



KÖPÜK DOLGULU KAYNAKLI KONİK TÜPLERİN ENERJİ SÖNÜMLEME ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Dursun MERİÇ¹ ve Hasan Gedikli²

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, A. Kanca MYO, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon

ABSTRACT

In this study, we numerically evaluated the energy absorbing behavior of aluminum metal foam-filled tailor welded tubes (TWT) with different taper angles (0° , 5° , 10° , and 15°) by using the Feedforward Neural Network (FNN). Within the scope of the study, tubes composed of Al6061 and AISI1018 materials were designed by using three different weld zones ($L_0/L=0.25$, $L_0/L=0.50$, and $L_0/L=0.75$). In the welded tubes, the thickness of the lower part (AISI1018) was held constant, while the thickness of the upper part (Al6061) and the foam density of the filler material were variable (0.5-2.5 mm and 100-800 kg/m³, respectively). Based on the analysis of the study results, it was determined that a 5° taper angle exhibited the best energy absorbing behavior. In addition, we also determined the optimum upper part thickness and foam density for obtaining the minimum peak power and maximum SEA values.

ÖZET

Bu çalışmada, farklı koniklik açısına sahip (0° , 5° , 10° , 15°), alüminyum metalik köpük dolgulu ve kaynaklı dikişli tüplerin (TWT) enerji sönmleme davranışı ileri beslemeli yapay sinir ağıları yöntemi kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Analizlerde; Al6061 alüminyum alaşımı ve AISI1018 çelik malzemeleri, üç farklı kaynak bölgesi ($L_0/L=0.25$, $L_0/L=0.50$, $L_0/L=0.75$) kullanılarak tasarlanmıştır. Kaynaklı tüplerde; alt parça (AISI1018) kalınlığı sabit (1.5 mm) tutulurken üst parça (Al6061) kalınlığı (0.5 mm-2.5 mm) ve dolgu malzemesi köpük yoğunluğu (100 kg/m³-800 kg/m³) değişken alınarak tanımlanmıştır. Analizler sonucunda 5° koniklik açısına sahip tüpler en iyi enerji sönmleme davranışı göstermişlerdir. Ayrıca minimum pik kuvvet ve maksimum SAE değerleri için optimum üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğu değerleri belirlenmiştir.

GİRİŞ

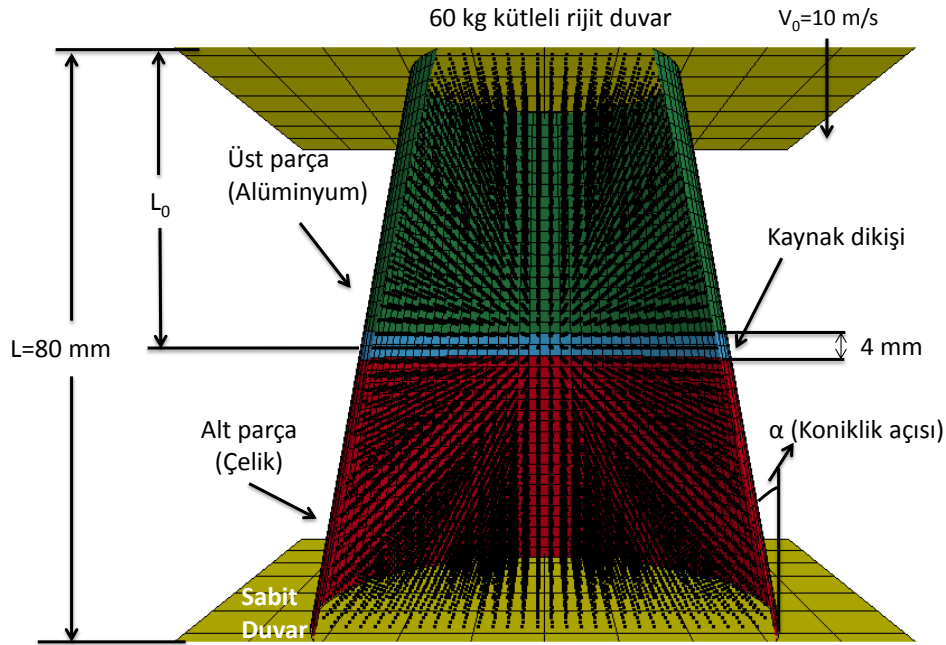
İnce cidarlı tüpler, düşük maliyet, hafiflik ve yüksek enerji sönmleme özelliklerinden dolayı mühendislik endüstrisinde genel enerji sönmleyiciler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [1]. Yapılan çalışmalarda ince duvarlı tüplerdeki enerji sönmleme kapasitesini, cidar kalınlığı, kesit geometrisi, malzeme çeşidi ve dolgu malzemeleri önemli ölçüde etkilemektedir [2]. Son 20 yıldan beri ince duvarlı yapıların enerji sönmleme kabiliyetleri optimizasyon teknikleri kullanılarak araştırılmaktadır [3-6]. Bu nedenle bu çalışmada literatürde olmayan kaynak dikişli, köpük dolgulu ve alüminyum-çelik

malzemelerinden üretilmiş tüplerin enerji sönümleme kapasitesi optimizasyon yöntemi ile Ls-DYNA paket programı kullanılarak araştırılmıştır.

MALZEME VE METOT

Tüp ve Köpük Geometrisi

Şekil 1’ de koniklik açısına sahip dairesel kesitli, kaynak dikişli ve köpük dolgulu ince cidarlı bir tüpün (TWT) sonlu elemanlar modeli verilmiştir. Tüpün toplam uzunluğu (L) 80 mm alınmışken üst ucun çapı 40 mm sabit alınmış olup alt ucun çapı; $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ ve 15° koniklik açılarına göre değişmektedir. TWT’ler iki farklı parçadan üretilirken üst parçada alüminyum alaşımı Al6061 ve alt parçada soğuk şekillendirilmiş AISI1018 malzemeleri kullanılmıştır. Tüpün alt parça kalınlığı (t_2) 1.5 mm ile sabit alınmışken üst parça kalınlığı (t_1) 0.5-2.5 mm aralığında değişken seçilmiştir. Tüplerde kaynak ile birleştirme, Şekil 1’den görüldüğü gibi tüpün üst ucundan itibaren üç farklı konumda ($L_0=0.25L$, $L_0=0.50L$, $L_0=0.75L$) gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgesi, 4 mm genişliğinde ve farklı bir malzeme olarak modellenmiştir. Kaynak bölgesindeki malzeme özellikleri, kaynak edilen malzemelerden karışımlar kuralı kullanılarak oluşturulmuştur [7].



Şekil 1. Kaynak dikişli tüpün FEM/SPH modeli

TWT’lerin sayısal analizlerinde, yüksek deformasyon hızı, sıcaklık ve deformasyon sertleşmesi gibi özellikleri içeren Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Al6061, AISI1018 ve kaynak bölgesi için Johnson-cook malzeme sabitleri ve lineer malzeme özellikleri [8]

Parça	Malzeme	Johnson-Cook sabitleri					Lineer özellikler	
		A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
Üst	Al6061	289.6	203.4	0.0110	0.350	1.34	2850	72
Alt	AISI1018	520.0	269.0	0.0476	0.282	0.553	7850	200
Kaynak	Al6061&AISI1018	381.8	229.6	0.0256	0.323	1.136	4850	123.2

Metalik köpük malzemeler, çarpma enerjisinin sönmüldendiği sistemlerinde yüksek mukavemet ve düşük yoğunluktan dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada TWT tamamen dolduran alüminyum köpük malzemesi dolgu malzemesi olarak seçilmiştir. Bu köpük malzemenin sabitleri; yoğunluk, $\rho_0 = 2700 \text{ kg/m}^3$, $C = 526 \text{ MPa}$ ve $m = 2.17$ olarak Hou ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan **Tablo 2**’ deki gibi alınmıştır [9].

Tablo 2. Alüminyum köpük malzemesinin plato gerilmesine bağlı gerilme-şekil değiştirme değişimi [9]

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

Burada σ_p plato gerilmesi olup Denklem 1’ deki gibi hesaplanır.

$$\sigma_p = C \left(\frac{\rho_{\text{FOAM}}}{\rho_0} \right)^m \quad (1)$$

Sayısal Analiz

Sayısal analizler, Ls-Dyna yazılımında optimizasyon modülü Ls-Opt kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde tüplerde kullanılan kabuk elemanlar için $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ağ örgü boyutu kullanılmışken, köpük malzemeler için ağdan bağımsız SPH modelinde noktalar arasında mesafe 2 mm alınmıştır. Bu yöntemde kullanılan köpük malzeme modeli, *Crushable_Foam* olarak seçilmiştir. Köpük malzeme modeli analizinde elastisite modülü $E = 72 \text{ GPa}$ olarak alınmışken Poisson oranı, tüp ve köpük için 0.3 ve 0.0 olarak alınmıştır.

Tüpün kendi üzerindeki teması için “Automatic_Single_Surface” kontak algoritması kullanılırken; tüp-köpük, rijit plaka-tüp ve rijit plaka-köpük yüzeyleri arasında “Node_Surface” kontak algoritması kullanılmıştır. Bu yüzeyler arasında statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.2 ve 0.1 olarak tanımlanmıştır. Tüpün alt kısmı rijit bir duvar ile desteklenmişken üst kısmı serbest bırakılmıştır. Ayrıca Şekil 1’den görülebileceği gibi tüplere üst kısımlarından 60 kg lık bir kütle 10 m/s hızıyla çarpmaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon modeli

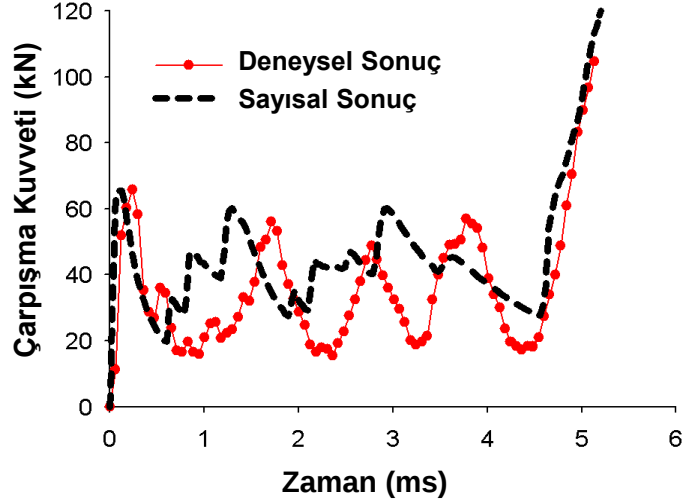
Çarpma sırasında insan üzerine gelen ve yaralanmaya veya ölüme neden olan yüksek kuvvetleri sınırlandırmak için pik kuvvet ve maksimum çarpma kuvvetinin üst sınırı sırasıyla 70 kN ve 200 kN olarak seçilmiştir [16-18]. Denklem 2’ de optimizasyon analizlerinde kullanılan kısıtlamalar verilmiştir. Burada SEA, F_{PIK} ve CFE sırasıyla özgül sönmülenen enerji, pik kuvveti ve çarpma kuvvet verimliliğini ifade etmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maksimize: } (SEA(t_1, \rho_{\text{KÖPÜK}}); 1/F_{\text{PIK}}(t_1, \rho_{\text{KÖPÜK}}); CFE(t_1, \rho_{\text{KÖPÜK}})) \\ \text{Değişkenlerine göre: } \left\{ \begin{array}{l} F_{\text{PIK}} \leq 70 \text{ kN} \\ F_{\text{MAK}} \leq 200 \text{ kN} \\ 0.5 \text{ mm} \leq t_1 \leq 2.5 \text{ mm} \\ 100 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{\text{KÖPÜK}} \leq 800 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

BULGULAR VE İRDELEME

Sonlu Elemanlar Modelinin Doğruluğu

TWT ün sayısal modelinin doğruluğu, deneysel sonuçla karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir [8]. Şekil 2’den görülebileceği gibi sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 2. İçi boş tüp için kuvvet-zaman grafiği

Optimizasyon Modelinin Doğruluğu

Optimizasyon modelinin doğruluğu SEA ve F_{pik} değerleri için R^2 tahminci değerlerine bakılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada 10 deneme noktası kullanıldı ve model için R^2 değerleri **Tablo 3**’te verilmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi bütün R^2 değerleri 0.97 in üzerinde elde edilmiş olup doğruluk için yeter hassasiyettedir.

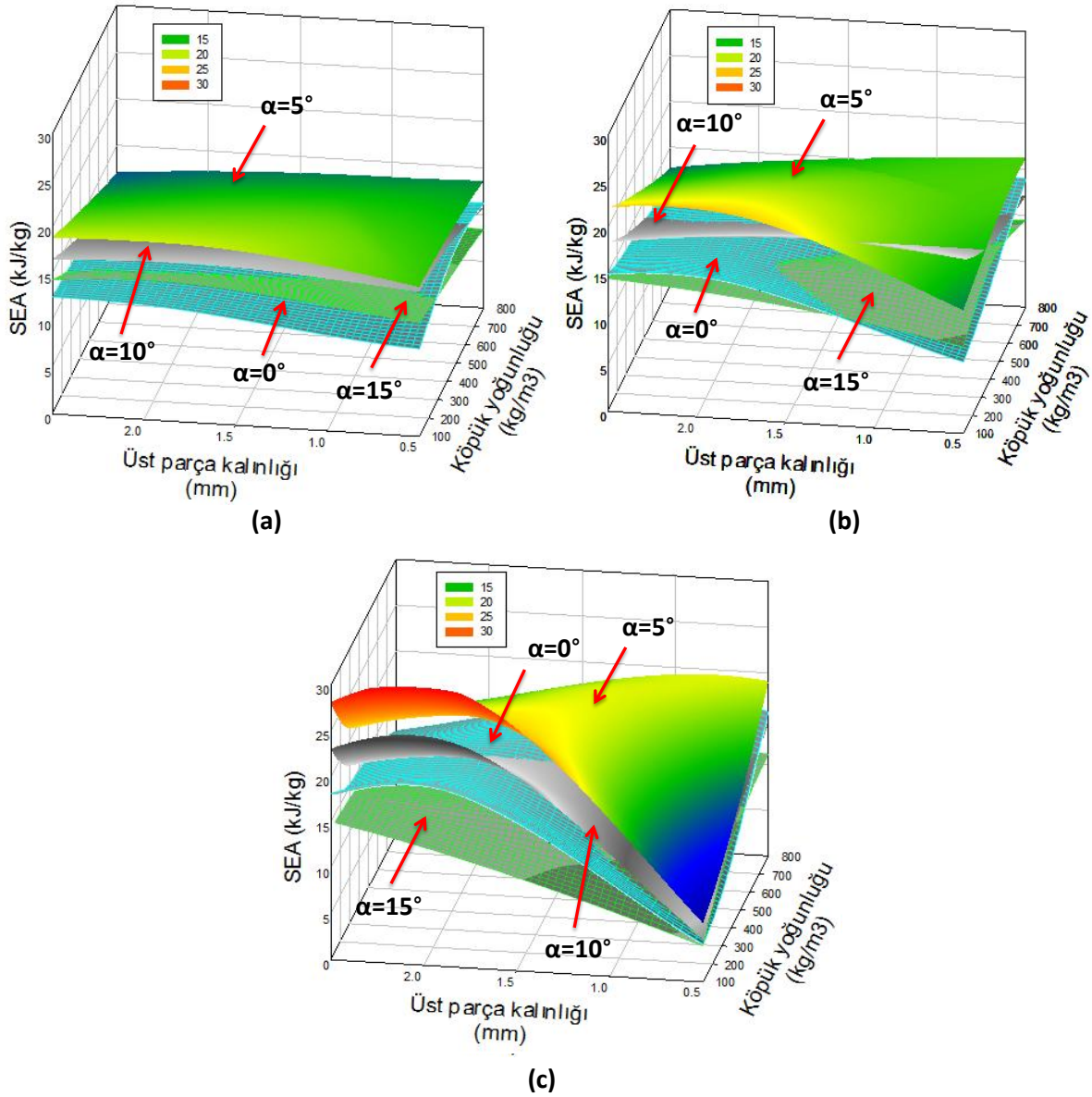
Tablo 3. Optimizasyon analizi sonucunda elde edilen R^2 değerleri

Lo/L		0.25				0.50				0.75			
Koniklik Açısı		0°	5°	10°	15°	0°	5°	10°	15°	0°	5°	10°	15°
Regresyon Katsayısı (R^2)	F_{pik}	0.999	0.999	0.999	0.989	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.998	0.990
	SEA	0.973	0.998	0.998	0.990	0.990	0.999	0.996	0.999	0.990	0.996	0.989	0.999

Kaynak Bölgesi, Tüp Kalınlığı ve Köpük Yoğunluğunun SEA ve F_{pik} ’e Etkisi

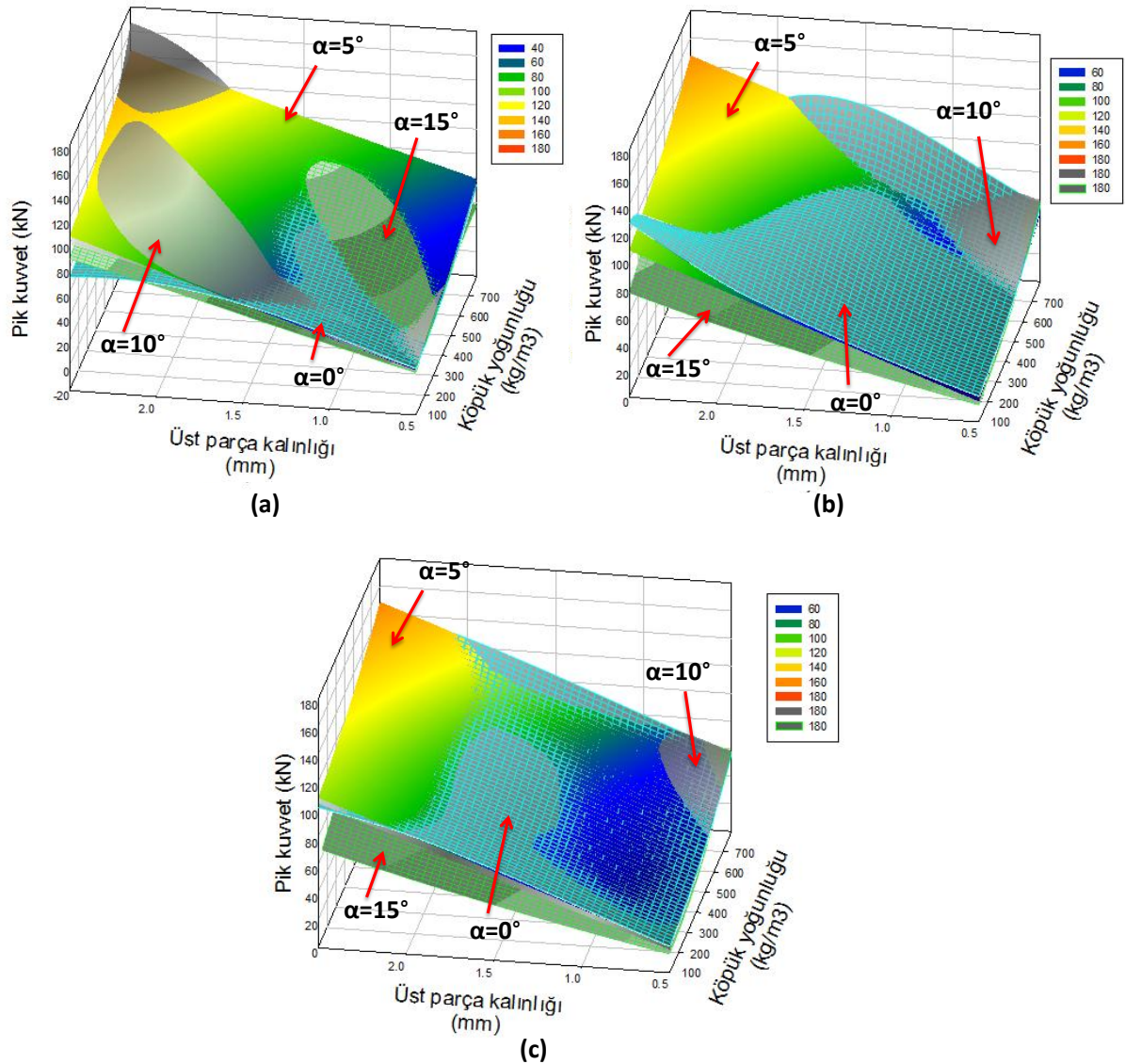
Şekil 3’te üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna bağlı olarak SEA değerleri verilmiştir. Şekilden en yüksek SEA değerleri $\alpha=5^\circ$ koniklik açılarında elde edilirken, SEA değerleri üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğunun artmasıyla artmıştır. Bununla birlikte Şekil 3a’dan kalınlık 2.5 mm ve köpük yoğunluğu 800 kg/m³ bölgesine doğru SEA değerinin, toplam kütle değerinin artmasından dolayı azaldığı görülmektedir. Ayrıca kaynak

bölgesinin (L_0/L) artmasıyla ki alüminyumlu kısım artmasıyla tüp hafifler, SAE değerinin arttığı **Şekil 3c'** den görülmektedir. Örneğin **Şekil 3c'**den 5° koniklik açısı için üst parça kalınlığı 0.5 mm deki SAE değerleri; köpük yoğunluğu 100 kg/m^3 için 6.41 kJ/kg iken 800 kg/m^3 köpük yoğunluğunda 28.16 kJ/kg değerine yükselmiştir.



Şekil 3. Üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre SAE yüzey değişimleri: a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.

Şekil 4'de pik kuvvet değişimleri, üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre verilmiştir. Şekilden pik kuvvetler, üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğunun artması ile genelde doğrusal olarak artmıştır. Bununla beraber pik kuvvet değişimlerini, üst parça kalınlığı köpük yoğunluğuna göre daha fazla yükseltmiştir. Ayrıca kaynak bölgesiyle pik kuvvetin beklendiği gibi pek etkilenmediği **Şekil 4'**den görülmüştür. Örneğin Şekil 10c'deki $L_0=0.75L$ kaynak noktası, 0° koniklik açısı ve üst parça kalınlığı 0.5 mm için köpük yoğunluğu 100 kg/m^3 'de pik kuvvet 19.46 kN iken 800 kg/m^3 ' yoğunluğunda 55.98 kN olmuştur. Diğer yandan, 0° koniklik açısı ve üst parça kalınlığı 2.5 mm için köpük yoğunluğu 100 kg/m^3 'de pik kuvvet 55.98 kN iken 800 kg/m^3 ' yoğunluğunda 102.05 kN'a çıkmıştır.



Şekil 4. Üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre Pik kuvvet yüzey değişimleri: a) $L_0=0.25L$, b) $L_0=0.50L$ ve c) $L_0=0.75L$.

Optimizasyon Sonuçları

Tablo 5, üst parça kalınlığı, köpük yoğunluğu ve koniklik açılarına göre elde edilen optimum değerleri göstermektedir. Köpük dolgulu tüplerde kaynak noktaları 0.25, 0.50 ve 0.75 için düz (0°) tüplerde optimum üst parça kalınlıkları sırasıyla 1.43 mm, 0.68 mm ve 1.41 mm olarak elde edilmiştir. Bunun yanında boş tüplerde ise 0.25, 0.50 ve 0.75 kaynak bölgeleri için düz tüplerde 1.65 mm, 1.61 mm ve 1.61 mm değerleri bulunmuştur. $L_0/L=0.50$ kaynak noktasında köpük dolgulu tüpler için üst parça kalınlıkları 0° , 5° , 10° ve 15° konik tüplerde 0.68 mm, 1.68 mm, 1.71 mm, 2.21 mm olurken boş tüplerde ise 1.61 mm, 1.63 mm, 1.69 mm ve 1.70 mm olmuş ve koniklik açısının artmasıyla artmıştır.

Tablo 5. Tüpler için optimum köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığı değerleri

L_0/L	Koniklik açısı (°)	Optimum sonuçlar				
		T_{AL} (mm)	Köpük yoğunluğu (kg/m ³)	SEA (kJ/kg)	F_{PIK} (kN)	CFE
0.25 0.50 0.75	0	1.43	405	11.92	69.94	0.81
	5	1.67	100	18.82	69.96	0.72
	10	1.69	100	16.89	69.96	0.72
	15	1.52	100	14.94	52.12	1.06
	0	0.68	799	14.07	64.01	1.16
	5	1.68	101.4	21.27	69.95	0.70
	10	1.71	100	19.87	69.93	0.74
	15	2.21	133.6	14.05	69.96	0.69
	0	1.41	409	17.49	69.97	0.70
	5	1.57	193.1	25.88	69.95	0.69
	10	1.73	100	21.76	69.91	0.71
	15	2.29	100	15.85	69.98	1.12

SONUÇLAR

Bu çalışmada eksenel dinamik yükler altındaki içi boş ve köpük dolgulı kaynaklı konik tüplerin çarpışma performansı sayısal olarak incelenmiştir. Tüplerin analizleri sonucunda üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğunun optimum değerleri FFN metamodel için genetik algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Farklı malzemelerden oluşan tek bir tüp kullanmak, klasik tek malzemeli tüplere göre pik kuvvetini düşürmektedir. Bunun yanında düşük yoğunluklu malzeme kullanmak ile de özgül enerji sönümleme artmaktadır.
2. En yüksek enerji absorpsiyon değeri koniklik açısı 5° de elde edilmiştir. Diğer koniklik açılarında sahip (0°, 10° ve 15°) tüplerde ise özgül enerji sönümleme (SAE) değeri düşük elde edilmiştir.
3. SAE değeri, üst parça kalınlığının düşmesi ve köpük yoğunluğunun artırması ile artmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Lu G, Yu T. Energy absorption of structures and materials. NW Boca Raton, FL, USA: CRC Press LLC; 2003.
- [2] S. Hou, X. Han, G. Sun, S. Long, W. Li, X. Yang, Q. Li, Multiobjective optimization for tapered circular tubes, Thin-Walled Structures, 49 (2011) 855-863. doi:10.1016/j.tws.2011.02.010.
- [3] J. Sobieszczyński-Sobieski, S. Kodiyalam, R.Y. Yang, Optimization of car body under constraints of noise, vibration, and harshness (NVH), and crash, Struct Multidisc Optim, 22 (2001) 295-306. doi: 10.1007/s00158-001-0150-6.
- [4] K. Yamazaki, J. Han, Maximization of the crushing energy absorption of tubes, Structural Optimization, 16 (1998) 37-46. doi:10.1016/S0965-9978(00)00004-1.

- [5] P.O. Marklund, L. Nilsson, Optimization of a car body component subjected to side impact, *Struct Multidisc Optim*, 21 (2001) 383-392. doi: 10.1007/s001580100117.
- [6] J. Bi, H. Fang, Q. Wang, X. Ren, Modeling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46 (2010) 698-709. doi:10.1016/j.finel.2010.03.008.
- [7] R. Padmanabhan, M.C. Oliveira, L.F. Menezes, Deep drawing of aluminium–steel tailor-welded blanks, *Materials & Design*, 29 (2008) 154-160. doi:10.1016/j.matdes.2006.11.007.
- [8] H. Gedikli, Crashworthiness optimization of foam-filled tailor-welded tube using coupled finite element and smooth particle hydrodynamics method, *Thin-Walled Structures*, 67 (2013) 34-48. doi:10.1016/j.tws.2013.01.020.
- [9] S. Hou, Q. Li, S. Long, X. Yang, W. Li, Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures, *Material an Design*, 30 (2009) 2024-2032. doi:10.1016/j.tws.2014.08.019.