

Zırhlı Araç Zeminlerinde Darbe Emici Olarak Kullanılan Skydex Modeline Alternatif Zemin Pedlerinin Tasarım ve Analizleri

Hatice Taş¹ ve Murat Altın¹

¹ Department of Automotive Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, 06500, Türkiye

Özet

Savunma sanayisinin kilit taşlarından biri olan zırhlı araçlarda, personelin alt ekstremitte bölgesindeki yaralanmayı azaltmak için birçok yapı tasarlanmıştır. Bu yapılardan en öne çıkan SKYDEX zemin pedleridir. SKYDEX pedleri yapısı gereği olası ani darbe anlarında enerjiyi sönmüleyerek personel yaralanmalarını azaltmaktadır. Bu çalışmada, zırhlı araçlarda kullanılan SKYDEX zemin pedlerinin iç geometrik yapısına alternatif yapılar tasarlanmıştır. Mevcutta bulunan ticari ped sistemlerinin büyük çoğunluğu, sınırlı yüklemeye koşulları altında test edilmekte ve farklı darbe senaryolarına karşı yeterli performans gösterememektedir. Bu doğrultuda geliştirilen alternatif iç yapı tasarımları, LS-DYNA yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda SKYP modelinin verimi % 0,85 ve özgün enerji emiliminin 31,94 kJ/kg olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma kuvveti verimi; Özgün enerji emilimi; SKYDEX modeli; Sonlu elemanlar analizi

<http://dx.doi.org/10.29228/pastech.89166>

Design and Analyses of Alternative Floor Pads to Skydex Model Used as Impact Absorber in Armored Vehicle Floors

Abstract

In armored vehicles, which are among the key components of the defense industry, various structures have been designed to reduce injuries in the lower extremities of personnel. Among these structures, the most prominent one is the SKYDEX ground pad. Due to its structural design, the SKYDEX pad absorbs impact energy during sudden blast events, thereby minimizing personnel injuries. In this study, alternative internal structures were designed for the SKYDEX ground pads used in armored vehicles. Most of the currently available commercial pad systems are tested under limited loading conditions and fail to perform adequately under different impact scenarios. Therefore, the proposed alternative internal structures were analyzed using the finite element method in LS-DYNA. As a result of the study, the efficiency of the SKYP model was found to be 0.85% and the specific energy absorption was determined as 31.94 kJ/kg.

Keywords: Crushing force efficiency; Finite element analysis; SKYDEX model; Specific energy absorption

1. Giriş

21.yüzyılda teknolojik yeniliklerinin zirveye çıkması ile birçok alanda büyük kapsamlı gelişmeler yaşandı ve yaşanmaya devam etmektedir. Özellikle günümüzde dünya ülkeleri savunma sanayisine büyük yatırımlar yapmaktadır. Savunma sanayisinin kilit taşlarından biri olan zırhlı araçlar ise personel güvenliği açısından bu büyük yatırımlardan payını almaktadır. Personel güvenliği zırhlı araçlar için kritik bir öneme sahiptir. Bu önem doğrultusunda enerji sönmüleyici yapılar geniş bir araştırma konusu haline gelmektedir. Enerji sönmüleyici yapıların optimizasyonu için birçok araştırma yapılmaktadır. Lee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bal peteği ve benzeri sandviç yapıların analizler sonucunda, patlama yüklerinin sönmülenmesinde etkili enerji emici sistemler olarak kullanılabilceğini göstermektedir [1]. Bu yapıların enerji sönmüleme özelliklerinin yanı sıra yapısal dayanıklılığı ve konforu da öneme sahiptir. Bu özelliklerin dengeli bir şekilde optimum derecede olması gerekmektedir. Huang ve arkadaşları (2024) yaptıkları çalışmada, hücresel yapıların sadece mekanik dayanım ya da darbe performansı yönünden değil, aynı zamanda ısı yama kapasitesi yönünden de optimize edilebileceğini göstermiştir. TPMS (triply periodic minimal surface) yapılar kullanılarak hem yüksek ısı iletkenliğe hem de geniş konvektif yüzey alanına sahip hücresel yapılar tasarlanmıştır. Bu yapıların,

savunma sanayisinde kullanılan zemin pedleri gibi darbe sönümlemesi gereken yapılar için uygun geometriler sunduğu ifade edilmiştir [2].

Bu noktada SKYDEX tipi zemin pedleri öne çıkmaktadır. Literatürde SKYDEX zemin pedleri üzerine kapsamlı çalışmalar vardır. Gerek tasarımı gerekte malzeme çeşitliliği açısından gelişmeye açık bir yapıdır SKYDEX. Daha önce yapılmış çalışmalarda SKYDEX ve benzeri yapıların sadece tek eksenli yüklemeye altında test edildiği görülmektedir. Çeşitli enerji sönümleme malzemeleri, polimer esaslı köpükler ve içi boş hücreli yapılar ile denenmiştir. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu yalnızca deneysel yöntemlere dayanmaktadır ve sayısal doğrulama çalışmaları sınırlıdır. Bu çalışmalarda kullanılan sayısal analizlerin büyük kısmı deneysel doğrulama içermediğinden, elde edilen sonuçların fiziksel gerçekliği temsil etme düzeyi tartışmalıdır. Sayısal doğrulamanın az olmasının birçok sebebi vardır. Bunlar test cihazlarının ve deney hazırlıklarının pahalılığı, deney sınır koşullarını simülasyon ortamına birebir taşıyamamak, literatürde halihazırda yapılmış deney verilerinin nadir olması gibi nedenlerdir. Zemin ped sistemlerinin geneli sınırlı yüklemeye koşulları ile test edildiği için asıl kullanım koşullarının gerektirdiği senaryoyu tam olarak karşılayamamaktadır. Özellikle bu pedlerin ani darbeler altında çalıştığı göz önünde bulundurulmadan mühendislik temeller yerine daha çok insani etkilerle tasarlanmaktadır. Bu tasarımların sonucunda enerji sönümleme performansında büyük eksiklikler. Bu durum insan güvenliğini esas alan bir sistem için büyük eksi olmakla birlikte hayati risk ve maddi kayba neden olmaktadır. Saha koşullarına karşı en iyi performansı gösteren tasarımlar için sadece mukavemet açısından bir değerlendirme yapılmamalıdır. Mukavemet değerleri ile birlikte tasarımın ve malzemenin uyumunu ya da dinamik davranışları bir bütün olarak ele alınmalıdır. Bu alanda geliştirilen ped sistemlerinin büyük çoğunluğu, ticari ürünler üzerinden değerlendirilmekte ve alternatif iç yapı tasarımlarına yeterince yer ve önem verilmemektedir. Özellikle darbe enerjisinin yönü, büyüklüğü ve sürekliliği gibi parametreler göz önüne alındığında, standart yapılar her durumda istenen korumayı sağlayamamaktadır. Bununla birlikte, yapılan analizlerin çoğu sadece sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal tahminlere dayalı olup, fiziksel testlerle desteklenmemektedir. Bu eksiklik hem tasarım doğruluğunu hem de uygulama güvenilirliğini azaltmaktadır. Dolayısıyla, gerçek koşulları yansıtan ve deneysel verilerle doğrulanmış yeni tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yakın dönemde yapılan çalışmalarda, enerji sönümleyici sistemlerde öncelik malzeme seçimine odaklanılmaktadır. Toussaint ve arkadaşları, 6061-T6 alüminyum plaka üzerinde yaptıkları patlama simülasyonlarında, 6061-T6 alüminyumun dinamik davranışı ve malzeme modeli doğrulaması incelenmiştir [3]. Jiang ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, SKYDEX malzemesinin darbe altındaki ezilme davranışını deneysel testlerle ve sayısal analizlerle incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada farklı hızlardaki sıkıştırma testleri ve farklı yüksekliklerden yapılan düşme testleri sonucunda elde edilen verileri, LS-DYNA yazılımındaki MAT_26, MAT_83 ve MAT_163 modelleriyle karşılaştırmışlardır. En iyi sonucun MAT_163 modeliyle elde edildiği ve bu modelin özellikle düşük ve orta darbe hızlarında SKYDEX davranışını başarılı bir şekilde tahmin ettiğini ortaya koymuşlardır [4]. İç geometrik yapıların optimizasyonunun çoğu zaman geri planda kaldığı görülmektedir. Ne var ki, malzemenin özellikleri kadar iç geometrinin de enerji sönümleyici pedlerin darbe altında gösterdiği davranış üzerinde belirleyici olduğu bilindik bir gerçektir. Bu durum, aynı malzemeden üretilmiş fakat farklı iç yapıya sahip iki pedin tamamen farklı enerji sönümleme performansları sergilemesine neden olmaktadır. Gao ve arkadaşları darbe enerjisini daha verimli bir biçimde sönümlemesini sağlamak amacıyla kademeli yoğunluk (gradyan) içeren petek yapılar tasarlamışlardır ve gradyan yapıların enerji soğurma performansının, homojen yapılara göre %66 oranında daha yüksek olduğu gösterilmiştir [5]. Bu kapsamda, sadece malzeme merkezli araştırmaların değil, farklı geometrik tasarımların da karşılaştırmalı olarak ele alınması önemli bir rol oynamaktadır.

Bunun yanında, mevcut literatürdeki çalışmaların çoğunda pedlerin performansı statik veya düşük hızda yüklemeye koşulları altında incelenmiş, gerçek patlama ve darbe senaryolarını yansıtan yüksek hızdaki ani yüklemeler yeterince incelenmemiştir. Bu yetersizlik, özellikle askeri uygulamalarda güvenlik açısından kritik bir sorun oluşturmaktadır. Gerçek saha koşullarında ped sistemleri ani ve yüksek enerjili darbelerle maruz kalmakta, bu nedenle laboratuvar ortamında elde edilen düşük hızlı test sonuçlarının güvenilirliği yetersizdir.

Son yıllarda mühendislik tasarımlarında doğadan ilham alınan biyomimetik yaklaşımlar önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Kabuklu deniz canlılarının iskelet yapıları, arı peteklerinin hücreli organizasyonu, çiçeklerin taç yapraklarının oluşturduğu simetrik taç yapıları ve bitki saplarının iç dokuları gibi doğal yapılarda gözlemlenen geometrik yapılar ve malzeme dağılımları, enerji sönümleme açısından dikkate değer alternatifler sunmaktadır. Zemin pedlerinin alternatif iç yapılarında da benzer prensiplerin uygulanması hem hafiflik hem de yüksek darbe dayanımı sağlayarak mevcut tasarımlara kıyasla önemli avantajlar oluşturabilmektedir. Yapılan bu çalışmada, halihazırda bulunan zemin pedlerine alternatif olarak geliştirilen yeni tasarımlar önerilmektedir. Biyomimetik yaklaşımla tasarlanan bu yapıların analizi LS-DYNA ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Burada asıl amaç, önerilen yapıların darbe enerjisini ne ölçüde sönümleyebildiğini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda tasarlanan zemin pedlerinin hem yapısal hem de enerji yönünden verimliliği karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, söz konusu eksiklikleri gidermeyi hedeflemektedir. Literatürde çoğunlukla deneysel verilere dayalı kısıtlı sayısal analizlerin yapıldığı görülmekte, sayısal doğrulama ile desteklenmiş alternatif ped tasarımlarına dair örneklerin azlığı göze çarpmaktadır. Bu doğrultuda, LS-DYNA yazılımı kullanılarak geliştirilen alternatif iç geometriye ped tasarımları sayısal olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar ticari SKYDEX modeli ile kıyaslanmıştır. Böylece hem

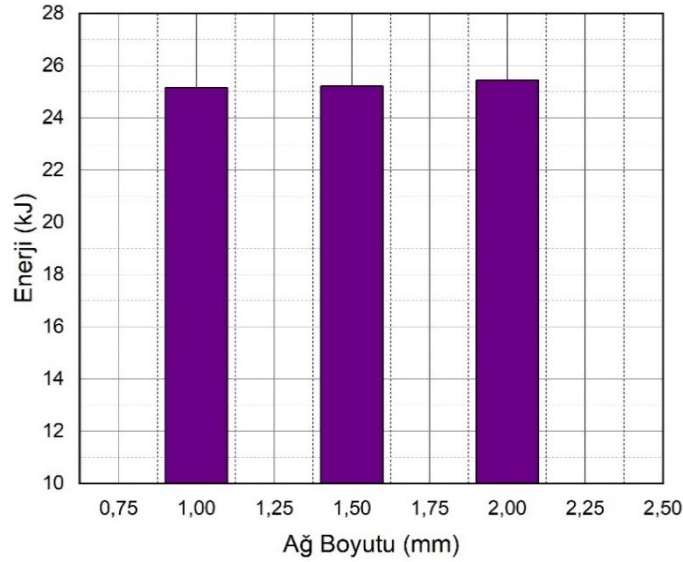
malzeme modelinin doğrulanması hem de farklı iç geometrilerin enerji sönümlenme kabiliyetlerinin değerlendirilmesi mümkün olmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma hem literatürdeki sayısal doğrulama eksikliğine hem de alternatif tasarımların yetersiz incelenmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle biyomimetik prensiplerden yola çıkılarak geliştirilen yeni ped tasarımları ile darbe enerjisinin sönümlenmesinde performans artışı elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, araştırma bulgularının hem akademik literatüre hem de savunma sanayiindeki mühendislik uygulamalarına katkı sunması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ağ Boyutlandırması Çalışması

Sonlu elemanlar analizlerinde ağ boyutu sonuçların doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli faktörlerden biridir. Eleman boyutu küçüldükçe modelin geometriyi temsil etme hassasiyeti artmakta ve malzemenin lokal deformasyon davranışı daha gerçekçi bir şekilde yakalanmaktadır. Ancak çok küçük mesh boyutlarının tercih edilmesi, modeldeki eleman sayısını artırarak çözüm süresini ve hesaplama maliyetini ciddi ölçüde yükseltmektedir. Buna karşılık, çok büyük eleman boyutları kullanıldığında analiz süresi kısalmakta, fakat elde edilen sonuçların doğruluğu azalmaktadır. Bu nedenle, analizlerde optimum ağ boyutunun seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, yapılan yakınsama kontrolleri sonucunda ağ boyutu inceltildikçe elde edilen sonuçların sabit bir değere yaklaşması, modelin güvenilirliğini teyit eden bir gösterge olmaktadır. Bu nedenle farklı eleman boyutları denenerek (1 mm, 1,5 mm ve 2 mm) sonuçlardaki değişim incelenmiştir.



Şekil 1. Ağ yakınsama analizi sonuçları

Tablo 1. Ağ boyutlarına göre çekme numunelerinin toplam enerjisi ve hata payı (Total energy and error margin of tensile specimens based on mesh sizes)

Ağ Boyutu (mm)	Enerji (kJ)	Hata (%)
1	25,16	1,410721
1,50	25,22	1,652559
2	25,44	2,539299

Ağ boyutu küçüldükçe enerji sönümlenme değerlerinin de küçüldüğü gözlemlenmiştir. %1,5'in altında değişim elde edildiğinde yakınsamanın sağlandığı kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, tüm analizlerde optimum dengeyi sağlayan 1 mm'lik eleman boyutu tercih edilmiştir.

2.2. Malzeme Modeli ve Çekme Testi Doğrulaması

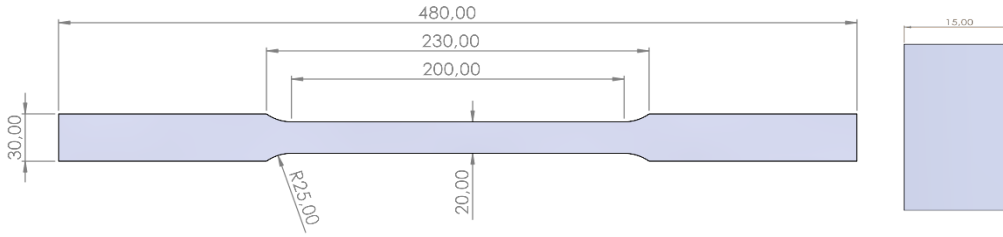
Bu çalışmada kullanılan malzeme modeli, 6061-T6 alüminyum alaşımına ait mekanik özellikler esas alınarak oluşturulmuştur. İlgili veriler, Aktaş ve arkadaşları tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinde sunulan deneysel sonuçlardan elde edilmiştir [6]. Söz konusu tez kapsamında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mühendislik

gerilim–gerinim eğrisinden çevrilerek elde edilen gerçek gerilim–gerinim eğrisi, bu çalışmada kullanılan *MAT_024* (*Piecewise Linear Plasticity*) malzeme kartının tanımlanmasında temel veri seti olarak kullanılmıştır.

Tablo 2. 6061-T6 Alüminyum'un malzeme özellikleri (Material properties of 6061-T6 Aluminum) [6]

Elastisite Modülü (GPa)	68,85
Poisson Oranı	0,33
Akma Dayanımı (GPa)	0,285
Yoğunluk (kg/mm ³)	2,7x10 ⁻⁶

Gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mühendislik gerilim–gerinim eğrisi bu çalışmada alınmış, gerçeğe (true) dönüştürülerek *MAT_024* malzeme kartının tanımlanmasında temel veri seti olarak kullanılmıştır. Ek olarak çekme numunesinin geometrik ölçüleri ve deneysel prosedür de aynı tezde belirtilen yöntemler doğrultusunda modellenmiştir.



Şekil 2. Çekme testi numunesi ölçüleri [6]

Belirtilen ölçülere uygun olarak, ASTM E8 standartlarına göre boyutlandırılmış çekme numunesi SolidWorks ortamında modellenmiş, ardından HyperMesh yazılımında 1 mm ağ boyutu ile sonlu elemanlara ayrılmıştır. LS-DYNA da uygun sınır koşulları oluşturularak analizler gerçekleştirilmiş ve tezden elde edilen mühendislik gerilim–gerinim verileri gerçeğe çevrilip simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

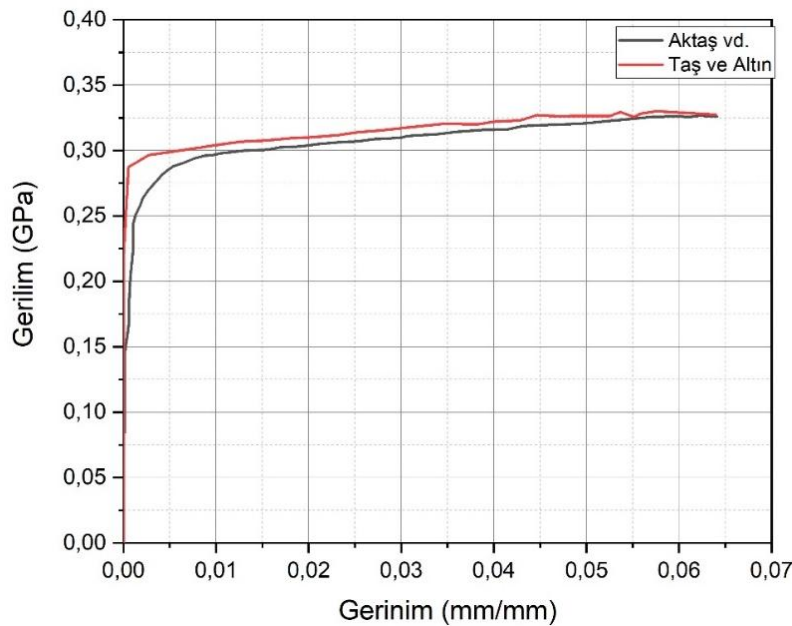
Denklem (1) mühendislik gerilim değerini gerçek gerilim değerine çevirmek için kullanıldı:

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (1)$$

Denklem (2) mühendislik gerinim değerini gerçek gerinim değerine çevirmek için kullanıldı:

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (2)$$

Burada ε_e mühendislik gerinimini, σ_e ise mühendislik gerilimini belirtmektedir.





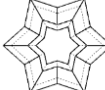

















Şekil 3. Aktaş'ın test sonuçları ile oluşturulan sonlu elemanlar modelinin karşılaştırılması

Böylece kullanılan 6061-T6 alüminyum malzeme modelinin güvenilirliği hem literatürdeki deneysel sonuçlarla hem de bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizlerle Şekil 3’de gösterildiği gibi doğrulanmıştır. Sonuç olarak, Aktaş’ın çalışmasında rapor edilen çekme testleri, bu tezin malzeme modeli geliştirme ve validasyon sürecine doğrudan katkı sağlamış ve analizlerin doğruluk seviyesini artırmıştır.

2.3. Modelleme ve Ped Tasarımları

Zırlı araçlarda en çok kullanılan SKYDEX modeli Solidworks de modellenmiştir. LS-DYNA da yapılacak olan basma testi için ek olarak modelin 2 mm üstüne kabuk bir plaka yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra aynı şekilde, enerji sönmüleme kapasitesini artırmak amacıyla alternatif iç geometriye sahip 10 farklı ped tasarımı geliştirilmiştir. Tasarımlar, biyomimetik yaklaşımlar ve hüresel yapılar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Modellerin sonlu elemanlar ağı HyperMesh ortamında 1 mm kare ağ ile oluşturulmuş, tüm yapılar benzer ağ yoğunluğu ve sınır koşulları altında karşılaştırmaya uygun hale getirilmiştir.

DKYP		→	
DKEYP		→	
AKYP		→	
SKYTP		→	
SKYP		→	
SKEYP		→	
TP		→	
KOP		→	
İKOP		→	
SP		→	

Şekil 4. Ped tasarımları

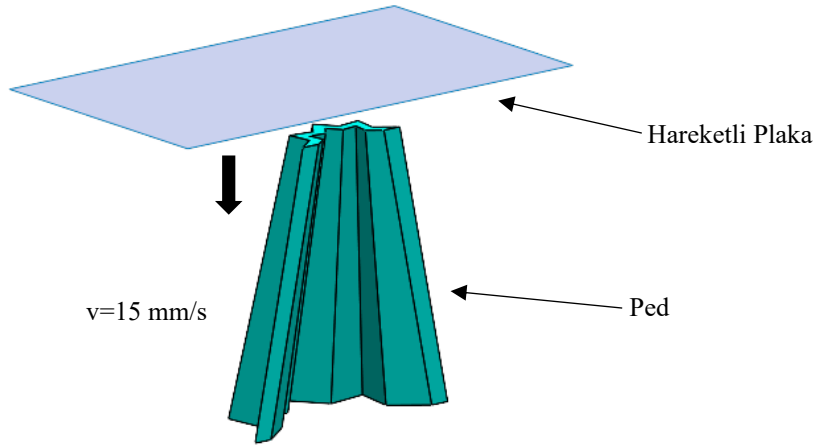
Yapılan bu tasarımlarda yıldız tipi pedler tasarlanırken Yağmur Zambağı ve Yıldız Çiçeklerinin taç yaprak yapılarından esinlenilmiştir. Yağmur Zambağının ayrı taç yaprak yapısı ile Yıldız Çiçeğinin sivri uçlu taç yaprak yapısı bir arada düşünülmüştür. Gradyan ve dairesel yapıya sahip tasarımlar da ise arı kovanlarının dairesel ve kademeli olarak küçülen çaplarından esinlenilmiştir.



Şekil 5. Esinlenilen yapılar (Yıldız Çiçeği, Yağmur Zambağı ve Arı Kovanı)

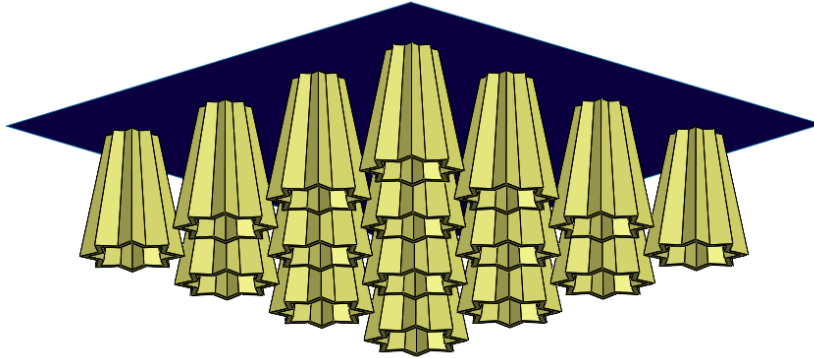
2.4. Analiz Senaryosu

Ped sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek amacıyla basma testi senaryosu kurgulanmıştır. Modelde, pedlerin 2 mm üstüne rijit kabuk plaka tanımlanmış, üst plaka belirli bir hızda aşağıya doğru hareket ettirilmiştir. Model alt kısmındaki nodlardan tüm yönlerden, hareketli plaka ise hareket yönü olan y-ekseni dışındaki tüm yönlerden sabitlenmiş, plaka ve ped arasında temas tanımları yapılmıştır. Analizler LS-DYNA yazılımında gerçekleştirilmiş, enerji sönümlenme davranışı, maksimum ezilme kuvveti ve ped deformasyon şekilleri elde edilmiştir.



Şekil 6. Pedlerin genel modeli

Analizlerde kullanılan sınır koşulları, ped ve yükleme plakası arasındaki etkileşimi gerçekçi bir şekilde temsil edecek biçimde dikkatle seçilmiştir. Pedin kendi içerisinde oluşabilecek potansiyel temasları modellemek amacıyla AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE kontak tipi tercih edilmiştir. Bunu yapmaktaki amaç, ped geometrisinde yüksek deformasyonlar sırasında elemanların birbirine geçmesini engelleyerek, modelin sayısal kararlılığını artırmaktır. Ped ile plaka arasındaki temas ise AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE kontak algoritması ile tanımlanmıştır (Şekil 8.). Bu kontak tipi, farklı iki yüzey arasındaki temasın daha hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanıdığı için tercih edilmiştir. Temas bölgelerinde kayma ve sürtünme etkilerini temsil edebilmek adına sürtünme katsayıları, literatürde benzer çalışmalarla uyumlu olacak şekilde, statik sürtünme katsayısı (FS) 0.2 ve dinamik sürtünme katsayısı (FD) 0.1 olarak atanmıştır. Analiz süresi 0.8 saniye olarak belirlenmiş olup dinamik özellikler içeren bir analiz olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 7. Pedlerin kontak yapıları

Plakaya hareket vermek için BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID kartı kullanılmıştır. Bu yöntem, yüklemenin doğrudan hız veya kuvvet olarak verilmesi yerine, yer değiştirme-zaman eğrisi aracılığıyla uygulanmasına imkân tanıyarak, deneysel koşulların daha gerçekçi biçimde modellenmesini sağlamaktadır.

Plaka kabuk elemanlarla modellenmiş ve yapısal rijitliğin sağlanabilmesi için 4 mm et kalınlığı atanmıştır. Malzeme tanımlamaları kapsamında, ped için validasyonu gerçekleştirilen MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024) modeli tercih edilmiştir. Bu model, elastoplastik davranışı gerçeğe en yakın şekilde tanımlayabilmesi ve gerilim-gerinim verilerinin doğrudan kullanılmasına imkân tanınması sebebiyle seçilmiştir. Plaka için ise deformasyonunun ihmal edilebilmesi ve yükün tamamının ped üzerine aktarılabilmesi amacıyla MAT_RIGID (MAT_020) malzeme modeli kullanılmıştır. Bu seçimler sayesinde, analiz senaryosunda hem pedin deformasyon mekanizması doğru biçimde incelenmiş hem de sayısal çözümün kararlılığı ve güvenilirliği artırılmıştır.

2.5. Performans Değerlendirme Metrikleri

Analizleri yapılan yapıların performanslarını değerlendirmek ve karşılaştırmak için çeşitli metrikler vardır [6, 7]. Tasarlanan pedlerini, yaygın SKYDEX pedine göre başarısını kıyaslayabilmek için bu metrikler kullanılmıştır.

2.5.1. Toplam Enerji Emilimi

Toplam enerji Emilimi (TE), çarpışma sürecinde yapı tarafından sönmölenen enerjiyi ifade etmektedir. Bu büyüklük, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Eşitlik 3’de gösterildiği üzere, çarpışma kuvveti ile deformasyon mesafesinin integrali toplam emilen enerjiyi vermektedir. Bu çalışmada, çarpışma kutusunun deformasyon uzunluğu $d = 12$ mm olarak kabul edilmiştir [3].

$$TE = \int_0^d F(x) dx \quad (3)$$

2.5.2. İlk Tepe Çarpışma Kuvveti

Bir enerji sönmöleyici sistem tasarlanırken, araç içerisine aktarılan en yüksek çarpışma kuvvetinin mümkün olduğunca düşük olması hedeflenmektedir. Bu durum, yolcular üzerinde oluşabilecek ani ve yüksek yüklerin sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. İdeal bir çarpışma kutusunda, ilk tepe çarpışma kuvvetinin (İTÇK) düşük bir değerde olması ve ortalama ezilme kuvvetine yakın seyretmesi beklenmektedir [6].

2.5.3. Özgöl Enerji Emilimi

Araç güvenliği sağlanırken, aynı zamanda toplam araç kütlelerinin düşük tutulması da önemli bir tasarım kriteridir. Bu nedenle çarpışma kutularının değerlendirilmesinde kütle etkisi dikkate alınmaktadır. Özgöl enerji Emilimi (ÖEE), toplam emilen enerjinin yapının kütlelerine bölünmesiyle elde edilen ve birim kütle başına enerji sönmöleme kapasitesini ifade eden bir parametredir. ÖEE, Eşitlik 4’de verilmiştir [6].

$$\text{ÖEE} = \frac{TE}{m} \quad (4)$$

2.5.4. Ortalama Deformasyon Kuvveti

Ortalama deformasyon kuvveti (ODK), çarpışma sırasında sönmölenen toplam enerjinin, meydana gelen toplam deformasyon mesafesine oranlanmasıyla hesaplanan ortalama kuvvet değeridir. Bu büyüklük, çarpışma sürecindeki genel kuvvet seviyesini temsil etmekte olup Eşitlik 5’te gösterilmiştir [6].

$$ODK = \frac{TE}{d} \quad (5)$$

2.5.5. Çarpışma Kuvveti Verimi

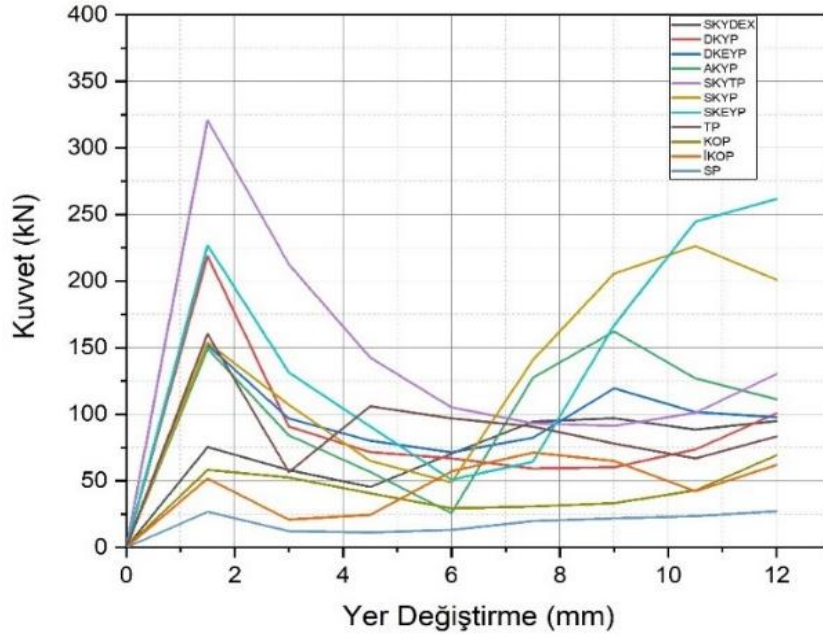
Çarpışma kuvveti verimi (ÇKV), ortalama deformasyon kuvvetinin ilk tepe çarpışma kuvvetine oranlanmasıyla elde edilen önemli bir performans göstergesidir. Bu oran, çarpışma kutusunun yükleri ne kadar dengeli ve etkin bir şekilde sönmölediğini ortaya koymaktadır. Yüksek ÇKV değerleri, sistemin çarpışma sırasında daha verimli çalıştığını göstermektedir. ÇKV, Eşitlik 6’da sunulmuştur [6].

$$\zeta_{KV} = \frac{ODK}{\dot{I}T\zeta K} \tag{6}$$

2.5.6. *f* Faktörü

En iyi ÇKV (Çarpışma Yüğü Verimliliği) performansı SKYDEX tasarımıyla elde edilmiştir. En iyi ÖEE (Özgül Enerji Emilimi) performansı ise SKYP tasarımıyla elde edilmiştir. Bu iki performansı değerlendirebilmek için *f* adında bir bileşik amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu fonksiyonda yer alan ω ağırlık katsayısını ifade etmektedir. ÇKV ve ÖEE çalışma kapsamında eşit ağırlıktadır ve ω katsayısı eşitlikte 0,5 alınmıştır [8].

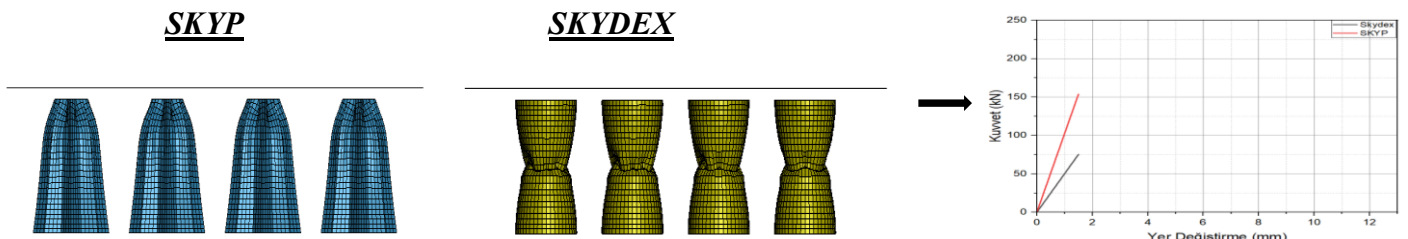
$$f = \omega_1 \frac{\zeta_{KV}}{\zeta_{KV_{Max}}} + \omega_2 \frac{\dot{O}EE}{\dot{O}EE_{Max}} \tag{7}$$

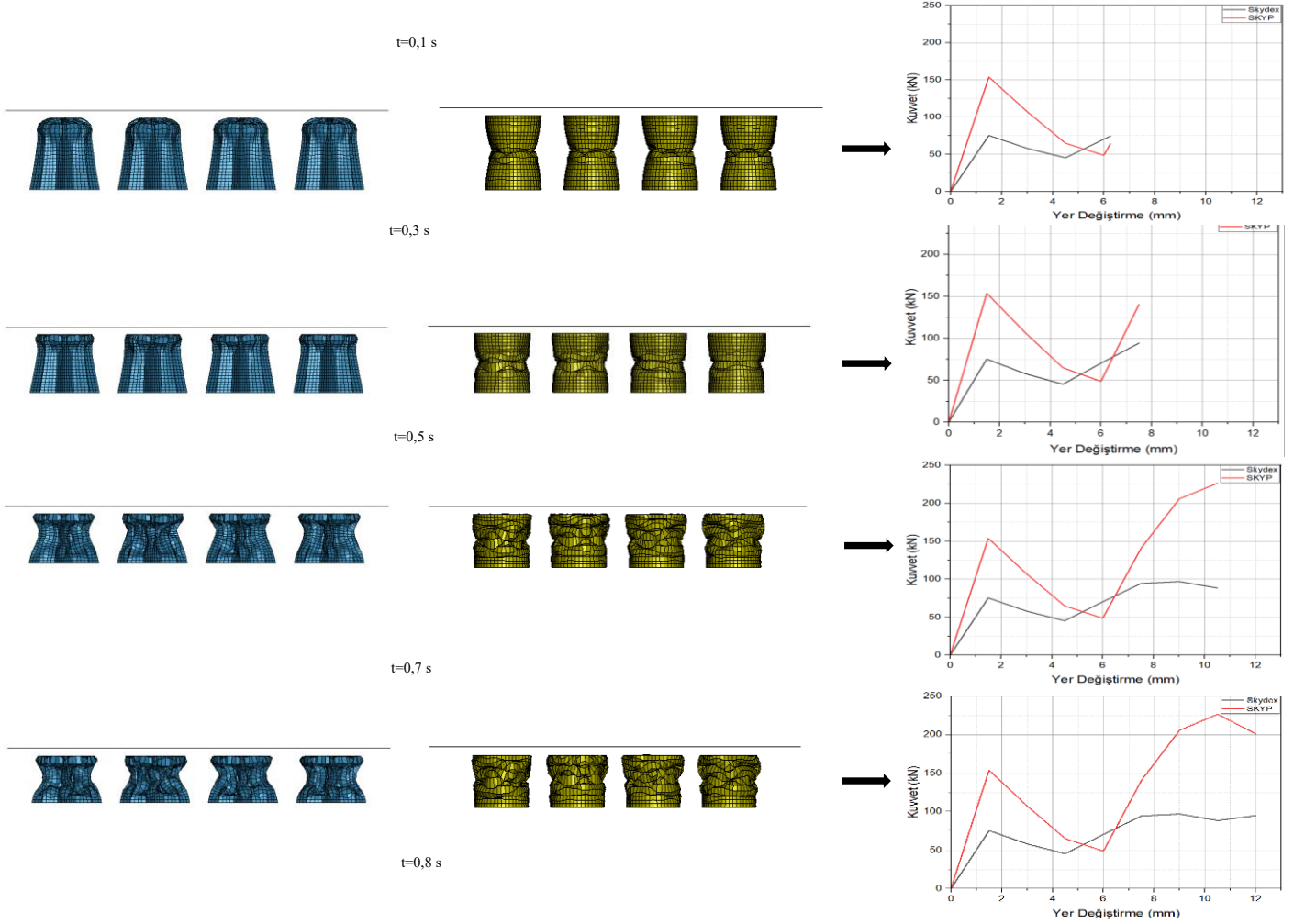


Şekil 8. Tasarlanan tüm pedlerin Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği

Tablo 3. Tasarlanan pedlerin performans değerlendirmesi (Performance evaluation of the designed pads)

Model	d (mm)	m (kg)	Enerji (kJ)	İTÇK (kN)	ODK (kN)	ÇKV	ÖEE (kJ/kg)	f
Skydex	12	0,0427773	0,8645	75,33	72,05	0,96	20,21	1,63
DKYP	12	0,0547460	1,0369	218,74	86,41	0,40	18,94	1,00
DKEYP	12	0,0420097	1,1286	152,00	94,05	0,62	26,87	1,49
AKYP	12	0,0458144	1,1822	149,39	98,52	0,66	25,81	1,49
SKYTP	12	0,0674629	1,6977	320,57	141,48	0,44	25,17	1,25
SKYP	12	0,0492025	1,5716	153,76	130,97	0,85	31,94	1,89
SKEYP	12	0,0552875	1,6597	226,73	138,31	0,61	30,02	1,58
TP	12	0,0486901	1,0453	160,29	87,11	0,54	21,47	1,24
KOP	12	0,0394403	0,4825	58,14	40,21	0,69	12,23	1,10
İKOP	12	0,0422347	0,5449	51,70	45,41	0,88	12,90	1,32
SP	12	0,0221897	0,2123	26,74	117,70	0,66	9,57	0,99





Şekil 9. Tasarlanan en verimli pedin zamana göre deformasyonu

3. Sonuçlar

Tasarlanan ve analizleri yapılan 10 zemin pedinin 7'si yaygın SKYDEX pedinden daha fazla enerji sönmülemiştir. Fakat bu 7 pedin İTÇK de aynı oranda fazla çıkmıştır. Personel güvenliği açısından bu istenmeyen bir durumdur. Hesaplanan ÇKV ve ÖEE değerleri sonucunda SKYDEX modeli en iyi ÇKV'ye sahip çıkarken SKYYP de en iyi ÖEE değerine sahiptir. Bu iki değerde tasarlanan sistem için eşit derecede önemli olduğu için kıyaslama yapabilmek için ağırlık (f) faktörü tanımlanmıştır. Sonuç olarak tüm pedler arasındaki en yüksek ağırlık (f) faktörü değeri olan 1,89'a ulaşan SKYYP modeli, SKYDEX modelini geçerek bu çalışmadaki en iyi model olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın tasarım ve analiz aşamalarında katkıda bulunan Ahmet Mete Sabah, Aytaç Gök ve İrem Keskin'e teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Lee D.K. and O'Toole B.J., Energy Absorbing Sandwich Structures Under Blast Loading. 8th International LS-DYNA Users Conference. 2004.
- [2] Huang M, Sha W, Xiao M, Gao L, Liu X, Wang Y. Multiscale topology optimization of cellular structures with high thermal conductivity and large convective surface area. International Journal of Thermal Sciences. 2024.
- [3] A.N. Varma, Close-Range Blast Effects on Small Square Clamped Plates Made from Aluminum 6061-T6. 2017.
- [4] Jiang B, Zhu F, Jin X, Cao L, Yang K.H. Computational modeling of the crushing behavior of SKYDEX® material using homogenized material laws. Composite Structures. 2013.
- [5] Gao Y, Chen X, Wei Y. Graded honeycombs with high impact resistance through machine learning-based optimization. Thin-Walled Structures. 2023.
- [6] Aktaş C. Tetra kiral ve içe girintili çarpışma kutularının performanslarının deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmesi ve optimizasyonu. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi. 2021.
- [7] Altın M, Acar E, Güler M.A. Foam filling options for crashworthiness optimization of thin-walled multi-tubular circular columns.

Thin-Walled Structures. 2018.

- [8] Acar E, Altin M, Güler M.A. Evaluation of various multi-cell design concepts for crashworthiness design of thin-walled aluminum tubes. Thin-Walled Structures. 2019.