



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

KÖPÜK DOLGULU KARE KESİTLİ TAILOR-WELDED TÜPLERİN ÇARPMA PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR/PARÇACIK HİDRODİNAMIĞI YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Durukan Dilek, Dursun Meriç ve Hasan Gedikli

Karadeniz Technical University, Department of Mechanical Engineering, Trabzon.

ÖZET

Bu çalışmada köpük dolgulu tailor welded tüplerin aksel yük altındaki dinamik davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle araştırıldı. Bu çalışmada optimizasyon modüllü (Ls-Opt) ticari sonlu elemanlar yazılımı LS-DYNA kullanıldı. Köpük dolgulu tüplerin enerji sönümleme kapasitelerini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi ve düzgün parçacık hidrodinamiği yöntemi birlikte kullanıldı. Analizler sonucunda özgül enerji absorpsiyonu (SEA), pik kuvveti, çarpma kuvveti verimliliği (CFE, ortalama kuvvetin pik kuvvete oranı) grafikleri elde edildi. Sonuçta tüp kalınlığı ve yoğunluğun artmasıyla tailor-welded tüplerin çarpma performansını artırdığı görülmüştür.

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımı ve yüksek mukavemetli çelik gibi malzemelerin birleştirilmesi, yüksek sertlik-ağırlık oranı ve üstün fonksiyonel kabiliyetleri nedeniyle otomotiv endüstrisinde çok dikkat çekmiştir [1]. Farklı malzemelerin birleştirilmesi sonucu elde edilen ürünler tailor-welded tüpler (TWT) olarak isimlendirilmiştir. Tailor-welded tüplerin üretilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) lazer ışın kaynağı ve elektron ışın kaynağı kullanılmaktadır.

Tailor-welded tüplerin ezilme davranışına yönelik birkaç çalışma yapılmıştır. Zhang vd., [2] özel kaynaklı boruların aksel deformasyon davranışı üzerinde kalınlık farkının araştırıldı. Shi vd., [3] farklı kalınlıklara sahip tailor-welded tüplerin kaynak bölgesinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi üzerinde çalışmıştır. Sonuçta kaynak dikişinin modellenme yönteminin malzeme ve geometri açısından önemli olduğu görülmüştür. Salehghaffari vd., [4] silindirik metal boruların özellikleri incelenmiştir. Dairesel tüpler için uyguladıkları tasarım yöntemi çarpma performansını iyileştirirken başlangıç pik kuvvetini azaltmıştır. Gedikli [5] tailor-welded tüplerin malzeme, kalınlık oranının TWT' nin enerji sönümleme kapasitesine etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Alüminyum ve yüksek mukavemetli çelikten oluşan tailor-welded tüpler aksel yük altında pik kuvvetini başarılı bir şekilde azalttığı görülmüştür.

Ayrıca optimizasyon yöntemleri de enerji sönümleme ve çarpma performansına yönelik çalışmalarda yaygın kullanılmaktadır. Örneğin Zarei ve Kröger [6] köpük dolgulu ve kare kesitli alüminyum tüplerle yaptığı çalışmada çok değişkenli optimizasyon (MDO) tekniği

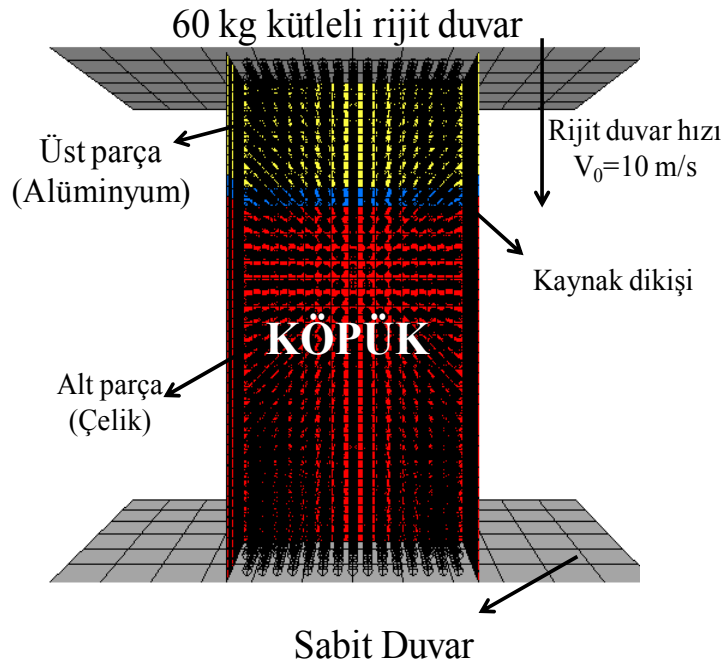
kullanmıştır. Uygulama gereksinimleri açısından maksimum enerji sönümlenme kapasitesi ve en düşük ağırlığa sahip tüp geometrisi belirlenmiştir. Bir başka çalışmada ise Zarei ve Kröger [7] içi boş ve petek dolgulu alüminyum tüpler üzerinde çarpışma testleri gerçekleştirmiştir. Öncelikle çok değişkenli optimizasyon (MDO) tekniği ile, kare, dikdörtgen, dairesel borular, enerji emme ve spesifik enerji emilimi maksimize etmek için uygulanmıştır. Optimizasyon yöntemi en iyi sonuçların dairesel tüplerde olduğunu göstermiştir. Hou vd., [8] köpük dolgulu kare kesitli tüpler üzerinde çok değişkenli optimizasyon çalışması yapmıştır.

Bu çalışmada alüminyum köpük dolgulu kare kesitli tailor-welded tüplerin aksel yük altında ticari elemanlar kodu LS-DYNA ve optimizasyon yazılımı LS-OPT ile enerji sönümlenme kapasiteleri araştırılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

TWT geometrisi ve malzemesi

Şekil 1’de köpük dolgulu bir TWT geometrisi görülmektedir. TWT’ nin dış çap ölçüsü 50 mm ve boyu 100 mm’ dir ($L=2a$). Üst parçanın kalınlığı (t_1) 0.5mm ile 2.5 mm arasında değişmektedir. Alt parçanın kalınlığı sabit ve 1.5 mm’ dir. Kaynak dikişinin kalınlığı 4mm olup tüpün üst ucundan itibaren üç farklı mesafede konumlandırılmıştır ($L_0=0.25L$, $L_0=0.50$ ve $L_0=0.75L$).



Şekil 1 Köpük dolgulu kare kesitli TWT’ nin birleşik FE/SPH modeli

Tailor-welded tüpler farklı kalınlıklardaki aynı veya farklı tür malzemelerin birleşmesiyle oluşturulur. Bu çalışmada tek tür malzemedan oluşan tüpler “TWT-S” iki farklı tür malzemedan oluşan tüpler “TWT-M” olarak isimlendirilmiştir. TWT-S için alüminyum alaşımı AL6061 ve soğuk çekilmiş çelik AISI1018 kullanılmıştır. TWT-M için bu iki farklı malzeme birleştirilmiştir (Şekil 1).

Bu çalışmada sayısal analizlerde Johnson-Cook [9] malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli sıcaklıklara ve büyük deformasyonlara maruz kalan malzemelerin

davranışlarını tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır ve genelde ani dinamik davranışı incelenen malzemeler için kullanılmaktadır. AL6061 ve AISI1018 malzemeleri için Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri Fish vd., [10] ve Sasso vd., [11] referanslarından alınarak Tablo 1’de verilmiştir.

Kaynak dikişinin özellikleri, denklem 1’deki karışım kuralı uygulanarak türetilmiştir. Bu denklemde, kaynak bölgesinde [12] çelik malzemenin alüminyuma göre daha az nüfuz ettiği varsayılmıştır.

$$X_K = (0.6)W_{AL} + (0.4)X_{CL} \quad (1)$$

Burada “K”, “AL”, “ÇL” simgeleri sırasıyla kaynak dikişi, alüminyum ve çeliği göstermektedir.

Tablo 1 AL6061, AISI1018 ve AL6061&AISI1018 malzemeleri için lineer malzeme özellikleri ve Johnson-Cook sabitleri

Malzeme	Johnson-Cook malzeme sabitleri					Lineer malzeme özellikleri	
	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modeli (MPa)
AL6061	289.6	203.4	0.011	0.35	1.34	2850	72
AISI1018	520	269	0.0476	0.282	.0553	7850	200
AL6061&AISI1018	381.8	229.6	0.0256	0.323	1.136	4850	123.2

Köpük Malzemesi

Tipik bir köpüğün gerilme-şekil değiştirme eğrisi elastik bölge, hücrelerin plastik olarak deforme olmasından dolayı gerilmenin yavaş bir şekilde arttığı düz bölge ve sıkıştırılmış bölgedir.

Plastik gerilme σ_p , köpük yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğundan, köpük malzemeleri karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Köpük yoğunluğu ile plastik gerilme σ_p ilişkisi aşağıda gösterilmiştir.

$$\sigma_p = C \left(\frac{\rho_{KÖPÜK}}{\rho_0} \right)^m \quad (2)$$

Burada $\rho_{köpük}$ köpüğün yoğunluğudur. Çalışmada köpüğün malzemesi alüminyum olduğundan $\rho_0 = 2700 \text{ kg/m}^3$ ’dur. C ve m ise malzeme sabitleri olup sırasıyla 526 (MPa) ve 2.17 olarak tanımlanmıştır. Gerilmeye (σ_p) bağlı şekil değiştirme-gerilme eğrisi verileri Tablo 2’de verilmiştir.

Bu çalışmada köpük dolgu malzemesi olarak alüminyum seçilmiştir. Alüminyum köpük izotropik ve şekil değişiminden bağımsız olarak kabul edilmektedir. Ayrıca Merrette vd., [13] deneysel çarpma testi yaparak plastik çökme mukavemeti ve plastik gerilmenin çarpma hızı arttığında artmadığını göstermiştir.

Tablo 2 Alüminyum köpük için plastik gerilme cinsinden deformasyon-gerilme verileri [8]

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

Problemin sonlu elemanlar modeli

Problemin sonlu elemanlar analizi için nonlinear sonlu elemanlar kodu LS-DYNA optimizasyon modülü LS-OPT ile beraber kullanılmıştır. TWT bileşenleri (üst parça, kaynak dikişi ve alt parça) için LS-DYNA’ da Johnson-Cook izotropik (MAT 15) malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli karmaşık yapısal termal ve yapısal analizlere uygundur. Tablo 1’de verilen AL6061 ve AISI1018’e ait Johnson-Cook sabitleri kullanılarak TWT-S ve TWT-M modelleri kurulmuştur. Köpük dolgulu tailor-welded tüpler için SEY ve SPH bir arada uygulanmıştır. Boş tüpler için ise sadece FE uygulanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde tüplerin tüm bölgeleri (üst parça, kaynak bölgesi ve alt parça) dokuz integrasyon noktalı Belytschko–Tsay [14] eleman formülasyonu kullanılmıştır. Kabuk eleman boyutları 2 mm x 2 mm seçildiğinde uygun sonuçlar alınmıştır.

Köpüğü sonlu elemanlar yöntemi ile analizi büyük deformasyonlar nedeniyle çok zor olduğundan ağırsız SPH yöntemi kullanılmıştır. SPH elemanları arasındaki uzaklık sabit ve 2 mm olarak alınmıştır. LS-DYNA’ da [15] var olan köpük malzeme modelleri arasında bütün yük konfigürasyonları için daha doğru sonuçlar verdiği için köpüğün malzeme modeli için *CRUSHABLE FOAM (*MAT 63) modeli kullanılmıştır. Young modülü $E=63.75$ GPa ve poisson oranı 0,0 olarak alınmıştır. Rijit duvar için ise *RIGID (*MAT 20) malzeme modeli kullanılmıştır.

Bu çalışmada model için iki çeşit temas algoritması uygulanmıştır. Bunlardan biri olan *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE analiz sırasındaki iç içe geçişleri önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Diğer temas algoritması ise *CONTACT_NODE_SURFACE kartı kullanarak tüp-köpük, tüp-rijit plaka ve rijit-köpük ara yüzleri tanımlanmıştır. Burada statik ve dinamik sürtünme katsayıları olarak 0,1 ve 0,2 olarak alınmıştır. Üst parçanın kalınlığı 0,5–2,5 mm arasında değiştiğinden tüp ve köpük arasında 1,25 mm boşluk bırakılmıştır.

Tüp darbe yüküne maruz kaldığından rijit plaka üzerinde 60 kg kütleli bir MASS eleman atanmıştır. Bu rijit düzleme *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY keywordu kullanılarak 10 m/s başlangıç hızı verilmiştir. Altta sabit duvarı temsil etmesi için *RIGIDWALL içinde *GEOMETRIC_FLAT kullanılmıştır (Şekil 4).

LS-DYNA’ da analizleri durdurmak için iki kriter uygulanmıştır. Bunlardan birinde rijit duvar hızı 0.01 m/s’ ye düştüğünde analiz duracak ve diğerinde ise ezilme mesafesi 50 mm’ ye ulaştığında analizler durdurulacaktır.

Problemin çok değişkenli optimizasyon modeli

Bu çalışmada optimizasyon çalışması için özgül enerji absorpsiyonu (SEA), başlangıç pik kuvveti (F_{pik}), ortalama ezilme kuvveti (F_{ORT}) ve çarpma kuvveti verimliliği (CFE) çapma performansı kriterleri tanımlanmıştır.

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

$$F_{avg} = \frac{E_{toplama}}{\Delta} \quad (3)$$

$$CFE = \frac{F_{ort}}{F_{peak}}$$

$$M_{toplama} = 4*0.050*(L_0 - 0.002) \rho_1 t_1 + 0.0008 \left(\frac{t_1 + 0.0015}{2} \right) (0.6\rho_1 + 0.4\rho_2) + 4*0.05(L - L_0 - 0.002)0.0015 * \rho_2 \rho_{FOAM} (0.01875^2) L$$

Burada $E_{toplama}$ toplam yutulan enerji, $F(x)$ aksenal doğrultudaki ezilme kuvveti, Δ ezilme deplasmanı, $M_{toplama}$ problemin toplam kütlesi, t_1 is tüpün üst parçasının kalınlığı, ρ_1 ve ρ_2 sırasıyla üst ve alt parçanın yoğunluğu, $\rho_{köpük}$ köpük yoğunluğudur. Şekil 3’de optimizasyon akış şeması verilen problemin optimizasyon modeli aşağıdaki gibidir. Başlangıç pik kuvveti (F_{pik}), ortalama kuvvet (F_{ort}) ve maksimum kuvvet (F_{max}) gibi büyük kuvvetler meydana gelen çarpışmaların yolcuların yaralanmalarına ve ölümlerine sebebiyet vereceği için son derece önemlidir. Bu yüzden SEA ve CFE değerlerinin maksimum istenirken başlangıç pik kuvveti değerinin minimum olması gerekmektedir [16, 17, 18]

Bu çalışmada SEA, $1/F_{pik}$ 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 arasında alınmıştır. Köpük yoğunluğu ($\rho_{köpük}$) ise 100 kg/m^3 ile 800 kg/m^3 arasında sınırlandırılmıştır. Aşağıda denklem 4’de problemin optimizasyon modeli gösterilmiştir. Probleme ait optimizasyon işleminin akış şeması ise Şekil 4 gösterilmiştir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximize: } (SEA(t_1, \rho_{KÖPÜK}); 1/F_{peak}(t_1, \rho_{KÖPÜK}); CFE(t_1, \rho_{KÖPÜK})) \\ \text{Kısıtlar: } \left\{ \begin{array}{l} F_{peak}(t_1, \rho_{KÖPÜK}) \leq 70 \text{ kN} \\ F_{max}(t_1, \rho_{KÖPÜK}) \leq 200 \text{ kN} \\ 0.5 \text{ mm} \leq t_1 \leq 2.5 \text{ mm} \\ 100 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{KÖPÜK} \leq 800 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4)$$

Yapay sinir ağları lineer olmayan problemlerin modellenmesinde güçlü bir potansiyele sahiptir [19].

Bu çalışmada tüplerin analizi için ileri beslemeli yapay sinir ağları kullanılmıştır.

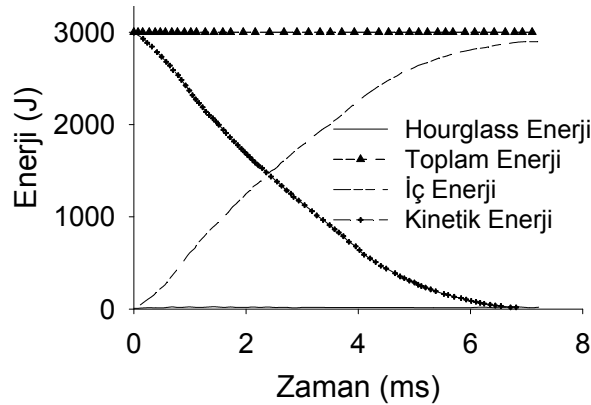
Bu çalışmada 10 örnek noktalı ($>3^2$) üst parçanın kalınlığı ve köpük yoğunluğu gibi iki değişken seçilmiştir. Her bir L_0/L değeri için kullanılan boş ve dolu tüplerdeki numune noktaları ve bunların malzeme özellikleri (üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğu) Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3 Köpük dolgulu tüplerde $L_0=0.25L$, $L_0=0.50L$ ve $L_0=0.75L$ için Optimizasyon işleminde kullanılan örnek noktaları ve malzeme noktalar

Malzemeler		Tüpü tipi		
		$L_0=0.25L$	$L_0=0.50L$	$L_0=0.75L$
Üst parça	Alt parça	Örnek Noktalar	Üst parçanın kalınlığı (mm)	Köpük Yoğunluğu (kg/m^3)
<i>AL6061 (i)</i> <i>AL6061 (ii)</i> <i>AISI1018 (iii)</i>	<i>AL6061 (i)</i> <i>AISI1018 (ii)</i> <i>AISI1018 (iii)</i>	1	0.5	100
		2	1.8	499
		3	0.5	503
		4	0.5	800
		5	2.5	598
		6	2.48	288
		7	1.91	800
		8	1.09	302
		9	1.21	651
		10	1.79	120

3. BULGULAR VE İRDELEME

Sonlu elemanlar modelinin doğruluğu



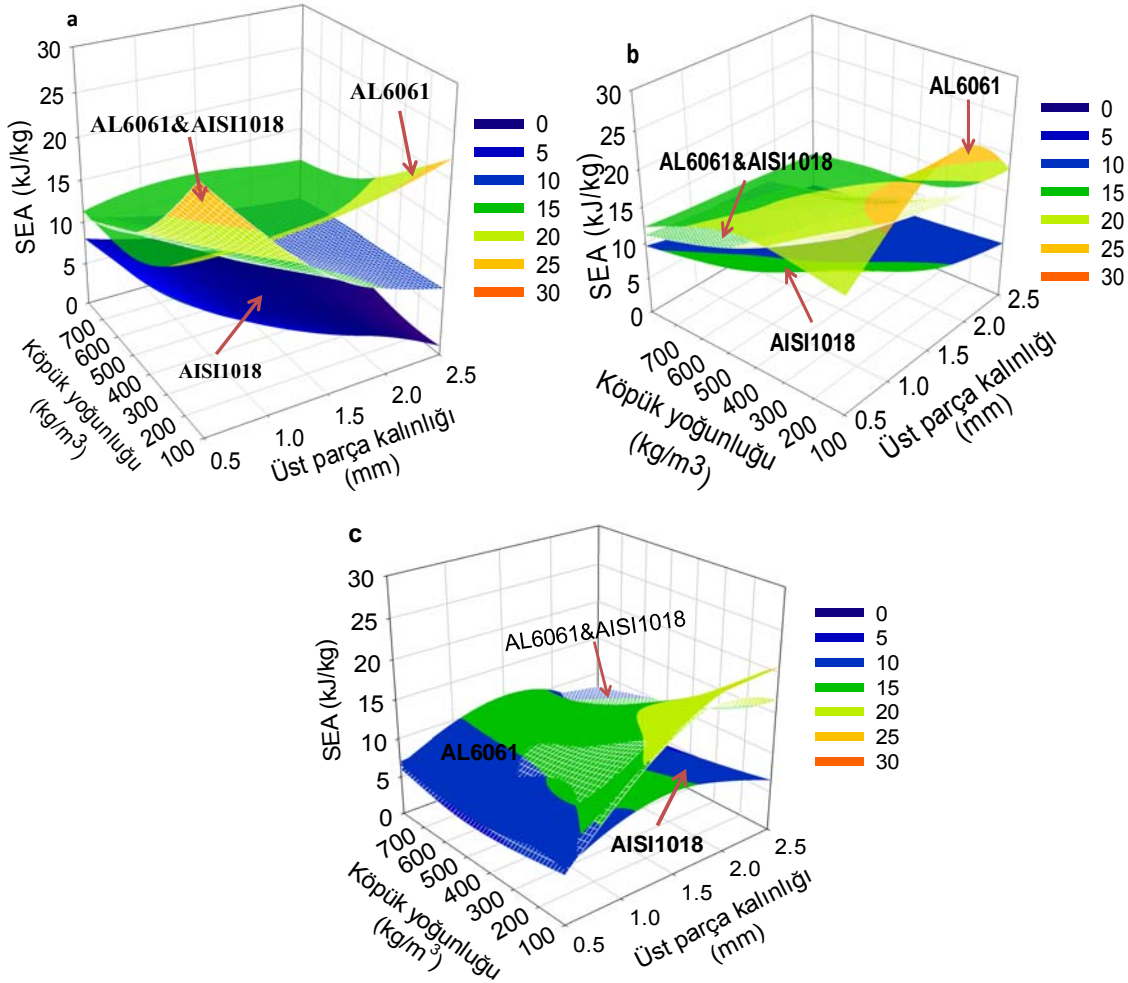
Şekil 2 Köpük dolgulu TWT için enerji zamana bağlı eğrileri

Şekil 5’de köpük dolgulu tailor-welded tüpün enerji eğrileri gösterilmiştir. Sonuç olarak sonlu elemanlar modelinin mesh boyutları ve düzgün hidrodinamik parçacıkların aralarındaki uzaklık köpük dolgulu tüp için gayet uygun olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi için ağ boyutları, hidrodinamik düzgün parçacıklar arasındaki mesafe, eleman formülasyonları, integrasyon noktaları ve temas algoritmaları bütün analizlerde uygulanmıştır.

Köpük dolgulu tailor-welded tüplerde kaynak yerinin, üst parça kalınlığının, köpük yoğunluğunun SEA, CFE ve pik kuvveti üzerindeki etkisi

Şekil 6’da tüpün üst kısmının kalınlığı ve köpük yoğunluğuna karşı SEA’deki 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 $600–800 kg/m^3$ olduğu bölgede SEA değerleri AISI1018’den yapılmış tüplerde daha yüksektir (Şekil 3a ve 7b). Köpük yoğunluğunun minimum ve kalınlığın en

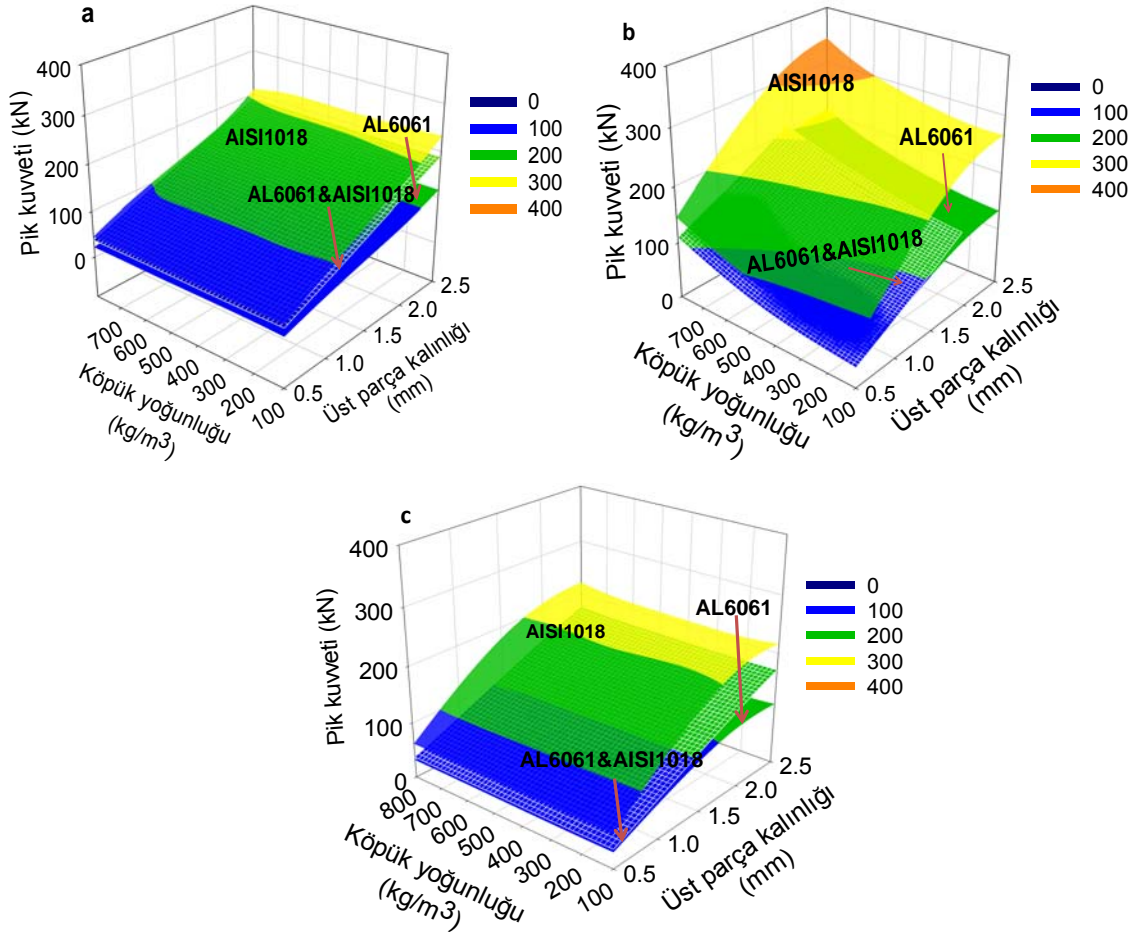
maksimum olduğu yerde özgül enerji sönümlenme değeri maksimumdur (Şekil 7a). Ayrıca Şekil 7a’ da köpük yoğunluğun artmasıyla TWT-M’ in özgül enerji sönümlenme kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7b’de köpük yoğunluğunun ve üst parça kalınlığının artmasıyla TWT-M için özgül enerji sönümlenme değeri maksimuma ulaşmaktadır. Ayrıca aşağıdaki üç grafikten köpük yoğunluğunun artmasıyla AL6061 malzemeli tüpün özgül enerji sönümlenme miktarının azaldığı söylenebilir. Dolgu köpüğü yoğunluğu SEA önemli ölçüde değerlerini etkiler [8]. Bütün tüpler için yüksek köpük yoğunluğu ($400\text{--}800\text{ kg/m}^3$) ve yüksek kalınlıklar ($1.5\text{--}2.5\text{ mm}$) toplam kütleleri artırdığından özgül enerji sönümlenme miktarını azaltmaktadır.



Şekil 6 Köpük dolgulı tüplerin özgül enerji absorpsiyon cevabı $L_0=0.25L$ a) $L_0=0.50L$ b) $L_0=0.75L$ c)

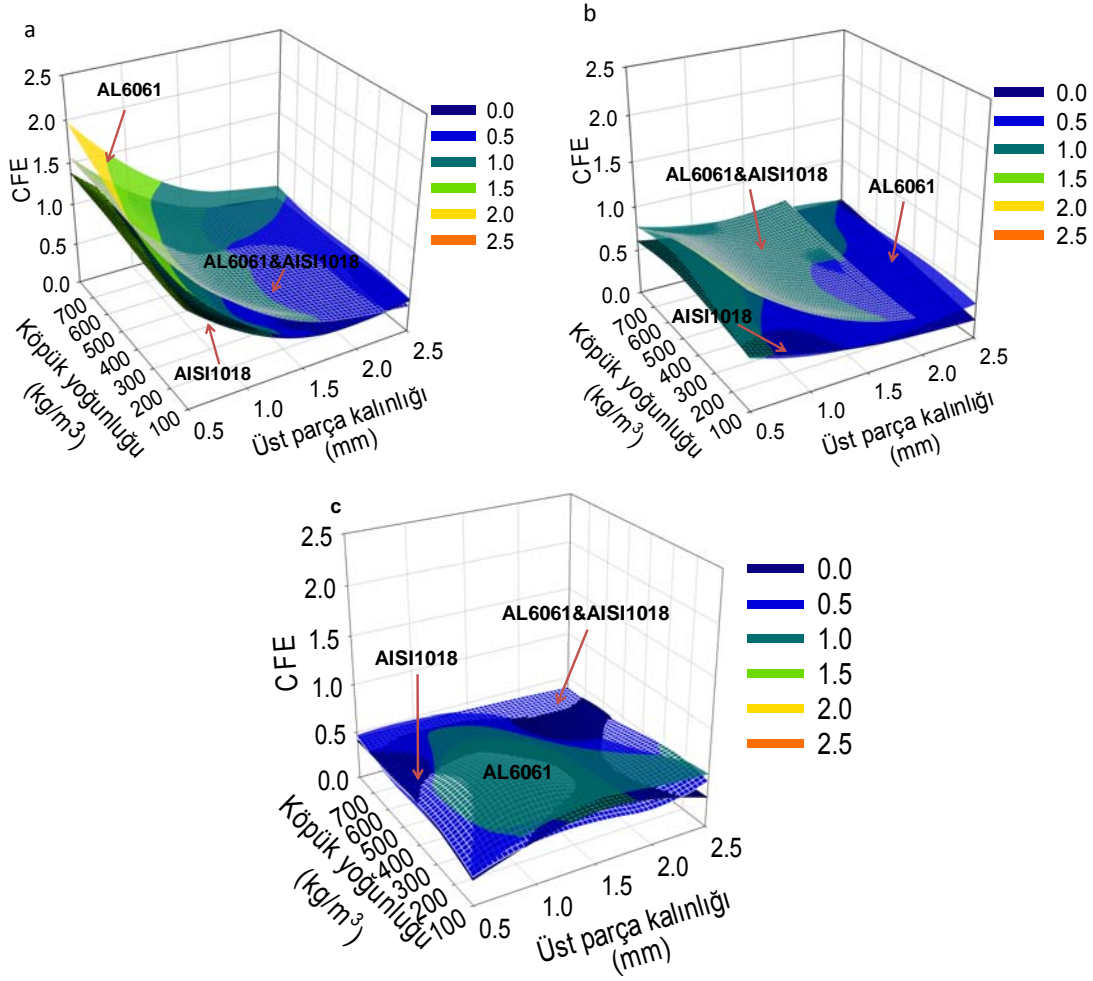
Şekil 8’de köpük dolgulı köpüklerde üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna bağılı olarak tahmini pik kuvveti değışimi görülmektedir. Grafiklerde en fazla pik kuvvetinin AISI1018’de oluştuğı ve en az pik kuvvetinin ise AL6061’de oluştuğı görülmektedir. Kaynak dikişinin yerinin 0.25 ve 0.75 olduğı Şekil 8a ve 8c’de köpük yoğunluğunun pik kuvvetine etkisinin fazla olmadığı görülmektedir. Şekil 8b’de ise denklem(2)’de köpüğün yoğunluğunun artmasıyla gerilme arttığından köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığının artmasıyla pik kuvvetini arttığı görülmektedir. Şekil 8a’da pik kuvvetinin üst parça kalınlığının 1,5 değerine kadar AL6061 malzemeli TWT-S ve TWT-M tüplerinde aynı pik kuvveti değerinde olduğı görülmektedir. Sonuç olarak köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığı pik değeri artırırken

TWT-M malzeme kullanılması pik kuvvetini azaltmaktadır. Ayrıca grafiklerden üst parça kalınlığının



Şekil 4 Köpük dolgulı tüplerin tahmini pik kuvveti cevabı a) $L_0=0.25L$ b) $L_0=0.50L$ c) $L_0=0.75L$

Şekil 9’de alüminyum köpük dolgulı tüplerin yaklaşık CFE cevabını göstermektedir. Şekil 8a ve 8b, 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 önemsenmeyecek kadar azdır (Şekil 9a). Şekil 9a’de AL6061’de düşük kalınlık ve yüksek köpük yoğunluğunda CFE değerinin maksimum olduğu görülmektedir. Şekil 8a ve 9b’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 5 Köpük dolgulu tüplerin tahmini CFE cevabı a) $L_0=0.25L$ b) $L_0=0.50L$ c) $L_0=0.75L$

4. SONUÇLAR

Köpük dolgulu TWT'lerin aksenal yükler altındaki çarpışma davranışlarını belirlemek için sayısal analizleri yapıldı. Analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir

- Köpük dolgulu kare kesitli tailor-welded tüplerin sayısal analizinde ağırsız 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.
- 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.

5. KAYNAKLAR

- [1] E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner, C. Wlaz ve G. Sepold, «Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry,» *Journal of Materials Processing Technology*, no. 115, pp. 2-8, 2001.
- [2] G. Zhang Li-ling ve D. Fa-rong, «Experimental and numerical investigation of axial crushing of dissimilar thickness tailor-welded tube,» *Journal of Plastic Engineering*, no. 13(4), pp. 7-11, 2006.
- [3] Y. Shi, Z. Lin, P. Zhu ve S. Han, «Impact modeling of the weld line of tailor-welded blank,» *Materials and Design*, no. 29, pp. 232-238, 2010.
- [4] S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panah ve F. Mokhtarnezhad, «Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading,» *Thin-walled Structures*, no. 48, pp. 379-390, 2010.
- [5] H. Gedikli, «Numerical investigation of axial crushing behavior of a tailor-welded tube,» *Materials and Design*, no. 44, pp. 587-595, 2013.
- [6] H. Zarei ve M. Kroger, «Optimization of the foam-filled aluminum tubes,» *Thin-Walled Structures*, no. 46(2), pp. 214-221, 2008.
- [7] H. Zarei ve M. Kroger, «Optimum honeycomb filled crash absorber design,» *Materials and Design*, no. 29 (1), pp. 193-204, 2008.
- [8] S. Hou, Q. Li, L. S, X. Yang ve W. Li, «Crashworthiness design for foam filled thin-walled structures,» *Material and Design*, no. 30, pp. 2024-2032, 2009.
- [9] G. Johnson ve W. Cook, «A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rate and high temperatures,» %1 içinde *In: Proceedings of the seventh international symposium on Ballistics*, Hague, Netherlands, 1983.
- [10] J. Fish, C. Oskay ve R. Fan, «AL6061-T6-elastomeer impact simulations,» Rensselaer polytechnic institute, 2005.
- [11] M. Sasso, G. Newaz ve A. D, «Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization,» *Materials Science and Engineering A*, no. 487, pp. 289-300, 2008.
- [12] R. Padmanabhan, M. Oliveira ve L. Menezes, «Deep drawing of aluminium–steel tailor-welded blanks,» *Materials and Design*, no. 29, pp. 154-160, 2008.
- [13] R. Merrette, G. Langdon ve M. Theobald, «The blast and impact loading of aluminium foam,» *Materials and Design*, no. 44, pp. 311-319, 2013.
- [14] T. Belytschko ve T. C.S., «Explicit Algorithms for Nonlinear Dynamics of Shells,» *AMDVol*, no. 48, pp. 209-231 , 1981.
- [15] « LS-DYNA keyword user’s manual Version,» LSTC, 2010.
- [16] L. Gibson ve M. Ashby, «solids:structure and properties.,» Cambridge, Cambridge

University Press, 1997.

- [17] M. Attia, S. Meguid ve H. Nouraei, «Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns,» *Finite Elements in Analysis and Design*, no. 61, pp. 50-59, 2012.
- [18] E. Acar, M. Guler, B. Gerceker, M. Cerit ve B. Bayram, «Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations,» *Thin-walled Structures*, no. 49, pp. 94-105, 2011.
- [19] «Ls-Opt; User's; manual,» LSTC, 2010..