

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARE KESİTLİ TAILOR-WELDED TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME
ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Durukan Burak DİLEK

**HAZİRAN 2013
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARE KESİTLİ TAILOR-WELDED TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME
ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

Makine Müh. Durukan Burak DİLEK

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :24.05.2013
Tezin Savunma Tarihi : 18.06.2013**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
(Makine Mühendisliği) Anabilim Dalında
(Durukan Burak DİLEK) tarafından hazırlanan

**KARE KESİTLİ TAILOR-WELDED TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME
ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2013 gün ve 1507 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Doç. Dr. Volkan KÂHYA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ


.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Otomotiv endüstrisinde yaygın şekilde kullanılan tailor-welded tüplerin çarpışma analizlerinin gerçekleştirildiği bu yüksek lisans çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında yapılmıştır.

Bana bu konuda çalışma olanağı sağlayan ve tez sürecinde benden bilgi, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ' ye teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim. Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarından dolayı başta sayın, Dr. RECEP GÜMRÜK, Arş. Gör. Mehmet Emin ÇETİN ve Öğr. Gör. Dursun MERİÇ' e teşekkür ederim. Gösterdikleri yüksek hoşgörü ve verdikleri desteklerden ötürü dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine ve Endüstri Mühendisliği bölümlerinde görev yapan tüm hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini her zaman yanında hissettiğim, sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma 2008.112.03.8 kod numaralı proje ile K.T.Ü. Araştırma Fonu tarafından desteklenmektedir. Bu nedenle fon yöneticilerine de teşekkürlerimi sunarım.

Durukan Burak DİLEK

Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kare Kesitli Tailor-Welded Tüplerin Enerji Sönümlenme Özelliklerinin Optimizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi.” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'nin 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. 24.05.2013


Durukan Burak DİLEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No.</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. İnce Duvarlı Yapılar.....	1
1.2. Tailor-welded Yapılar	3
1.3. Köpük Malzemeler.....	4
1.4. Enerji Sönümleyici Sistemler.....	6
1.4.1.Enerji Sönümleyici Tasarımındaki Genel Prensipler.....	6
1.4.2.Geleneksel İnce Duvarlı Tüplerin Enerji Sönümlenme Özellikleri	9
1.4.3.Köpüklerin Enerji Sönümlenme Özellikleri.....	12
1.4.4.Köpük Dolgulu Tüplerin Enerji Sönümlenme Özellikleri	14
1.4.5.Tailor-welded Tüplerin Enerji Sönümlenme Özellikleri	16
1.4.6.Enerji Sönümlenme Özelliklerinin Optimizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi	17
1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	19
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	20
2.1. Sayısal Çalışmalar	20
2.1.1.Tüp Geometrisi ve Malzeme Özellikleri.....	20
2.1.2.Köpük Malzemesinin Özelliği	23
2.1.3.Problemin SPH/Sonlu Elemanlar Modeli	23
2.2. Çok Kriterli Optimizasyon	25
3. BULGULAR VE İRDELEME	31
3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Modelin Doğruluğu	31
3.2. İleri Beslemeli Sinir ağlar (FNN) Modelinin Doğruluğu.....	32

3.3. İçi Boş Tüplerde Kaynak Bağlantısının Konumunun ve Üst Parça Kalınlığının SEA, Başlangıç Maksimum Kuvvet (BMK) ve CFE Üzerindeki Etkisi.....	33
3.4. Köpük Dolgulu Tüplerde Kaynak Bölgesi Yerleşiminin ve Üst Parça Kalınlığının SEA, Başlangıç Maksimum Kuvvet (BMK) ve CFE Üzerindeki Etkisi.....	37
3.5. Koniklik Açısının SEA, Başlangıç Maksimum Kuvvet (BMK) ve CFE Üzerindeki Etkisi.....	50
3.6. Optimizasyon Sonuçları	59
4. SONUÇLAR	62
5. ÖNERİLER	63
6. KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KARE KESİTLİ TAILOR-WELDED TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Durukan Burak DİLEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ
2013, 71 Sayfa

İnce duvarlı yapılar, hafif ve yüksek enerji sönmleme kapasitelerinden dolayı otomobil ve taşımacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlardaki enerji sönmleme uygulamalarında özellikle köpük dolgulu yapılara ilgi artmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada, içi boş ve köpük dolgulu kare kesitli konik tailor-welded tüplerin aksenel darbe yükü altındaki dinamik davranışı araştırılmıştır. Simülasyonlarda köpük dolgulu konik tüpler için sonlu elemanlar yöntemi ve ağırsız düzgün parçacık hidrodinamiği yöntemi (SPH) birlikte kullanılmıştır. Bu tüpler tek bir malzemedden (AL6061 veya AISI1018) veya iki farklı malzemedden (AL6061&AISI1018) tailor-welded kaynağı ile uç uca birleştirilmesi ile imal edildiği kabul edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan köpüğün ise alüminyumdan üretildiği varsayılmıştır. Tüplerin sayısal analizleri aksenel dinamik yük altında; koniklik açısı, kaynak bölgesi, üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda; tüp kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre özgül enerji sönmleme (SEA), başlangıç maksimum kuvvet (BMK) ve kuvvet verimliliği (CFE) grafikleri elde edilmiştir. Bunun yanında en uygun tüp kalınlığı ve köpük yoğunluğu değerleri, ileri beslemeli yapay sinir ağları ve genetik algoritmali optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda ağırsız SPH yöntemi ve ileri beslemeli sinir ağları yöntemi tüplerin optimizasyon çalışmalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Ayrıca, iki farklı malzemedden oluşan düz ve konik tüplerde başlangıç maksimum kuvvetin önemli ölçüde düştüğü, enerji sönmleme miktarının ise arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tailor-Welded Tüp, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Düzgün Parçacık Hidrodinamiği, Optimizasyon

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF ENERGY ABSORPTION CHARACTERISTICS OF TAILOR- WELDED TUBES WITH OPTIMIZATION Durukan Burak DILEK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Allied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Hasan GEDIKLI
2013, 71 Pages

Thin-walled structures are widely used in the automobile and transportation industry due to their lightweight and high-energy absorption. Especially thin-walled structures with filling materials have received much attention in energy absorption applications. Therefore, in this study, empty and foam-filled square tapered tailor-welded tubes were investigated for their dynamic behaviour under axial impact load. The finite element method and meshless smooth particle hydrodynamics method (SPH) were used together for foam-filled tailor-welded tubes in all simulations. It was assumed that tailor-welded tubes were composed of a single material (AISI1018 or AL6061) or two different materials (AL6061 & AISI1018) by joining end to end with tailor welding while the foam-filler material was made of aluminium. Analyses of tubes were performed with different taper angle, welding area, thickness of the outer part and foam density under axial impact loading. In a result of numerical simulations, graphs of specific energy absorption (SEA), the peak force (BMK) and crashworthiness force efficiency (CFE) were obtained. In addition to, optimum values of tube thickness and foam density were determined by using the forward neural network and genetic algorithm. The results of the simulations indicated that meshless SPH method and forward neural network for optimization of tubes have been successfully employed. Also, the peak force significantly decreased in the straight and tapered tubes composed of different two materials while the absorbed energy increased.

Keywords: Tailor-Welded Tube, Finite Element Method, Smooth Particles Hydrodynamics, Optimization

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 1.1. Bir araç gövdesinde kullanılan ince duvarlı yapılar [4].....	1
Şekil 1.2. Petek yapı bileşenleri [9].	2
Şekil 1.3. Farklı kalınlıklı TWT yapılarına bir örnek [11].....	3
Şekil 1.4. Kaynak işlemi. (a) Lazer ışın kaynağı [19] ve (b) Sürtünme karıştırma kaynağı [20].....	4
Şekil 1.5. Metal esaslı köpük malzemelere ait kapalı (a) ve açık hücreli (b) model [24].....	5
Şekil 1.6. Tipik bir alüminyum köpük için gerilme-şekil değiştirme grafiği [41].....	13
Şekil 1.7. Genetik algoritma akış diyagramı [69].....	18
Şekil 2.1. Kare kesitli bir TWT a) köpük dolgulu kesit alınmış ve b) üç boyutlu gösterimi	20
Şekil 2.2. Şekil değiştirme hızı 0.001 s^{-1} durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi	22
Şekil 2.3. Gerilme-şekil değiştirme grafiğinin köpük yoğunluğuna göre değişimi.....	23
Şekil 2.4. Kare kesitli köpük dolgulu TWT' in SEY/SPH modeli	24
Şekil 2.5. TWT için optimizasyon akış şeması [80].	27
Şekil 2.6. İki girişli yapay sinir ağı [80].	28
Şekil 3.1. Köpük dolgulu TWT için enerji zamana bağlı eğrileri.....	31
Şekil 3.2. İçi boş tüpler için özgül enerji sönmleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	35
Şekil 3.3. İçi boş tüpler için başlangıç maksimum kuvvetinin (BMK) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	36

Şekil 3.4. İçi boş tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	37
Şekil 3.5. Köpük dolgulu tüpler için özgül enerji sönmleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	39
Şekil 3.6. Köpük dolgulu tüpler için başlangıç maksimum kuvvetin (BMK) tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	40
Şekil 3.7. Köpük dolgulu tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	41
Şekil 3.8. Kaynak konumu $L_0/L= 0.25$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri	43
Şekil 3.9. Kaynak konumunun $L_0/L=0.25$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmlenen enerji-zaman grafikleri.....	44
Şekil 3.10. Kaynak konumu $L_0/L= 0.50$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.	44
Şekil 3.11. Kaynak konumunun $L_0/L=0.50$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmlenen enerji-zaman grafikleri.....	45
Şekil 3.12. Kaynak konumu $L_0/L= 0.75$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.	45
Şekil 3.13. Kaynak konumunun $L_0/L=0.75$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmlenen enerji-zaman grafikleri.....	46
Şekil 3.14. Kaynak konumu $L_0/L= 0.25$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.	47
Şekil 3.15. Kaynak konumunun $L_0/L=0.25$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmlenen enerji-zaman grafikleri.....	47
Şekil 3.16. Kaynak konumu $L_0/L= 0.50$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.	48
Şekil 3.17. Kaynak konumunun $L_0/L=0.50$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmlenen enerji-zaman grafikleri.....	48

Şekil 3.18. Kaynak konumu $L_0/L=0.75$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri	49
Şekil 3.19. Kaynak konumunun $L_0/L=0.75$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönümlenen enerji-zaman grafikleri.....	49
Şekil 3.20. Farklı konikliğe sahip içi boş TWT-M için çarpma kuvveti verimliliğinin (SEA) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	53
Şekil 3.21. Farklı konikliğe sahip içi boş tüpler için başlangıç maksimum kuvvetinin (BMK) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	54
Şekil 3.22. Farklı konikliğe sahip içi boş tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	55
Şekil 3.23. Farklı konikliğe sahip köpük dolgulu tüpler için özgül enerji sönümleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	57
Şekil 3.24. Farklı konikliğe sahip köpük dolgulu tüpler için başlangıç maksimum kuvvetin (BMK) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	58
Şekil 3.25. Farklı konikliğe sahip köpük dolgulu tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) değerinin tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$	59

TABLULAR DİZİNİ

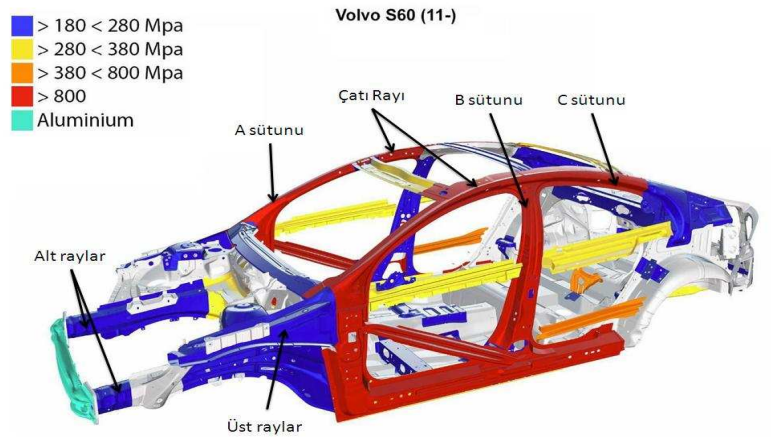
Sayfa No.

Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan AL6061, AISI1018 ve AL6061&AISI1018 malzemelerinin lineer elastik özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri	22
Tablo 2.2. Alüminyum köpüğe ait şekil değiştirme-gerilme değerleri [73]	23
Tablo 2.3. $L_0=0.25L$, $L_0=0.5L$ ve $L_0=0.75L$ için boş ve dolu tüplerde kullanılan optimizasyon işleminde kullanılan örnekler ve malzeme özellikleri	29
Tablo 3.1. Optimizasyon analizi sonucunda elde edilen düz tüplere ait ($\alpha=0^\circ$) R^2 değerleri	32
Tablo 3.2. TWT-M farklı koniklik açıları için ($\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$) optimizasyon analizi sonucunda elde edilen R^2 değerleri	33
Tablo 3.3. İleri beslemeli yapay sinir ağları modelinin koniklik açısı (α) 0° için elde edilen optimum değerler	60
Tablo 3.4. İleri beslemeli yapay sinir ağları modelinin koniklik açısı (α) 5° ve 10° için elde edilen optimum değerler	61

1. GENEL BİLGİLER

1.1. İnce Duvarlı Yapılar

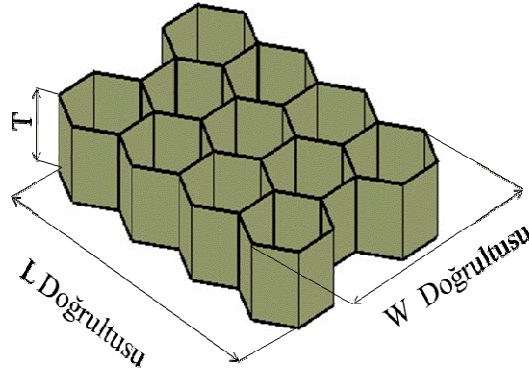
Otomobil ve havacılık endüstrisinde çarpışma performansının iyileştirilmesi üzerine son elli yıldır önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda geliştirilen yeni yapılar, çarpışma nedeniyle can güvenliği riski taşıyan sistemlerdeki enerjisinin kontrol edilebilmesinde önemli rol oynamaktadırlar. Enerji kontrolünde kinetik enerji, yeterli büyük çarpışma kuvveti altında kısmi veya tamamen hasar enerjisine dönüştürülür. Böyle yapılara en iyi örnekler ince duvarlı tüpler, petek yapılar ve gözenekli malzemelerdir [1]. Bu yapılar içinde yumuşak malzemedan yapılmış ince duvarlı tüpler çarpışma uygulamalarında yolcu ve kargo güvenliği için enerji sönümleyici sistem olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun nedeni, bu yapıların diğer sönümleyici sistemlere göre daha basit ve hafif oluşudur. Şekil 1.1' de bir araca ait iskelette kullanılan ince duvarlı yapılar görülmektedir. Burada ön rayların yapısı genelde prizmatiktir [2, 3].



Şekil 1.1. Bir araç gövdesinde kullanılan ince duvarlı yapılar [4].

Çarpışma sırasındaki yapısal bütünlük açısından ince duvarlı tüplerin aşırı yüklemelere dayanması ve darbe enerjisini kontrollü bir şekilde sönümlemesi gerekir. Bu nedenle ince duvarlı tüpler çelik, alüminyum ve kompozit malzemeler gibi çeşitli

malzemeler kullanılarak farklı geometrilere yapılmaktadır. Literatürden bilinmektedir ki tüpün enerji sönmleme kapasitesi geometri ve malzeme tipine göre değişmektedir [5, 6, 7, 8]. İnce duvarlı tüplerde kare, dikdörtgen, dairesel, konik, kare kesitli konik, şapka kesitli geometriler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tüpler dinamik aksenal çarpma durumlarında kademeli bir şekilde plastik deformasyona uğrayarak kontrollü bir şekilde yüksek enerjileri sönmleyebilmektedir [1]. Çarpışma sırasında arzu edilen, belirli bir deformasyon uzunluğunda en yüksek enerjii sönmlemektir. İnce duvarlı yapılar bu özellikleri sağlayabilmektedirler. Bundan dolayıdır ki yol kenar bariyerlerinde, otomobil, uzay ve nükleer endüstrilerinde ince duvarlı yapılar sıkça kullanılmaktadır. Şekil 1.2' de 11 hücreli ince duvarlı bir petek yapı görölmektedir.

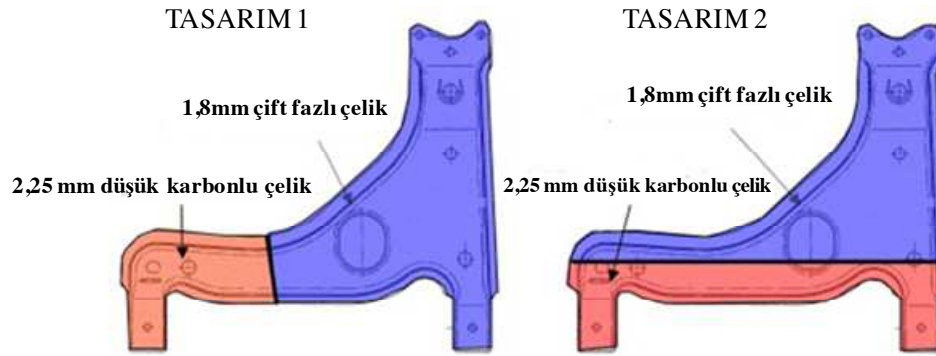


Şekil 1.2. Petek yapı bileşenleri [9].

Hücre boyutları 1,6 mm - 35 mm ve petek yoğunluğu ise 16 kg/m^3 ile 880 kg/m^3 arasında değişebilmektedir. Petek yapılarda çeşitli hücre konfigürasyonları mevcuttur ve hangi konfigürasyonun en uygun olduğu uygulamanın gereksinimleriyle alakalıdır. Petek yapısının en çok bilinen belli başlı şekilleri; kare, dairesel, altıgen, çapraz, spiral, esnek çekirdek, çift esnek çekirdek ve takviyeli olabilmektedir. Bununla birlikte petek yapıların birçoğunda yöne bağlı olarak mekanik özellikler değişmektedir [9].

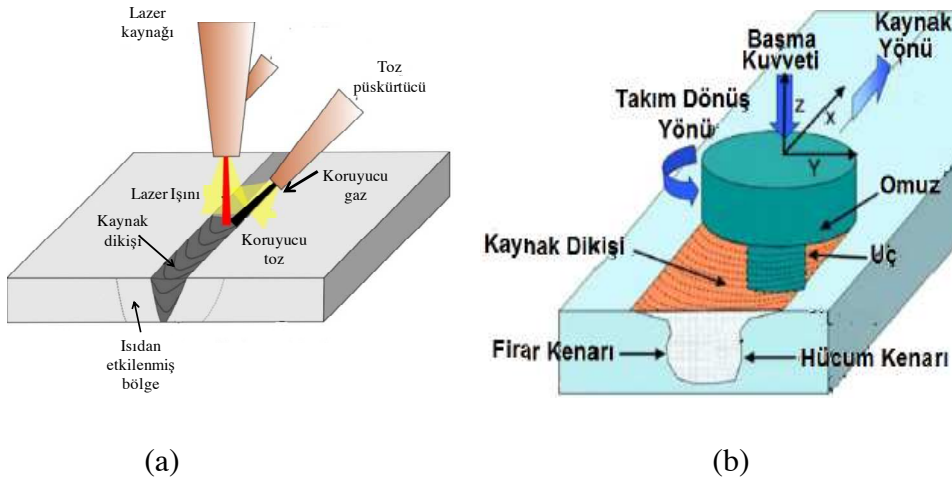
1.2. Tailor-welded Yapılar

Tailor welded yapılar, farklı malzeme veya kalınlığa sahip parçaların birleştirilmesiyle üretilen yapılardır (Şekil 1.3). Bu yapılar, ağırlığın ve maliyetin azaltılmasında oynadığı rol ve parça entegrasyonu gibi avantajları nedeniyle otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [10].



Şekil 1.3. Farklı kalınlıklı TWT yapılarına bir örnek [11].

Alüminyum ve çelik kombinasyonları otomotiv ve uzay endüstrisinde artan bir ilgi almaktadır [12, 13, 14]. Alüminyum ve çelik malzemelerin ergime sıcaklıkları çok farklı olduğundan geleneksel kaynak teknolojileri bu malzemelerin birleştirilmesi için uygun değildir [15, 16]. Birleştirme işleminde genelde lazer kaynağı veya sürtünme karıştırma kaynağı gibi ileri üretim teknolojileri kullanılmaktadır. Bununla birlikte alüminyum ve çelik gibi malzemelerin birleştirmesinde bazı problemler oluşabilmektedir [15, 17]. Yapısal performans, şekillendirilebilirlik, yüzey görünümü, korozyon direnci ve maliyet, uygulanacak kaynak işlemi için önemlidir. Birleştirme işleminde daima yüksek nitelikli ve basınçlara dayanabilen kaynak bölgeleri üretilmelidir. Bundan dolayı tailor-welded yapı teknolojisinin başarılı bir şekilde uygulanması için itinalı bir çalışma ve tüm sürecin kontrol edilmesi gerekir. Şekil 1.4a' da görülen lazer birleştirme kaynağı, sürekli birleştirme yöntemi olup esnek bir yöntemdir ve otomasyona elverişlidir. Ayrıca yüksek güçlü CO₂ lazeri ve robotik denetleme teknolojisindeki son gelişmeler, lazer kaynağı uygulamasına bir ivme kazandırmış ve otomotiv endüstrisindeki araçlardaki yapısal parçaların birleştirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [18].



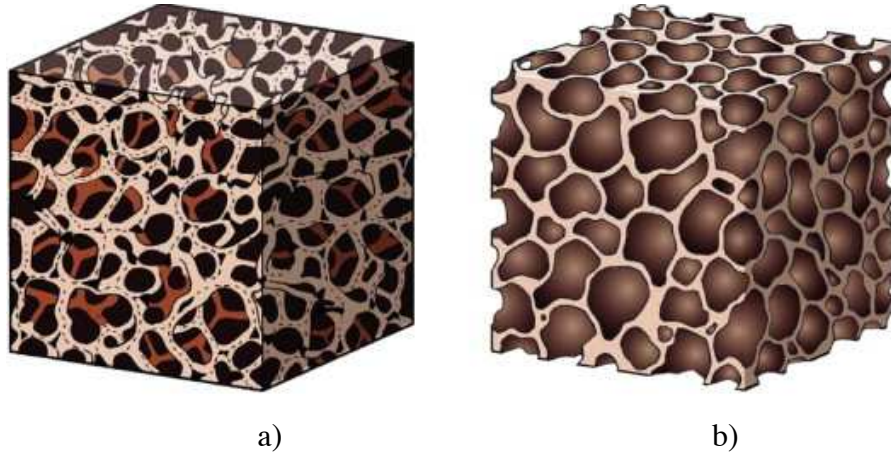
Şekil 1.4. Kaynak işlemi. (a) Lazer ışın kaynağı [19] ve (b) Sürtünme karıştırma kaynağı [20].

Sürtünme karıştırma kaynağı da otomotiv endüstrisinde önemli bir birleştirme ve montaj teknolojisidir. Bu kaynak işlemi alüminyum ergitme kaynağından doğan alışılmış problemlerin üstesinden gelinmesinde dolayı önemlidir. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi, içerdiği mekanik özellikler, işletim maliyeti avantajları, daha az sağlık ve çevre problemi gibi birçok avantajı nedeniyle otomotiv sektöründe oldukça ilgi toplamıştır [21]. Bu yöntemde Şekil 1.4b' de görüldüğü gibi bir omuz ve uçtan oluşan takım birleştirilecek plakaların kenarlarına daldırılır. Takım kendi eksenini etrafında dönerek kaynak doğrultusunda ilerleyerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Isıtma işlemi takım ile iş parçası ve takım arasındaki sürtünme ve iş parçasının ısınması ile oluşur. Bölgesel ısıtma uç etrafındaki malzemeyi yumuşatır ve takımın dönmesiyle malzeme önden arkaya geçer. Böylece katı bir birleşme oluşur [22].

1.3. Köpük Malzemeler

Yüksek dayanımlı hafif malzemelere duyulan ihtiyacın artması köpüklere olan ilgiyi artırmıştır. Çalışmalar neticesinde köpük malzemeler hafiflik ve dayanıklılığın istendiği yapılarda, çarpışma enerjisinin yutulmasında, titreşim ve ısı yalıtımı gibi mühendislik uygulamalarında yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Köpükler metal ve metal olmayan malzemeli köpükler olarak alt gruba ayrılabilirler. Özellikle de metalik köpükler son

yıllarda oldukça fazla ilgi almaktadır. Genellikle bu köpükler hacminin %40-97 arasında hava veya gaz ile doldurulmuş yüksek gözenekliğe sahip malzemeler olarak ifade edilebilirler. Metalik köpükler, yüksek mukavemet ağırlık oranı özelliğinden dolayı yüksek enerji sönmeme uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında son yıllarda oldukça önemli kullanım alanı bulmuştur. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilirler ve birçok metalden daha fazla enerji yutabilirler. Şekil 1.5’ de verildiği gibi bu köpükler açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki yapı biçiminde üretilmektedir. Eğer gözenekler birbiri ile bağlantılı bir halde bulunuyorsa, bu tür yapıya “açık hücreli” (open cell), hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiş ve birbirinden sızdırmazlık derecesinde duvarlarla ayrılmış ise “kapalı hücreli” (closed cell) alüminyum köpükler olarak adlandırılmaktadırlar [23].



Şekil 1.5. Metal esaslı köpük malzemelere ait kapalı (a) ve açık hücreli (b) model [24].

Metalik köpükler yanında metal olmayan köpüklere de modern dünyamızda hemen her yerde karşılaşmaktadırlar. Yiyeceklerin tek kullanımlık paketlenmesinden binalarda ısı yalıtımına kadar pek çok yerde kullanılmaktadırlar.

1.4. Enerji Sönümleyici Sistemler

Geleneksel yapısal tasarımlarda malzemelerin belirli bir mukavemete ve katılığa sahip olması gerekir. Bunun birlikte malzemeler genelde çok küçük elastik deformasyonlar da sergileyebilirler. Enerji sönümleyici yapılarda ise durum farklıdır. Enerji sönümleyici sistemler kinetik enerjiyi kısmen veya tamamen bir başka enerjiye dönüştürürler. Dönüştürülen enerji tersinir (geri dönüşebilir) veya ağırlıklı olarak tersinmez (geri dönüşmez) olabilmektedir. Örneğin sıkıştırılabilir akışkanlardaki basınç enerjisi ve katılardaki elastik uzama tersinirken, plastik deformasyon enerjisi tersinmezdir. Bu nedenle enerji sönümleyici sistemler yumuşak malzemelerden yapılırlar. Düşük karbonlu çelikler veya alüminyum alaşımları bu sistemlerin yapımında yaygın biçimde kullanılırken özellikle ağırlığın önemli olduğu yerlerde fiber takviyeli plastikler veya poliüretan köpükler de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

1.4.1. Enerji Sönümleyici Tasarımındaki Genel Prensipler

Enerjinin tersinmezliği

Yapıların ve malzemelerin enerji dönüşümü tersinmez olmalıdır. Yani yapılar ve malzemeler başlangıçtaki kinetik enerjinin büyük bir kısmını plastik deformasyon ile elastik olmayan enerjiye dönüştürürler. Başlangıçtaki kinetik enerji elastik uzama enerjisine dönüştüğü takdirde azami elastik deformasyon gerçekleşir. Bu elastik uzama serbest kalacak ve kişiyi ve yapıyı daha sonra oluşacak hasardan koruyacaktır [25].

Sınırlı sabit tepki kuvveti

Enerji sönümleyici tasarımında ve analizinde üzerinde durulan temel konulardan biri de başlangıç (ilk zamanlarda oluşan maksimum çarpışma kuvveti) çarpma kuvvetinin güvenli bir değerin (kısıt) altında tutulmasıdır. Büyük deformasyon sürecinde yeterli enerji yutabilme kapasitesi sunulurken çarpma tesiri altındaki enerji sönümleyicilerin oluşturduğu reaksiyon kuvvetini belli bir sınır değerin altında tutmak gerekir. Bu sınır değerler üzerinde meydana gelen hasarlar insanlar üzerinde ciddi yaralanmalar oluşabilmektedir [25].

Uzun strok

Bir enerji sönümleyici yapı için yukarıda belirtildiği gibi tepki kuvveti kısıtlıdır. Ancak kuvvet tarafından yapılan iş, kuvvetin büyüklüğü ile kuvvetin etki doğrultusunda aldığı yol kadardır. Dolayısıyla yapı büyük miktarlarda enerji sönümlese buna bağlı olarak yer değiştirme de oldukça büyük olacaktır. Bu da kabin güvenliği için daima bir tehdit oluşturmaktadır [25].

Kararlı ve tekrarlanabilir deformasyon şekli

Çok belirsiz çalışma yükleriyle başa çıkmak için tasarlanan yapının deformasyon şekli ve enerji sönümleyebilme kapasitesi kararlı ve tekrarlanabilir olmalıdır. Enerji sönümleyici yapılara uygulanan dış dinamik yüklerin ritmi, şekli, büyüklüğü ve dağılımı gibi belirsizlikler kestirilmelidir [25].

Hafiflik ve yüksek enerji yutabilme kapasitesi

Enerji sönümleyici sistemlerin hafif olması özgül enerji sönümleme kapasitesinin (birim kütle başına sönümlenen enerji) de yüksek olmasını sağlar. Bu kriterler özellikle araçlardaki enerji sönümleyicileri ve kişisel güvenlik sistemleri için hayati önem sahiptir. Otomobil üreticileri araçların çarpma performansını iyileştirmek için düzeltmeler yaptıklarında olası ağırlık artışlarını da dikkate almak zorundadırlar. Ayrıca ağırlıktaki ufak bir artış da daha fazla yakıt tüketimi ve çevre kirliliği anlamına gelir [25].

Düşük maliyet ve kolay kurulum

Enerji sönümleyicilerin imalatı düşük maliyetli, bakım ve montajı ise kolay olmalıdır. Günümüzün rekabetçi dünyasında bütün sönümleyiciler sınırlı bütçeyle imal edilmektedir. Sonuç olarak bütün ekonomik yapıların üretimi bu sınırlar içinde tutulmaktadır [25].

Enerji sönümleyicilerin kullanım alanları

Araçlardaki şasi demirlerinin çoğu ince cidarlı yapılardır. Buna ilaveten, Şekil 1.1'den de görülebileceği gibi aracın ön, alt ve üst rayları ana çarpışmada enerji emici parçalardır. Şekilde gösterildiği gibi A ve B sütunları ve çatı rayı, bir kaza anında yolcu kabininin yapısal bütünlüğünü korumak için tasarlanmıştır. Buna karşın ani frenleme durumunda yolcuların kafasını çarpabileceği kısımlardır.

Önden çarpmalar araç yaralanmalarında büyük bir öneme sahip olsa da karmaşık yol trafiğinde sürücüler ve yolcular için yanlardaki korumalar büyük önem arz eder. Çünkü trafik kazalarında ciddi yaralanmaların %13'ünü bunlar teşkil eder. Bundan dolayı bazı araç üreticileri, 50 km/saat çarpma hızına dayanabilen, kapı kolonları ve güçlü kapılar üretilmişlerdir. Ayrıca yeni tasarımlarda çarpma esnasında enerji sönümlenmesini artırmak için direksiyon ve koltuk sistemi gibi yerlere enerji sönümleyiciler yerleştirilmiştir.

Karayollarındaki çeşitli araç kazalarını önlemek amacıyla çeşitli yol donanımları üzerinde çalışılmıştır. Otoyollardaki bu sistemler kafa kafaya çarpışma koşullarında aracı güvenli şekilde durdurana kadar yavaşlatmak amacıyla veya yanal çarpışmalardaki tehlikeli etki bölgesinin dışına yönlendirmek amacıyla kademeli olarak tasarlanmıştır. En yaygın olarak kullanılan korkuluk sistemi, çelik boru ya da kanal üzerinde desteklenmiş "W" şeklindeki galvanize çelik kirişlerdir. Destekleyici sistemler temele gömülüdür. Bir araç yol kenarındaki korkuluklara çarptığında araçtaki kinetik enerjinin büyük bir bölümü hem "W" kirişler ve direkler tarafından hem de kirişin gömülü olduğu zeminin hareketi ve parçalanması ile dağıtılır. Karayollarındaki diğer koruma sistemleri beton korkuluklar ve halat güvenlik bariyerleridir. Beton korkulukların fonksiyonu, aracın kinetik enerjisinin bir kısmını potansiyel enerjiye dönüştürerek aracı esas hareket doğrultusuna yönlendirmektir. Araç korkuluğun düşük olan kısmındaki eğik düzlem ile yükseltilerek kinetik enerji potansiyel enerjiye dönüştürülür. Bir diğer kullanım alanı, dağlık arazilerde özellikle yağmurlu günlerde dik yamaçlardan düşen kayaların insanlar ve araçlar için oluşturdukları tehlikedir. Örneğin sürücü kabinine düşen bir kaya çarptığında veya bir kaza neticesinde kabin yana devrildiğinde deforme olmuş kabin operatör için bir yaşam alanı bırakmak zorundadır. Dolayısıyla kabin yapısı bu çarpışma koşullarında yeterli enerji sönümlemek üzere tasarlanmış olmalıdır.

Enerji sönümleme çalışmaları yüksek basınçlı yüksek hızlı akışkanın geçtiği borularda da önemli yer tutar. Bu durum nükleer, enerji ve kimya endüstrileri için önemli bir güvenlik sorunudur. Bu tip borular yüksek basınçlara dayanacak şekilde tasarlanmasına rağmen sistem içinde yüksek basınçların ve basınç dalgalanmalarının meydana getirdiği bir tehlike söz konusudur. Ayrıca bisiklet kaskı, baret, kurşun geçirmez ceket gibi çeşitli yardımcı koruma araçlarının enerji yutabilme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Özellikle şantiyelerde yüksek seviyelerden düşen borular ve diğer nesnelere işçilere çarpmaktadır. Birçok ülkede baretler etkin bir koruma ögesi olarak kullanılmaktadır. Oyunlarda ve futbol, at yarışı, boks, kayak gibi müsabakalarda da darbelere karşı dayanıklılık ve enerjinin sönümlenmesi önemli bir husustur [25].

1.4.2. Geleneksel İnce Duvarlı Tüplerin Enerji Sönümleme Özellikleri

İnce duvarlı tüpler üzerine ilk çalışmalar Alexander [26] tarafından başlatılmıştır. Alexander, yaptığı çalışmada tüplerdeki enerji sönümleme kapasitesinin tüp geometrisi ve malzemesinin, kullanılan dolgu çeşidinin, yükleme ve sınır şartlarına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Daha sonraki çalışmalarda; Wierzbicki ve Abramowicz [27] çok köşeli ince duvarlı yapıların deformasyon davranışını deneysel olarak analiz etmiştir. Analiz sonucu çok köşeli ince duvarlı yapıların simetrik çökme durumunda ortalama kuvvet (P_{ort}) denklemini aşağıdaki gibi bulmuştur. Çalışmasında malzeme davranışını rijit-plastik olarak seçilmiştir.

$$P_{ort} = 9.56 \sigma_{ak} \sqrt[3]{Ct^5} \quad (1.1)$$

Burada σ_{ak} akma gerilmesi, t kalınlık ve C karesel sütunun genişliğidir. Başka bir çalışmada ise Abramowicz ve Jones [28], asimetric olarak aksenal deforme olan kare kesitli tüplerin ortalama kuvvet değerini denklem 1.2' deki gibi belirlemiştir.

$$P_{ort} = 9.56 \sigma_{ak} t (\sqrt[3]{Ct^2} + 0.84 \sqrt[3]{C^2 t}) + 0.58 t^2 \quad (1.2)$$

Wierzbicki ve Abramowicz 'ın [29] geliştirdiği başka bir modelde ise ardışık plakalar arasında rastgele bir açı olması durumunda ortalama kuvvet bağıntısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$P_{ort} = 13.06 \sigma_{ak} \sqrt[3]{Ct^5} \quad (1.3)$$

Karagiozova vd., [30] aksenal simetrik deformasyon altındaki silindirik kabukların atalet etkisini sayısal olarak sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelenmiştir. Yapmış oldukları çalışmada atalet etkilerinin ince duvarlı tüplerde kütle ve çarpma hızına bağlı olduğunu ortaya koymuştur ve ayrıca tüpün malzeme özelliklerinin aksenal gerilme dalga dağılımını etkilediğini göstermişlerdir. Gupta ve Abbas [31] ise yuvarlak tüplerin kıvrımlı (akordeon) şeklindeki aksenal deformasyon cevabı için matematiksel model kurmuştur. Akordeon modelinde, şekil değişimi sırasında uzunluk boyunca kalınlıktaki değişim ile çekme ve basma esnasındaki akma gerilmesindeki farklılıklar birleştirilmiştir. Modelde meydana gelen düz kıvrımlar ve çevresel gerilmeler dikkate alınmıştır. Kıvrım boyutu, diğer parametrelerin yanı sıra deformasyon yükündeki değişimler hesaplanıp sonuçlar deneylerden elde edilen verilerle karşılaştırıldığında iyi bir örtüşme sergilediği görülmüştür.

Guillow [32], Al6060 malzemesinden yapılmış ince duvarlı dairesel tüplerin statik yüklemeler altındaki enerji sönümlene karakteristiğini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarda D/t (çap/kalınlık) oranını 10-450 arasında değiştirmiş ve aşağıdaki gibi ampirik ortalama yük ifadesini geliştirmiştir.

$$P_{ort} = 72,3 M_p \left(\frac{D}{t} \right)^{0.32} \quad (1.4)$$

Burada M_p plastik momenttir.

Karagiozova ve Jones [33] aksenal çarpma etkisine maruz alüminyum ve çelik kabukların çarpma davranışını sayısal simülasyonlarla test etmişlerdir. Sayısal çözümlerde ABAQUS sonlu elemanlar yazılımını kullanmışlardır. Çalışmalarında; kabuk geometrisinin, malzeme özelliklerinin, sınır şartlarının ve yükleme tiplerinin enerji

sönümleme karakteristiği üzerindeki etkileri araştırmışlar ve enerji sönümleme karakteristikleri, kıvrım (büklüm) uzunlukları, başlangıç maksimum kuvvetleri elde etmişlerdir. Velmuruganc ve Gupta [34] enerji sönümleme karakteristiklerini ve kademeli hasar şekillerini araştırmak amacıyla farklı boyuttaki metal ve kompozit tüpleri aksenal yüklere maruz bırakmışlardır çalışmada metal tüplerin ortalama çökme yükü ve kat miktarını bulmak için analitik bağıntılar geliştirilmiştir. Ayrıca Nagel ve Thambiratnam [35] ince cidarlı konik tüplerin enerji sönümleme karakteristiklerini araştırmak amacıyla ABAQUS sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Simetriden dolayı numunelerin sadece dörtte birini modellemişlerdir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara yaklaştığı 5 mm eleman boyutunda analizler yapılmıştır. Nagel ve Thambiratnam'ın [36] diğer bir çalışmasında ise kare kesitli düz ve konik tüplerdeki enerji sönümleme davranışına cidar kalınlığının, koniklik açısının, çarpan cismin kütesinin ve hız değişiminin etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarını statik ve dinamik aksenal yük altında yapmışlardır. Analizlerde sonlu elemanlar paket programı ABAQUS kullanılmıştır. Çalışmalar neticesinde konik tüplerde düşük hızlar için kalınlığın etkisinin koniklik açısından daha fazla olduğu görülmüştür. Neticede ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme değerinin duvar kalınlığıyla ve koniklik açısıyla kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Konik tüpler nispeten ezilme yükü ve deformasyon cevabı nedeniyle düz tüplere göre daha çok tercih edilirler. Bunların nedenlerinden biri koniklik açısı arttıkça başlangıç maksimum azalmasıdır [37] .

Gupta ve Venkatesh [38] çap ve kalınlığın aksenal çökmeye etkisini incelemek üzere çapın kalınlığa oranının (D/t) 11,5 ve 31,49 olduğu iki farklı örnek üzerinde düşey çarpma testi deneylerini gerçekleştirmiştir. Najafi ve Rais-Rohani [39] ise aksenal olarak deforme olan alüminyum tüplerin enerji sönümleme karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında LS-DYNA kodunu kullanarak statik simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonlarında alüminyum tüplerin çok hücreli ve çok köşeli olduğunu kabul etmişlerdir. Plastik çöküş kinematiğini ele alarak yaptıkları simülasyonlarda kesit geometrisi ve deformasyon davranışı arasında kuvvetli bir ilişki bulmuşlardır. Chen ve Ushijima [40] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak dairesel tüpler üzerinde başlangıç maksimum kuvvetinin davranışını çalışmışlardır. Başlangıç maksimum kuvvetinin malzemeye, tüp geometrisine ve çarpma hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu parametreleri sistematik olarak değiştirerek malzemenin ve tüp geometrisinin başlangıç

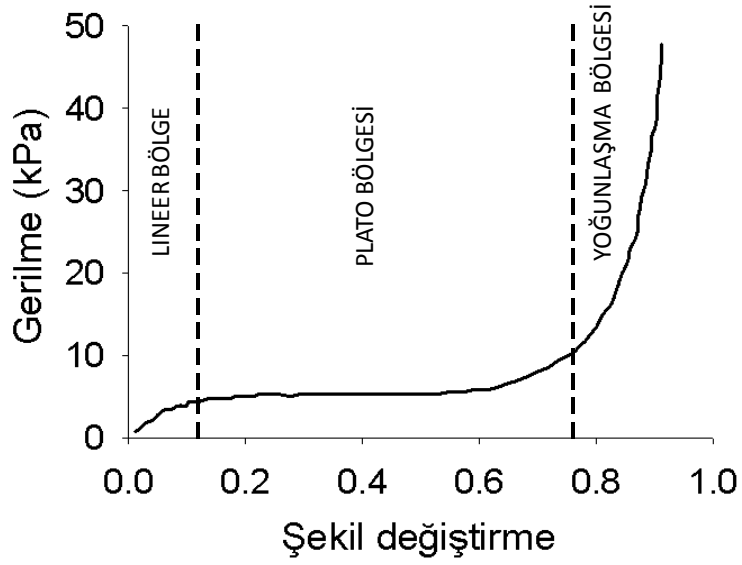
yüke etkisini araştırmışlardır. Eksenel gerilme dağılımını ve deformasyon davranışını ayrıntılı olarak gözlemleyerek başlangıç yük üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır.

1.4.3. Köpüklerin Enerji Sönümleme Özellikleri

Köpükler, özellikle otomobil sektöründe düşük ağırlık ve yüksek enerji sönümleme kabiliyetinden dolayı yoğun ilgi almaktadır. Bu malzemeler, sıkışma durumlarında gözenekli yapılarından dolayı deformasyonla yüksek miktarda enerji sönümleyebilmektedir. Bunlar içerisinde metal köpükler yüksek enerji sönümleme potansiyeline sahip malzemelerdir. En çok kullanılan metal köpükler alüminyum ve nikelidir. Özellikle alüminyum köpükler Şekil 1.6' da verilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri nedeniyle en etkili enerji sönümleyicilerden biri olarak tanımlanmaktadır [41]. Şekil 1.6' da görülen köpük malzemeleri, gerilme-şekil değiştirme eğrisine göre genelde üç farklı bölgeyle karakterize edilmektedir. Birinci bölge doğrusal sıkışma bölgesi, ikincisi bölge plato bölgesi ve üçüncü bölge yoğunlaşma bölgesidir [42]. Plato bölgesinde sönümlenen enerji miktarı yüksektir. Bu yüzden köpüğün mekanik özelliklerini belirleme açısından oldukça önemli bir bölgedir ve denklem 1.5'de görüldüğü gibi köpüğün yoğunluğuna bağlıdır [43, 44, 45].

$$\sigma_p = C \left(\frac{\rho_f}{\rho_{f_0}} \right)^m \quad (1.5)$$

Burada ρ_f köpüğün yoğunluğu, ρ_{f_0} köpüğün yapıldığı malzemenin yoğunluğu, C ve m malzeme sabitleridir.



Şekil 1.6. Tipik bir alüminyum köpük için gerilme-şekil değişirme grafiği [41].

Köpük üzerine yapılan çeşitli çalışmalarda köpük yoğunluğunun artmasıyla sönmölenen özgül enerji değerinin arttığı görölmüşür [41, 46]. Bu nedenle köpükler dolgu malzemesi olarak tüplerin içine yerleştirildiğinde tüp ve köpüğün malzemelerinin ayrı ayrı sönmölediği enerjinin toplamından daha fazla enerji sönmölemektedir.

Reyes vd., [43] ise sayısal analizler için alüminyum köpöklere uygulanabilir bir malzeme modeli geliştirmiş ve modeli sonlu elemanlar yazılımı LS-DYNA' da test etmişlerdir. Farklı test koşullarında sayısal analizler yapılarak geliştirdikleri modelin sağlam ve etkili bir model olduğunu deneysel verilerle karşılaştırarak göstermişlerdir. Rajendran vd., [47] nükleer taşıma tanklarında kullanılan kapalı hücreli alüminyum köpüğün enerji sönmöleme kapasitelerini deneysel ve sayısal olarak araştırdı. Sayısal sonuçlarla deneysel verileri karşılaştırarak sonuçların birbirlerine yakın olduğunu göstermişlerdir. Bunlar yanında Liu vd., [41] alüminyum köpöklere ekseneel çarpma yükü altında deformasyon şekilleri, çarpma kuvveti ve enerji sönmöleme kabiliyetini incelemişlerdir. İki farklı alüminyum köpüğün üretildiği çalışmada köpökleredeki deformasyon şekilleri, ekseneel dinamik yük altındaki davranış ve enerji sönmöleme kabiliyetinin izah edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçta kullanılan köpüğün yoğunluğunun artışı ile sönmölenen enerji miktarı ve başlangıç maksimum kuvvet değerini arttığı gözlenmiştir.

Metal olmayan köpük malzemeler de enerji sönümlenme kabiliyeti bakımından alüminyum köpüğe yakın özellikler gösterebilmektedir. Bu malzemeler düşük yoğunluğa ve iyi kalıplanabilme özelliklerine sahiptir. Gilchrist ve Milss [48] rijit polimerik köpüklerin çarpma deformasyon davranışını sonlu elemanlar programı ABAQUS ile modellemiştir. Malzeme modeli olarak tek eksenli sıkıştırma modeli kullanılmış ve özellikle kayma ve çekme hallerinde köpük malzeme modeli davranışının polistreninkinden oldukça farklı olduğu görülmüştür. Ancak çatlak/hasar yokken sonlu elemanlar kodu ile tahmin edilen deformasyon bölgelerinin aynı olduğu görülmüştür

1.4.4. Köpük Dolgulu Tüplerin Enerji Sönümlenme Özellikleri

Köpük dolgulu tüpler, boş tüplere kıyasla enerji sönümlenme performansını artırdığından tercih edilmektedirler [49]. Ayrıca köpük malzemeler otomotiv, uzay, taşımacılık ve savunma sanayinde yaygın şekilde kullanılmaktadır [50]. Hanssen vd., [51] alüminyum köpük dolgulu kare kesitli alüminyum tüplerin statik yükleme koşullarındaki davranışını incelemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel verilere dayanarak, köpüğün deformasyona etkisini boyutsuz sayılarla belirlemeye çalışmışlardır. Hanssen ve ekibi 2000 yılı içinde yaptıkları çalışmalarda alüminyum köpük dolgulu ve çentikli dairesel [52] ve kare kesitli tüpler [53] için statik ve dinamik deneyler gerçekleştirilmişlerdir. Deneylerdeki tüp malzemesi olarak AL6060 alüminyum alaşımı kullanılmışlardır. Dairesel kesitli tüplerin deneyleri neticesinde; ortalama kuvvet, maksimum kuvvet ve deformasyon değerlerini içeren deneye dayalı bir bağıntı geliştirmişlerdir. Kare kesitli tüpler için deneysel bağıntıyı dinamik yüklemeler için yeniden düzenlemişlerdir. Santosa ve Wierzbicki [54] ince cidarlı yapıların aksenel deformasyonu üzerine alüminyum petek ve köpük dolgusu gibi malzemelerin etkilerini incelemişlerdir. Yapmış oldukları sayısal simülasyonlar sonucunda, yapıların maksimum enerji sönümlenmesi için, duvar kalınlığı yerine petek dolgulu malzemelerin daha yerinde olacağını belirtmişlerdir. Bununla birlikte yüksek enerji sönümlenme karakteristiği, orta veya yüksek mukavemetli köpük malzemelerin kullanımıyla da elde edilebilir. Ortalama kuvvet ile köpük mukavemeti arasındaki ilişkiyi basit bir formülle ifade etmişlerdir. Ayrıca Santosa vd., [55] alüminyum köpük dolgulu tüplerin aksenel deformasyonu üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Sayısal analizler için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlar ve simülasyon

sonuçlarında elde ettikleri kuvvet ve deformasyon verilerinin deneysel sonuçlara yakın çıktığı görülmüştür. Sonuçlarında köpük dolgulu tüplerde ortalama kuvvetin, köpüğün deformasyon kuvveti ve kesit alanıyla doğrusal arttığı belirlenmiştir. Hall vd., [56] da boş ve metal dolgulu tüplerin enerji sönümlenme karakteristiklerini belirlemek amacıyla statik ve dinamik yükler altındaki deformasyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Gerilme-şekil değiştirme eğrilerini oluşturmak için Split-Hopkinson basınç çubuğundan aldıkları verileri kullanmışlardır. Sonuçta köpük dolu tüplerin aynı ağırlıktaki boş tüplere göre daha fazla enerjiyi sönümlediklerini göstermişlerdir. Altenhof vd., [57] aksenal deformasyon altında alüminyum köpük dolgulu şapka kesitli tüplerin sayısal ve deneysel testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda tüplerin kuvvet-yer değiştirme ve sönümlenen enerji-yer değiştirme grafiklerini elde etmişlerdir. Eğrilerin kıyaslanmasından deneysel veriler ve sayısal simülasyonların birbirini doğruladığı görülmüştür. Deneysel ve sayısal gözlemler sonucunda köpük dolgulu tüplerde plastik burkulma yükü yaklaşık iki katı kadar artmıştır. Benzer bir artış da köpük dolgulu tüplerdeki sönümlenen enerji miktarında gözlenmiştir. Wang vd., [58] köpük dolgulu şapka kesitli tüpler için sonlu elemanlar programı LS-DYNA' yı kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal çalışmalarda tüplere farklı uzunlukta köpükler doldurdular. Deney ve sayısal sonuçlarda, köpük dolgu ile yüksek deformasyon kuvveti ve özgül enerji sönümlenme değeri elde edilirken başlangıç maksimum kuvvetler tam dolgulu tüplere göre düşük elde edildi. Song vd., [59] de köpük dolgulu şapka kesitli tüplerin aksenal deformasyonunda köpük dolgu ile tüp arasındaki etkileşimi araştırmışlardır. Analitik modele, sayısal simülasyonlar ve deneysel incelemelere dayanarak bir enerji sönümlenme sistemi geliştirmişlerdir. Deformasyon profiline uygun bir analitik model öne sürdüler. Yamada vd., [45] Yan vd., [60] ve Zhang ve Cheng [61] köpük dolgulu tüplerin testlerinde deformasyon ve enerji sönümlenme davranışını incelemişlerdir. Onlar da köpük dolgulu yapıların enerji sönümlenme davranışı önemli ölçüde iyileştirdiklerini belirlemişlerdir.

Aktay vd., [62] klasik sonlu elemanlarına alternatif olarak, ayrık parçacıkların bir alan temsil ettiği düzgün hidrodinamik parçacık (SPH) metodunu ve FEM-SPH modelleme tekniğini poliüretan köpük dolgulu ince cidarlı alüminyum tüplerin yarı statik aksenal ezilme davranışının sayısal simülasyonu için kullanmışlardır. Sayısal simülasyon sonucunda, SPH ve sonlu elemanlar yönteminin başarılı bir şekilde birlikte kullanılabilirliğini göstermişlerdir.

Ahmad ve Thambiratnam [63] doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, aksenal darbe yükü altında köpük dolgulu konik tüplerin enerji sönümleme ve dinamik davranışı üzerine malzeme geometrisi ve yükleme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda köpük dolgunun deformasyon işlemini kararlı hale getirdiği ve böylece enerji sönümleme kapasitesini artırdığı görülmüştür. Başka bir çalışmada [64] ise cidar kalınlığı, köpük yoğunluğu ve koniklik açısı gibi parametrelerin etkilerini incelendi ve köpük dolgulu konik tüplerin kullanımının önemine vurgu yapmışlardır. Başka bir çalışmada [65] köpük dolgulu konik tüplerin aksenal yük altındaki dinamik simülasyonlarını sonlu elemanlar programı LS-DYNA ile gerçekleştirmişlerdir. Tüpler için kabuk elemanlar köpük içinse solid elemanlar kullanmışlardır. Gharmian vd., [50] boş ve köpük dolgulu konik tüplerin çarpışma performansını incelerken sayısal analizler için ABAQUS sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Sonuçta tahmin edilen çarpma kuvveti ve çökme şekilleri gerçeği ile karşılaştırıldığında mühendislik açısından kabul edilebilir bir uyum gözlenmiştir. Ayrıca boş ve köpük dolgulu tüpler için enerji sönümleme karşılaştırılmış ve dolgu kullanılan tüplerde enerji sönümleme karakteristiğinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

1.4.5. Tailor-welded Tüplerin Enerji Sönümleme Özellikleri

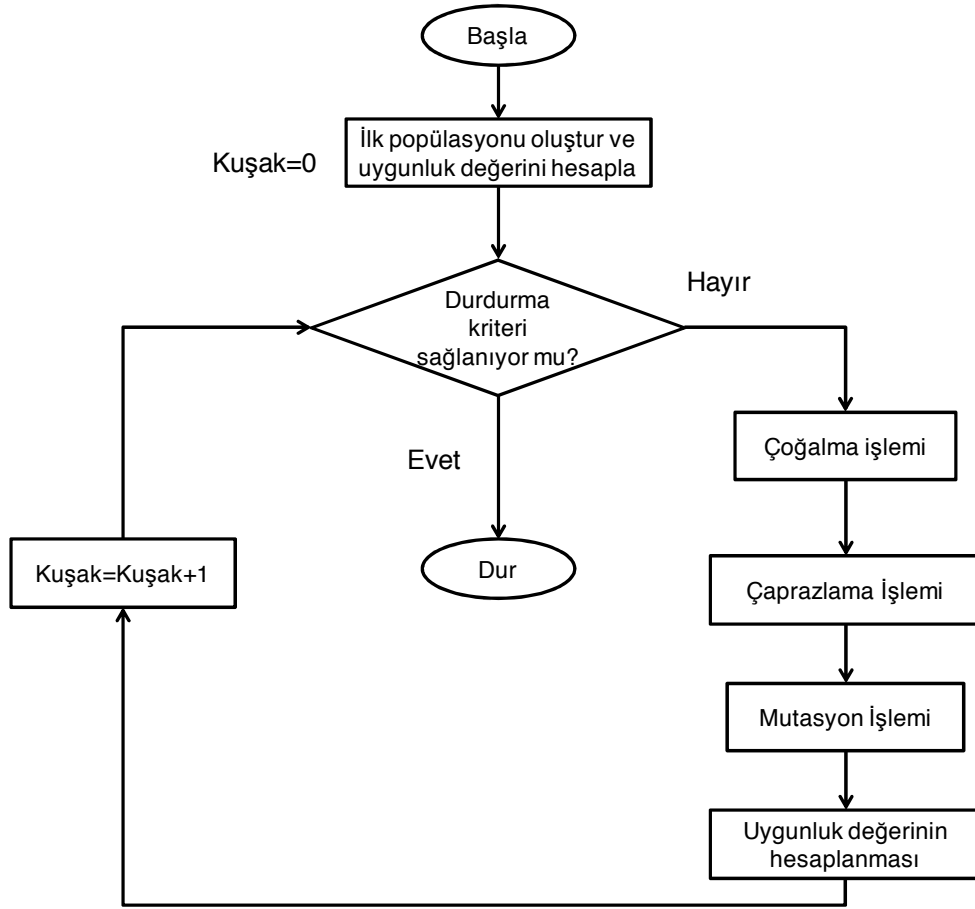
Tailor-welded tüplerin enerji sönümleme ve deformasyonu üzerine pek fazla çalışma yoktur. TWT için ilk çalışma olarak kabul edilen Zhang vd., [66] de tailor-welded tüplerin aksenal deformasyonu üzerine tüp kalınlığının etkisini incelenmiştir. Shi vd., [67] ise farklı kalınlıktaki tailor-welded tüplerin kaynak dikişinin sayısal modellenmesi üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Çalışmasında kaynak bağlantısı için kullanılan kiriş elemanı veya üç boyutlu eleman kullanımının deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuçta geometri ve malzeme özelliklerini barındıran kaynak dikişinin sonlu elemanlar modelinde son derece önemli olduğuna vurgu yapılmıştır. Gedikli [68] tailor-welded tüplerdeki geometri, malzeme özellikleri ve en boy oranı gibi parametrelerin tüplerin enerji sönümleme karakteristiğine etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Başka bir çalışmada [46] ise köpük dolgulu tüplerde başlangıç kuvvet, kuvvet verimliliği ve enerji sönümleme özellikleri üzerine kalınlığın, köpük yoğunluğunun, kaynak konumunun ve malzeme tipinin etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Sonuçta TWT' de başlangıç kuvvetin önemli ölçüde düştüğü ve köpük yoğunluğuna göre ise doğrusal bir artışın olduğu görülmüştür.

1.4.6. Enerji Sönümlenme Özelliklerinin Optimizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi

Optimizasyon kelime olarak “en iyiye ulaşma” anlamına gelir. Yani eldeki olanaklarla amaç fonksiyonunu en iyi noktaya taşımaktır. Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse optimizasyon bir fonksiyonun minimize veya maksimize edilmesi olarak tanımlanabilir. Modern çağda optimizasyonun kullanılmadığı bilim dalı yok gibidir. Özellikle mühendislik uygulamalarında çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında kısıtlamasız optimizasyon, kısıtlamalı optimizasyon, doğrusal programlama, doğrusal olmayan optimizasyon yöntemleri sayılabilir. Ayrıca optimizasyon yöntemlerinde genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, karınca-koloni optimizasyonu, yapay arı kolonisi optimizasyonu, yapay bağışıklık sistemi gibi sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır.

Günümüzde birçok karmaşık problemin çözümünde genetik algoritmalar, daha hızlı ve kolay çözüm yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu problemlerde bilhassa sert yöntemler yerine yumuşak optimizasyon teknikler kullanılmaktadır. Optimizasyon tekniklerinden olan genetik algoritmalar, fonksiyon optimizasyonu, mekanik öğrenme, çizelgeleme, hücresel üretim gibi alanlarda başarıyla kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, analitik olmayan metotlardandır. Genetik algoritmalar doğal seçim mekanizmalarından esinlenerek geliştirilmiştir. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritma yalnızca amaç fonksiyonuna gerek duyar; çözüm uzayının tamamını incelemeyiz, belli bir bölümünü inceleyerek çözüme daha çabuk ulaşır. Önemli bir üstünlükleri de oluşan popülasyonu eş zamanlı olarak inceleyerek en iyi yerel çözümlere ulaşmasıdır. Genetik algoritmaların problemin çözümündeki başarısına karar vermedeki en önemli faktör, problemin çözümünü temsil eden bireylerin gösterimidir. Popülasyon içindeki her bireyin problem için çözüm olup olmayacağına karar veren bir uygunluk fonksiyonu vardır. Uygunluk fonksiyonundan dönen değere göre yüksek değere sahip olan bireylere, popülasyondaki diğer bireyler ile çoğalmaları için fırsat verilir. Bu bireyler çaprazlama işlemi sonunda yeni bireyler üretirler. Yeni bireyler kendisini meydana getiren ebeveynlerin (anne, baba) özelliklerini taşır. Yeni bireyler üretilirken düşük uygunluk değerine sahip bireyler daha az seçileceğinden bu bireyler bir süre sonra popülasyon dışında bırakılırlar. Yeni popülasyon, bir önceki popülasyonda yer alan uygunluğu yüksek bireylerin bir araya gelip çoğalmalarıyla oluşur. Aynı zamanda bu popülasyon, önceki popülasyonun uygunluğu yüksek bireylerinin sahip olduğu özelliklerin büyük bir kısmını içerir. Böylelikle, pek çok

nesil aracılığıyla iyi özellikler popülasyon içerisinde yayılır ve genetik işlemler aracılığıyla da diğer iyi özelliklerle birleşir. Uygunluk değeri yüksek olan ne kadar çok birey bir araya gelip yeni bireyler oluşturursa arama uzayı içerisinde o kadar iyi bir çalışma alanı elde edilir. Probleme ait en iyi çözümün bulunabilmesi için bireylerin gösterimi doğru bir şekilde yapılmalı, uygunluk fonksiyonu etkin bir şekilde oluşturulmalı ve doğru genetik işlemciler seçilmelidir.



Şekil 1.7. Genetik algoritma akış diyagramı [69].

Birçok uygulamada kullanılan genetik algoritma işlem adımları Şekil 1.7' de de verildiği gibi şu şekilde sıralanabilir.

- 1) Arama uzayındaki tüm muhtemel çözümler dizi olarak kodlanır.
- 2) Genellikle rastgele bir çözüm kümesi seçilir ve bu başlangıç popülasyonu olarak kabul edilir.

3) Her bir dizi için uygunluk değeri hesaplanır ve bulunan uygunluk değeri çözümün kalitesini temsil eder.

4) Bir grup dizi belirli bir olasılık değerine göre rastgele seçilip çoğalma işlemi gerçekleştirilir.

5) Yeni bireylerin uygunluk değerleri hesaplanarak, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulur.

6) Önceden belirlenen kuşak sayısı boyunca yukarıdaki işlemler devam ettirilir.

7) İterasyon, belirlenen kuşak sayısına ulaşıncaya işlem sona erdirilir Amaç fonksiyonuna göre en uygun olan dizi seçilir.

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

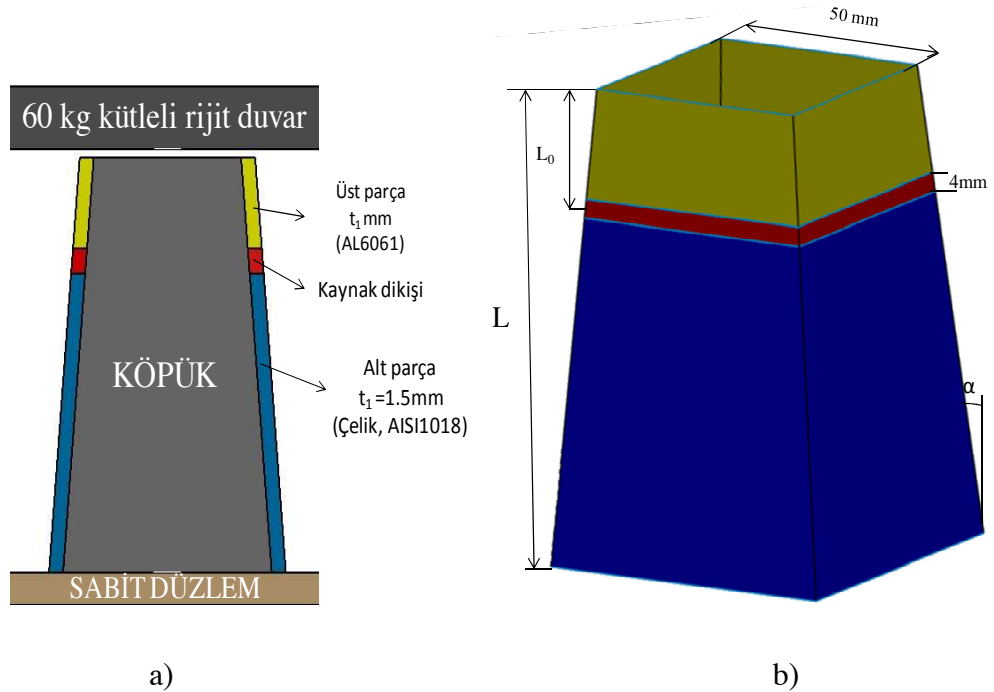
Bu çalışmanın amacı, boş ve köpük dolgululu kare kesitli tailor-welded tüplerin enerji sönmülleme özelliklerinin, çarpma kuvvet verimliliğinin ve BMK değerlerinin; malzeme tipi, farklı koniklik açısı, kaynak konumu, kalınlık ve köpük yoğunluğuna göre değişimlerini araştırmaktır. Malzeme tipi olarak tüpler için çelik alaşımı AISI 1018 ve alüminyum alaşımı AA6061 kullanılırken, köpük dolgu için alüminyum köpük malzemesi kullanılmıştır. Tüp için koniklik açısı, kaynak konumu ve köpük yoğunluğu sırasıyla; 0° - 10° , 0.25L-0.75L ve 100kg/m^3 - 800kg/m^3 aralığında alınmıştır. Çalışmalar optimizasyon modüllü LS-DYNA kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Köpük dolgululu TWT'lerin sayısal analizinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve düzgün parçacık hidrodinamiği (SPH) aynı anda kullanılmıştır. Optimizasyon çözümlerinde ileri beslemeli yapay sinir ağları ve genetik algoritma kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi; özgül enerjiyi ve kuvvet verimliliğinin maksimum, BMK değerini minimum (üst sınır 70 kN) olması için 10 örneklem nokta seçilerek yapılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Sayısal Çalışmalar

2.1.1. Tüp Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

Tailor-welded tüpler (TWT) farklı kalınlığa sahip tek bir malzeme veya birden çok malzemenin birleştirilmesiyle oluşturuldu. Şekil 2.1’de köpük dolgulu kare kesitli konik TWT’ nin geometrisi görülmektedir. Kare kesitli TWT’ nin üstte dış ölçüler sabit olup 50 mm x 50 mm dir ve boyu 100 mm’ dir. Üst parçanın kalınlığı (t_1) 0.5 mm ile 2.5 mm arasında değişmektedir. Alt parçanın kalınlığı sabit olup 1.5 mm dir. Kaynak dikişinin boyu 4 mm olup tüpün üst ucundan itibaren üç farklı mesafeye ($L_0=0.25L$, $L_0=0.50L$, $L_0=0.75L$) konumlandırılmıştır. Konikliğin etkisini incelemek için üç farklı koniklik açısında ($\alpha =0^\circ$, $\alpha =5^\circ$, $\alpha =10^\circ$) tüpler oluşturulmuştur.



Şekil 2.1. Kare kesitli bir TWT a) köpük dolgulu kesit alınmış ve b) üç boyutlu gösterimi

Bu çalışmada alaşımlı alüminyum malzemesi AL6061 ve soğuk çekilmiş AISI 1018 malzemeleri kullanılmıştır. Tüpler tek bir malzemeden veya iki farklı malzemeden yapıldığı düşünülmüştür. Tek malzemeli tüpler için “TWT-S” olarak ve iki farklı malzemeden oluşan tüpler için TWT-M tanımlaması kullanılmıştır. Yani TWT-S için alüminyum alaşımı AL6061 veya AISI1018 çeliği kullanılırken, TWT-M’ de üst parça daima AL6061 alaşımı alt parça ise çelik AISI1018 den kaynak edilerek birleştirildiği varsayılmıştır.

Sayısal analizlerde Johnson-Cook [70] malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli sıcaklık, şekil değiştirme sertleşmesi ve büyük deformasyon hızlarına maruz malzemeleri başarılı bir şekilde modelleyebilmektedir. Bu modelde gerilme fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\sigma_0 = \left[A + B(\epsilon_p)^n \right] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^m \right) \quad (2.1)$$

Burada A , B , C , n ve m Johnson-Cook malzeme modelindeki sabitler iken ρ , c_p ve T_m sırasıyla yoğunluk, özgül ısı ve erime sıcaklığıdır. Bu çalışmada kullanılan Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri Fish vd., [71] ve Sasso vd., [72] kaynaklarında alınmış olup Tablo 2.1’de verildiği gibidir. Burada, kaynak dikişinin mekanik özellikleri denklem 2.2’deki karışım kuralı kullanılarak türetilmiştir. Bu denklemde kaynak bölgesi için çelik malzemesinin alüminyum malzemesine göre daha az olduğu varsayılmıştır [73].

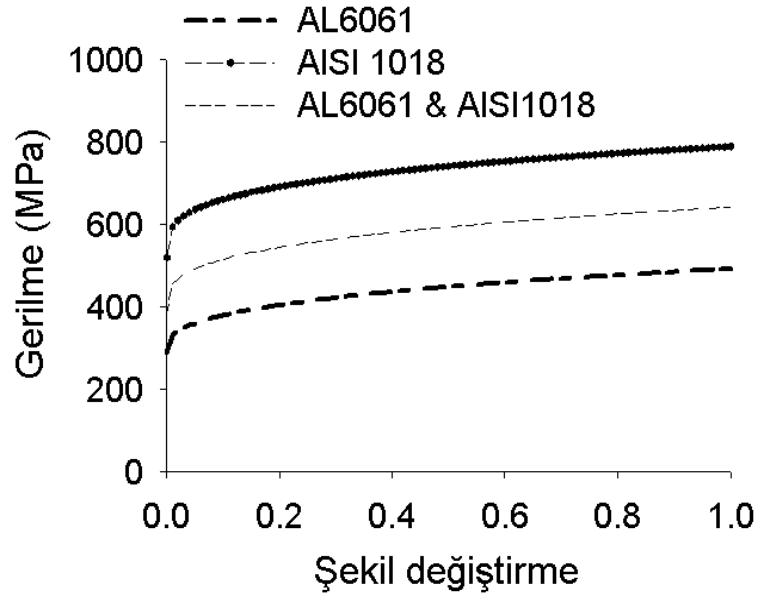
$$X_K = (0.6)X_{AL} + (0.4)X_{ST} \quad (2.2)$$

Burada “K, AL, ST” kısaltmaları sırasıyla kaynak dikişini, alüminyumu ve çelik malzemelerini göstermektedir.

Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan AL6061, AISI1018 ve AL6061&AISI1018 malzemelerinin doğrusal elastik özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri

Malzeme	Johnson-Cook Malzeme Sabitleri					Doğrusal Malzeme Özellikleri		
	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	E (MPa)	ρ (kg/m ³)	ν
AL6061	289.6	203.4	0,011	0,350	1,34	72	2850	0,3
AISI1018	520	269	0,0476	0,282	0,553	200	7850	0,3
AL6061&AISI1018	381,8	229,6	0,0256	0,323	1,136	123.2	4850	0,3

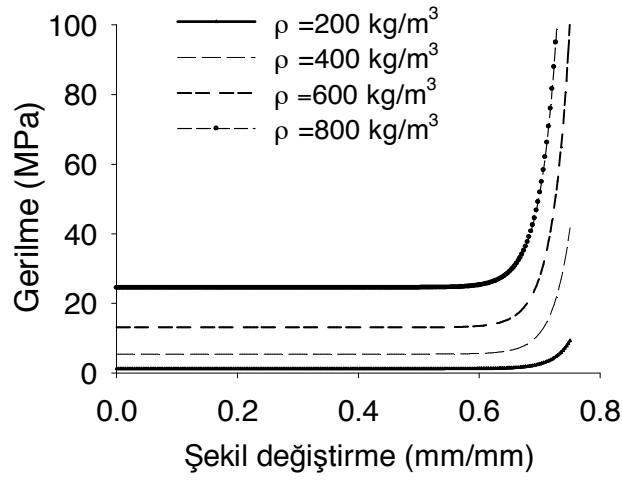
Şekil 2.2, referans sıcaklığında ve düşük şekil değiştirme hızındaki (0.001 s^{-1}) gerilme şekil değiştirme grafiğini göstermektedir. Grafikten de görülebileceği gibi kaynak bölgesinin değerleri alüminyum ve çelik değerleri arasında elde edilmiştir.



Şekil 2.2. Şekil değiştirme hızı 0.001 s^{-1} durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi

2.1.2. Köpük Malzemesinin Özelliği

Bu çalışmada kullanılan alüminyum köpük malzemesinin davranışı köpük yoğunluğuna göre Denklem 1.5' te verildiği gibidir. Şekil 2.4' den de görülebileceği gibi Denklem 1.5'de ki C ve m katsayıları alüminyum köpük için kaynak Hou vd., [74]' dan sırasıyla 564 MPa ve 2.17 olarak alınmıştır. Ayrıca alüminyum köpük malzemesi için gerilme-şekil değiştirme değerleri Tablo 2.2' de verildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Gerilme-şekil değiştirme grafiğinin köpük yoğunluğuna göre değişimi

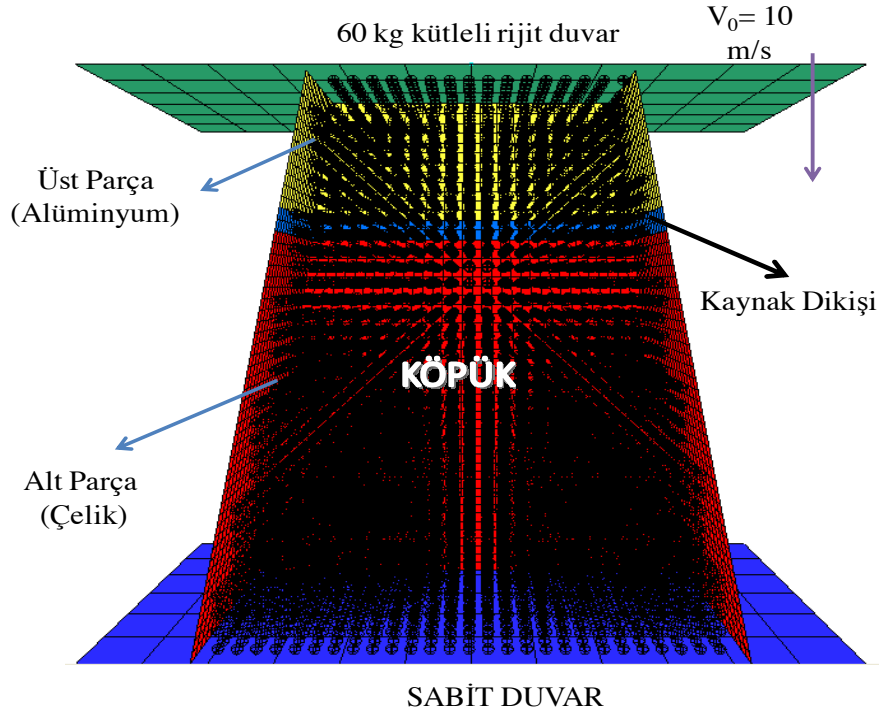
Tablo 2.2. Alüminyum köpüğe ait şekil değiştirme-gerilme değerleri [74].

Şekil değiştirme	0	σ_p/E	0.6	0.7	0.75	0.8
Gerilme	0	σ_p	σ_p	$1.35 \sigma_p$	$5\sigma_p$	$0.05 E$

2.1.3. Problemin SPH/Sonlu Elemanlar Modeli

Problemin sonlu elemanlar analizi için optimizasyon modüllü LS-DYNA [75] yazılımı kullanılmıştır. TWT bileşenleri (üst parça, kaynak dikişi ve alt parça) için LS-DYNA' da Johnson-Cook malzeme modeli (MAT 15) seçilmiştir. Bu malzeme modeli

termal ve yapısal analizlere uygundur. AL6061 ve AISI1018 malzemeleri için Johnson-Cook malzeme modelinde kullanılan sabitler Tablo 2.1’de verilmektedir. Şekil 2.4’ den de görüldüğü gibi köpük dolgulu tailor-welded tüpler için sonlu elemanlar ve SPH yöntemi bir arada kullanılmıştır. Boş tüpler için ise sadece SEY uygulanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde tüplerin tüm bölgeleri için (üst parça, kaynak bölgesi ve alt parça) 9 integrasyon noktalı Belytschko-Tsay [76] eleman formülasyonu kullanılmıştır. Sayısal analizinde kabuk eleman boyutları uygun çözüm için 2 mm x 2 mm alınırken, SPH noktaları arasındaki uzaklık sabit ve 3 mm olarak alınmıştır.



Şekil 2.4. Kare kesitli köpük dolgulu TWT' in SEY/SPH modeli

LS-DYNA’ da var olan köpük malzeme modelleri arasından *CRUSHABLE FOAM (*MAT 63) modeli daha doğru sonuçlar verdiği için seçilmiştir. Elastisite modülü $E=63.75$ GPa ve poisson oranı 0.0 olarak alınmıştır. Rijit duvarın malzemesi için *RIGID (*MAT 20) malzeme modeli kullanılmıştır. Tüp darbe yüküne maruz kaldığından rijit plaka üzerinde 60 kg kütleli bir MASS elemanı atanmıştır. Bu rijit düzleme *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY keywordu kartı kullanılarak 10 m/s başlangıç hızı

verilmiştir. Alttaki sabit duvarı içinse *RIGIDWALL içinde *GEOMETRIC_FLAT kullanılmıştır.

Bu çalışmada model için iki çeşit temas algoritması uygulanmıştır. Bunlardan biri olan *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, analiz sırasında tüpün kendi içine geçişleri önlemek için kullanılmıştır. Diğer temas algoritması olarak *CONTACT_NODE_SURFACE kartı; tüp-köpük, tüp-rijit plaka ve rijit-köpük ara yüzleri için tanımlanmıştır. Burada statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,1 ve 0,2 alınmıştır. Üst parçanın kalınlığı 0,5-2,5 mm arasında değiştiğinden tüp ve köpük arasında 1,25 mm boşluk bırakılmıştır.

LS-DYNA' da farklı değişkenler tanımlandığından analizleri gerekli yerde durdurmak için iki durdurma kriteri *CONTROL_TERMINATION kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Bunlardan biri rijit duvarın kinetik enerjisinin sıfıra yakın olduğu bir anda (0,01 m/s) veya üst rijit duvarın deformasyon mesafesi 50 mm' ye ulaştığında analizler durdurulmuştur.

2.2. Çok Kriterli Optimizasyon

Bu çalışmada optimizasyon çalışması için özgül enerji sönmüleme (SEA), başlangıç maksimum kuvveti (BMK), ortalama kuvveti (F_{ORT}) ve çarpma kuvveti verimliliği (CFE) çarpma performansı kriterleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$SEA = \frac{E_{\text{toplama}}}{M_{\text{TOPLAM}}} = \frac{\int_0^{\Delta} F(x)dx}{M} \quad (2.3)$$

$$F_{ORT} = \frac{E_{\text{TOPLAM}}}{\Delta} \quad (2.4)$$

$$CFE = \frac{F_{ORT}}{BMK} \quad (2.5)$$

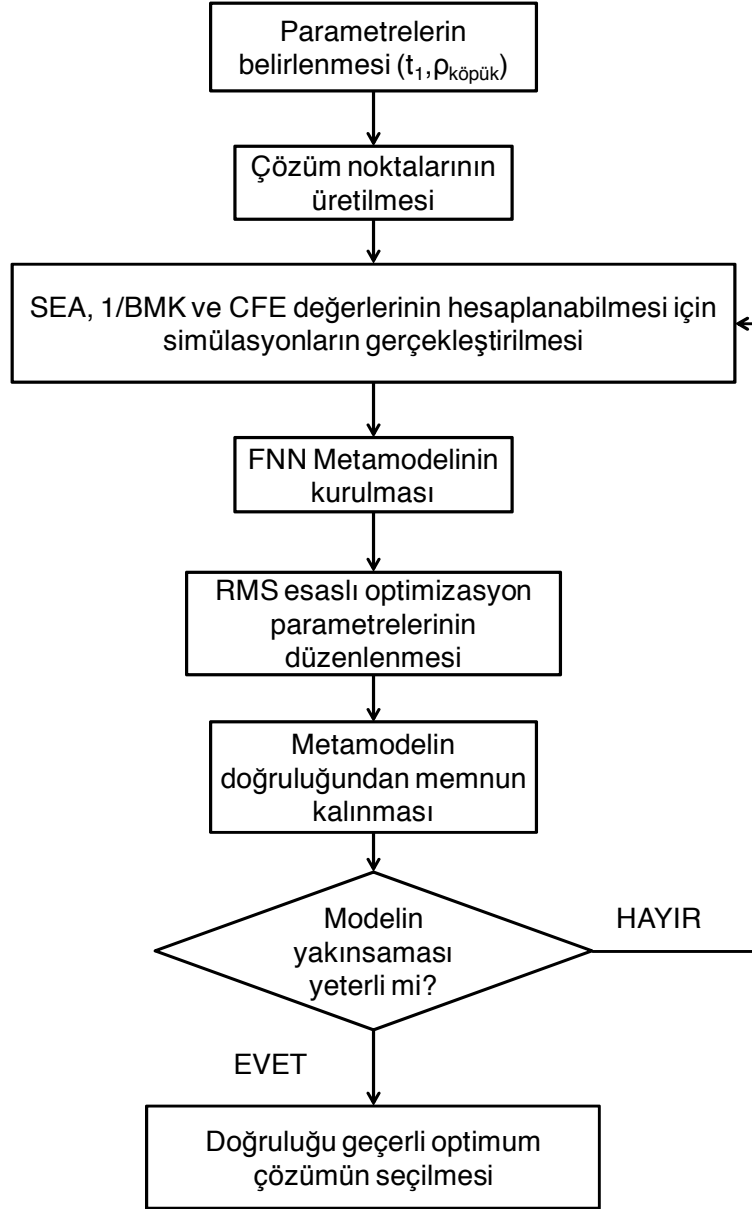
$$\begin{aligned}
M_{\text{TOPLAM}} = & 4 \left\{ \left[0.05 + (L_0 - 0.002) \tan \alpha \right] \left(\frac{L_0 - 0.002}{\cos \alpha} \right) \right\} \rho_1 t_1 + \\
& 4 \left\{ \left[0.05 + (L + L_0 + 0.002) \tan \alpha \right] \left(\frac{L - L_0 - 2}{\cos \alpha} \right) (0.015) \rho_2 \right\} \\
& 4 \left\{ \left[0.05 + L_0 \tan \alpha \right] \left(\frac{0.004}{\cos \alpha} \right) \left(\frac{t_1 + 0.015}{2} \right) (0.6 \rho_1 + 0.4 \rho_2) \right\} + \\
& \rho_{\text{köpük}} \left(\frac{0.1}{3} \right) \left[0.0475^2 + (0.0475 + 2(0.1) \tan \alpha)^2 + \sqrt{(0.0475 + 2(0.1) \tan \alpha)} \right]
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Burada E_{TOPLAM} toplam sönmölenen enerjiyi, $F(x)$ aksene çarpma kuvvetini, M_{TOPLAM} köpük dolgululu tailor-welded tüpün toplam kütesini, t_1 üst parçanın kalınlığını göstermektedir. ρ_1 , ρ_2 ve $\rho_{\text{köpük}}$ sırasıyla üst, alt parça ve köpüğün yoğunludur. Tailor-welded tüplerin içi boş ise $\rho_{\text{köpük}}=0$ 'dur.

Çarpma esnasında aşırı yüksek başlangıç maksimum kuvveti (BMK), ortalama kuvvet (F_{ORT}) ve maksimum kuvvet (F_{MAKS}) hayatı önem taşır. Bu yüzden başlangıç maksimum kuvvetin düşük olması istenirken SEA ve CFE' nin yüksek olması istenir [77, 78, 79].

Bu çalışmada SEA, 1/BMK ve CFE değerlerini maksimize edebilecek en iyi üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğu aranmıştır. Burada et kalınlığı (t_1) 0.5mm ve 2.5 mm, köpük yoğunluğu ($\rho_{\text{köpük}}$) ise 100 kg/m³ ile 800 kg/m³ arasında alınmıştır. Problemin optimizasyon modelinde kullanılan çeşitli parametreler Denklem 2.7'da, akış şeması ise Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

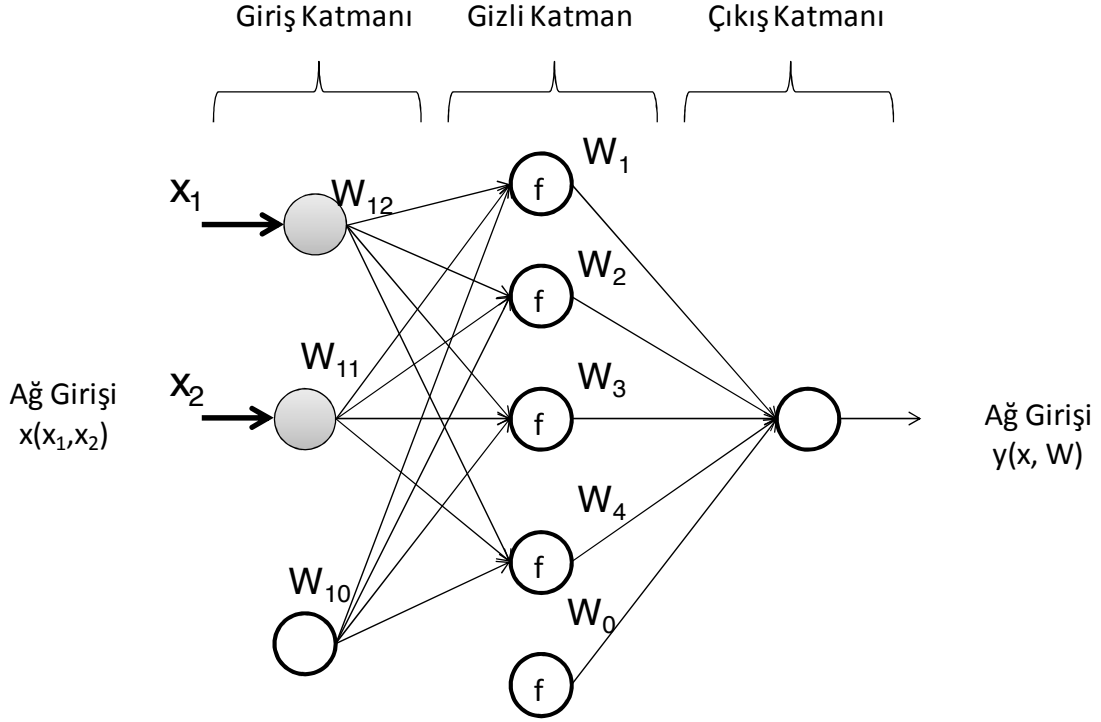
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \left(\text{SEA} (t_1, \rho_{\text{köpük}}); \frac{1}{\text{BMK}} (t_1, \rho_{\text{köpük}}); \text{CFE} (t_1, \rho_{\text{köpük}}) \right) \\ \text{KISITLAYICILAR} \left\{ \begin{array}{l} \text{BMK} (t_1, \rho_{\text{köpük}}) \leq 70 \text{ kN} \\ \mathbf{F}_{\text{Max}} (t_1, \rho_{\text{köpük}}) \leq 200 \text{ kN} \\ 0.5 \text{ mm} \leq t_1 \leq 2.5 \text{ mm} \\ 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_{\text{köpük}} \leq 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{array} \right. \end{array} \right\} \tag{2.7}$$



Şekil 2.5. TWT için optimizasyon akış şeması [80].

Yapay sinir ağları doğrusal olmayan problemlerin modellenmesinde güçlü bir araçtır [81]. Bu çalışmada tüplerin optimizasyon analizleri için ileri beslemeli sinir ağları (FNN) kullanılmıştır. İleri sinir ağları analizinde sunulan veriler eğitim ve test gibi ikiye ayrılmaktadır. Eğitim kısmı ağı eğitmek için kullanılmaktadır. Test kısmında ise eğitilen ağın performansı belirlenmektedir. Bu nedenle bu problem için en iyi ağın seçimi, test kısmına aittir. Bu yüzden yapay sinir ağları, optimizasyon analizlerinde yaklaşım fonksiyonları için bir vekil model olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.6' da gösterildiği gibi

ileri yapay sinir ağı yönteminde her bir birim kendi girişlerinin etkilenmiş ağırlıklarını toplar (Denklem 2.8) ve çıkış üretebilmek için bu değerleri bir transfer fonksiyonu (Denklem 2.9) yardımıyla sonraki birime iletirler.



Şekil 2.6. İki girişli yapay sinir ağı [80].

Şek. 2.6'da \$f\$ aktivasyon fonksiyonuna sahip ve iki girişli kapalı gizli katmanlı şematik bir sinir ağı gösterilmektedir. Ara (gizli) tabaka genelde sigmoid fonksiyondur, giriş ve çıkış birimleri ise genelde doğrusal olmaktadır.

$$\hat{y}(x, W) = W_0 + \sum_{h=1}^H W_h f(W_{h0} + \sum_{k=1}^K W_{hk} x_k) \quad (2.8)$$

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (2.9)$$

Burada \$f(x)\$ aktivasyon fonksiyonudur.

Örneklem noktalarının üretimi için tasarım alanında amaç ve kısıt fonksiyonlarının formüle edilmesi gerekir. Örnek noktaları sayısı, ikinci derece yaklaşım için en az \$3^n\$

noktaya (n değişken sayısıdır) sahip olması gerekir [80]. Bu çalışmada örneklem sayısı 10 olarak seçilmiştir. Çünkü üst parçanın kalınlığı ve köpük yoğunluğu gibi iki değişken mevcuttur ve optimum örneklem sayısı en az 9 (3^2) olmalıdır. Her bir L_0/L değeri için kullanılan boş ve dolu tüplerdeki numune noktaları ve bunların malzeme özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. $L_0=0.25L$, $L_0=0.5L$ ve $L_0=0.75L$ için boş ve dolu tüplerde kullanılan optimizasyon işleminde kullanılan örnekler ve malzeme özellikleri

Malzeme		$L_0=0.25L$ $L_0=0.50L$ $L_0=0.75L$		
Üst Parça	Alt Parça	Örneklem Nokta	Üst Parça Kalınlığı (mm)	Köpük yoğunluğu (kg/m^3)
AL6061 (I) AL6061 (II) AISI1018 (III)	AL6061 (I) AISI1018 (II) AISI1018 (III)	1	0.5	100
		2	1.8	449
		3	0.5	503
		4	0.5	800
		5	2.5	598
		6	2.48	288
		7	1.9	800
		8	1.1	302
		9	1.2	651
		10	1.8	120
	Boş Tüpler			
	1	0.5	-	
	2	1.8	-	
	3	0.5	-	
	4	0.5	-	
	5	2.5	-	
	6	2.48	-	
	7	1.9	-	
	8	1.1	-	
	9	1.2	-	
10	1.8	-		

Seçilen örnek sayısı yapay sinir ağları modelinin doğrulunu değerlendirmek için yeterli olmayabilir. Bu nedenle modelin doğruluğunu değerlendirmek için Denklem 2.10'da verilen R-kare (R^2) bağıntısı kullanılmıştır. R^2 toplam varyansa göre göreceli bir varyanttır ve regresyon analizlerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Gösterge değeri 1 (bir) ise hedeflenen ile elde edilen sonuç arasında mükemmel bir tutarlılık vardır demektir [80].

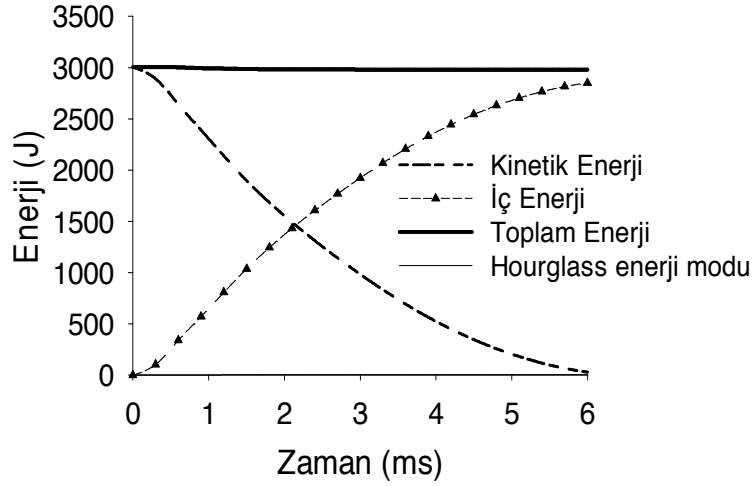
$$R^2 = \frac{\sum_i^P (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i^P (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.10)$$

Burada P örnek sayısını, \hat{y}_i tahmini değeri, \bar{y} ortalama değeri, y_i gerçek değeri göstermektedir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Modelin Doğruluğu

Sonlu elemanlar yönteminde hourglass enerji sayısal analizde kullanılan ağın doğruluğu için iyi bir göstergedir. Eğer bu enerji, iç enerji değerinin % 5'ten daha küçük kalıyorsa ağ kalitesinin yeterli olduğu söylenebilir [79]. Şekil 3.1' de köpük dolgulu tailor-welded tüpün kinetik enerji, iç enerji, hourglass enerji ve toplam enerji eğrileri gösterilmiştir. Şekil 3.1' den de görülebileceği gibi hourglass enerji miktarı bütün analizlerde iç enerji miktarının %1'inin altında elde edilmiştir. Sonuç olarak problemin sonlu elemanlar/SPH modelindeki ağ boyutları ve düzgün hidrodinamik parçacıkları arasındaki uzaklık köpük dolgulu tüpler için uygun olmuştur. Bundan dolayı bütün analizlerde aynı özellikler kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Köpük dolgulu TWT için enerji zamana bağlı eğrileri

3.2. İleri Beslemeli Sinir ağlar (FNN) Modelinin Doğruluğu

Optimizasyon çözümlerinin doğruluğunu kontrol etmek için SEA, BMK, F_{ORT} ve F_{MAKS} değerlerine bakılabilir [80]. Problemden optimizasyon modeli olarak kullanılan ileri beslemeli sinir ağların doğruluğu için bu değerlerin % 90' in üzerinde olması gerekir. Tablo 3.1.'de SEA, BMK, F_{ORT} ve F_{MAKS} değerleri için elde edilen R^2 değerleri verilmektedir. Tablodan bu değerlerin genelde 0.90'in üzerinde olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 3.1. Optimizasyon analizi sonucunda elde edilen düz tüplere ait ($\alpha=0^\circ$) R^2 değerleri.

Dolgu	L_0/L	Malzeme	SEA	$F_{(BMK)TOPLAM}$	$F_{(ORT)TOPLAM}$	$F_{(MAKS)TOPLAM}$
VAR	0.25	AL6061	0.998	1.000	0.973	0.999
		AL6061&AISI1018	0.971	1.000	0.987	0.997
		AISI1018	0.978	1.000	0.999	0.987
	0.50	AL6061	0.999	1.000	0.982	0.999
		AL6061&AISI1018	0.984	1.000	0.998	0.996
		AISI1018	0.95	1.000	0.982	0.993
	0.75	AL6061	0.999	1.000	0.988	0.997
		AL6061&AISI1018	0.994	1.000	0.988	0.995
		AISI1018	0.996	1.000	0.99	0.992
YOK	0.25	AL6061	0.977	1.000	0.991	0.999
		AL6061&AISI1018	0.995	1.000	0.986	0.999
		AISI1018	0.980	1.000	0.986	0.992
	0.50	AL6061	0.995	1.000	0.995	1.000
		AL6061&AISI1018	0.905	1.000	0.996	0.998
		AISI1018	0.996	1.000	0.995	1.000
	0.75	AL6061	0.969	1.000	0.996	0.987
		AL6061&AISI1018	0.996	1.000	0.999	0.991
		AISI1018	0.995	1.000	0.995	0.996

Tablo 3.2.TWT-M farklı koniklik açıları için ($\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$) optimizasyon analizi sonucunda elde edilen R^2 değerleri.

Dolgu	L_0/L	Koniklik Açısı	SEA	$F_{(BMK)TOPLAM}$	$F_{(ORT)TOPLAM}$	$F_{(MAKS)TOPLAM}$
VAR	0.25	$\alpha=0^\circ$	0.971	1.000	0.987	0.997
		$\alpha=5^\circ$	0.974	0.991	0.999	0.985
		$\alpha=10^\circ$	0.999	0.997	0.904	0.984
	0.50	$\alpha=0^\circ$	0.984	1.000	0.998	0.996
		$\alpha=5^\circ$	0.992	0.993	0.965	0.934
		$\alpha=10^\circ$	0.999	0.996	0.989	0.960
	0.75	$\alpha=0^\circ$	0.994	1.000	0.988	0.995
		$\alpha=5^\circ$	1.000	0.991	0.996	0.999
		$\alpha=10^\circ$	0.931	0.997	0.987	0.948
YOK	0.25	$\alpha=0^\circ$	0.995	1.000	0.986	0.999
		$\alpha=5^\circ$	0.997	1.000	0.994	0.996
		$\alpha=10^\circ$	0.989	0.977	0.909	0.940
	0.50	$\alpha=0^\circ$	0.905	1.000	0.996	0.998
		$\alpha=5^\circ$	0.92	0.996	0.996	0.992
		$\alpha=10^\circ$	0.987	1.000	0.992	1.000
	0.75	$\alpha=0^\circ$	0.996	1.000	0.999	0.991
		$\alpha=5^\circ$	0.979	1.000	0.992	0.995
		$\alpha=10^\circ$	0.97	1.000	0.999	1.000

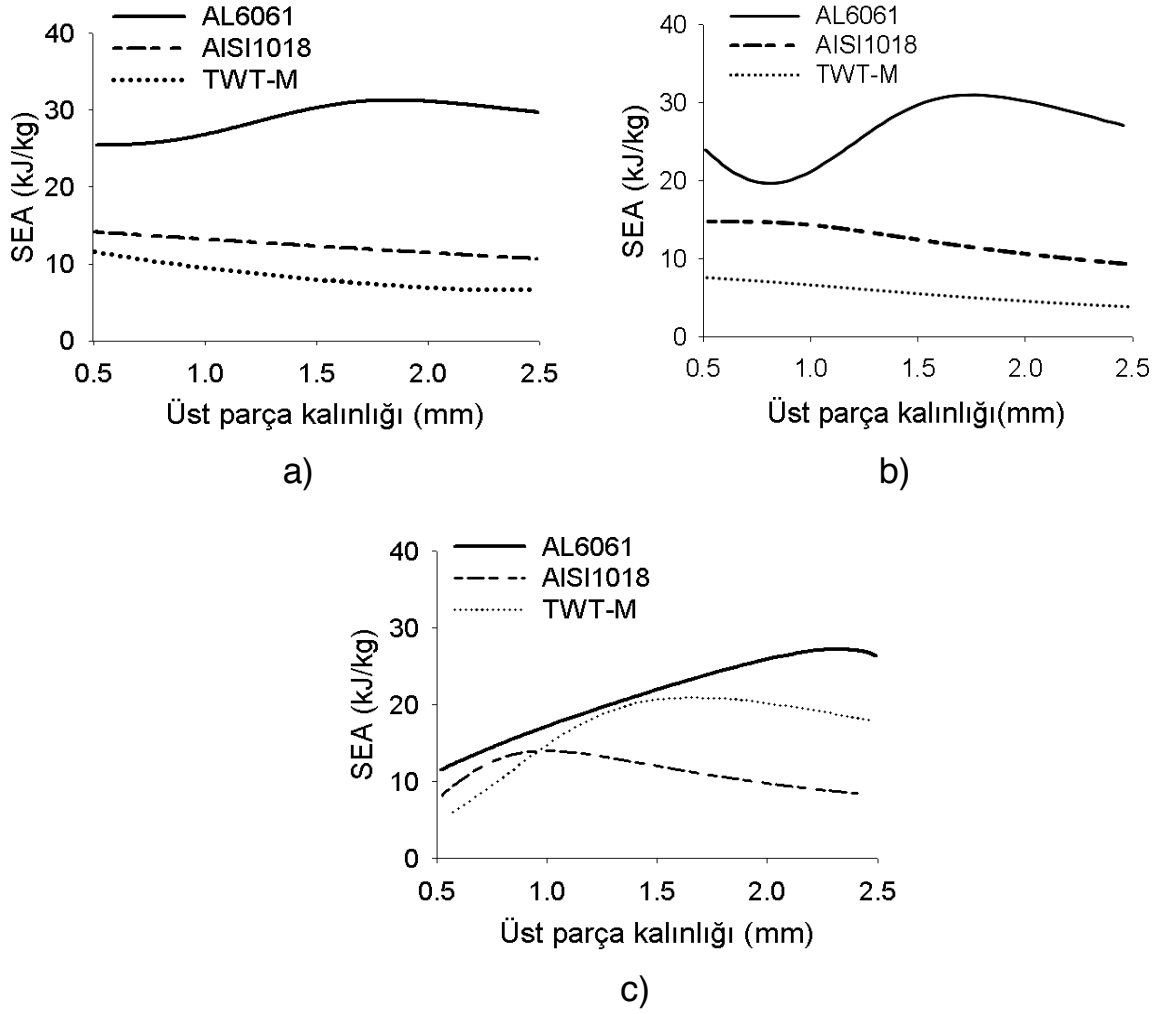
3.3. İçi Boş Tüplerde Kaynak Bağlantısının Konumunun ve Üst Parça Kalınlığının SEA, Başlangıç Maksimum Kuvvet (BMK) ve CFE Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.2' de farklı kaynak bölgelerindeki ($L_0/L=0.25, 0.50$ ve 0.75) tüplerin üst parça kalınlığına göre özgül enerji sönmleme miktarı değişimi görülmektedir. Aşağıdaki grafiklerde gösterildiği gibi AL6061 malzemesinin sönmlediği özgül enerji miktarı diğerlerine göre daha yüksektir. Bunun nedenlerinden biri çalışmada kullanılan alüminyum alaşımının yoğunluğunun düşük olmasıdır. Kaynak bölgesi 0.25 'te iken 25.4 kJ/kg ' dan başlar ve kalınlık değeri 1.93 mm ' de maksimum değeri olan 31.9 kJ/kg değerine ulaşır buradan kalınlık arttıkça daha azalmaktadır. AISI1018 ve TWT-M malzemeleri için ise sırasıyla 14.1 ve 11.6 kJ/kg değerlerinden başlayarak kalınlık arttıkça düşmektedir. Benzer şekilde kaynak bölgesi 0.50 'de iken AISI1018 ve TWT-M malzemeleri için üst parça

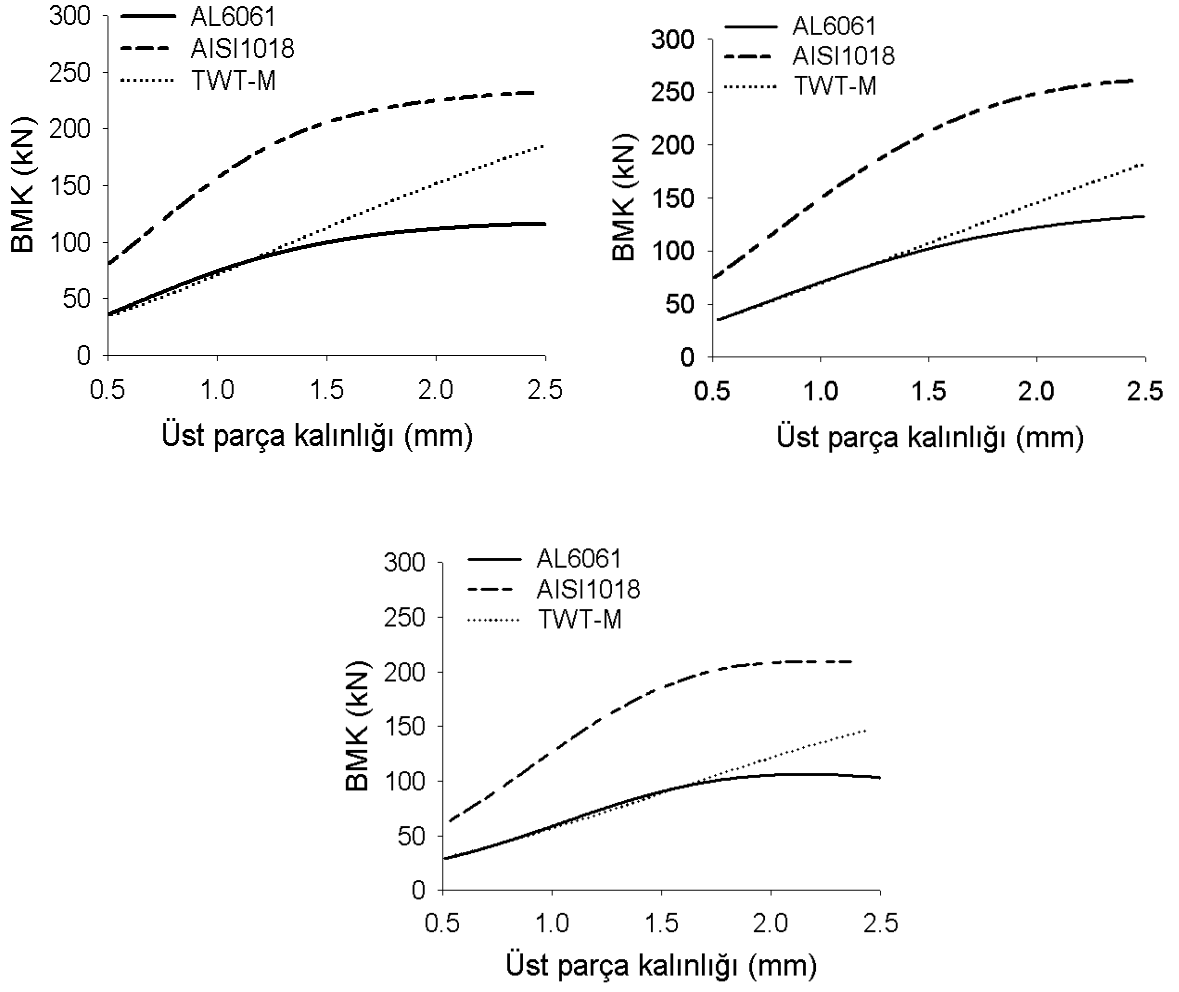
kalınlığı arttıkça sönümlenen özgül enerji miktarı azalmaktadır. AL6061 malzemesi için ise kalınlık değeri 1.77 mm' de maksimum değerine ulaşmaktadır ve daha sonra kalınlık arttıkça düşmektedir. Kaynak bölgesi 0.75'te iken AL6061 için kalınlık değeri 2.4 mm' ye kadar arttıkça sönümlenen enerji değerinin arttığı ve sonra düştüğü görülmektedir.

Şekil 3.3' te ise AL6061, AISI1018 ve TWT-M farklı kaynak bölgelerindeki ($L_0/L=0.25, 0.50$ ve 0.75) tüplerin üst parça kalınlığına göre başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değişim grafikleri verilmektedir. Kaynak bölgesinin her üç pozisyonda da başlangıç maksimum kuvvetinin en fazla AISI1018 malzemesinde en az ise AL6061 malzemesinde olduğu görülmüştür. Çünkü AISI1018 malzemesinin mukavemet değerleri yüksektir. TWT- M malzemesi için ise 0.25, 0.5 ve 0.75 kaynak bölgelerinde başlangıç maksimum kuvveti sırasıyla 35.8, 35.4 ve 32.4 kN değerlerinden başlayarak kalınlıkla artmaktadır. AL6061 ve AISI1018 tüpleri için kalınlıkla belli bir değere kadar artmakta daha sonra da sabit kalmaktadır.

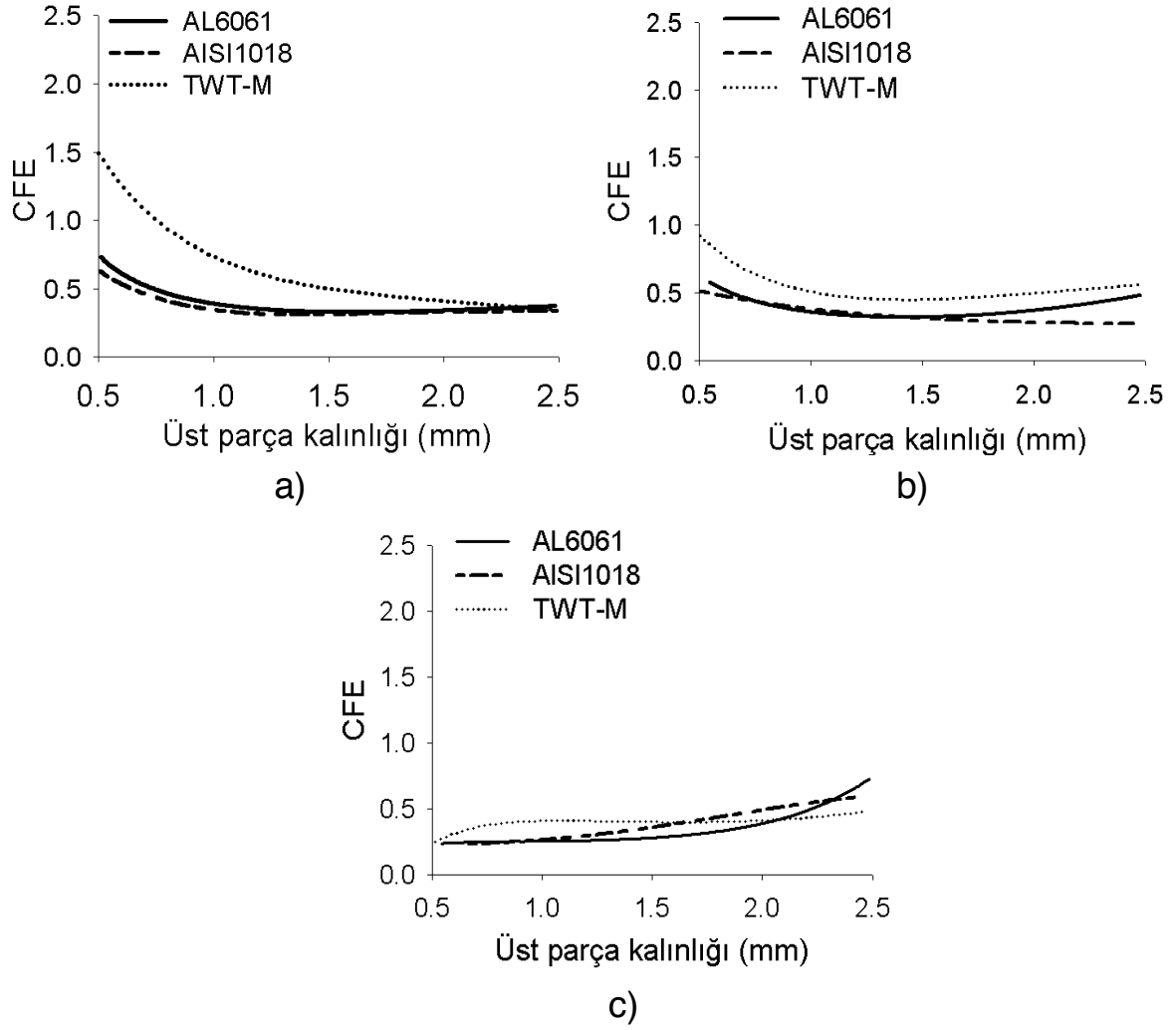
Şekil 3.4'te ise AL6061, AISI1018 ve TWT-M farklı kaynak bölgelerindeki ($L_0/L=0.25, 0.50$ ve 0.75) tüplerin üst parça kalınlığına göre çarpma kuvveti verimliliği (CFE) değişimi gösterilmiştir. Kaynak pozisyonu 0.25'te iken TWT-M malzemesinin başlangıç maksimum kuvveti Şekil 3.4a'da sürekli arttığından 1.5 değerinden başlayarak CFE değeri 0.5'e kadar düşmektedir. AL6061 ve AISI1018 için ise sırasıyla 0.76 ve 0.61 değerlerinden başlayarak azalma gerçekleşmektedir 0,5 değerine ulaşmaktadır. Şekil 3.4b'de görüldüğü gibi 0.50 kaynak pozisyonunda TWT-M değeri CFE değeri 1'den başlayarak 0.49 değerine inmektedir ve buradan artarak 0.55'e çıkmaktadır. AISI1018 için ise 0.5'ten başlayarak kalınlığın azalmasıyla 0.3'e düşmektedir. Ayrıca, 0.75 kaynak konumu için CFE değeri tüm tüpler için 0.4-0.6 aralığında olduğu görülmektedir (Şekil 3.4c). Kaynak konumunun 0.75 olduğu durum dışında, 1.5 mm üstü kalınlıklarda tailor-welded tüpler CFE değerleri için önemli avantajlar sağlamaktadır. Çünkü ortalama kuvvet değeri alttaki çelik malzemesinde yüksektir veya BMK daima alüminyumla düşük tutulmaktadır.



Şekil 3.2. İçi boş tüpler için özgül enerji sönmleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



Şekil 3.3. İçi boş tüpler için başlangıç maksimum kuvvetinin (BMK) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



Şekil 3.4.İçi boş tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.

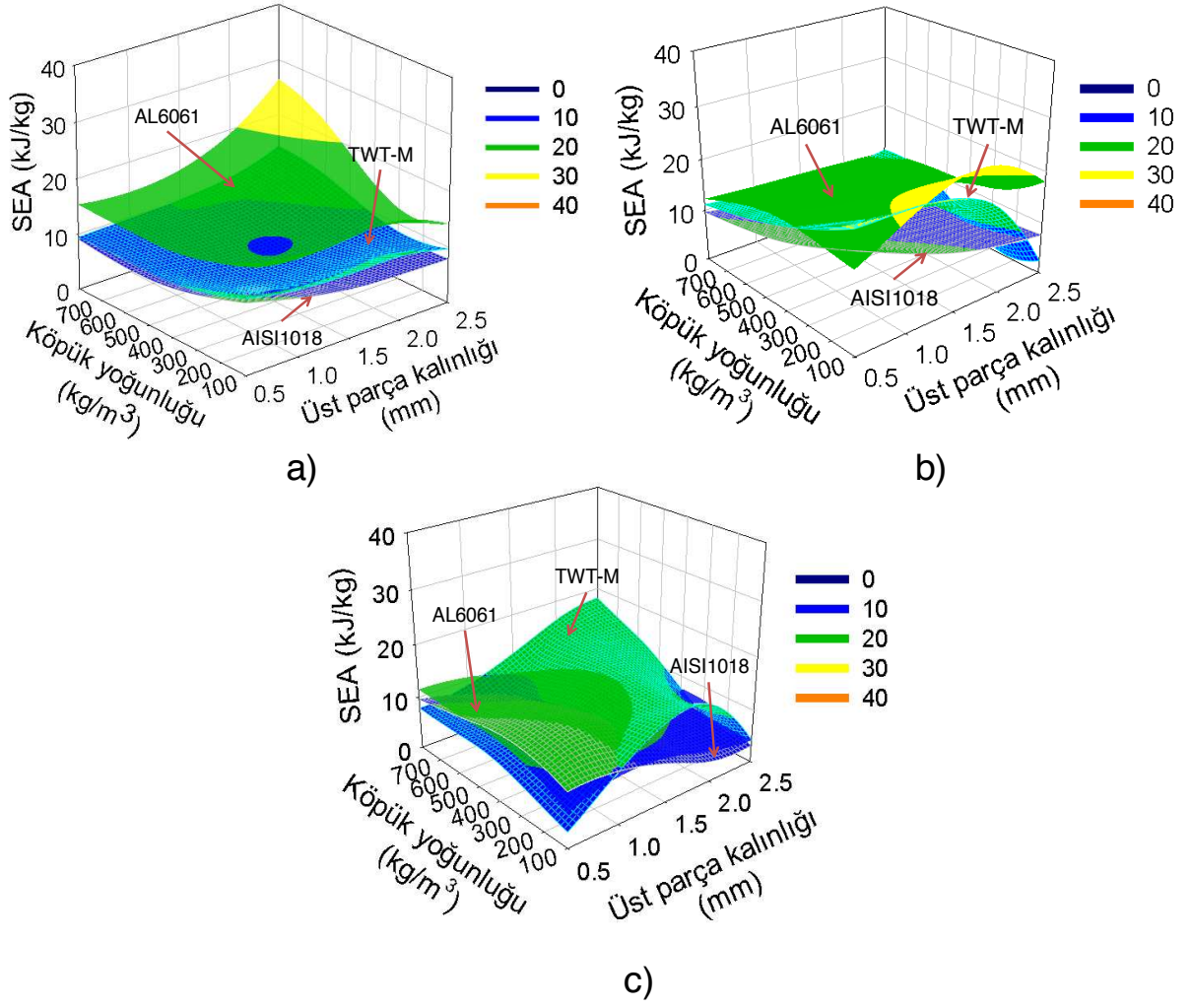
3.4. Köpük Dolgulu Tüplerde Kaynak Bölgesi Yerleşiminin ve Üst Parça Kalınlığının SEA, Başlangıç Maksimum Kuvvet (BMK) ve CFE Üzerindeki Etkisi

Şekil.3.5' te tüpün üst kısmının kalınlığı ve köpük yoğunluğunun SEA' daki değişim görülmektedir. Grafiklerde SEA değerlerinin AL6061'den yapılmış tüplerde daha yüksek iken AISI1018'den yapılmış tüplerde ise daha küçüktür. Fakat üst parça kalınlığının 2-2.5 mm ve köpük yoğunluğunun $600-800 \text{ kg/m}^3$ olduğu bölgede SEA değerleri AISI1018'den yapılmış tüplerde daha yüksektir (Şekil 3.5a ve 3.5b). Köpük yoğunluğunun minimum ve kalınlığın maksimum olduğu yerde özgül enerji sönmleme değeri maksimumdur (Şekil

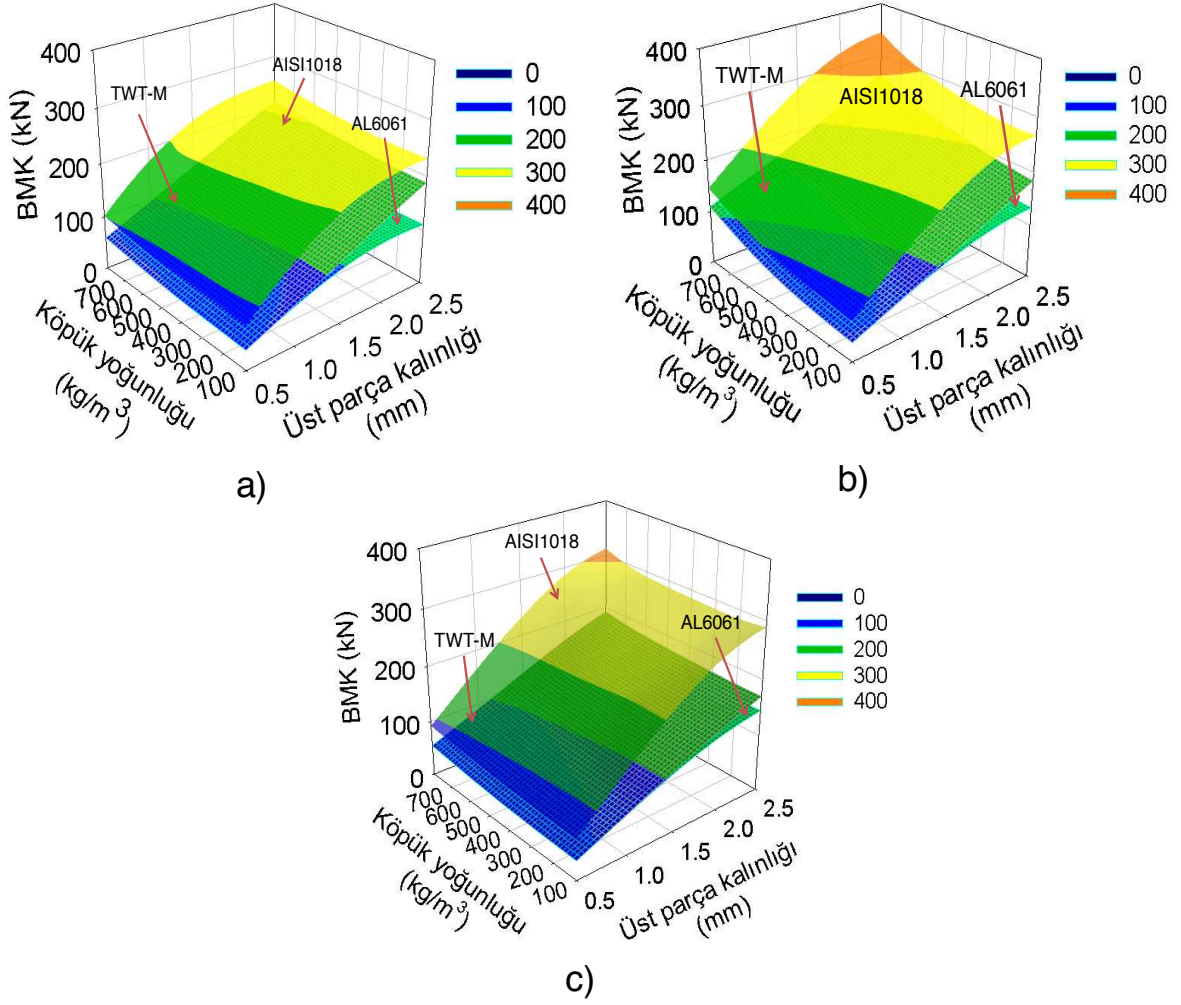
3.5a). Ayrıca Şekil 3.5a' da köpük yoğunluğunun artmasıyla TWT-M' in özgül enerji sönmleme kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Şekil 3.5b'te köpük yoğunluğunun ve üst parça kalınlığının artmasıyla TWT-M için özgül enerji sönmleme değeri maksimuma ulaşmaktadır. Ayrıca aşağıdaki üç grafikten köpük yoğunluğunun artmasıyla AL6061 malzemeli tüpün özgül enerji sönmleme miktarının azaldığı söylenebilir. Dolgu köpüğü yoğunluğu SEA önemli ölçüde değerlerini etkiler. Bütün tüpler için yüksek köpük yoğunluğu ($400-800 \text{ kg/m}^3$) ve yüksek kalınlıklarda (1.5-2.5 mm) toplam kütle arttığından özgül enerji sönmleme miktarını azaltmaktadır.

Şekil 3.6' da köpük dolgulu köpüklerde üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna bağlı olarak BMK değişimi görülmektedir. Grafiklerden başlangıç maksimum kuvvetinin en fazla AISI1018'de oluştuğu, en az ise AL6061'de oluştuğu görülmektedir. Kaynak dikişinin yerinin 0.25 ve 0.75 olduğu Şekil 3.6a ve 3.6c'de köpük yoğunluğunun başlangıç maksimum kuvvetine etkisinin fazla olmadığı görülmektedir. Şekil 8b'de ise Denklem 1.5' de köpüğün yoğunluğunun artmasıyla gerilme arttığından köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığının artmasıyla başlangıç maksimum kuvvetini arttığı görülmektedir. Şekil 3.6a'da başlangıç maksimum kuvvetinin üst parça kalınlığının 1.5 değerine kadar AL6061 malzemeli TWT-S ve TWT-M tüplerinde aynı başlangıç maksimum kuvveti değerinde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığı başlangıç değerini arttırırken TWT-M malzeme kullanılması başlangıç maksimum kuvvetini azaltmaktadır.

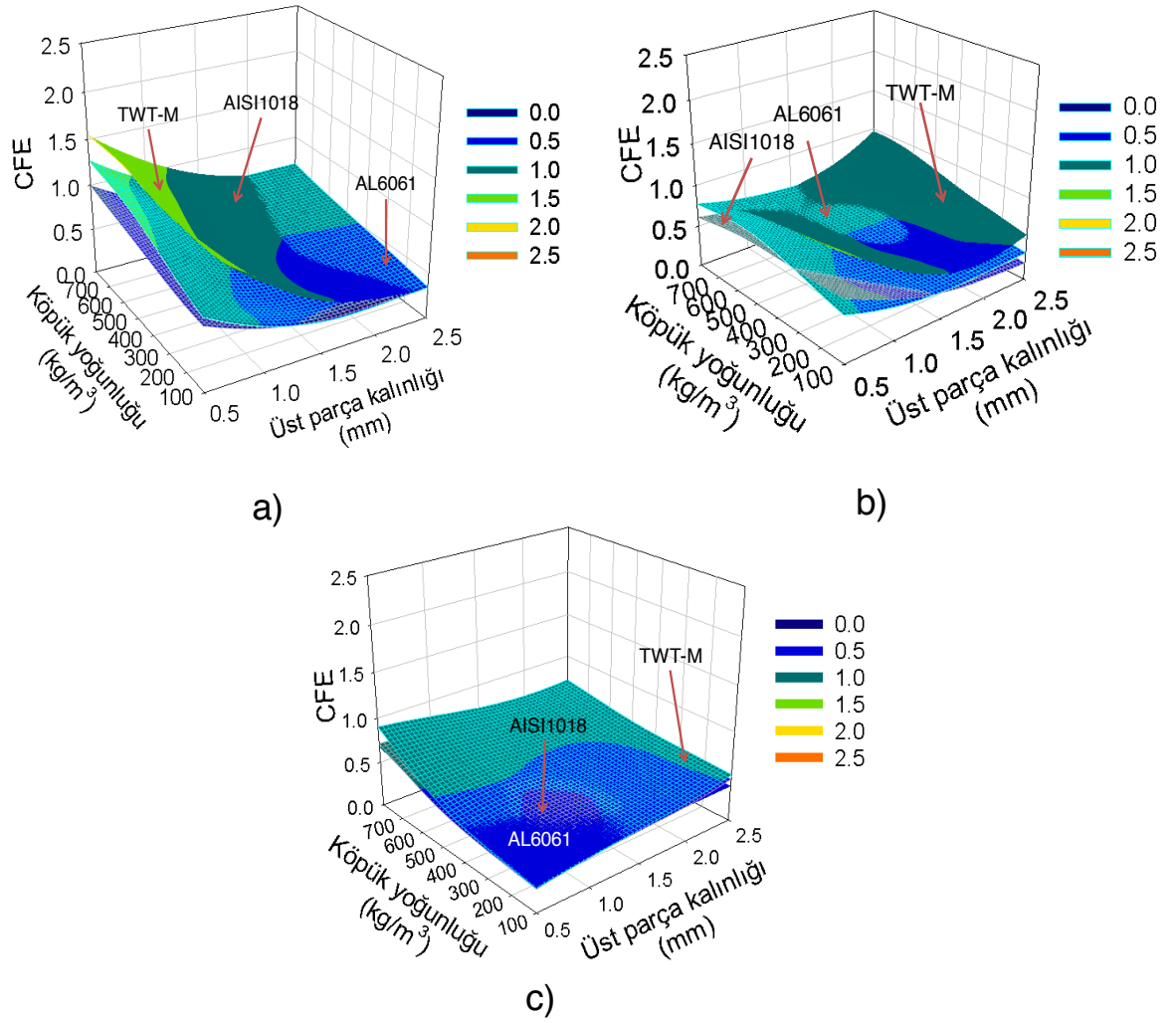
Şekil 3.7' de alüminyum köpük dolgulu tüplerin CFE değişimi verilmektedir. Şekil 3.7a ve 3.7b, CFE üzerinde tüp kalınlığının etkisinin köpük yoğunluğundan fazla olduğunu göstermektedir. Özellikle kaynak yeri $L_0=0.25L$ 'de iken TWT-M' de köpük yoğunluğunun etkisi çok azdır (Şekil 3.7a). Ayrıca, Şekil 3.7a'da AL6061'de düşük kalınlık ve yüksek köpük yoğunluğunda CFE değerinin maksimum olduğu görülmektedir. Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b'de TWT-M için kaynak yeri $L_0/L=0.25$ 'de iken CFE değeri 1.6'dan 0.4'e, kaynak yeri $L_0/L=0.50$ 'de ise 1.2'den 0.4'e düşmektedir. Kaynak yeri $L_0/L=0.75$ 'de iken 0.4-0.6 arasında değişmektedir. Ayrıca kaynak dikişinin yeri $L_0/L=0.75$ 'de iken tailor-welded tüplerin CFE değerlerinin çok fazla değişmediği görülmektedir.



Şekil 3.5. Köpük dolgulı tüpler için özgül enerji sönümlenme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L0=0.25L$, b) $L0=0.50L$ ve c) $L0=0.75L$.



Şekil 3.6. Köpük dolgulu tüpler için başlangıç maksimum kuvvetin (BMK) tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



Şekil 3.7. Köpük dolgulı tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.

Şekil 3.8' de tüpün üst parça kalınlığının 0.5 mm ve tüp üzerindeki kaynak dikişi konumunun 0.25 olduğu durum için, çarpma kuvvetinin zamana bağlı değişim eğrileri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. Boş tüplerde başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerleri AL6061, AISI1018 ve TWT-M için sırasıyla, 35.5 kN, 77.4 kN ve 36 kN olarak belirlenmiştir. Köpük dolgulı tüplerde ise başlangıç maksimum kuvvet değerleri AL6061, AISI1018 ve TWT-M için sırasıyla, 59 kN, 102 kN ve 60 kN olarak belirlenmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi her üç malzemede de tüpler içinde köpük dolgu kullanıldığında kuvvet eğrilerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Yukarıda belirlenen değerlere bakılarak en büyük başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerlerinin AISI1018

malzemesinden yapılan tüplerde olduğu görülebilir. Ayrıca AL6061 ve TWT-M tüplerinde başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerleri birbirlerine yakın olduğu AISI1018 malzemesinden yapılan tüplerde (boş ve köpük dolgulu) ise daha yüksek başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerleri elde edildiği görülebilir. İlave olarak 2 ms' den sonra kuvvet değerleri önemli artış göstermiştir. Deformasyon biçimlerine bakılarak köpük dolgunun kullanıldığı tüplerde (A1, B1, C1) boş tüplere göre (A2, B2, C2) daha az deforme olmaktadır (Şekil 3.8).

Şekil 3.9'da ise bu tüplere ait sönmölen enerji miktarlarının zamana göre değişim grafikleri görölmektedir. Belirli bir anda sönmölen enerji miktarının köpük kullanıldığında boş tüplere göre daha fazla olduğu görölmektedir. Örneğin 5.7 ms anında boş tüpler için sönmölen enerji miktarları AL6061, AISI1018 ve TWT-M için sırasıyla 1.06 kJ, 2 kJ ve 1.82 kJ değerlerine ulaşmaktadır. Köpük dolgu kullanıldığında ise sönmölen enerji miktarları 2.59 kJ, 2.83 kJ ve 2.76 kJ olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9'dan ve sönmölen enerji miktarı değerlerine göre en yüksek miktar AISI1018 için elde edilmektedir. Ayrıca sönmölen enerji miktarlarının 2 ms anından itibaren belirgin şekilde arttığı görölmektedir.

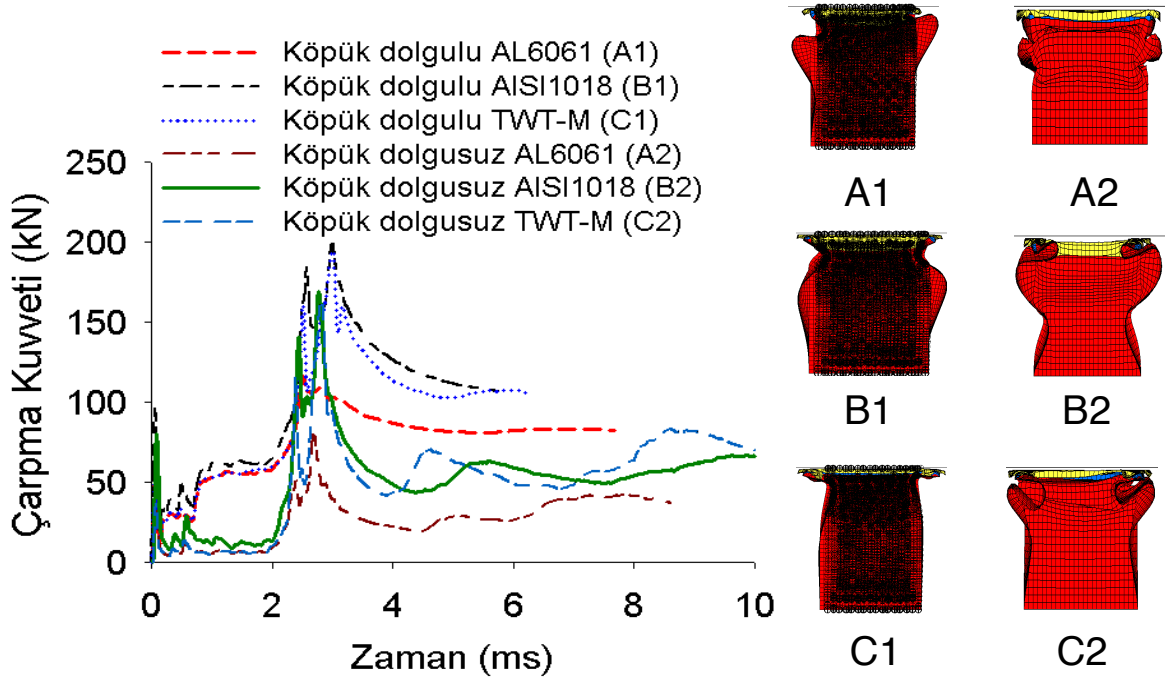
Şekil 3.10'da tüpün üst parça kalınlığının 0.5 mm ve tüp üzerindeki kaynak konumunun 0.50 olduğu durum için, çarpma kuvvetinin zamana bağlı değişim eğrileri ve deformasyon biçimleri görölmektedir. En yüksek başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerleri bu kaynak konumu elde edilmiştir. Boş tüpler için kuvvet eğrilerine bakıldığında 4ms'den sonra belirgin bir artış gözlenmektedir. Burada AL6061, AISI1018 ve TWT-M sırasıyla 5.03 ms' de maksimum çarpma kuvveti değeri olan 63.1 kN, 5.2 ms' de 144.6 kN'a ve 143.4 kN'a çıkmakta ve buradan itibaren düşüş gözlenmektedir. Boş tüpler için başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerleri AL6061, AISI1018 ve TWT-M için sırasıyla 33.6 kN, 70.3 kN ve 33.9 olarak belirlenmiştir. Köpük dolgulu tüplerde ise başlangıç maksimum kuvvetler 85.4 kN, 96.5 ve 86.7 olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.11'de ise 0.5 mm üst parça kalınlığı ve kaynak bağlantısının tüpün tam ortasında olduğu durum için sönmölen enerjinin zamanla değim eğrileri verilmiştir. Sönmölen enerji miktarları boş tüplerde AL6061, AISI1018 ve TWT-M malzemeler için 1.24 kJ, 2.26 kJ ve 2.18 kJ olarak elde edilirken, dolu tüpler için sırasıyla 2.86 kJ, 2.87 kJ

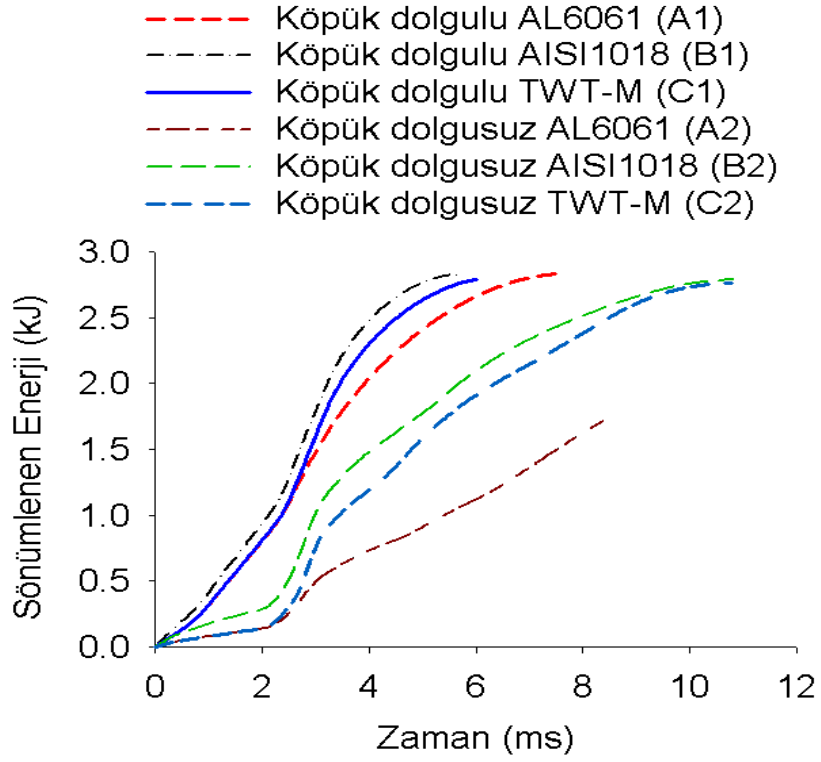
ve 2.84 kJ olarak elde edilmiştir. Grafiklerde ve elde edilen bu verilere bakılarak köpük dolgunun kullanımı sönmölenen enerji miktarını artırmaktadır.

Şekil 3.12’de tüpün üst parça kalınlığının 0.5 mm ve tüp üzerindeki kaynak dikiş konumunun 0.75 olduğu durum için, çarpma kuvvetinin zamana bağılı değışim eğrileri ve deformasyon biçimleri görölmektedir. Kaynak dikiş konumlarına göre kuvvet eğrileri göz önüne alındığında en düşük başlangıç maksimum kuvveti değerleri kaynak dikiş konumu 0.75’de elde edilmiştir. Boş tüplerde başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerleri, AL6061, AISI1018 ve TWT-M için sırasıyla, 33.4 kN, 68.7 kN ve 33.5 kN olarak belirlenmiştir. Köpük dolgu kullanıldığında ise sırasıyla 54.6 kN, 96 kN ve 54.5 kN olarak belirlenmiştir. Eğrilerde göröldüğü gibi köpük dolgu kullanıldığında çarpma kuvveti 0.71 ms’ den sonra artış göstermektedir. Boş tüplerde ise 2.87 ms’ den sonra artış görölmektedir.

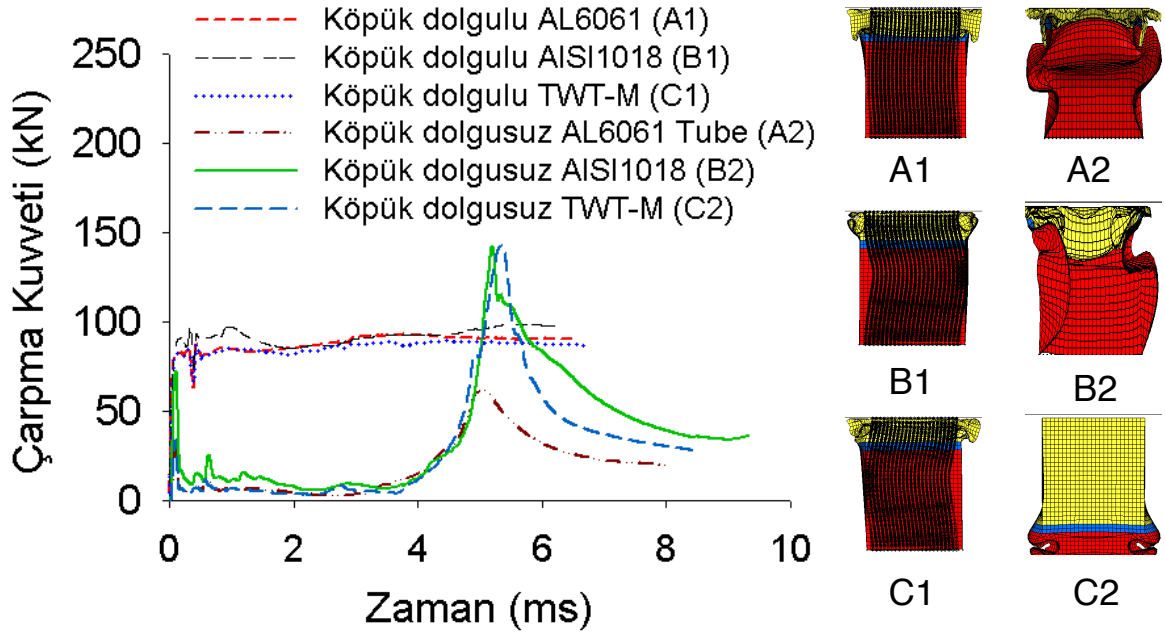
Şekil 3.13’de 0.75 kaynak konumuna ait sönmölenen enerji miktarlarının zamana göre değışim eğrileri gösterilmiştir. Hem boş hem de köpük dolgulu tüpler için AL6061 ve TWT-M eğrileri nerdeyse birbirinin aynısıdır. AISI1018 malzemesinden yapılmış tüplerin sönmölediğı enerji miktarı AL6061 ve TWT-M’ den daha büyüktür.



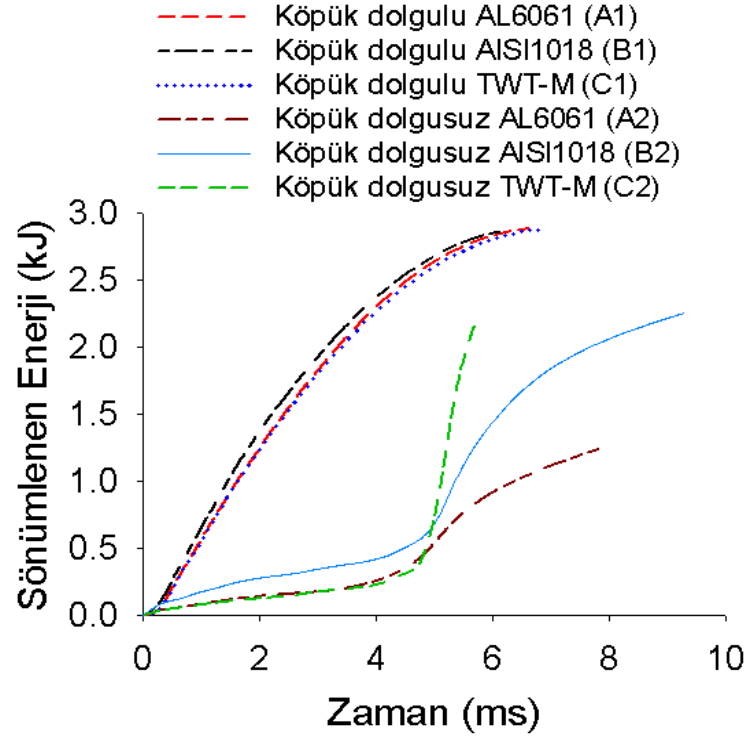
Şekil 3.8. Kaynak konumu $L_0/L=0.25$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri



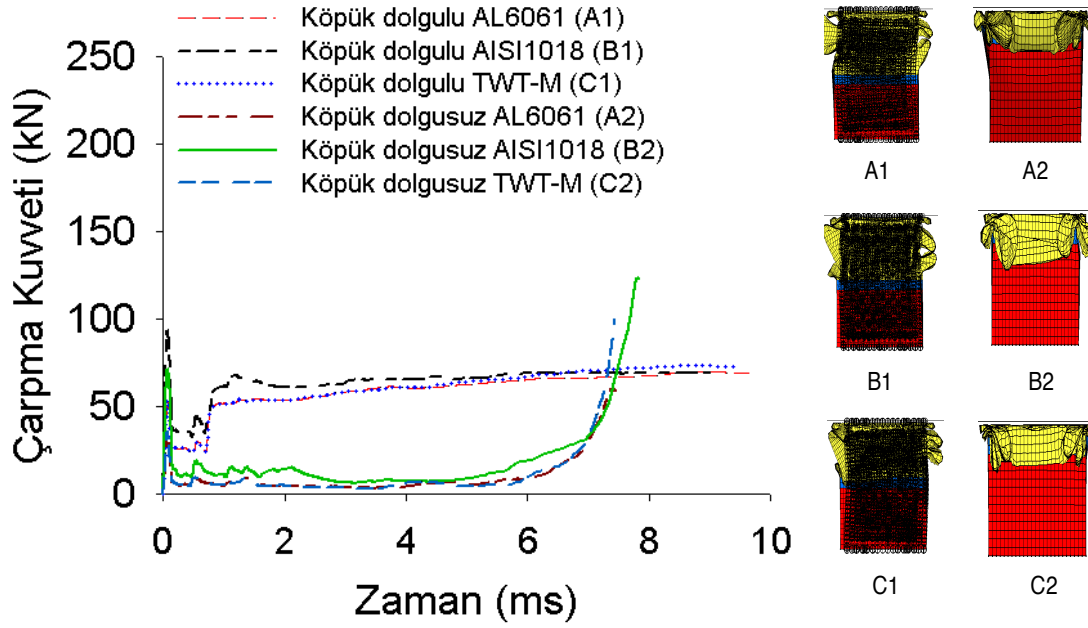
Şekil 3.9. Kaynak konumunun $L_0/L=0.25$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmülenen enerji-zaman grafikleri.



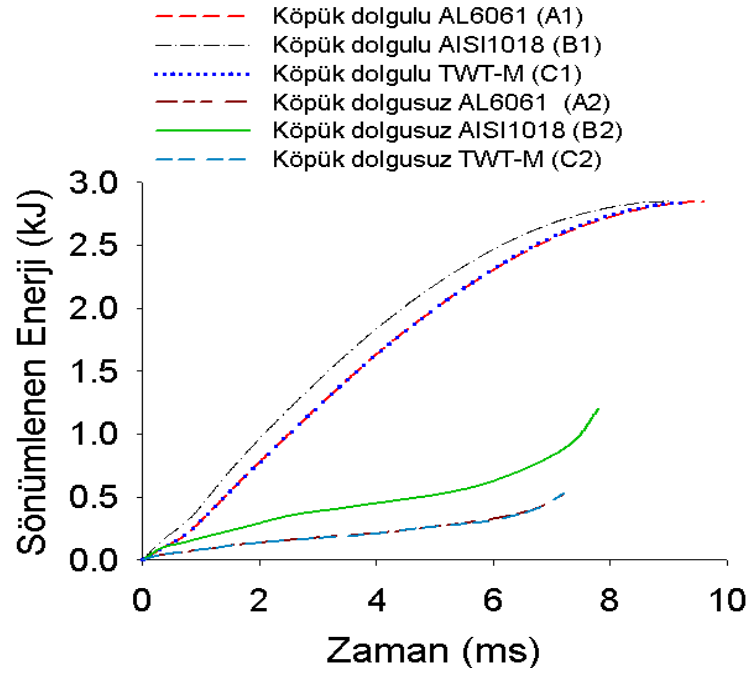
Şekil 3.10. Kaynak konumu $L_0/L= 0.50$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.



Şekil 3.11. Kaynak konumunun $L_0/L=0.50$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönmölenen enerji-zaman grafikleri.

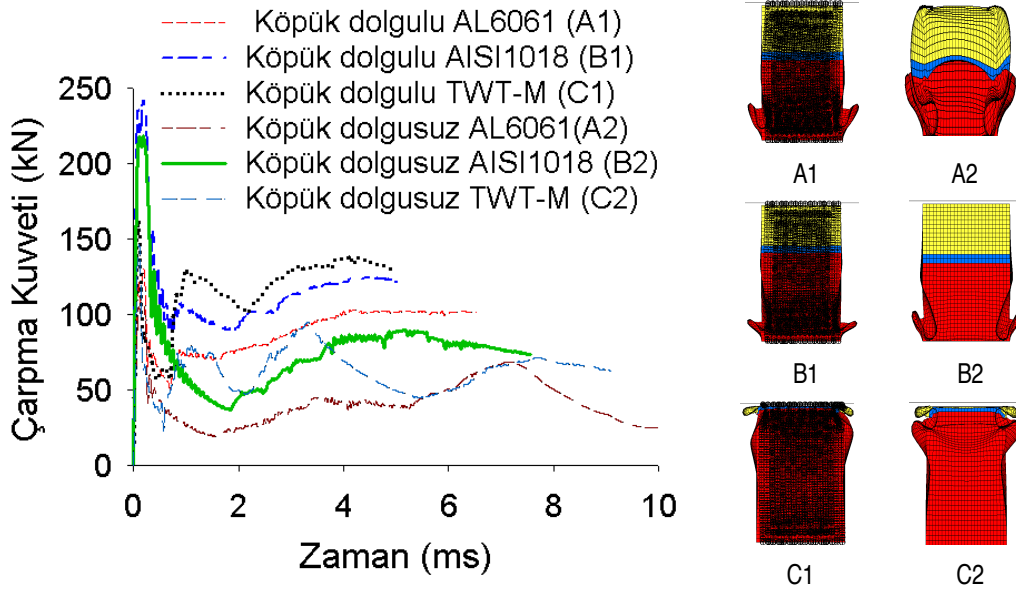


Şekil 3.12. Kaynak konumu $L_0/L= 0.75$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.

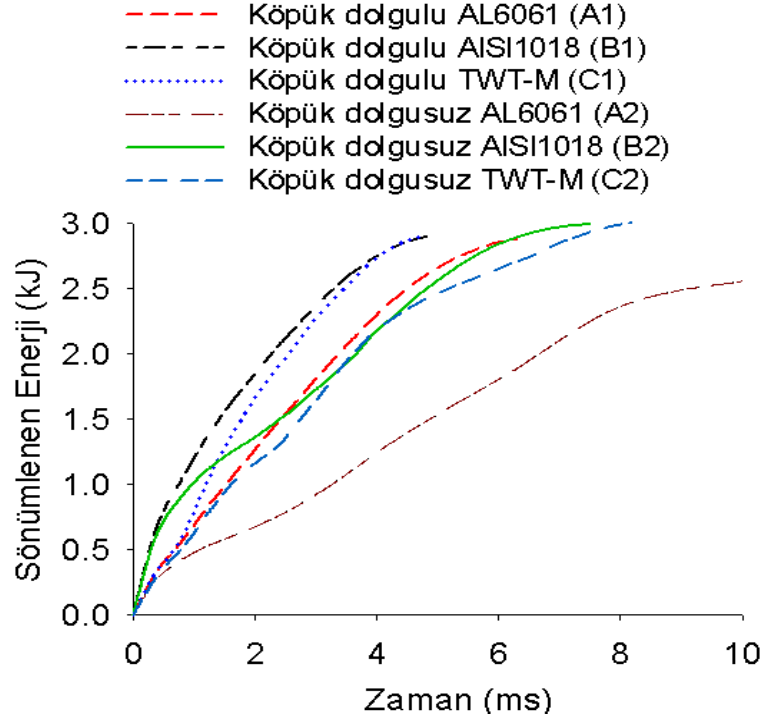


Şekil 3.13. Kaynak konumunun $L_0/L=0.75$, $t_1=0.5$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönümlenen enerji-zaman grafikleri.

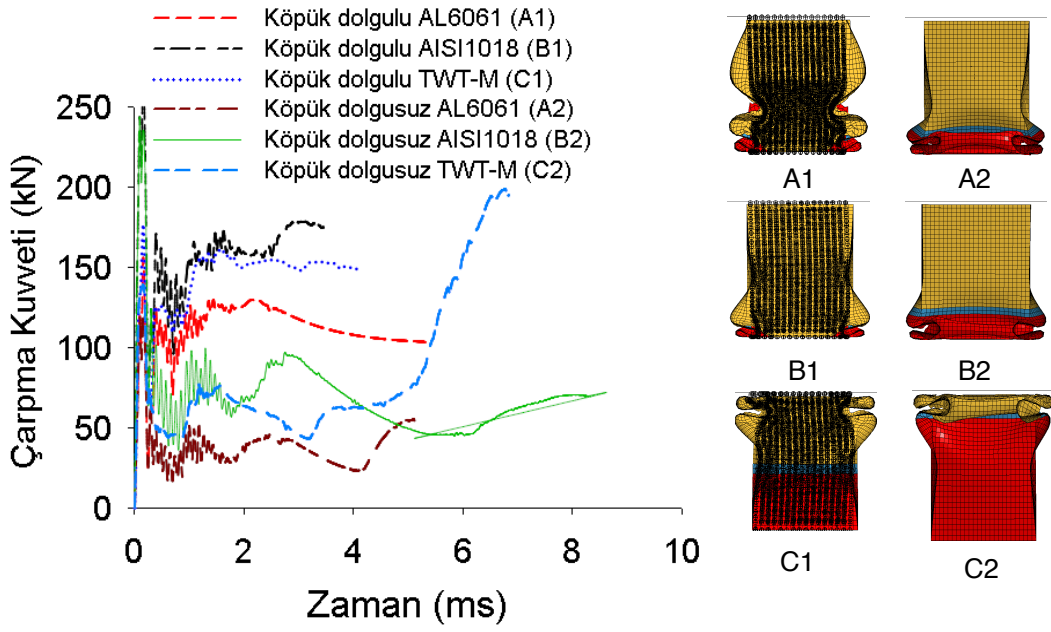
Şekil 3.14-3.19 'da köpüğün çarpma performansına etkisini açık bir şekilde görebilmek için köpük yoğunluğu 800 kg/m^3 ve tüpün üst parça kalınlığı 1.91 mm için çarpma kuvveti-zaman ve sönümlenen enerji-zaman grafikleri gösterilmiştir. Üst parça kalınlığının alt parçaya göre daha fazla olmasından dolayı çarpma kuvveti ve başlangıç maksimum kuvveti daha fazladır. Ayrıca üst parça kalınlığı alt parça kalınlığından fazla olması deformasyon biçimlerini de etkilemektedir. Alt parça daha önce deforme olmuştur (A1, A2, B1, B2). Ancak TWT-M' de yukarıdaki parça kalınlığı daha yüksek olmasına rağmen üst parça AL6061 ve alt parça AISI1018 olduğundan deformasyon üst parçada başlamaktadır (C1, C2).



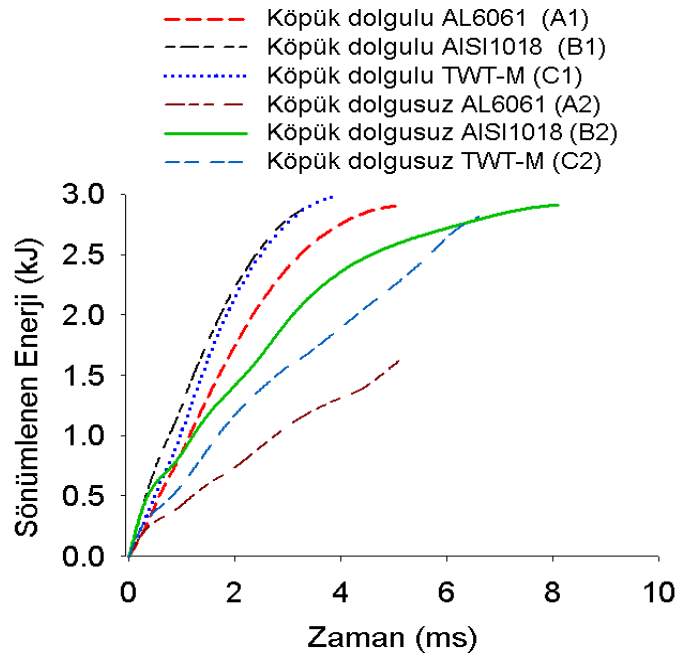
Şekil 3.14. Kaynak konumu $L_0/L=0.25$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.



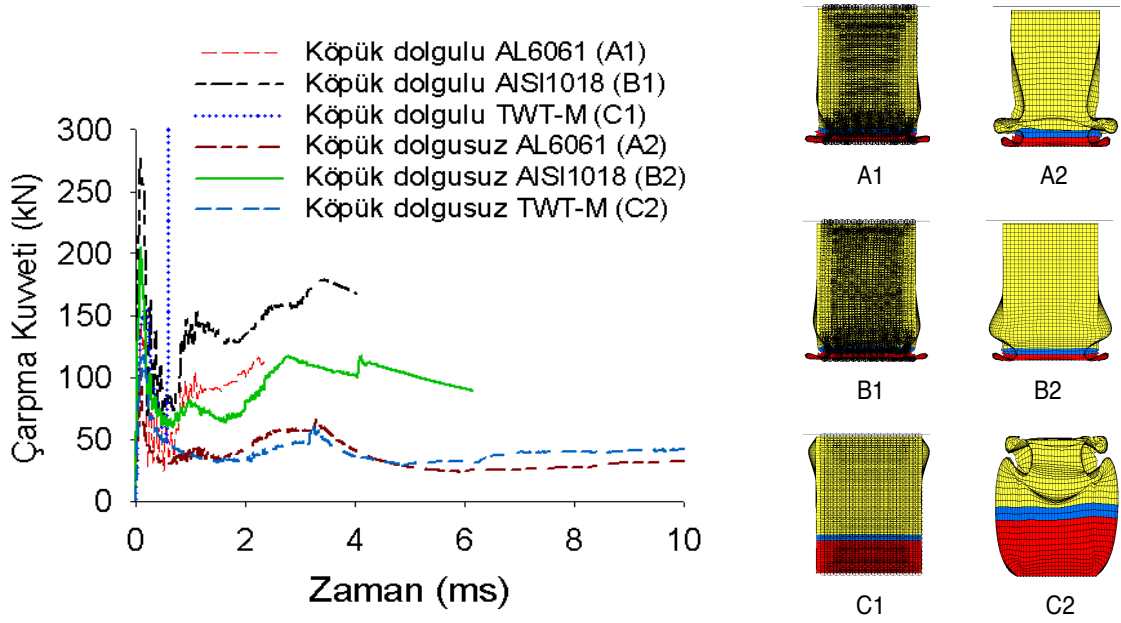
Şekil 3.15. Kaynak konumunun $L_0/L=0.25$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönümlenen enerji-zaman grafikleri.



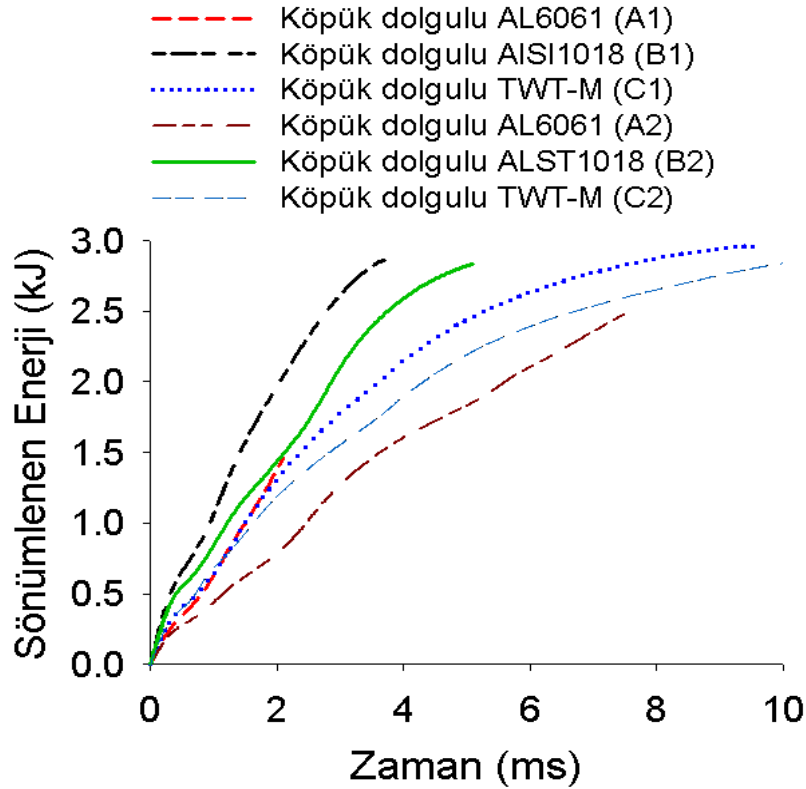
Şekil 3.16. Kaynak konumu $L_0/L=0.50$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri.



Şekil 3.17. Kaynak konumunun $L_0/L=0.50$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönümlenen enerji-zaman grafikleri.



Şekil 3.18. Kaynak konumu $L_0/L=0.75$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için çarpma kuvveti-zaman grafikleri



Şekil 3.19. Kaynak konumunun $L_0/L=0.75$, $t_1=1.91$ mm ve $t_2=1.5$ mm tüp kalınlıkları için sönümlenen enerji-zaman grafikleri.

3.5. Koniklik Açısının SEA, Başlangıç Maksimum Kuvvet (BMK) ve CFE Üzerindeki Etkisi

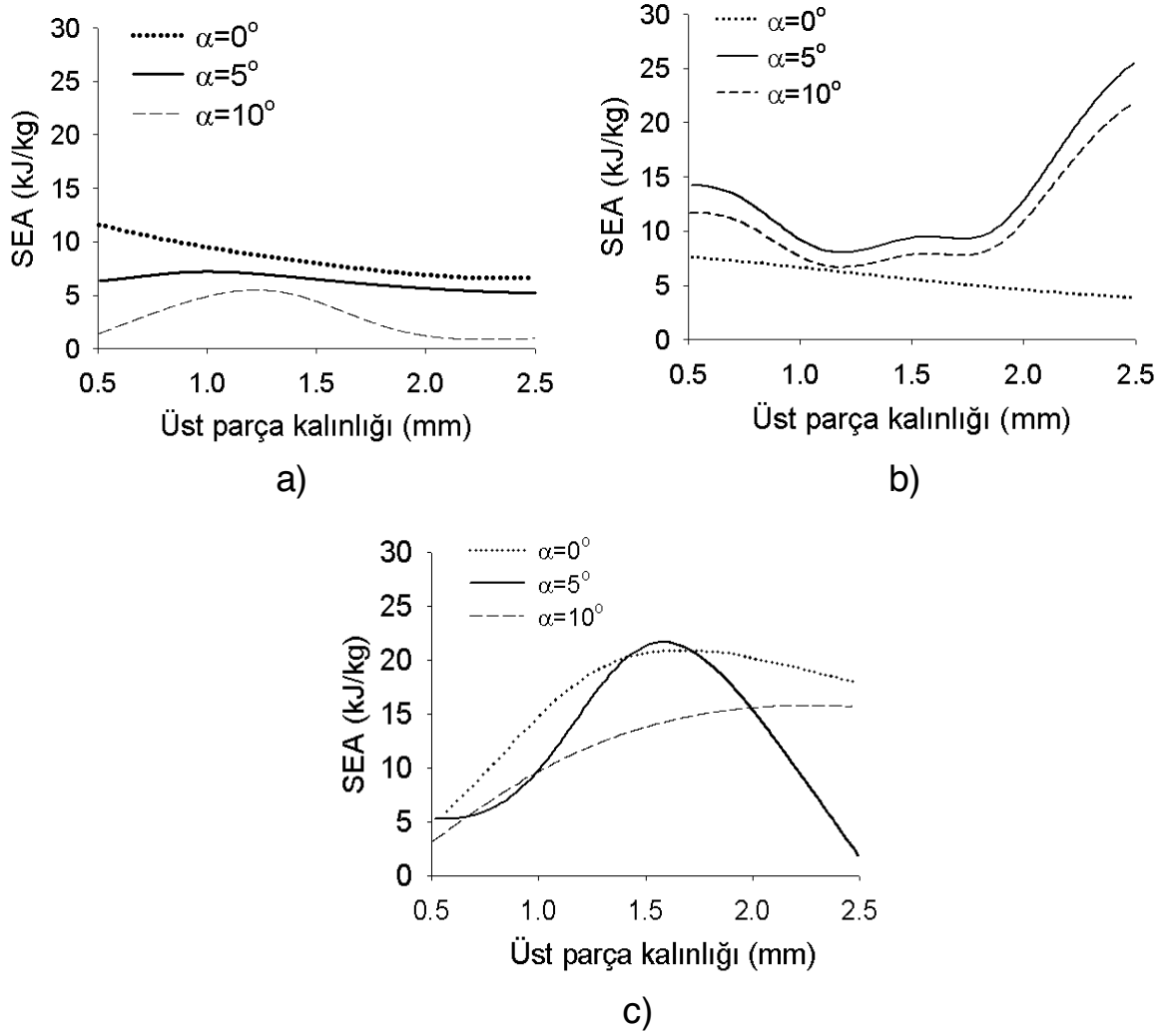
Değişik koniklik açıları için boş tüplerde özgül enerji sönümlenme miktarının (SEA) kalınlıkla değişimi Şekil 3.20'de verilmiştir. Kaynak bağlantısının konumu $L_0/L=0.25$ olduğu durum için sönümlenen enerji değişimini gösteren Şekil 3.20a'da düz tüp ($\alpha=0^\circ$) için SEA 11.8 kJ/kg'dan başlayarak kalınlık arttıkça azaldığı görülmektedir. Konikliğin $\alpha=5^\circ$ olduğu tüp için ise SEA 6.55 kJ/kg'dan başlayarak kalınlık arttıkça artmakta olup kalınlık değeri 1.02 mm'de maksimum değeri olan 7.21 kJ/kg'a ulaşmakta ve bu kalınlık değerinden itibaren kalınlığın artmasıyla SEA azalmaktadır. Konikliğin $\alpha=10^\circ$ derece olduğu tüp için ise özgül enerji sönümlenme değeri (SEA) 1.41 kJ/kg'dan başlayarak kalınlıkla artmakta olup, kalınlık değeri 1.21 mm'de maksimum değeri olan 5.5 kJ/kg'a ulaşmakta ve buradan kalınlık arttıkça SEA azalmaktadır. Kaynak bağlantısının konumu $L_0/L=0.50$ için özgül enerji sönümlenme değerinin kalınlıkla değişimi Şekil 3.20b'de gösterilmiştir. Grafikte boş düz ($\alpha=0^\circ$) tüplerin SEA 7.62 kJ/kg'dan başlayarak kalınlıkla azaldığı görülmektedir. Koniklik açısı $\alpha=5^\circ$ için ise kalınlığı 1.1 mm'ye kadar kalınlık arttıkça özgül enerji sönümlenme miktarı azalmaktadır. Bu kalınlık değerinden itibaren kalınlık arttıkça özgül enerji sönümlenme miktarının arttığı görülmektedir. Kaynak bağlantı konumunun $L_0/L=0.75$ için özgül enerji sönümlenme miktarının üst parça kalınlığı ile değişimi Şekil 3.20c'de görülmektedir. Boş tüpler ($\alpha=0^\circ$) için özgül enerji sönümlenme miktarı 4.6 kJ/kg'dan başlayarak üst parça kalınlığıyla artmakta olup, kalınlık değeri 1.68 mm'de en büyük değerini almaktadır. Bu kalınlık değerinden itibaren kalınlık arttıkça özgül enerji sönümlenme miktarı azalmaktadır. Koniklik açısı $\alpha=5^\circ$ için, ise benzer bir durum söz konusudur. Yani üst parça kalınlığı 1.59 mm'ye kadar özgül enerji sönümlenme miktarı artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Koniklik açısı $\alpha=5^\circ$ için ise bu tepe değeri 2.27 mm'dir.

Farklı koniklik açıları için boş tüplerde başlangıç maksimum kuvvetinin üst parça kalınlığına göre değişimi Şekil 3.21'de gösterilmektedir. Kaynak bağlantısının konumunu $L_0/L=0.25$ 'in gösterildiği Şekil 3.21a'da koniklik açısı arttıkça başlangıç maksimum kuvvetin düştüğü görülmektedir. Ayrıca koniklik açısı $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=5^\circ$ üst parça kalınlığı 1,5 mm'de başlangıç maksimum kuvvet değerinin aynı ve 100 kN olduğu görülmektedir. Üst

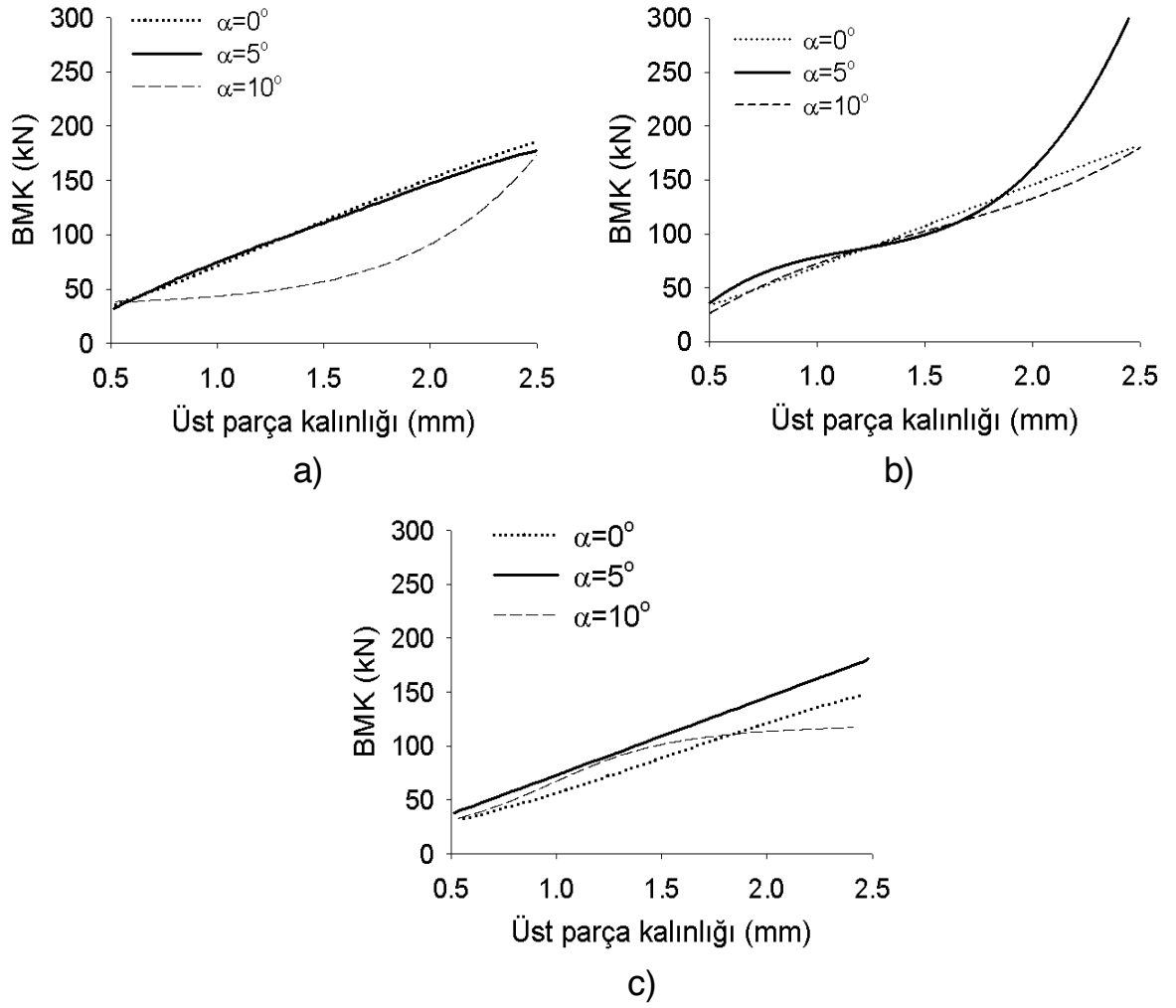
parça kalınlığının bu değerinden itibaren $\alpha=0^\circ$ koniklik açısına ait başlangıç maksimum kuvveti değerleri $\alpha=10^\circ$ 'ye göre daha yüksek olmaktadır. Kaynak bağlantısı konumu $L_0/L=0.50$ 'ye ait başlangıç maksimum kuvvet değişimi verildiği Şekil 3.21b'de ise 0.5-0.75 mm üst parça kalınlığı aralığına kadar düz tüpe ($\alpha=0^\circ$) ait başlangıç maksimum kuvvet $\alpha=10^\circ$ koniklik açısına ait BMK değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Kalınlık değeri 0.75 mm' de düz tüp ve $\alpha=10^\circ$ koniklik açısına sahip tüplere ait BMK değerleri aynı ve 52 kN olduğu belirlenmiştir. Bu kalınlık değerinden itibaren 1.25 mm kalınlığına kadar, kalınlık arttıkça $\alpha=10^\circ$ koniklik açısına sahip tüplere ait BMK değeri düz tüplerin ($\alpha=0^\circ$) BMK değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Kalınlık değeri 1.25 mm değerinde üç koniklik açısına ait ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$) BMK değerleri aynı ve 88 kN' dur. Ayrıca üst parça kalınlık değeri 0.5 mm–1.25 mm arasında koniklik açısı $\alpha=5^\circ$ 'ye ait BMK değerleri diğer iki koniklik açısındaki ($\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$) tüplere ait değerlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Üst parça kalınlığı 1.25-1.67 mm aralığında ise $\alpha=5^\circ$ konikliğe sahip BMK değerleri diğer iki koniklik açısındaki ($\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$) tüplere ait değerlerine göre daha küçük olduğu görülmektedir. Üst parça kalınlığı 1.67-1.86 mm arasında $\alpha=5^\circ$ 'e ait BMK değerleri iki koniklik açısına ait BMK değerleri arasındadır. Şekil 3.21c'deki grafikte ise $L_0/L=0.75$ 'ye ait başlangıç maksimum kuvvet değerlerinin üst parçaya değişimi çizilmiştir. Elde edilen grafiklerde $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=5^\circ$ koniklik açılı tüplere ait BMK değerleri sırasıyla 28.3 kN ve 38.4 kN değerlerinden başlayarak kalınlıkla doğrusal olarak artmaktadır. Ayrıca $\alpha=10^\circ$ koniklik açılı tüplere ait BMK eğrileri, 1.5 mm kalınlık değerine kadar kalınlığın artmasıyla artmakta ve bu değere tekabül eden BMK değeri 105.8 kN' da sabit kalmaktadır.

Şekil 3.22'de farklı koniklik açıları için boş tüplerde çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) üst parça kalınlığına göre değişimi gösterilmektedir. Kaynak bağlantısının konumunun $L_0/L=0.25$ olduğu durum için değişimi gösteren Şekil 3.22a'da, düz tüp ($\alpha=0^\circ$) için CFE değeri 1.5, değerinden başlayarak kalınlığın artmasıyla azalmaktadır. Konikliğin $\alpha=5^\circ$ derece olduğu tüp için ise CFE 1.62'den başlayarak 1.51 mm değerine kadar, kalınlık arttıkça azalmakta ve kalınlık değeri 1.51 mm' de CFE minimum değeri olan 0.576 olmakta ve buradan itibaren kalınlığın artmasıyla CFE değeri artmaktadır. Koniklik açısı $\alpha=10^\circ$ 'ye sahip tüpler ise kalınlığın artmasıyla CFE değeri 1.92'den başlayarak azalmakta ve kalınlık değeri 1.3 mm' de minimum CFE değeri olan 0.556 değerine ulaşmaktadır ve bu kalınlık değerinden itibaren CFE değeri artmaktadır. Ayrıca Şekil 3.22a'daki grafikten

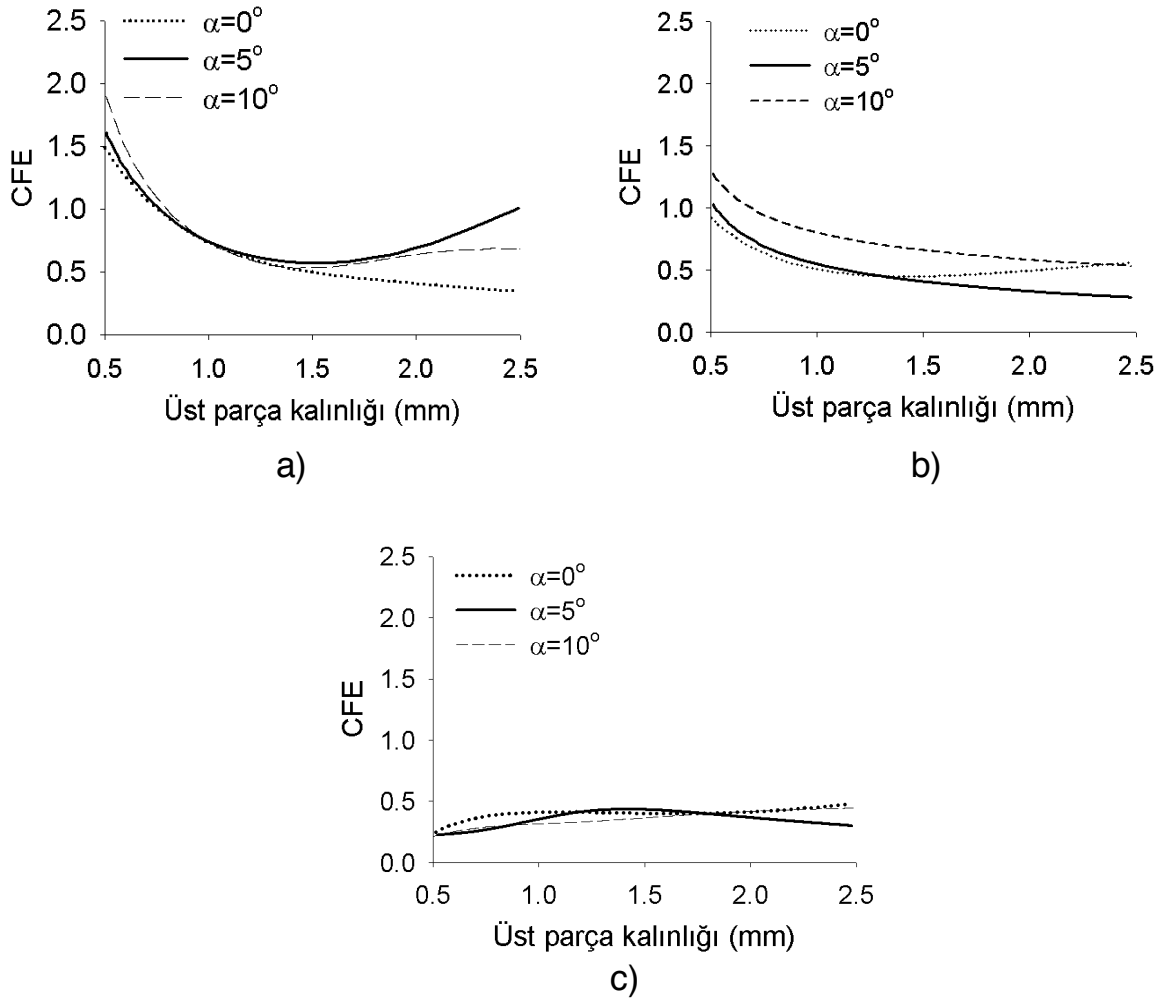
üst parça kalınlık değeri 1mm'de üç koniklik açısı için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$) CFE değerlerinin aynı ve 0.74 olduğu belirlenmiştir. Bu kalınlık değerine kadar en büyük CFE değerinin $\alpha=10^\circ$ 'da ve en küçük CFE değerinin ise $\alpha=0^\circ$ 'da elde edilmekteyken, bu kalınlık değerinden itibaren en büyük CFE değerinin $\alpha=5^\circ$ 'da elde edilirken en küçük CFE değerinin yine $\alpha=0^\circ$ 'da elde edildiği görülmektedir. Şekil 3.22b'de kaynak bağlantısı konumu $L_0/L=0.50$ için çarpma kuvveti verimliliği' nin (CFE) kalınlıkla değişimi görülmektedir. Düz tüpler ($\alpha=0^\circ$) için ise CFE 0.92'den başlayarak 1.44 mm değerine kadar, kalınlık arttıkça azalmakta ve kalınlık değeri 1.44 mm' de CFE minimum değeri olan 0.45 olmakta ve buradan itibaren kalınlığın artmasıyla CFE değeri artmaktadır. Koniklik açısı $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$ 'ye ait tüplerde CFE değeri sırasıyla 1.028 ve 1.28'den başlayarak kalınlık arttıkça azalmaktadır. Şekil 3.22c'de kaynak bağlantısı konumu $L_0/L=0.75$ için ise CFE değerleri diğer iki kaynak konumuna göre daha düşük elde edilmiştir. Burada düz tüp ($\alpha=0^\circ$) için 1.13 mm' ye kadar kalınlık arttıkça CFE değeri artmaktadır ve CFE, 0.412 olmaktadır. Bu kalınlıktan itibaren 1.61 mm üst parça kalınlığına kadar CFE azalmaktadır ve buradan tekrar artmaktadır. Tüpün koniklik açısı olduğunda 1.43 mm kalınlık değerine kadar CFE değeri 0.238'den başlayarak kalınlığın artmasıyla artmaktadır. Bu kalınlık değerinden sonra kalınlık arttıkça CFE değeri azalmaktadır. Koniklik açısı $\alpha=10^\circ$ için CFE değeri kalınlık arttıkça artmaktadır.



Şekil 3.20. Farklı konikliğe sahip içi boş TWT-M için çarpma kuvveti verimliliğinin (SEA) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



Şekil 3.21. Farklı konikliğe sahip içi boş tüpler için başlangıç maksimum kuvvetinin (BMK) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



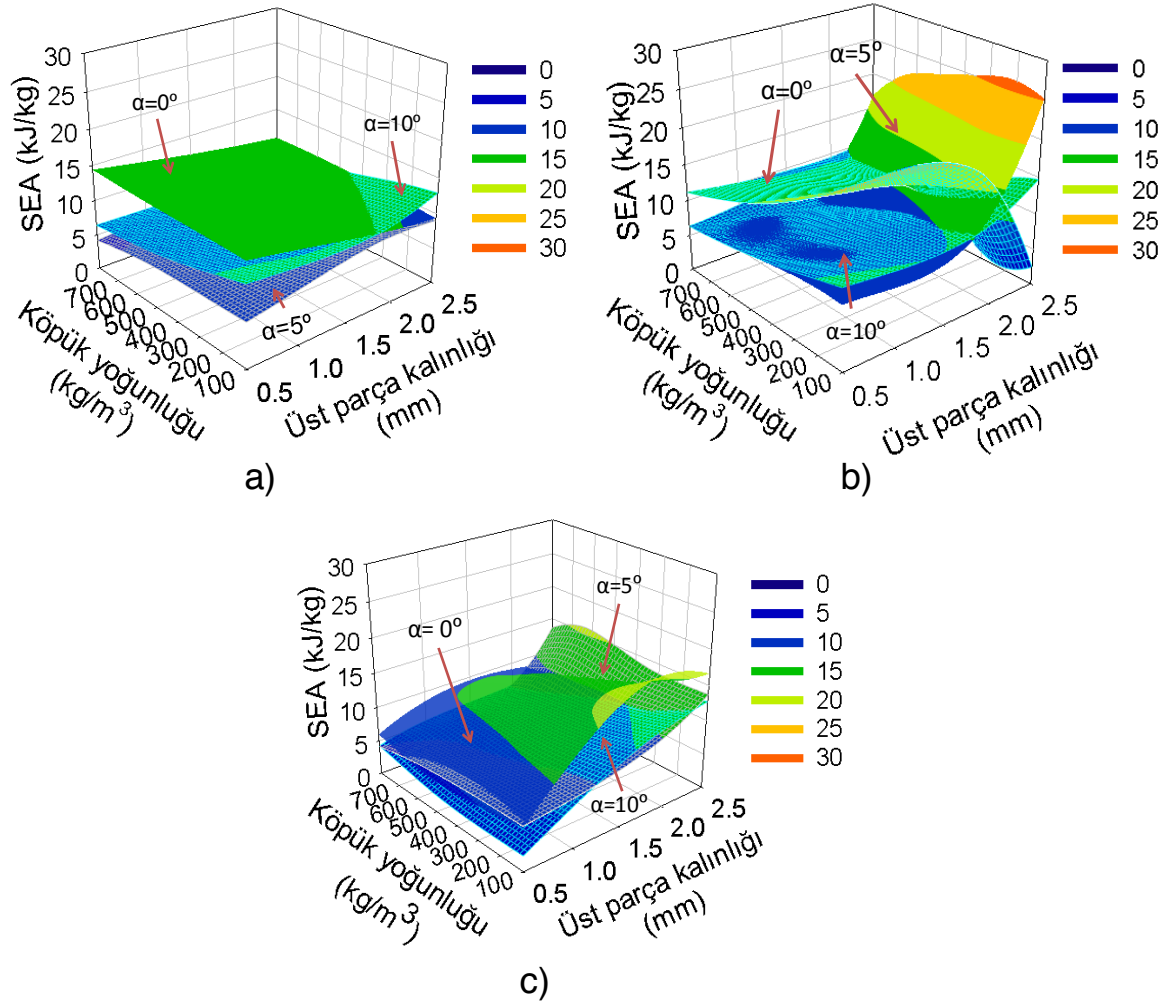
Şekil 3.22. Farklı konikliğe sahip İçi boş tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.

Şekil 3.23'te AL6061 ve AISI1018 malzemelerinin birleşimi ile oluşan TWT-M' in farklı koniklik açılarında sönümlendiği özgül enerji miktarının kalınlık ve köpük yoğunluğuyla değişimi görülmektedir. Konik olmayan tüpün ($\alpha=0^\circ$) sönümlendiği özgül enerji miktarı kalınlık arttıkça azalmaktadır. Fakat köpük yoğunluğuyla önemli bir değişim gözlenmemektedir. Koniklik açıları $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$ için, sönümlenen özgül enerji miktarları kalınlık arttıkça, köpük yoğunluğunun artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca koniklik açısı $\alpha=10^\circ$ 'da sönümlenen enerji miktarının $\alpha=5^\circ$ 'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3.22a). Bunun sebebi kalınlıkla artan sönümlenen enerji miktarıdır. Şekil 3.23b'de 0.5 kaynak konumunda Şekil 3.23a'da $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$ için yaptığımız gözleme benzer bir

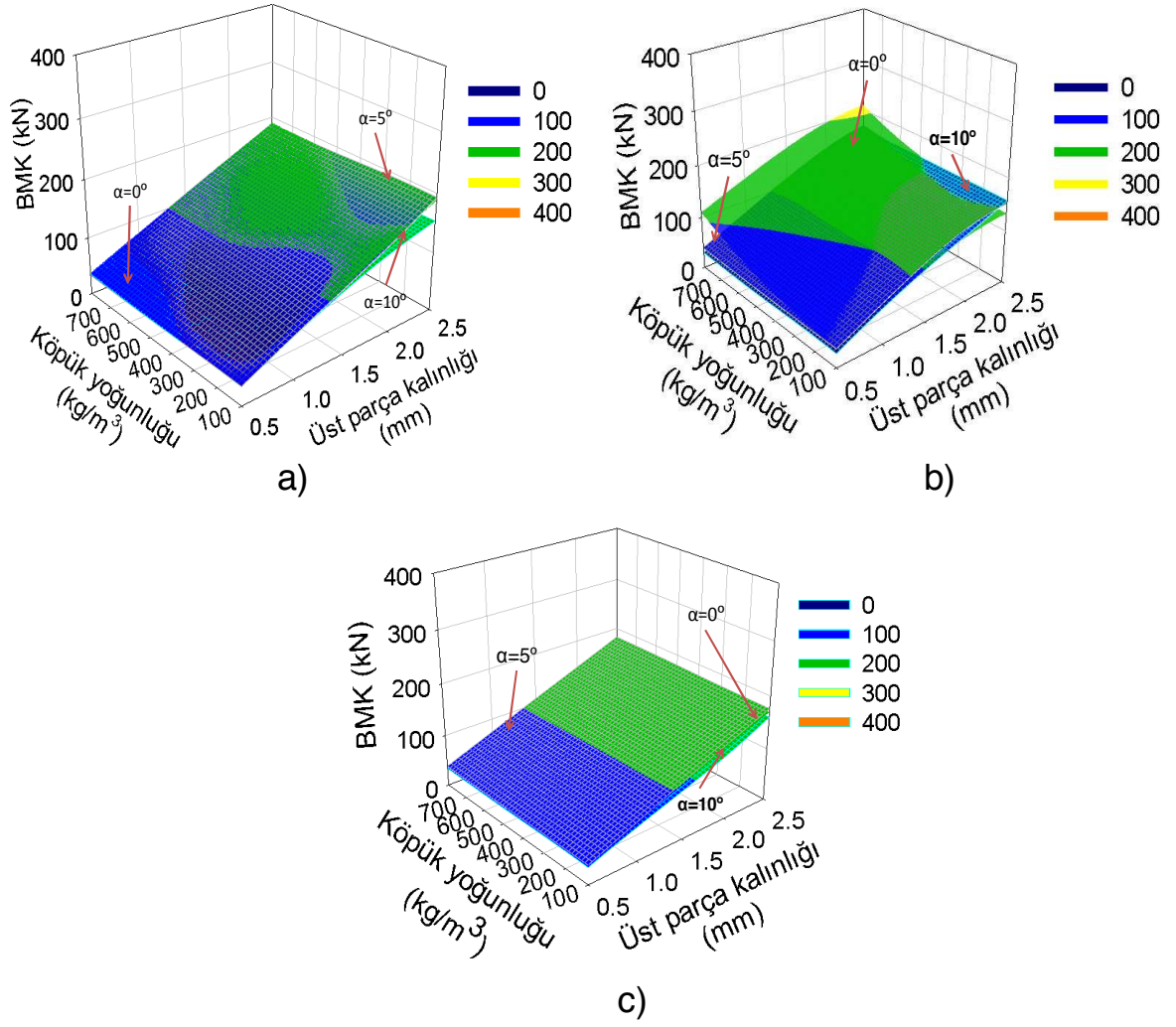
gözlem yapabiliriz. Ancak burada konik olmayan ($\alpha=10^\circ$) TWT-M' in sönümlediği özgül enerjinin, artan köpük yoğunluğu ile azaldığı görülmektedir. Ayrıca, $\alpha=5^\circ$ koniklik açısında sönümlenen özgül enerji miktarının artan kalınlıkla beraber, $\alpha=10^\circ$ 'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni $\alpha=10^\circ$ 'de kütlenin $\alpha=5^\circ$ 'ye göre daha yüksek olmasıdır.

Şekil 3.24'de TWT-M malzemesi için farklı koniklik açılarına göre başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değişimi verilmektedir. Grafiklerde görüldüğü AL6061 ve AISI1018 malzemelerinin birleştirilmesiyle elde edilen TWT-M'e koniklik verilmesi $\alpha=5^\circ$ 'ye kadar çarpma sırasındaki başlangıç maksimum kuvvet (BMK) değerini artırmaktadır. İncelenen üç koniklik açısı için minimum değerler $\alpha=10^\circ$ 'de elde edilmiştir. Şekil 3.24a ve 3.24c'e göre sırasıyla kaynak konumu 0.25 ve 0.75 için köpüğe etkileyen başlangıç maksimum kuvvetlerinin çok küçük olduğu görülmektedir. Kaynak bağlantısının konumunun 0.25 i gösterdiği Şekil 3.24a'da $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=5^\circ$ için birbirine yakın başlangıç maksimum kuvveti karakteristikleri elde edilmekte $\alpha=10^\circ$ için ise yüksek kalınlık değerlerinde daha düşük $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=5^\circ$ 'den daha düşük başlangıç maksimum kuvvetinin daha düşük olduğu görülebilir. Şekil 3.24b'de koniklik verilmeyen TWT-M'de. Şekil 3.24c'de gösterilen 0.75 kaynak konumu için ise birbirine yakın grafikler elde edilmiştir.

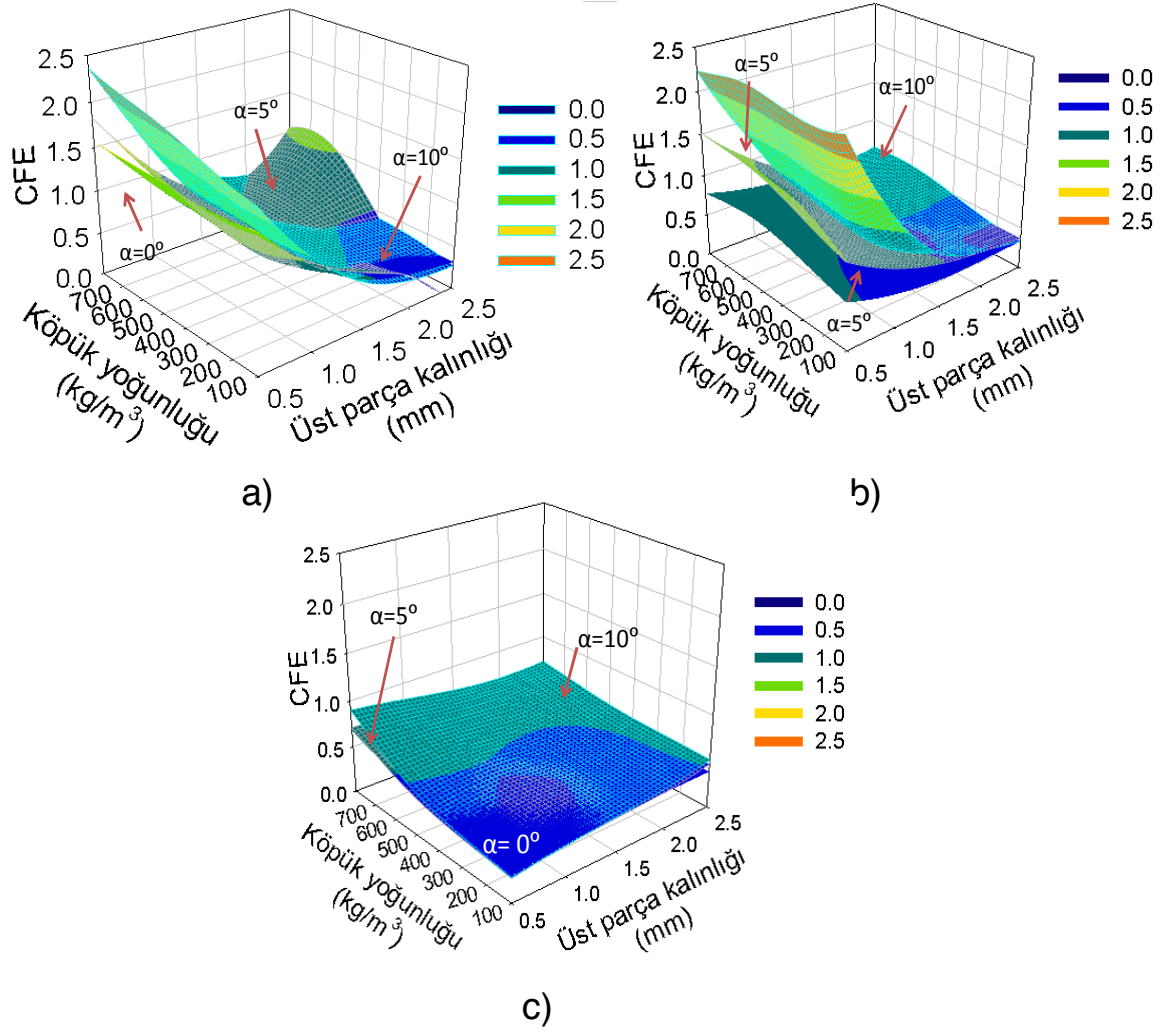
Şekil 3.25'te TWT-M malzemesi için kuvvet verimliliği (CFE) değişimi görülmektedir. Aşağıdaki grafiklerden görüleceği gibi α koniklik açısı arttıkça CFE değeri artmaktadır. Şekil 3.7'de verilen eğrilere benzer olarak en yüksek değerler kaynak dikişinin konumu 0.25 için elde edilmektedir. Ayrıca Şekil 3.25'teki grafiklere bakılarak köpük yoğunluğunun CFE'yi artırdığı görülmektedir. Kaynak dikişi 0.25 konumunu Şekil 3.25a'dan $\alpha=5^\circ$ için 600-800 kg/m³ aralığında, üst parça kalınlığı arttıkça 2-2.5 mm aralığına kadar CFE azalmaktadır. Bunun nedeni bu aralıkta ortalama kuvvet değeri artmasıdır. Ayrıca Kaynak bağlantısı tüpün tam ortasında bulunduğu durumda ($L_0/L=0.50$) üç koniklik değeri için de kuvvet verimliliği (CFE), azaldığı görülmektedir. Kaynak bağlantısının 0.75 durumu için ise CFE diğer iki konuma göre daha az değerler almış ve birbirine yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 3.25c).



Şekil 3.23. Farklı konikliğe sahip köpük dolgulı tüpler için özgül enerji sönümleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



Şekil 3.24. Farklı konikliğe sahip köpük dolgu tüpler için başlangıç maksimum kuvvetin (BMK) tüpün üst parça kalınlığına göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.



Şekil 3.25. Farklı konikliğe sahip köpük dolgulu tüpler için çarpma kuvveti verimliliğinin (CFE) değerinin tüpün üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre değişimi; a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.

3.6. Optimizasyon Sonuçları

Boş ve dolu köpük dolgulu tüplere ait üst parça kalınlığı, köpük yoğunluğu ve farklı kaynak konumlarına karşı optimum değerler koniklik açısı 0° için Tablo 3.3’de verilmiştir. Boş tüpler için AL6061 tüplerde kaynak konumunun aşağıya doğru kaymasıyla optimum üst parça kalınlığının artmakta olduğu görülmektedir. Ayrıca boş tüpler için en yüksek optimum kalınlık değerleri AL6061’de elde edilmiştir. Tüm kaynak konumlarında AISI1018 tüpler için optimum üst parça kalınlığı 0.5 mm olarak elde edilmiştir. Hem boş hem de dolgulu tüpler için maksimum CFE değerleri 0.25 kaynak durumunda elde

edilmiştir ve kaynak konumu tüpün üst kısmından aşağı doğru ilerledikçe artmaktadır ve en yüksek CFE değerleri TWT-M li tüpte de edilmiştir.

Tablo 3.3. İleri beslemeli yapay sinir ağı modelinin koniklik açısı (α) 0° için elde edilen optimum değerler

L_0/L	Malzeme	Üst parça kalınlığı (mm)	Köpük yoğunluğu (kg/m^3)	SEA (kJ/kg)	Başlangıç Maksimum Kuvvet (kN)	CFE
0.25	AL6061	0.5	800	22.2	59.2	1.262
	AL6061&AISI1018	0.5	704.1	15.4	54.2	1.559
	AISI1018	0.5	100	12.8	78.4	0.682
0.50	AL6061	0.967	100	23.4	70.0	0.238
	AL6061&AISI1018	0.958	149.7	20.5	69.8	0.748
	AISI1018	0.500	219.0	16.0	78.3	0.713
0.75	AL6061	0.952	398.8	15.4	69.9	0.479
	AL6061&AISI1018	0.5	100	9.5	95.8	0.428
	AISI1018	0.5	100	10.2	71.2	0.52
0.25	AL6061	0.996	-	26.7	73.6	0.383
	AL6061&AISI1018	0.5	-	15.2	34.2	1.557
	AISI1018	0.5	-	14.3	79.6	0.691
0.50	AL6061	0.988	-	21.1	69.8	0.359
	AL6061&AISI1018	0.5	-	7.6	34.4	0.920
	AISI1018	0.5	-	4.7	73.7	0.524
0.75	AL6061	1.03	-	7.8	69.6	0.310
	AL6061&AISI1018	1.02	-	28.2	70.0	0.418
	AISI1018	0.50	-	10.4	69.8	0.275

Köpük dolgululu TWT-M' e ait üst parça kalınlığı, köpük yoğunluğu ve farklı kaynak konumlarına göre optimum değerler koniklik açısı 5° ve 10° için Tablo 3.4'de verilmiştir. Sönümlenen optimum enerji miktarları göz önüne alındığında en düşük miktarlar $\alpha=5^\circ$ için elde edilmiştir. Tablo 3.4 ve koniklik açısı arttıkça kuvvet verimliliği artmaktadır. Kaynak bağlantısının konumunun 0.25 olduğu durumda bütün optimum değerler 0.5 mm parça kalınlığında elde edilmiştir. Ayrıca bu kaynak bağlantısı konumunda optimum köpük yoğunluğu koniklik açısı büyüdükçe azalmaktadır. Kaynak bağlantısı tüpün tam ortasında

olduğu durumda ise koniklik açısı arttıkça optimum kalınlık ve köpük yoğunluğunun azalmakta olduğu görülmektedir.

Tablo 3.4. İleri beslemeli yapay sinir ağları modelinin koniklik açısı (α) 5° ve 10° için elde edilen optimum değerler

DOLGU	L_0/L	Malzeme	Üst parça kalınlığı (mm)	Köpük yoğunluğu (kg/m^3)	SEA (kJ/kg)	Başlangıç Maksimum Kuvvet (kN)	CFE
VAR	0.25	$\alpha=0^\circ$	0.5	704.1	15.4	54.2	1.559
		$\alpha=5^\circ$	0.5	224.6	7.2	32.1	1.456
		$\alpha=10^\circ$	0.5	100	11.3	31.9	1.82
	0.50	$\alpha=0^\circ$	0.958	149.7	20.5	69.8	0.748
		$\alpha=5^\circ$	0.52	100	9.8	37.4	1.05
		$\alpha=10^\circ$	0.5	100	11.1	27.4	2.556
	0.75	$\alpha=0^\circ$	0.5	100	9.5	95.8	0.428
		$\alpha=5^\circ$	0.942	674	6.5	70	0.569
		$\alpha=10^\circ$	1.1	100	6.2	70	0.304
YOK	0.25	$\alpha=0^\circ$	0.5	-	15.2	34.2	1.557
		$\alpha=5^\circ$	0.93	-	7.9	70.4	0.74
		$\alpha=10^\circ$	0.5	-	12.6	31.7	1.933
	0.50	$\alpha=0^\circ$	0.5	-	7.6	34.4	0.92
		$\alpha=5^\circ$	0.966	-	16.5	65.4	0.683
		$\alpha=10^\circ$	0.5	-	14.6	26	1.849
	0.75	$\alpha=0^\circ$	1.02	-	28.2	70	0.418
		$\alpha=5^\circ$	1.15	-	27.1	66.2	0.46
		$\alpha=10^\circ$	0.91	-	12.4	74.2	0.32

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, boş ve köpük dolulu TWT'in aksenal dinamik yük altındaki çarpışma performansı optimizasyon yöntemiyle birlikte sayısal olarak araştırılmıştır. TWT' lerin sayısal analizlerinde SEA, BMK ve CFE değişimleri; tüp kalınlığı, köpük yoğunluğu, üst parça kalınlığı, kaynak konumu ve malzeme çeşidinin etkisi belirlenmiştir. Elde edilen verilerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Köpük dolgulu kare kesitli tailor-welded tüplerin sayısal analizinde ağsız SPH yöntemi sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte başarılı bir şekilde kullanılmıştır.
- İleri beslemeli yapay sinir ağları modeli tailor-welded tüplerin çarpışma performansını verimli bir şekilde optimize etmektedir.
- İçi boş tüplerde sönmölenen özgül enerji miktarı ve kuvvet verimliliği üst parça kalınlığının artmasıyla azalmaktadır. Buna karşın başlangıç maksimum kuvvet değerinin kalınlığın artmasıyla arttığı görölmüştür.
- Köpük dolgunun kullanılması başlangıç maksimum kuvvetini artırmaktadır.
- Kaynak dikişinin konumu arttıkça kuvvet verimliliği düşmektedir. Bununla birlikte en yüksek kuvvet verimliliği farklı malzemelerden yapılmış TWT-M' de elde edilmiştir.
- TWT kullanımı başlangıç maksimum kuvvetini önemli ölçüde düşürmektedir.
- Koniklik açısının artması TWT' lerde başlangıç maksimum kuvvetini düşüreceği buna karşın sönmölenen enerji miktarını artıracığı görölmüştür.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

1. Bu çalışmada yapılan sayısal simülasyonlar yanında TWT ler için deneysel çalışmalar yapılabilir.
2. Kare kesitli TWT ler dışında farklı kesit ve malzeme özelliğine sahip optimizasyon çalışmaları yapılabilir.
3. Farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.
4. Köpüklerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi için yeni bir malzeme modeli üzerine geliştirme çalışmaları yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Ahmad, Z. Impact and Energy Absorption of Empty and Foam-filled Conical Tubes, Doktora Tezi, The School of Urban Development Queensland University of Technology, Avustralya, 2009.
2. Jones, N, Structural Impact, Cambridge University Press, 1997.
3. Abramowicz, W., Thin-walled structures as impact energy absorbers, Thin-Walled Structures,41,2-3 (2003) 91-107.
4. <http://www.boronextrication.com/tag/volvo>, Volvo S60 otomobil şasisi, 20.04.2013.
5. Huang X. ve Lu, G., Axisymmetric progressive crushing of circular tubes, International Journal of Crashworthiness,8,1 (2003), 87-95.
6. Jensen O., Langseth M. ve Hoerstad, O. Experimental investigations on the behaviour of short to long square aluminium tubes subjected to axial loading, International Journal of Impact Engineering - Eighth International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics (IMPLAST 2003), 2004.
7. Thornton, P., Mahmood H. ve Magee, C., Energy absorption by structural collapse, Structural crashworthiness, Butterworths, (1983) 96-117.
8. Zhang, X., Tian, Q. ve Yu, T., Axial crushing of circular tubes with buckling initiators, Thin-Walled Structures, 47,6-7 (2009) 788-797.
9. Kindinger, J., HexWeb Honeycomb Attributes and Properties, 1986.
10. Shi, Y., Zhu, P., Shen L. ve Lin, Z., Lightweight design of automotive front side rails with TWB concept, Thin-Walled Structures, 45, 2007 (2006) 8-14.
11. Fourlaris, G., Ellwood, R. ve Jones, T., The reliability of test results from simple test samples in predicting the fatigue performance of automotive components, Materials and Design, 28 (2006) 1198-1210.
12. Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Wlaz, C. ve Sepold, G., Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry, Journal of Materials Processing Technology, 115 (2001) 2-8.
13. Yutaka, S., Yusuke, S., Yohei, S., Park Seung Hwan, C., Hiroyuki K. ve Keisuke, I., Post-weld formability of friction stir welded Al alloy 5052, Materials Science and Engineering, A369 (2004) 3-12.

14. Hisashi, K., Toshiyuki, T. ve Fumiaki, N., Formability of Tailor Blanks, Journal of Materials Science, 71 (1997) 134-140.
15. Fukumoto, S., Tsubakino, H., Okita, K., Aritoshi, M. ve Tomita, T., Amorphization by friction welding between 5052 aluminium alloy and 304 stainless steel, Scripta Materialia, 42 (2000) 807-812.
16. Chen, C. ve Kovacevic, R. Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding, International Journal of Machine Tools, 44 (2004) 1205-1214.
17. Bach, F., Beniyash, A., Lau, K. ve Versemann, R., Joining of steel aluminium hybrid structures with electron beam on atmosphere, Advanced Materials Research, 6-8 (2005) 143-150.
18. Peixinho, N., Laser welding application in crashworthiness parts, 2010.
19. Asadi, P., Kazemi-Choobi, K. ve Elhami, A., Welding of Magnesium Alloys, New Features on Magnesium Alloys, 2012.
20. Mishraa, R. ve Ma, Z., Friction Stir Welding and Processing, Materials Science and Engineering, 2005.
21. Dawes, C. ve Thomas, W. Welding Journal, (1996), 41-45.
22. Dalkılıç, S., Sürtünme Karıştırma Kaynağı Ve Havacılık Ve Uzay Endüstrisindeki Uygulama Alanları, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 5,4 (2012) 25-33.
23. Ozan, S. ve Katı, N. Metal Köpükler, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 2011.
24. Wadley, H., Dharmasena, K., He, M., McMeeking, R., Evans, A., Bui-Thanh, T. ve Radovitzky, R., An active concept for limiting injuries caused by air blasts, International Journal of Impact Engineering, 37 (2009) 317-323.
25. Lu, G. ve Yu, T. Energy Absorption of Structures and Materials, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003.
26. Alexander, J., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, Quart. J. Mechs. and Allied Maths, 13 (1960) 1-9.
27. Wierzbicki, T. ve Abramowicz, W. On the crushing mechanics of thin-walled structures, Journal Application of Mechanics, 50,4 (1983) 737-744.

28. Abramowicz, W. ve Jones, N., Dynamic axial crushing of square tubes., International Journal of Impact Engineering, 2,2 (1984) 179-208.
29. Abramowicz, W. ve Wierzbicki, T., Axial crushing of multicorner sheet metal columns, International Journal of Impact Engineering, 56 (1989) 113-120.
30. Karagiozova, D., Alves, M. ve Jones, N., Inertia effects in axisymmetrically deformed cylindrical shells under axial impact, International Journal of Impact Engineering, 24 (2000) 1083-1115.
31. Gupta, N. ve Abbas, H. Axisymmetric axial crushing of thin frusta, Thin-Walled Structures, 36,3 (2000) 169-179.
32. Guillow, S., Lu, G. ve Grzebieta, R., Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 43,9 (2001) 2103-2123.
33. Karagiozova, D. ve Jones, N., Dynamic effects on buckling and energy absorption of cylindrical shells under axial impact, Thin-Walled Structures, 39,7 (2001) 583-610.
34. Velmurugan, R. ve Gupta, N.K., Energy absorption characteristics of metallic and composite shells, Defence Science Journal, 53,2 (2003) 127-138.
35. 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, 46,2 (2004) 201-216, 2004.
36. Nagel, G. ve Thambiratnam, D., Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading, International Journal of Crashworthiness, 9 (2004) 389-399.
37. Nagel, G. ve Thambiratnam, D., Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, Thin-Walled Structures, 43,8 (2005) 1225-1242.
38. Gupta, N.K. ve Venkatesh, Experimental and numerical studies of impact axial compression of thin-walled conical shells, International Journal of Impact Engineering, 34,4(2007) 708-720.
39. Najafi, A., Rais-Rohani ve M, Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes, Thin-Walled Structures, 49 (2010), 1-12.
40. Chen, D. ve Ushijima, K., Estimation of the initial peak load for circular tubes subjected to axial impact, Thin-Walled Structures, 49 (2011) 889-898.

41. Liu, H., Cao, Z., Luo, H., Shi, J.C. ve Yao, G., Performance of closed-cell aluminum foams subjected to impact loading, Materials Science & Engineering, 570 (2012) 27-31.
42. Croop, B. ve Lobo, H., Selecting material models for the simulation of foams in Ls-Dyna, Seventh European Ls-Dyna Conference, 2009.
43. Reyes, A., Hoerstad, O., Berstad, Hanssen T.A. ve Langseth, M., Constitutive modelling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density, European Journal of Mechanics - A/Solids, 22,6 (2003) 815-835.
44. Gibson, L. ve Ashby, M., Cellular solids: structure and properties., Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
45. Yamada, Y., Banno, T., Xie, Z. ve Wen, C., Energy absorption and crushing behaviour of foam-filled aluminium tubes, Materials Transactions, 6,12 (2005) 2633-2636.
46. Gedikli, H., Crashworthiness optimization of foam-filled tailor-welded tube using coupled finite element and smooth particle hydrodynamics method, Thin-Walled Structures, 67(2013) 34-48.
47. Rajendran, R., Moorthi A. ve Basu, S., Numerical simulation of drop weight impact behaviour of closed-cell, Material and Design,30 (2009) 2823-2830.
48. Gilchrist, A., ve Mills, N., Impact deformation of rigid polymeric foams: experiments and FEA modelling, International Journal of Impact Engineering 2005 (2001) 767-786.
49. Ahmad, Z. ve Thambiratnam D., Energy absorption performance of foam-filled conical tubes under axial and oblique loadings, 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, Sousse, Tunisia, 2008.
50. Ghamarian, A., Zarei H. ve Abadi., M.T., Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-caed conical tubes, Thin-Walled Structures, 49 (2011) 1312-1319.
51. Hanssen, A., Langseth M. ve Hoerstad, O., Static crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler, International Journal of Impact Engineering, 41,8 (1999) 967-993.
52. Hanssen, A., Langseth, M. ve Hoerstad, O., Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler, International Journal of Impact Engineering,24,5 (2000) 475-507.

53. Hanssen, A., Langseth, M. ve Hoerstad, O., Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler, International Journal of Impact Engineering,4,4 (2000) 347-383.
54. Santosa, S. ve Wierzbicki, T., Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam, Computers & Structures,68,4 (1998) 343-367.
55. Santosa, S., Wierzbicki, T., Hanssen, A. ve Langseth, M., Experimental and Numerical studies of foam-filled sections, International Journal of Impact Engineering, 24,5 (2000) 509-534.
56. Hall, I., Ebil, O., Guden, M. ve Yu, C., Quasi-static and dynamic crushing of empty and foam-filled tubes, Journal of Materials Science,36,24 (2001) 5853-5860.
57. Altenhof, W., Harte A. ve Turchi, R., Experimental and numerical compressive testing of aluminium foam-filled mild steel tubular hat sections, 7th International LS-DYNA Users Conference, Ontario , 2002.
58. Wang, Q., Fan, Z., Song, H. ve Gui, L. Experimental and numeric analyses of the axial crushing behaviour of hat sections partially filled with, International Journal of Crashworthiness,10,5 (2005) 535-543.
59. Song, H., Fan, Z., Yu, G., Wang, Q.C. ve Tobota, A., Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections, International Journal of Solids and Structures,42,9-10 (2005) 2575-2600.
60. Yan, W., Durif, E., Yamada, Y. ve Wen, C., Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes, Materials Transactions,48,7 (2007) 1901-1906.
61. Zhang, X. ve Cheng, G., A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns, International Journal of Impact Engineering, 34,11 (2007) 1739-1752.
62. Aktay, L., Johnson, A., Toksoy, A., Kroplin, B. ve Guden, M., Modeling the progressive axial crushing of foam-filled aluminum tubes using smooth particle hydrodynamics and coupled finite element model/smooth particle hydrodynamics, Materials & Design,29,3 (2008) 569-575.
63. Ahmad, Z. ve Thambiratnam, D., Application of foam-filled conical tubes in enhancing the crashworthiness performance of vehicle protective structures, International Journal of Crashworthiness,14,4 (2009) 343-369.

64. Ahmad, Z. ve Thambiratnam, D., Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading, Materials & Design,30,7 (2009) 2393-2403.
65. Ahmad, Z. ve Thambiratnam, D., Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, Computers & Structures, 87,3-4 (2009) 186-197.
66. Zhang Li-ling, G. ve Fa-rong, D., Experimental and numerical investigation of axial crushing of dissimilar thickness tailor-welded tube, Journal of Plastic Engineering, 13,4 (2006) 7-11.
67. Shi, Y., Lin, Z., Zhu, P. ve Han, S., Impact modeling of the weld line of tailor-welded blank, Materials and Design, 29 (2010) 232-238.
68. Gedikli, H., Numerical investigation of axial crushing behavior of a tailor-welded tube, Material and Design,44 (2012) 587-595.
69. Nakhaei, F., Mosavi, M. ve Sam, A., Recovery and Grade Prediction of Pilot Plant Potation Column Concentrate, International Journal of Mining Science and Technology,23 (2012) 69-77.
70. Johnson, G. ve Cook, W., A constitutive model and data for metals subjected to large strains,high strain rate and high temperatures, In:Proceedings of the seventh international symposium on Ballistics, Hague,Netherlands, 1983.
71. Fish, J., Oskay, C. ve Fan, R., AL6061-T6-elastomeer impact simulations, Rensselaer polytechnic institute, 2005.
72. Sasso, M., Newaz, G. ve Amodio. D., Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization, Materials Science and Engineering A, 487 (2008), 289-300.
73. Padmanabhan, R. ve Oliveira, M. ve Menezes, L., Deep drawing of aluminium–steel tailor-welded blanks, Materials and Design, 29 (2008) 154-160.
74. Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X. ve Li, W., Crashworthiness design for foam filled thin-walled structures, Material and Design,30 (2009) 2024-2032.
75. LS-DYNA keyword user's manual Version, LSTC, 2010.
76. Belytschko, T. ve Tsay, C., Explicit Algorithms for Nonlinear Dynamics of Shells, AMDVol,48 (1981) 209-231.

77. Attia, M., Meguid, W. ve Nouraei, H., Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns, Finite Elements in Analysis and Design, 61 (2012) 50-59.
78. Zarei H. ve Kroger, M., Optimum honeycomb filled crash absorber design, Materials and Design, 29,1 (2008) 193-204.
79. Acar, E., Guler, M., Gerceker, B., Cerit M. ve Bayram, B., Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, Thin-walled Structures, 49 (2011) 94-105.
80. Ls-Opt; User's; manual, LSTC, 2010.
81. Pawlis, W., Robbersmyr, K. ve Karimi, H., Performance evaluation of feed forward neural networks for modeling a vehicle to pole central collision, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Durukan Burak DİLEK 1986 yılında Malatya’da doğdu. Orta öğrenimini Malatya Lisesi’nde tamamladı. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden Makine Mühendisi unvanıyla mezun oldu. Mezun olduğu yıl Malatya’da Serena Çelik Döküm firmasında bir yıl çalıştı. Sonra 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi’nde yüksek lisans programına başladı. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Ayrıca iyi derecede İngilizce ve bilmektedir.