tampon kirişi ve enerji sönümleyici arasındaki bağlantının tamamen hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Daha sünek bir yapıştırıcı kullanıldığında ise hasarın azaldığı fakat dayanım noktasında eksik kaldığı belirlenmiştir. En iyi performans ise hem yeterli sünekliğe hem de yüksek tokluğa sahip XNR6852E-3 yapıştırıcısından elde edilmiştir.
6. Yapıştırıcıların geometrik özellikleri ön tampon sisteminin darbe davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar yapıştırıcı kalınlığı ve tampon kirişi yarıçapının üst yapıştırıcının performansını ve dolayısı ile hibrit ön tampon

sisteminin darbe performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bilhassa tampon kirişi yarıçapındaki artış, üst yapıştırıcıyı daha fazla deformasyona zorlamakta ve meydana gelen hasar miktarını artırmaktadır. Benzer şekilde yapıştırıcı kalınlığı ve yüksekliği yan yapıştırıcının da performansı etkileyen önemli parametrelerdir.

7. Tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp arasında kullanılan yapıştırma bağlantısı üzerine gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonrasında optimum tampon kirişi yarıçapı 1680 mm, üst yapıştırıcı kalınlığı 0,85 mm, yan yapıştırıcı kalınlığı 0,25 mm ve yan yapıştırıcı yüksekliği 25 mm olarak belirlenmiştir.



5. ÖNERİLER

1. Enerji sönümleyici imalatında daha karmaşık geometrilerin elde edilmesinin mümkün olduğu seçici lazer ergitme yöntemi gibi üç boyutlu imalat yöntemleri kullanılarak enerji sönümleyicinin darbe performansını nasıl etkilediği belirlenebilir.
2. Kompozit tampon kirişi malzemesi olarak termoplastik malzemeler de tercih edilebilir ve imalat proseslerinin etkisi tampon kirişini de kapsayacak şekilde genişletilebilir.
3. Tampon kirişi ve/veya enerji sönümleyici tüpte dolgu malzemesi kullanılarak sönümlenen enerji miktarı artırılabilir ve farklı dolgu malzemelerinin ön tampon sisteminin darbe davranışını nasıl etkilediği belirlenebilir.
4. Yapıştırıcının geometrik optimizasyonunda optimizasyon yapıştırıcılarla sınırlı tutulmak yerine tampon kirişi ve enerji sönümleyici tüp de optimizasyon sürecine katılarak yapıştırıcılardan daha iyi performans elde edilmesi sağlanabilir.
5. Tampon kirişinde ve bağlantı bölgelerinde kullanılan yapıştırıcılar nano partiküllerle katkılanarak darbe performansının nasıl değiştiği incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

1. <http://trafik.gov.tr/kurumlar/trafik.gov.tr/04-Istatistik/Aylik/aralik20.pdf> 11 Ağustos 2021.
2. <https://ec.europa.eu/transport/roadsafety/sites/default/files/pdf/statistics/dacota/asr2020.pdf> 15 Ağustos 2021.
3. http://dwmic.com/eng/product/product1.html?part_idx=8 15 Ağustos 2021.
4. Wang, D., Zhang, S., Wang, C. ve Zhang, C., Structure-material-performance integration lightweight optimisation design for frontal bumper system, International Journal of Crashworthiness, 8265 (2017).
5. Tanlak, N., Sönmez, F. ve Şenaltun, M., Shape optimization of bumper beams under high-velocity impact loads, Engineering Structures, 95 (2015) 49–60.
6. Mamalis, A., Robinson, M., Manolakos, D., Demosthenous, G., Ioannidis, M. ve Carruthers, J., Crashworthy capability of composite material structures, Composite Structures, 37 (1997) 109–134.
7. Baroutaji, A., Sajjia, M. ve Olabi, A., On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, Thin-Walled Structures, 118 (2017) 137–163.
8. Alghamdi, A., Collapsible impact energy absorbers: An overview, Thin-Walled Structures, 39 (2001) 189–213.
9. Alexander, J., An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13 (1960) 10–15.
10. Abramowicz, W. ve Jones, N., Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, International Journal of Impact Engineering, 4 (1986) 243–270.
11. Abramowicz, W. ve Jones, N., Dynamic axial crushing of square tubes, International Journal of Impact Engineering, 2 (1984) 179–208.
12. Wierzbicki, T., Bhat, S., Abramowicz, W. ve Brodtkin, D., Alexander revisited-A two folding elements model of progressive crushing of tubes, International Journal of Solids and Structures, 29 (1992) 3269–3288.
13. Guillow, S., Lu, G. ve Grzebieta, R., Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 43 (2001) 2103–2123.
14. Wang, B. ve Lu, G., Mushrooming of circular tubes under dynamic axial loading, Thin-Walled Structures, 40 (2002) 167–182.

15. Tang, Z., Liu, S. ve Zhang, S., Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns, Thin-Walled Structures, 62 (2013) 75–84.
16. Wierzbicki, T. ve Abramowicz, W., On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures, Journal of Applied Mechanics, 50 (1983) 727–734.
17. Abramowicz, W. ve Jones, N., Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically, International Journal of Impact Engineering, 19 (1997) 415–437.
18. Jensen, Ø., Langseth, M. ve Hopperstad, O., Transition Between Progressive And Global Buckling Of Aluminium Extrusions, WIT Transactions on the Built Environment, 63 (2002) 593.
19. Hsu, S. ve Jones, N., Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes, International Journal of Crashworthiness, 9 (2010) 195–217.
20. Karagiozova, D. ve Alves, M., Transition from progressive buckling to global bending of circular shells under axial impact—Part II: Theoretical analysis, International Journal of Solids and Structures, 41 (2004) 1581–1604.
21. Karagiozova, D. ve Alves, M., Transition from progressive buckling to global bending of circular shells under axial impact—Part I: Experimental and numerical observations, International Journal of Solids and Structures, 41 (2004) 1565–1580.
22. Nagel, G. ve Thambiratnam, D., Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, Thin-Walled Structures, 43 (2005) 1225–1242.
23. Güler, M., Cerit, M., Bayram, B., Gerçek, B. ve Karakaya, E., The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading, International Journal of Crashworthiness, 15 (2010) 377–390.
24. Abramowicz, W. ve Wierzbicki, T., Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns, Journal of Applied Mechanics, 56 (1989) 113.
25. Zhang, X. ve Huh, H., Crushing analysis of polygonal columns and angle elements, International Journal of Impact Engineering, 37 (2010) 441–451.
26. Yamashita, M., Gotoh, M. ve Sawairi, Y., Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections: Numerical simulation and experiment, Journal of Materials Processing Technology, 140 (2003) 59–64.
27. Tang, Z., Liu, S. ve Zhang, Z., Energy absorption properties of non-convex multi-corner thin-walled columns, Thin-Walled Structures, 51 (2012) 112–120.
28. Liu, W., Jin, L., Luo, Y. ve Deng X., Multi-objective crashworthiness optimisation of tapered star-shaped tubes under oblique impact, International Journal of Crashworthiness, 26 (2021) 328–342.
29. Zhang, X., Cheng, G. ve Zhang, H., Theoretical prediction and numerical simulation of multi-cell square thin-walled structures, Thin-Walled Structures, 44 (2006) 1185–1191.

30. Zhang, X. ve Zhang, H., Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression, Thin-Walled Structures, 68 (2013) 156–163.
31. Alavi A. ve Parsapour, M., Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections, Thin-Walled Structures, 74 (2014) 155–165.
32. Zou, X., Gao, G., Dong, H., Xie, S., Chen, G. ve Tan, T., Crashworthiness analysis and structural optimisation of multi-cell square tubes under axial and oblique loads, International Journal of Crashworthiness, 22 (2017) 129–147.
33. Sun, G., Xu, F., Li, G. ve Li, Q., Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness, International Journal of Impact Engineering, 64 (2014) 62–74.
34. Sofuoğlu, H. ve Çam, S., Coupled effect of thickness optimization and plastic forming history on crashworthiness performance of thin-walled square tube, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2021).
35. Li, G., Zhang, Z., Sun, G., Huang, X. ve Li Q., Comparison of functionally-graded structures under multiple loading angles, Thin-Walled Structures, 94 (2015) 334–347.
36. Thornton, P. ve Magee, C., The Interplay of Geometric and Materials Variables in Energy Absorption, Journal of Engineering Materials and Technology, 99 (1977) 114–120.
37. Yuen, S. ve Nurick, G., The energy-absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modifications: An overview, Applied Mechanics Reviews, 61 (2008) 0208021–02080215.
38. Song, J., Chen, Y. ve Lu G., Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing, International Journal of Mechanical Sciences, 66 (2013) 239–248.
39. Costas, M., Díaz, J., Romera, L., Hernández, S. ve Tielas, A., Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers, International Journal of Impact Engineering, 62 (2013) 166–181.
40. Ahmad, Z. ve Thambiratnam, D., Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, Composite Structures, 87 (2009) 186–197.
41. Hanssen, A., Hopperstad, O. ve Langseth, M., Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections, International Journal of Crashworthiness, 6 (2001)
42. Markaki A. ve Clyne, T., The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams, Acta Materialia, 49 (2001) 1677–1686.
43. Toksoy, A. ve Güden, M. The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes, Thin-Walled Structures, 43 (2005) 333–350.

44. Reid, S., Reddy, T. ve Gray, M., Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes, International Journal of Mechanical Sciences, Mech. Sci. 28 (1986).
45. Reid, S. ve Reddy, T., Axial crushing of foam-filled tapered sheet metal tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 28 (1986).
46. Seitzberger, S., Rammerstorfer, F., Gradingner, R., Degischer, H., Blaimschein, M. ve Walch, C., Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam, International Journal of Solids and Structures, 37 (2000) 4125–4147.
47. Hanssen, A., Langseth, M. ve Hopperstad, O., Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler, International Journal of Impact Engineering, 24 (2000) 475–507.
48. Zarei, H. ve Kröger, M., Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application, Thin-Walled Structures, 46 (2008) 214–221.
49. Jacob, G., Fellers, J., Simunovic, S. ve Starbuck, M., Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness, Journal of Composite Materials, (2002).
50. Godara, S. ve Nagar, S., Analysis of frontal bumper beam of automobile vehicle by using carbon fiber composite material, Materials Today: Proceedings, 26 (2019) 2601–2607.
51. Liu, Y., Wang, J., Xie, Q., Zhang, Z., Wang, B., Li, W., Shi, C., Yang, N. ve Gao, H., Energy absorption and response speed of composite/aluminium alloy coupling bumper beam in compact electric cars, International Journal of Crashworthiness, 24 (2019) 699–712.
52. Belingardi, G., Beyene, A., Koricho, E. ve Martorana, B., Alternative lightweight materials and component manufacturing technologies for vehicle frontal bumper beam, Composite Structures, 120 (2015) 483–495.
53. Belingardi, G., Beyene, A., ve Koricho, E., Geometrical optimization of bumper beam profile made of pultruded composite by numerical simulation, Composite Structures, 102 (2013) 217–225.
54. Kim, J., Yim, E., Jeon, C., Jung, C. ve Han, B., Effect of Structural Variables on Automotive Body Bumper Impact Beam, International Journal of Automotive Technology, 9 (2008) 713–717.
55. Marzbanrad, J., Alijanpour, M. ve Kiasat, M., Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes, Thin-Walled Structures, 47 (2009) 902–911.
56. Wang, T. ve Li, Y., Design and analysis of automotive carbon fiber composite bumper beam based on finite element analysis, Advances in Mechanical Engineering, 7 (2015) 1–12.
57. Xue, Y., Zhao, H., Zhang, Y., Gao, Z., Zhai, D., Li, Q. ve Zhao, G., Design and multi-objective optimization of the bumper beams prepared in long glass fiber-reinforced polypropylene, Polymer Composites, 42 (2021) 2933–2947.

58. Zhu, G., Wang, Z., Cheng, A. ve Li, G., Design optimisation of composite bumper beam with variable cross-sections for automotive vehicle, International Journal of Crashworthiness, 22 (2017) 365–376.
59. Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. ve Lessard, L., Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts, Composite Structures, 68 (2005) 419–427.
60. Zhang, Z., Liu, S. ve Tang, Z., Design optimization of cross-sectional configuration of rib-reinforced thin-walled beam, Thin-Walled Structures, 47 (2009) 868–878.
61. Davoodi, M., Sapuan, S., Aidy, A., Abu Osman, N., Oshkour, A. ve Wan Abas, W., Development process of new bumper beam for passenger car: A review, Materials&Design, 40 (2012) 304–313.
62. Wang, T. ve Li, Y., Design and analysis of automotive carbon fiber composite bumper beam based on finite element analysis, Advances in Mechanical Engineering, 7 (2015) 1–12.
63. Hu, Y., Liu, C., Zhang, J., Ding, G. ve Wu, Q., Research on carbon fiber-reinforced plastic bumper beam subjected to low-velocity frontal impact, Advances in Mechanical Engineering, 7 (2015) 1–15.
64. Liu, Y., Wang, J., Xie, Q., Zhang, Z., Wang, B., Li, W., Shi, C., Yang, N. ve Gao, H., Energy absorption and response speed of composite/aluminium alloy coupling bumper beam in compact electric cars, International Journal of Crashworthiness, 24 (2019) 699–712.
65. Nagel, G. ve Thambiratnam, D., A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 46 (2004) 201–216.
66. Reddy, S., Abbasi, M. ve Fard, M., Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection, Thin-Walled Structures, 94 (2015) 56–66.
67. Tran, T., Crushing analysis under multiple impact loading cases for multi-cell triangular tubes, Thin-Walled Structures, 113 (2017) 262–272.
68. Smerd, R., Winkler, S., Salisbury, C., Worswick, M., Lloyd, D. ve Finn, M., High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet, International Journal of Impact Engineering, 32 (2005) 541–560.
69. Zhang, X., Zhang, H. ve Ren, W., Axial crushing of tubes fabricated by metal sheet bending, Thin-Walled Structures, 122 (2018) 252–263.
70. Cowper, G. ve Symonds, P., Strain hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams, 1957.
71. LS-DYNA Keyword User's Manual Volume II: Material Models, Livermore Software Technology Corporation, California, 2018.
72. UN Regulation No 137, Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system, (2020) 18–61.

73. Gedikli, H. ve Meriç, D., Energy absorption behavior of tailor-welded tapered tubes under axial impact loading using coupled FEM/SPH method, Thin-Walled Structures, 104 (2016).
74. Bradley, M. ve Zhu, X., Input Parameters for Metal Forming Simulation Using LS-DYNA, 6th International LS-DYNA Conference, 2000, Detroit.
75. Gümrük, R. ve Karadeniz, S., The influences of the residual forming data on the quasi-static axial crash response of a top-hat section, International Journal of Mechanical Sciences, 51 (2009) 350–362.
76. Stander, N., Roux, W., Basudhar, A., Eggleston, T., Goel, T. ve Craig, K., LS-OPT User 's Manual: A Design Optimization and Probabilistic Analysis Tool for The Engineering Analyst, Livermore Software Technology Corporation, California, 2015.
77. Xu, Q., Liang, Y. ve Fang, K., The effects of different experimental designs on parameter estimation in the kinetics of a reversible chemical reaction, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 52 (2000) 155–166. doi:10.1016/S0169-7439(00)00084-8.
78. Jin, R., Chen, W. ve Simpson, T. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria, Structural and Multidisciplinary Optimization, 23 (2001) 1–13.
79. Stander, N. ve Goel, T., Metamodel sensitivity to sequential adaptive sampling in crashworthiness design, in: 12th AIAA/ISSMO Multidiscip. Anal. Optim. Conf., 2008.
80. Kaddour, A., Hinton, M., Smith, P. ve Li, S., Mechanical properties and details of composite laminates for the test cases used in the third world-wide failure exercise, Journal of Composite Materials, 47 (2013) 2427–2442.
81. Cherniaev, A., Montesano, J. ve Butcher C., Modeling the Axial Crush Response of CFRP Tubes using MAT 054, MAT058 and MAT262 in LS-DYNA, 15th International LS-DYNA Conference, 2018, Detroit.
82. Chang, F. ve Chang K., Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-Out Mode Failure, Journal of Composite Materials, 21 (1987) 809–833.
83. Chang, F. ve Chang K., A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations, Journal of Composite Materials, 21 (1987) 834–855.
84. LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, California, 2006.
85. Courteau, M., Investigating the Crashworthiness Characteristics of Carbon Fiber/Epoxy Tubes, Yüksek Lisans Tezi, The University of Utah, 2011.
86. Machado, J., Nunes, P., Marques, E. ve da Silva, L., Adhesive joints using aluminium and CFRP substrates tested at low and high temperatures under quasi-static and impact conditions for the automotive industry, Composites Part B: Engineering, 158 (2019) 102–116.

87. Valente, J., Campilho, R., Marques, E., Machado, J. ve da Silva, L., Geometrical optimization of adhesive joints under tensile impact loads using cohesive zone modelling, International Journal of Adhesion and Adhesives, 97 (2020) 102492.
88. Silva, M., Marques, E. ve da Silva, L., Behaviour under impact of mixed adhesive joints for the automotive industry, Latin American Journal of Solids and Structures, 13 (2016) 835–853.
89. Machado, J., Nunes, P., Marques, E. ve da Silva, L., Numerical study of similar and dissimilar single lap joints under quasi-static and impact conditions, International Journal of Adhesion and Adhesives, 96 (2020) 102501.



ÖZGEÇMİŞ

Salim ÇAM, Ortaöğretimini Niksar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2013 Yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği lisans programını tamamladı. 2016 Yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını bitirdi. Aynı sene Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı. Halen Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. 3 Adet SCI indeksli makalesi, 1 adet uluslararası hakemli dergi makalesi ve 4 adet bildirisi vardır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Doktora tezi kapsamında 1 adet SCI yayın yapmış olup 1 tanesi de yayımlanmayı beklemektedir.

Doktora tezi kapsamındaki yayını:

- Sofuoğlu, Hasan, and Salim Çam. "Coupled Effect of Thickness Optimization and Plastic Forming History on Crashworthiness Performance of Thin-Walled Square Tube." (2021).