

Ticari Araçlarda Sonlu Eleman Analizi Kullanılarak Arka Alt Koruma Tasarımı ve Optimizasyonu

¹Tuncay Çalışkan, ¹Ahmet Salih Yılmaz ve ^{*2}Nuri Akkaş

¹Anadolu Isuzu Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Çayırova/Kocaeli, Türkiye

^{*2}Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Serdivan/Sakarya, Türkiye

Özet:

M, N ve O kategorilerindeki ticari araçlar için arka alt koruma yönetmeliği ECE-R58/03 Eylül 2021’ de yürürlüğe girdi. ECE-R 58/02 de üç noktadan uygulanan test kuvvetlerinden P2 %60, P1 ve P3 ise %100 oranında artmıştır. Araç imalatçıların arka alt koruma tertibatlarını yürürlüğe girecek regülasyona uygun hale getirmeleri gerekmektedir. Çalışmamızda, artan test kuvvetlerine karşı arka alt koruma donanımını yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu alüminyum malzeme kullanarak, ağırlık artışını engellemek ve tasarımı geliştirmek hedeflenmiştir. Ağırlığın düşürülmesiyle iyileştirilen şartlara bağlı olarak yakıt tüketimi azalırken, taşıma kapasitesi ve CO₂ salınımını da iyileştirmiştir. Ayrıca bu geliştirme EV araç uygulamalarında kullanıldığında sürüş mesafesi uzayacaktır. Tasarımlar “Catia 3D Experience” programı ile hazırlanarak, “Hyperworks” yapısal analiz programı ile geliştirilmiştir. Uygulanan analiz kuvvetleri sonucunda, dikdörtgen formu arka tampon tasarımı ve güçlendirmeler ile birlikte kullanılacak malzemenin akma limitleri tespit edilmiştir. Tespit edilen akma değerleri dikkate alınarak alüminyum malzeme seçilmiş ve tasarım geliştirilerek ağırlık azaltma çalışmasından yeni yönetmeliğe uygun verimli sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Alüminyum Arka Tampon, ECE R58-03 Regülasyonu

Abstract

Rear underbody protection regulation ECE-R58/03 for commercial vehicles in categories M, N and O will enter into force in September 2021. In ECE-R 58/02, the three-point test forces P2 increased by 60%, P1 and P3 increased by 100%. Vehicle manufacturers are required to adapt their rear undercarriage protection devices to the regulation that will come into force. In our study, it is aimed to prevent weight gain and to improve the design by using high strength and low density aluminum material for the rear lower protection hardware against increasing test forces. Depending on the improved conditions by reducing the weight, fuel consumption decreased, while also improving the carrying capacity and CO₂ emissions. In addition, when this enhancement is used in EV vehicle applications, the driving range will be extended. The designs were prepared with the "Catia 3D Experience" program and developed with the "Hyperworks" structural analysis program. As a result of the applied test forces, the yield limits of the material to be used with the rectangular rear bumper design and reinforcements were determined. Considering the determined yield values, aluminum material was selected and the design was developed, and efficient results were obtained in accordance with the new regulation from the weight reduction study.

Key words: Finite Element Method, Aluminium Rear Bumper, ECE R58-03 Regulation

1. Giriş

Taşıtlarda ağırlık azaltmak, kirlenici gazların oluşturduğu çevre kirliliğinin azaltmakta ve yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle elektrikli ve hybrid taşıtlarda enerji verimliliği açısından hafiflik üretilen aracın sürüş mesafesini arttırmaktadır. Taşıtların hafifletme çalışmaları, taşıtların hızlanması ya da yokuş çıkması için gereken enerji miktarı azaltılabilmektedir. Sonuç olarak yakıt ekonomisine ve çevre kirliliğinin azalmasına katkı, enerjinin korunumu ile sağlanmaktadır [1].

Alüminyum, ulaşım sektöründe taşıtların üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık %25'i taşıtların üretimine aittir. Taşıtların ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye gerek duyulmaktadır. Alüminyum malzeme kullanan bir otomobilin, diğerlerine kıyasla, ekonomik ömrü boyunca 1500 litre daha az yakıt harcadığı hesaplanmıştır. Bu durumun gerek sürücülerin akaryakıt masraflarına sağlayacağı ekonomi ve çevre sağlığı açısından atmosfere yayılan atık egzoz gazının düşürülmesi yönünden çok büyük faydası bulunmaktadır. Hafiflik özelliğinin yanında alüminyum malzeme, boyasız veya kaplamasız olsa bile sudan ve yol tuzlarından kaynaklanan korozyona karşı dayanıklıdır. Çelik için gerekli olan ve ilave maliyet getiren galvanizleme, kaplama veya boyama alüminyum için gerekli olmayabilir. Alüminyum, boyanın çizilmesi veya kalkması durumunda çelik gibi paslanmaz, korozyona dirençlidir. Alüminyum; emniyet, konfor ve güvenilirlikten ödün vermeden ağırlık azalması için anahtar bir malzemedir [2].

Güvenlikten ödün vermeden ve konfordan vazgeçmeden az yakıt tüketen otomobiller için hafif, fakat mukavemeti yüksek alaşımların geliştirilmesi otomobil üreticilerinin önemli hedefleri arasında yer almaktadır. Alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif yapı metalleri, otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu için gerekli hafif malzeme seçiminde önemli potansiyel kullanım alanına sahiptirler. Ancak bu alaşımlar içerisinde alüminyumun, maliyet, işlenebilirlik, korozyon direnci ve geri dönüşüm yönünden avantajlarıyla hızla gelişmekte olan otomotiv endüstrisinde kullanımının her geçen yıl daha da artmasına neden olmuştur. Alüminyum alaşımları bu özellikleri nedeniyle otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu için gerekli hafif malzeme seçiminde önemli bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyumun tercih edilmesinin diğer nedeni ise, araç tasarımı alanında en önemli husus olan yolcu güvenliğidir. Çarpma sırasında ortaya çıkan enerji yolcular tarafından değil darbe emiciler tarafından absorbe edilmelidir. Alüminyum bu amaç için en uygun elementtir. [3].

Karayollarında, her gün birçok trafik kazası meydana gelmektedir. Süratli hafif araçların, düşük hızlarda seyreden ağır vasıta araçlarına arkadan çarpması neticesinde ağır yaralanmalı ve/veya ölümlü kazalar meydana gelmektedir. Bu tür kazaların hayati önem riski yüksek olmalarının ana nedeni ise üst yapılarının (kasaların), mevcut şasi uzunluklarından daha uzun yapılmaları ve/veya regülasyonlara uygun olmayan arka tampon kullanılmasıdır. Üst yapıların konumu arkadan gelen otomobillerin yaklaşık olarak cam seviyelerinde olmasından dolayı, arkadan çarpan araç, ağır vasıta aracının kasa alt bölgesine girmektedir. Şekil 1'de görüleceği üzere ECE R58-03 regülasyonuna uygun olmayan arka uzantılı veya arka koruma tamponlu ağır vasıta aracına arkadan

çarpması neticesinde, otomobiller kolaylıkla ağır vasıta aracının altına girebilmektedirler.



Şekil 1. Otomobilin ilk temas anı [5].

Şekil 1’de kaza, ağır vasıta aracının tamponuna çarpması ile başlamaktadır. Arka tampon regülasyonlarda belirtilen şartları sağlamadığında (regülasyon kuvvetlerini taşımayan, regülasyonda belirtilen yükseklik konumunda olmayan, regülasyonlarda belirtilen kasa çıkıntısına uyulmadığında) kazanın oluşumu devam etmektedir. Arka tampon görevini uygun olarak yerine getirmediğinde, arkadan çarpan araç, ağır vasıta araç kasasının altına doğru ilerler. Kasa yükseklikleri yaklaşık olarak otomobillerin cam başlangıç (kaza anında oluşan kuvvetleri sönmülemeyecek) bölgelerine tekabül ettiğinden dolayı bu tür kazalar ağır yaralanmalı ve/veya ölümcül sonuçlarla neticelenmektedir. Şekil 2’de gerçekleşen kaza, benzer kazalardan sadece tekidir. 29 Haziran 2021 tarihinde gerçekleşen otomobilin kamyonu arkadan çarpması sonucu genç bir öğretmen hayatını kaybetmiştir. [6]. Arka tamponların sadece regülasyonda talep edilen test kuvvetlerini sağlaması yeterli olmayıp, regülasyonun tüm şartlarını yerine getirmesi gerekmektedir.



Şekil 2. Otomobilin kamyonu arkadan çarpması

Yürürlükte olan regülasyonlara rağmen bu tür kazaların can kayıplarıyla sonuçlanmasına, araçlarda kullanılmakta olan arka tampon tasarımların da eksikliğine işaret etmektedir. Yük taşıma amacıyla

kullanılan M, N ve O kategorisi ticari araçların arka koruyucu tamponları UN ECE R-58-03 regülasyonuna uygun olarak tasarlanmakta ve uygulanmaktadır.

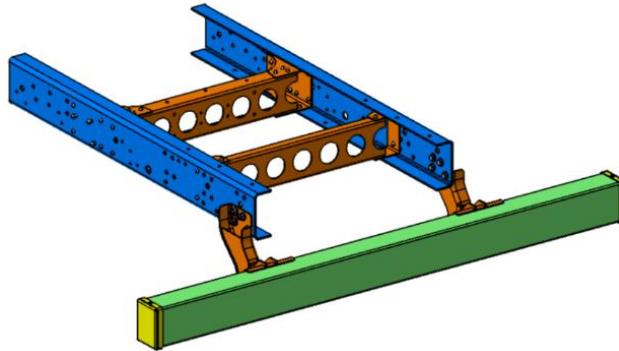
Ticari araçlarda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan yapısal analizler ile araç üzerinde bulunan parçaların mukavemet dayanımları belirlenebilmektedir. Yapılan analiz çalışmaları statik ve dinamik analizler olabileceği gibi parçaların yorulma kaynaklı doğacak sonuçlarını belirleyen yorulma-ömür değerleri de hesaplanabilmektedir [4]. Analizler sonucu, analiz edilen parçanın herhangi bir bölgesinde oluşan gerilme, deplasman değerlerini tespit etmek mümkündür.

Yapısal analizler ile bulunan sonuçların doğruluğuna güvenebilmek için modelin testlerle doğrulanması kadar analize teşkil edecek doğru girdilerin de hesaplanması gerekir.

Yapısal analiz çalışmalarında kısmi araç modelinden gelen datalar kullanılarak parça üzerinde oluşacak gerilme dağılımı elde edilebilir. Analiz sonucunda en yüksek, en düşük gerilme değerleri ve bunların bölgeleri belirlenecektir. İlk analiz ile en yüksek gerilme bölgelerine, birim uzama rozetleri yerleştirilerek strain bilgileri toplanabilir. Toplanan birim uzama verileri ile dolaylı olarak gerilme değerleri hesaplanabilir.

2. Kısmi Araç 3D Modelinin Oluşturulması ve FEA Modelinin Kurulması

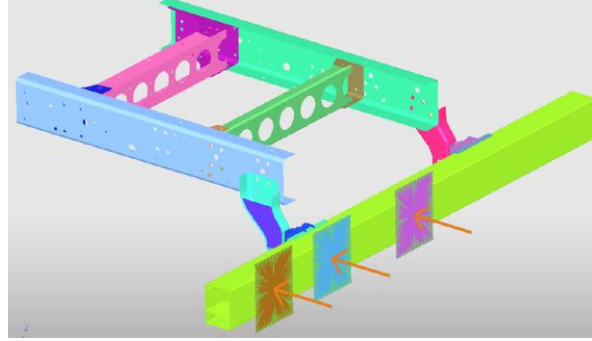
Arka tampon sisteminde yer alan şasi kompleksi regülasyonda izin verilen ölçüde kesilerek kısmi şasi modeli oluşturulur. Analizler ve fiili test şartları kısmi şasi üzerinde gerçekleştirilir. Kısmi şasi üzerine, UN ECE R-58-03 regülasyonunda belirtilen test kuvvetlerinin etki edeceği tüm parçalar Şekil 4'de gösterildiği gibi modele ilave edilir. Arka tampon bağlantı braketleri ve arka tampon, araç üzerindeki pozisyonlarında yerleştirilir. Arka tampon, kısmi modeli ne kadar doğru modellenir ve kısmi araç modeline aktarılırsa, sanal modelden elde edilen deplasman ve gerilme değerleri gerçeğe yakın yakınsama yapacaktır. Bu nedenle, tasarımda yer alan her alt sistem ayrı ayrı modellenerek birleştirilmiştir. Aracın, kısmi şasisi, kısmi şasi kolları ve arasındaki krosler, kros-şasi bağlantı braketleri, arka tampon-şasi montaj braketleri ile arka tampon bağlantı koordinatları modele aktarılmıştır. Şekil 4'de tampon kenarlarındaki kapamalar, analiz sonuçlarını etkilemeyeceği ve ECE R58-03 regülasyonunda bakılmasına gerek olmadığı için analizlerde dikkate alınmamıştır.



Şekil 3. Arka tampon kısmi CAD modeli

2.1. Arka Tampon Sistemi FEA Modeli

Şekil 4’de görüleceği üzere, arka tampon sistemi sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş ve ECE R58-03 regülasyonunda belirtilen kuvvetler, uygulama noktalarına kuvvetin uygulanması için regülasyonda önerilen dikdörtgen kesitli yapılar aracılığı ile regülasyonda belirtilen kuvvet değerleri ve kuvvet yönleri FEA modeline girilmiştir.



Şekil 4. Arka Tampon FEA Modeli

2.2. Arka Tampon Sistemi Malzeme Özellikleri

Kullanılan malzemeler;

- Şasi, kros ve tampon arkasındaki ara bağlantı braketleri “S420MC” kodlu çelik malzemedir.
- Arka tampon, 6062-T6 kodlu alüminyum malzemedir.

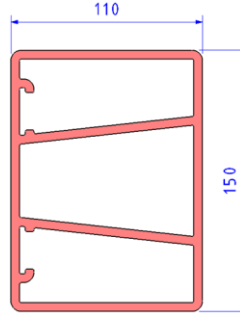
Malzeme özellikleri detaylı olarak Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

	Akma Dayanımı	Elastik Modülü	Yoğunluk [t/mm ³]
S420MC	420 MPa	210 GPa	7.85e-09
6062-T6	269 MPa	210 GPa	2.7e-09

2.3. Arka Tampon Modeli

Arka tampon sisteminde bulunan tampon ilk aşamada Şekil 5’teki gibi sadece dikdörtgen formda dizayn edilerek regülasyon test kuvvetlerini sağlayamamıştır. İlave olarak dikdörtgen tampon arasına (orta bölgesine) test kuvvetleri yönünde 1 adet takviye atılarak yapılan analiz sonuçları da uygun çıkmamıştır. Test şartlarını sağlayabilmesi için kuvvetler yönünde mukavemet arttırıcı 2 takviyeden oluşturulmuştur. Mukavemet arttırıcı 2 takviye regülasyonun gerektirdiği test şartlarını sağlamıştır.

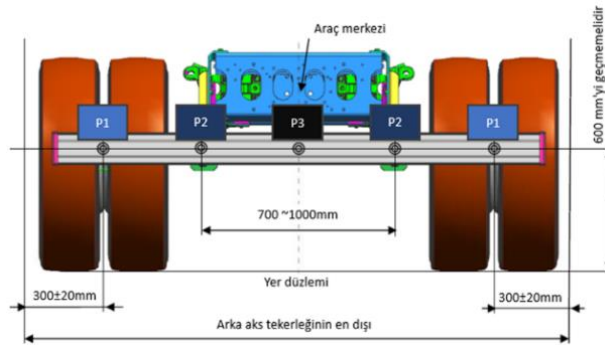


Şekil 5. Arka tampon kesiti

Kısmi araç modeli, ölçüleri ve kuvvetleri regülasyon verilerine uygun oluşturulmuştur.

3. Uygun Sınır Şartlarının ve Analiz Kuvvetlerinin Belirlenmesi

ECE R58-03 regülasyonu analiz ve test için gerekli sınır şartları ve kuvvet uygulama noktaları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. ECE R58-03 sınır şartları ve kuvvet uygulama noktaları [7]

Uygulanacak analiz ve/veya test kuvvetleri ise Tablo 2’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır. Aşağıdaki hesaplamalardan hangisi küçükse alınır. GVW – Gross Vehicle Weight olarak toplam araç ağırlığı 12,500 kg alınmıştır.

$$GVW = \frac{12500 \times 9,81}{1000} \approx 123 \text{ kN} \quad \text{olarak alınmıştır.}$$

Tablo 2. Hesaplanan analiz kuvvetleri

Test Kuvvetleri	P ₁	P ₂	P ₃	
UNECE R58-03	50%	80%	50%	GVW
	≤ 100	≤ 180	≤ 100	kN
Analiz Kuvvetleri	~62	~98	~62	kN

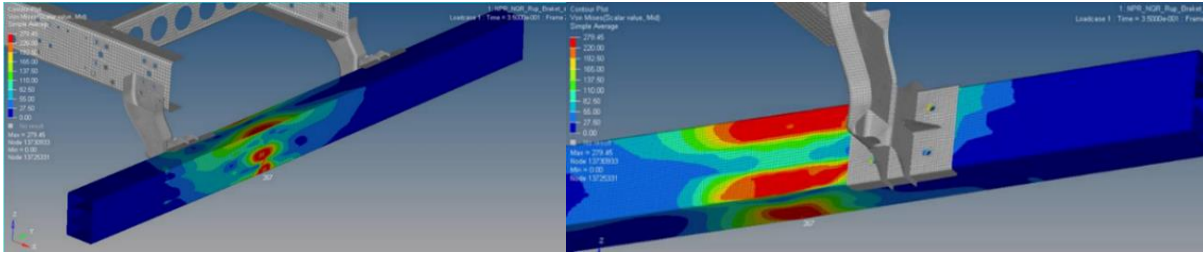
4. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

4.1. Sonlu Elemanlar Modeli

Arka tamponun CAD verisi uygun formatta alınarak yapısal analiz programında (Hyperworks) çalıştırılır. Devamında CAD verisindeki yüzeylerin birbirinden ayrılmasını sağlayan yazılım çalıştırılarak eleman boyutlarının yüzeylere homojen atılabilmesi sağlanmaktadır.

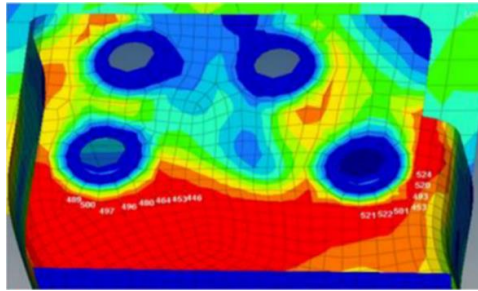
4.2. Maksimum Gerilme Bölgeleri

Kısmi araç modeli kullanılarak elde edilen kuvvet ve momentler ile yapılan yapısal analiz sonucu arka tampon üzerinde oluşan gerilmeler, von Mises gerilme hesaplama metodu ile tespit edilmiştir. Şekil 7'ye göre en yüksek gerilme bölgeleri arka tampon sabitleme braketleri ile aracın orta eksenini arasında bir bölgede çıkmaktadır.



Şekil 7. Arka tampon üzerinde oluşan en yüksek gerilmeler

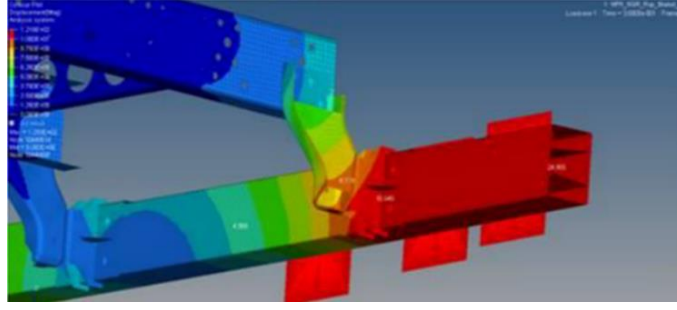
Kısmi araç modeli kullanılarak elde edilen kuvvet ve momentler ile yapılan yapısal analiz sonucu arka tampon bağlantı braketleri üzerinde oluşan gerilmeler, von Mises gerilme hesaplama metodu ile tespit edilmiştir. Şekil 8'e göre en yüksek gerilme bölgeleri ise montaj noktalarının alt bölgesinde çıkmaktadır.



Şekil 8. Arka tampon bağlantı braketleri üzerinde oluşan en yüksek gerilmeler





4.3. Maksimum Şekil Değişirme Bölgeleri

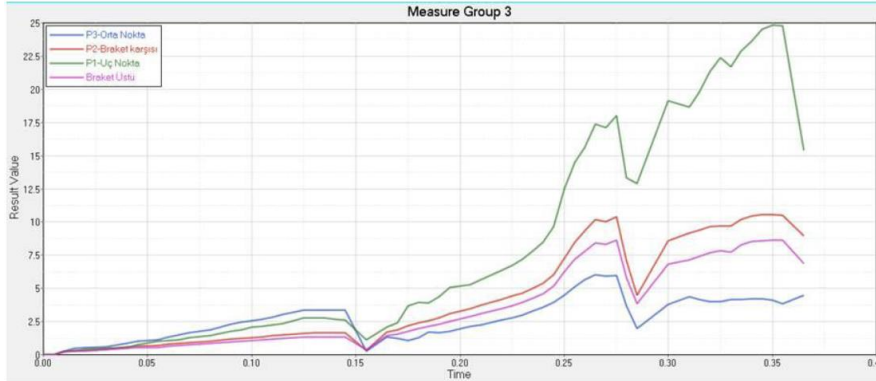
Kısmi araç modeli kullanılarak elde edilen kuvvet ve momentler ile yapılan yapısal analiz sonucu arka tampon üzerinde oluşan şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Şekil 8'e göre en yüksek şekil değiştirme bölgeleri arka tampon uç bölgelerinde çıkmaktadır.



Şekil 9. Arka tampon üzerinde oluşan en yüksek şekil değiştirmeler

Zamana bağlı olarak şekil değişimleri Şekil 10’da gösterilmektedir.

	P3 – Orta Nokta
	P2 – Braket Karşısı
	P1 – Uç Nokta
	Braket Üstü

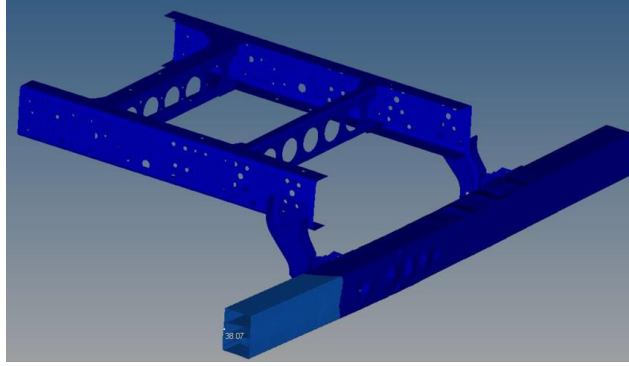


Şekil 10. Arka tampon üzerinde zamana bağlı oluşan şekil değiştirmeler

5. Uygun Arka Tamponların Karşılaştırması ve Hafifletme Çalışması

Mevcut ECE R58-02 regülasyonuna uygun fakat ECE R58-03 regülasyonunu sağlayamayan tampon $\approx 21,4$ kg olarak tartılmıştır. Alüminyum olarak tasarlanıp güçlendirilmiş tampon ECE R58-03 analiz şartlarına uygun dizayn edilerek gerçekleştirilmiştir. Toplam ağırlığı $\approx 19,4$ kg çıkmıştır. ≈ 2 kg (≈ 10) daha hafiftir.

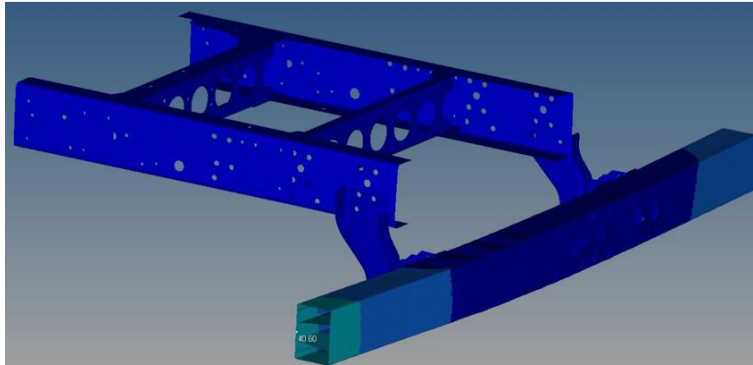
Alüminyum tampon malzemesi değiştirilerek daha yüksek akma mukavemeti olan 7075-T6 veya 7075-7651 malzeme seçimi yapılarak akma değeri 269MPa’dan 520MPa mertebelerine çıkartılmıştır. Böylece analiz edilen parçanın malzeme et kalınlığı 1mm düşürülmüştür. Çıkan sonuçlarda yer değiştirme miktarı 14mm artmış ve regülasyon şartlarını sağlamıştır.



Şekil 11. 7075-T6 malzemeli 1 mm inceltilmiş tampon

Yapılan son çalışma ile birlikte arka tampon ağırlığı toplam ≈ 16 kg çıkmıştır. Toplam hafifletme $\approx 5,4$ kg ($\approx \%25$) daha hafif olmuştur.

Et kalınlığı 0,5mm daha düşürülerek tekrar analiz edilerek parçanın durumu incelenmiştir. Toplamda 1,5mm düşürülmüş olan tamponda yer değiştirme miktarı 8mm artmış ve regülasyon şartlarını sağlamıştır. Ayrıca parçanın yapısında şekil bozuklukları gözlenmiştir.



Şekil 12. 7075-T6 malzemeli 1,5 mm inceltilmiş tampon

Son analiz çalışması ile tampon ağırlığı ≈ 14 kg çıkmıştır. Toplam hafifletme $\approx 7,4$ kg ($\approx \%34$) daha hafif olmuştur.

6. Sonuçlar

Oluşturulan kısmi araç modeli ile uygulanan regülasyon kuvvetleri neticesinde yapılan dinamik analiz çalışmasında 12,5 ton kapasitesindeki bir ticari aracın arka tamponu üzerinde oluşan gerilmeler ve yer değiştirme değerleri bulunmuştur. Ağırlık azaltma çalışmaları için akma değeri yüksek olan malzeme seçiminden yararlanmış olup parça et kalınlıklarında yapılan azalma ile $\%25$ - 34 mertebelerinde hafifletme sağlanabildiği tespit edilmiştir. Arkadan çapmalarda hayati önem niteliğinde bulunan arka tamponda $\%25$ ağırlık azaltma çalışması yeterli kabul edilmiştir. Çıkan en yüksek gerilmeler malzeme akma değerinin altında kalmıştır. Doğruya oldukça yaklaşan

çalışma sonucu belirlenen sonlu elemanlar yapı elemanı boyutu ileriki çalışmalara da ışık tutacak bir çalışma olarak değerlendirilmektedir. Bu modele dayanarak dinamik analizlerde en yüksek gerilmenin ve yer değiştirmelerin tespit edildiği parçaların geometrisi güncellenebilir ve parçada kullanılan malzemeler belirlenebilir. Model ayrıca optimizasyon çalışmasında kullanılabilceği gibi farklı toplam araç ağırlıklarında da arka tampon kesit kalınlığının artırılarak veya düşürülerek uygulanan yükler altındaki yapısal analiz çalışmalarında kullanılabilcektir.

7. Teşekkür

İlgili yayının oluşmasında desteklerini esirgemeyen Anadolu Isuzu Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça:

- [1] Öztürk F, Toros S, Esener E, Uysal E. 2009. “Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 11. Otomotiv Sempozyumu, Bursa, Türkiye, 50(596), 44-49.
- [2] Ertuğ B., Kumruoğlu L. C. (2009). “Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Uygulama Alanları”, Metal Dünyası (Ulusal) (Hakemsiz) (MAKALE Derleme Makale) (Yayın No: 3426668)
- [3] Beşer, T.A. (2013), “Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı”, Mühendis ve Makina, Sayı 635, Cilt 53, (Sayfa.51-58),
- [4] Şener, S. A. (2012), “Determination Of Vehicle Components Fatigue Life Based On Fea Method And Experimental Analysis”, I. J. of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering, 2:1, 133-145
- [5] Young, J. “IIHS recognizes semitrailers with good underride guards” Insurance Institute for Highway Safety (IIHS), <https://www.iihs.org/news/detail/iihs-recognizes-semitrailers-with-good-underride-guards>
- [6] <https://malatyahaber.com/haber/genc-ogretmen-kazada-can-verdi/>
- [7] Yılmaz, G., Aygün, Y., Cengiz, A. (2017) “Numerical and Experimental Analysis of A Prototype Rup Device for Heavy Vehicle” IATS17 8th International Advanced Technology Symposium, (Sayfa.4218-4223),