



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ

24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

OTOBÜSLERDE KULLANILAN PLASTİK YAKIT TANKLARININ STATİK VE DİNAMİK ANALİZLER YARDIMIYLA DAYANIMININ İNCELENMESİ

Gökay Simitçioğlu¹, Burak Ustaoglu², Serter Atamer², Vedat Z. Doğan¹, Halit S. Türkmen¹, Zahit Mecitoğlu¹, Sena Ayhün¹, Erdem Akay¹, Sedat Süsler¹, Y. Emre Erginsoy¹ ve Müslüm Çakır¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

² Mercedes-Benz Türk A.Ş., İstanbul

ABSTRACT

Nowadays, the conventional metal fuel tanks used in buses are being replaced with plastic fuel tanks. In this paper, a part of the project which aims to develop a computer aided methodology for developing/designing of the plastic fuel tanks based on static and dynamic analysis is presented. Coupon tests are first conducted to acquire the mechanical properties of the plastic material. In the static analysis, equivalent static loads are applied to the fuel tanks. In the dynamic analysis, the time varying loading and the inertia of the fluid and fuel tanks are taken into account using modal transient analysis. Fluid which is in the tank is modeled with acoustic approach in dynamic analysis. In this paper, different fullness ratios of the fuel tank are investigated and both results are compared each other.

ÖZET

Günümüzde, otobüslerde kullanılmakta olan konvansiyonel metal yakıt tankları yerini plastik yakıt tanklarına bırakmaktadır. Bu makalede, plastik yakıt tanklarının, statik ve dinamik analizlere dayalı, bilgisayar destekli, geliştirme-tasarım projesinin bir kısmı sunulmuştur. Öncelikle, plastik malzemenin mekanik özelliklerini bulmaya yönelik kupon testleri gerçekleştirilmiştir. Statik analizlerde yakıt tankına eşdeğer yükler uygulanmıştır. Dinamik analizler ise zamanla değişen yük, yakıt ve tankın atalet momentleri göz önüne alınmış ve modal transient analiz yöntemi kullanılmıştır. Statik analizlerde, eşdeğer statik yükleme yaklaşımı kullanılmaktadır. Yapılan dinamik analizlerde, akışkan akustik elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Yakıt tankı farklı doluluk oranları için incelenerek karşılaştırılmış ve sonuçları bu bildiride paylaşılmıştır.

GİRİŞ

Plastik yakıt tankları; günümüzde birçok araçta hafifliği, paslanmaz oluşu ve tasarım kolaylığı nedeniyle çelik tankların yerine kullanılmaya başlanmıştır. Liehr çalışmasında plastik yakıt tanklarının, seri araç üretimde, ilk olarak 1972 yılında, Volkswagen marka Passat model araçlarda kullanılmaya başlandığından bahsetmektedir. Plastik yakıt tanklarının tercih sebebi olarak, üretimin maliyetinin ve ham maddenin ucuzluğunu, korozyona karşı direncinin iyi olmasını, şekillendirme özgürlüğü sayesinde yüksek hacimli tasarım yapmaya uygun oluşunu ve güvenlik gibi sebepleri göstermektedir. Ayrıca çalışmasında, plastik yakıt tanklarının üretim şekillerinden bahsetmektedir. Bu teknikler, şişirme makinası ile üretim (blow molding), döner kalıpla üretim (rotomolding) ve el yatırması ile üretim (hand lamination) dir.

El yatırması tekniğinin kalite problemleri nedeniyle en az kullanılan yöntem olduğundan, şişirme makinasıyla ve döner kalıpla üretim yöntemlerinin tercih edildiğinden bahsetmektedir [1]. 1987 yılında yapılan bir çalışmada çok katmanlı yakıt tankları üretilmiştir. Çalışmada yakıt geçirgenliği tanımlanmış ve çok katmanlı yakıt tanklarının yapısı ve reçine gelişimi tartışılmıştır [2]. Autolatina için yapılan bir çalışmada, kamyonlar için yüksek kapasiteli plastik yakıt tankları üretilmiştir. Çünkü daha önce kullanılan çelik yakıt tanklarında, Brezilya'da kullanılan yakıt bileşimindeki kükürt fazlalığından dolayı korozyon meydana gelmiştir. Bu korozyon, motor enjeksiyon sisteminde hasara neden olmuştur. Araştırmacılar değişik tip malzemeleri, uyumluluk, güvenlik, maliyet, ağırlık, geri dönüşüm, yedek parça gibi özelliklere göre incelendikten sonra polietilen malzemedeki yakıt tankı üretilmesini önermişlerdir [3]. 1998 yılında yapılan bir çalışmada ise çelik ve plastik yakıt tanklarının yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Federal standartlara göre yakıt ekonomisini geliştirmek için otomotiv parçalarında hafif parçaların kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte çevreye duyarlı parçaların üretimi de ön planda tutulmaktadır. Üretim aşamasındayken çelik malzeme katı atık üretimi, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeye göre daha fazladır. HDPE bu anlamda çeliğe göre ön plana çıkmaktadır. Ancak plastik malzemenin geri dönüşümünün olmayışı dezavantajdır [4].

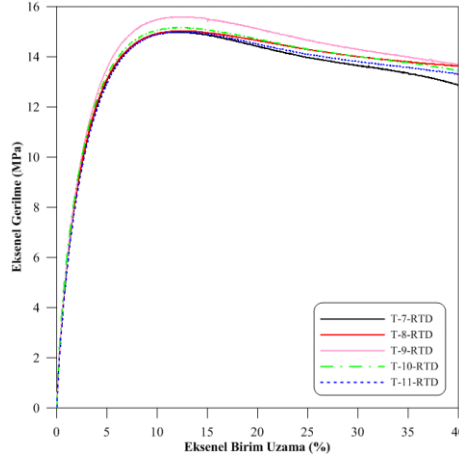
Yakıt tanklarında akışkanın modellenmesi ayrı bir sorun olarak ön plana çıkmaktadır. Akışkan ve katı etkileşimini sağlamak için literatürde belli başlı metotlar önerilmektedir. Yay - kütle modeli bunlardan ilkidir. Yay – kütle modelinde akışkan bir kütle olarak tanımlanarak katıya yaylarla bağlanmaktadır. Bir diğer metot eksplisit olarak çözüme giderek akışkanı Euler, Lagrange, SPH ya da ALE metotlarından biriyle modellemektir. Bir akışkan dinamiği hesaplama (CFD) programı yardımıyla da akışkan modellenip, çıkan basınç değerleri yapıya sonlu elemanlar metoduyla etkilenebilir. Son olarak bu çalışmada da kullanılan akustik yaklaşım bir diğer akışkan modelleme tekniğidir. Akışkan dinamiği hesaplama (CFD) gibi pahalı bir çözücü gerektirmemesi ve karmaşık geometrilere rahatlıkla uygulanabilir olması sebebiyle akustik modelleme tekniği tercih edilen bir metottur.

Akustik elemanlar özelinde yapılan literatür çalışmasında, Jaiswal, Kulkarni ve Pathak (2008) sıvı-tank sisteminin çalkantı frekansları üzerine bir çalışmasına rastlanmıştır. Sıvı depolama tanklarının tasarımında, sıvı depolama tanklarının sismik çalkantı frekans bilgisi ve tank duvarlarında meydana gelen hidrodinamik basınç bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da ancak sismik uyarma altında sıvı-tank etkileşimin doğru analiziyle mümkündür[5].

Bu çalışmada, farklı geometriler için çalkantı frekansının hesaplanabilmesi için deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmıştır. Elektro-Manyetik sarsma tablası kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntem olarak, ANSYS yazılımı kullanılarak sıvı-tank sisteminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yakıt modellenmesinde akustik yaklaşım kullanılarak çözüme gidilmiş ve testle numerik analizler doğrulanmıştır.

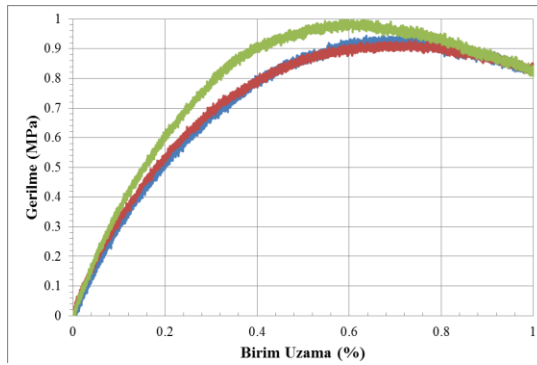
POLİETİLEN MALZEME TESTLERİ

Bu proje kapsamında plastik malzeme üzerinde yapılan birçok malzeme testi ile statik ve dinamik analizleri aşamasında ihtiyaç duyulan, mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve diğer malzeme davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda yapılan testlerden biri oda sıcaklığı, sıcak ortam (+60 °C) ve soğuk ortam (-40 °C) şartlarında kupon testleri yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılacak kuvvet değerlerinin okunması için yük hücresi kullanılmıştır. Birim uzama değerleri ise, numune üzerine yapıştırılan straingage ve numune üzerine takılan ekstensometre yardımıyla ölçülmüş ve bir veri toplama cihazı ile kaydedilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen çekme testi sonucu Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1: Oda sıcaklığında çekme testi gerilme-eksenel birim uzama grafikleri

Malzemenin mekanik özelliklerini anlamak için bir diğer test de 3 nokta eğilme testidir. Bu test yorulma testlerinde ihtiyaç duyulacak lineer bölge sınırlarını aşmayacak gerilme, deplasman ve birim uzama değerlerini elde etmek amacıyla yapılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan 3 testten elde edilen birim uzama sonuçları Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2: 3 nokta eğilme testi gerilme-birim uzama grafiği

FORMÜLASYON

Gerçekleştirilen statik ve dinamik analizler için farklı formülasyonlar kullanılmaktadır. Statik analizler kapsamında kullanılan formülasyon yakıt tankı üzerine etkiyen kötü yoldan toplanmış ivme değerlerinin alt üst maksimumlarını kullanarak yapılan bir hesabı kapsar. Örneğin, X doğrultusunda baskın ivme geldiği durumda, diğer doğrultulardaki maksimum ivme değerleri tanka belirli yüzdelerde azaltılarak etkiler. Bu yüzde değerleri ve yükleme koşulları SONLU ELEMEN ANALİZLERİ başlığı altında yer alan Tablo 2’de daha ayrıntılı şekilde verilmiştir. Bu üç yönlü ivme katkıları altında,

$$P = \rho.a.h \quad (1)$$

Denklemini yardımıyla akışkanın yarattığı basıncın statik eşdeğeri çıkartılabilir. Bu formülde,

P : Statik eşdeğer basınç	(N/mm ²)
a : İvme	(mm/s ²)
ρ : Yakıt yoğunluğu	(ton/mm ³)
h : Yakıtın yüksekliği	(mm)

olarak belirtilebilir. Basınç değerleri farklı yükleme koşulları olarak yakıt tankı iç cidarlarına etkilenerek çözüm yapılır.

Dinamik analizlerde ise, akustik analiz teorisi önemli bir yer tutar. Akışkanı modellemekte kullanılan akustik elemanlarda sistem, akustik dalga denklemini çözmektedir [6].

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemde;

- C : Akışkan ortamındaki ses hızı (mm)
t : Akışkan basıncı (mm/s²)
p : Zaman (s)

Akışkan ortamındaki dalga hızı “C” ise Denklem 3 ile çözülebilir.

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

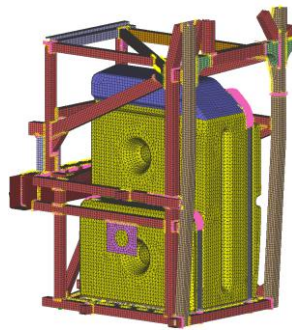
- K : Akışkanın bulk modülü (N/mm²)
ρ : Akışkanın yoğunluğu (ton/mm³)

K ve ρ akışkana bağlı büyüklükler olduğu için malzeme özelliği olarak kolayca sisteme girilebilmektedir.

SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Yakıt Tankının Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Koşulları

Belirtildiği gibi, yakıt tankı dinamik analizlerinde yakıt için akustik elemanlar ile modellenmiş ve “modal transient” analiz metodolojisi ile çözülmüştür. Analizde, öncelikle tüm sistemin 250 Hz’e kadar olan tüm doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen modları elde edilmiştir. Ardından tüm bu doğal frekanslara ait değerlerin, kötü yol ivme değerleri ile zorlanan sistemde nihai deplasman ve gerilmeye olan katılımları program tarafından bulunmuştur. Elde edilmiş olan doğal frekansa ait çıktıları ile katılım faktörleri sonucunda zorlanma sonrası nihai gerilme ve gerilmeye ait RMS değerleri elde edilmiştir. Yakıt tankının ve karoserinin sonlu eleman ağı yapısı kullanılan farklı malzemelere göre renklendirilerek, şekil 3’te gösterilmektedir.



şekil 3: Yakıt tankı ve karoserinin sonlu eleman ağı yapısı

şekil 3’de görülen yakıt tam dolu modelde yaklaşık olarak 131500 düğüm noktası ve 472000 eleman bulunmaktadır. Yakıt tankı ve karoseri 1. derece kabuk (shell) elemanlarla, yakıt ise üç boyutlu akustik elemanlar ile modellenmiştir. Tüm analizde PERMAS V15 sonlu elemanlar çözücüsü kullanılmıştır.

Temel anlamda akustik analizlerde 4 ana kısım bulunur. Bunlar; yapısal (structure part), akustik (acoustic part), etkileşim bölgesi (interface) ve serbest yüzey (free surface) olarak sıralanabilir. Tüm bu kısımlar için ayrı eleman tipleri tanımlama ihtiyacı bulunmaktadır. Akustik elemanların tümü akışkan malzeme özelliği kullanılmaktadır. Bu proje için otobüs deposu içerisinde dizel yakıtı bulunmaktadır. Dizel yakıtına ait malzeme özellikleri Tablo 1’de görülebilir. Dizel yakıtına ait malzeme özellikleri, Seykens, Somers ve Baert (2004)’ın makalesinden alınmıştır [7].

Tablo 1. Dizel yakıtın özellikleri

Yakıt Yoğunluğu	Yakıtın Bulk Modülü
823,4 kg/m ³	1393 MPa

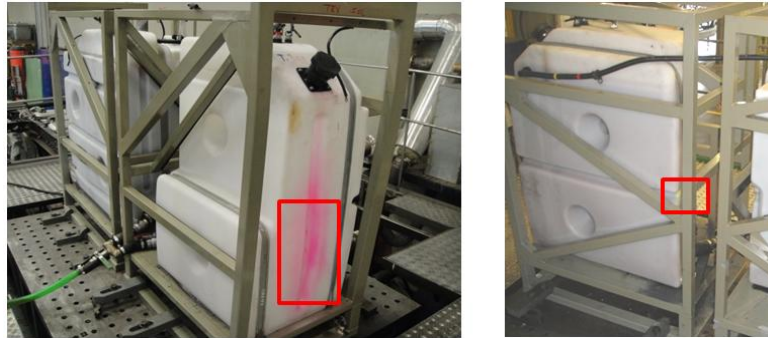
Statik analizlerde ise Tablo 2’de gösterildiği şekilde, 3 yöndeki ivme değerleri ile 24 farklı yükleme koşulu oluşturulmuştur. Bu yükleme koşullarında baskın olarak seçilen yöndeki ivme değerleri ile diğer iki doğrultudaki maksimum ivme değerlerinin %40’ı bileşke olarak alınmış ve yükleme koşulları oluşturulmuştur.

Tablo 2. Statik analizlerde kullanılan yükleme koşulları

X doğrultusundaki ivme değerleri	Y doğrultusundaki ivme değerleri	Z doğrultusundaki ivme değerleri
$\pm \%100 P_x$	$\pm \%40 P_y$	$\pm \%40 P_z$
$\pm \%40 P_x$	$\pm \%100 P_y$	$\pm \%40 P_z$
$\pm \%40 P_x$	$\pm \%40 P_y$	$\pm \%100 P_z$

Yakıt Tankı Sarsma Tablası Testleri

Analiz sonuçları değerlendirilmeden önce belirtilmesi gereken bir diğer nokta ise 7 mm cidar kalınlığına sahip yakıt tankı üzerinde yapılan sarsma tablası testlerinin sonuçlarının paylaşılmasıdır.



Şekil 4: Yakıt tankı üzerindeki kırık bölgeleri.

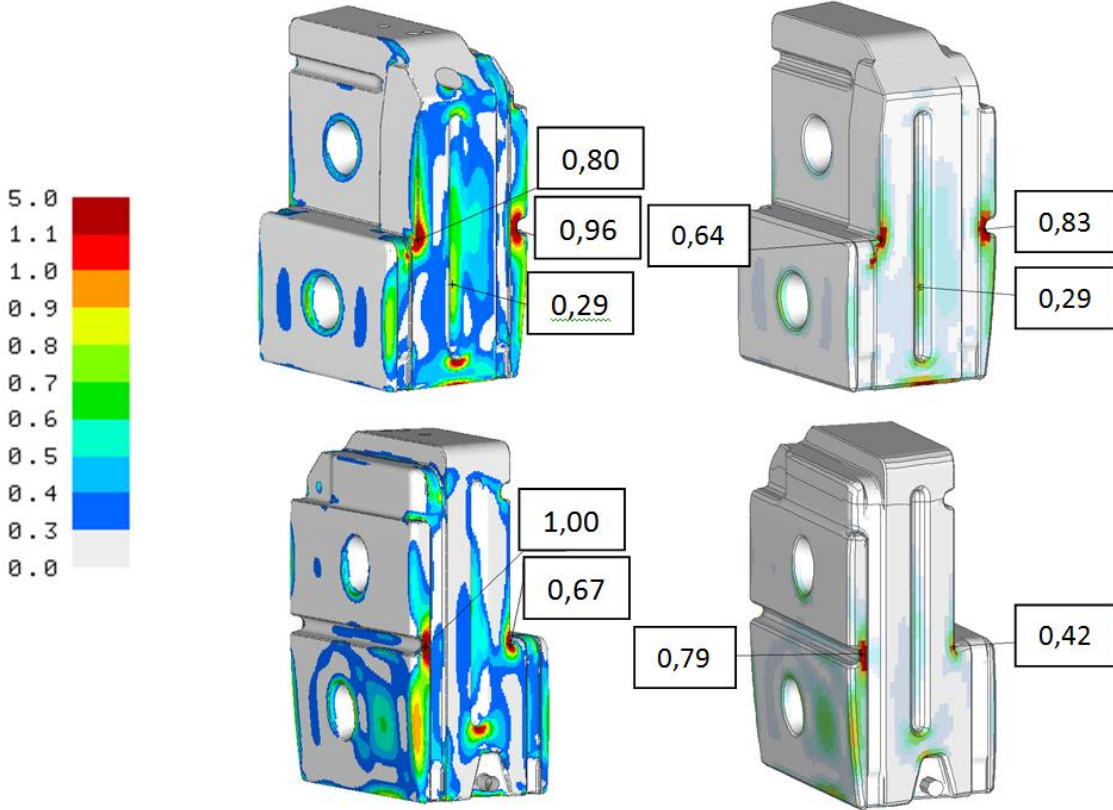
Sırası ile birinci ve ikinci kırık bölgeleri Şekil 4’te gösterilmektedir. Statik ve dinamik analizlerin sonuçları kendi içlerinde karşılaştırılması yanında sarsma tablası sonuçları ile de uyumlu olmasına dikkat edilecektir.

Statik ve Dinamik Analiz Sonuçları

İki farklı metodoloji ile çözdürülen yakıt tankı yapısına ait maksimum von Mises eş değer gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde görülebilir. İlk sütun statik sonuçlar, ikinci sütun ise dinamik analiz sonuçlarına ayrılmıştır. Değerler şirket içi gizlilik sebebiyle maksimum

gerilme “1” olacak şekilde ölçeklendirilerek verilmiştir. Şekil 5, 7 mm kalınlığa sahip tankın sonuçlarını, Şekil 6 ise 9 mm cidar kalınlığındaki tankın sonuçlarını kapsamaktadır. Şekillerde gösterilen tanklar tam dolu durumda analiz edilmiştir.

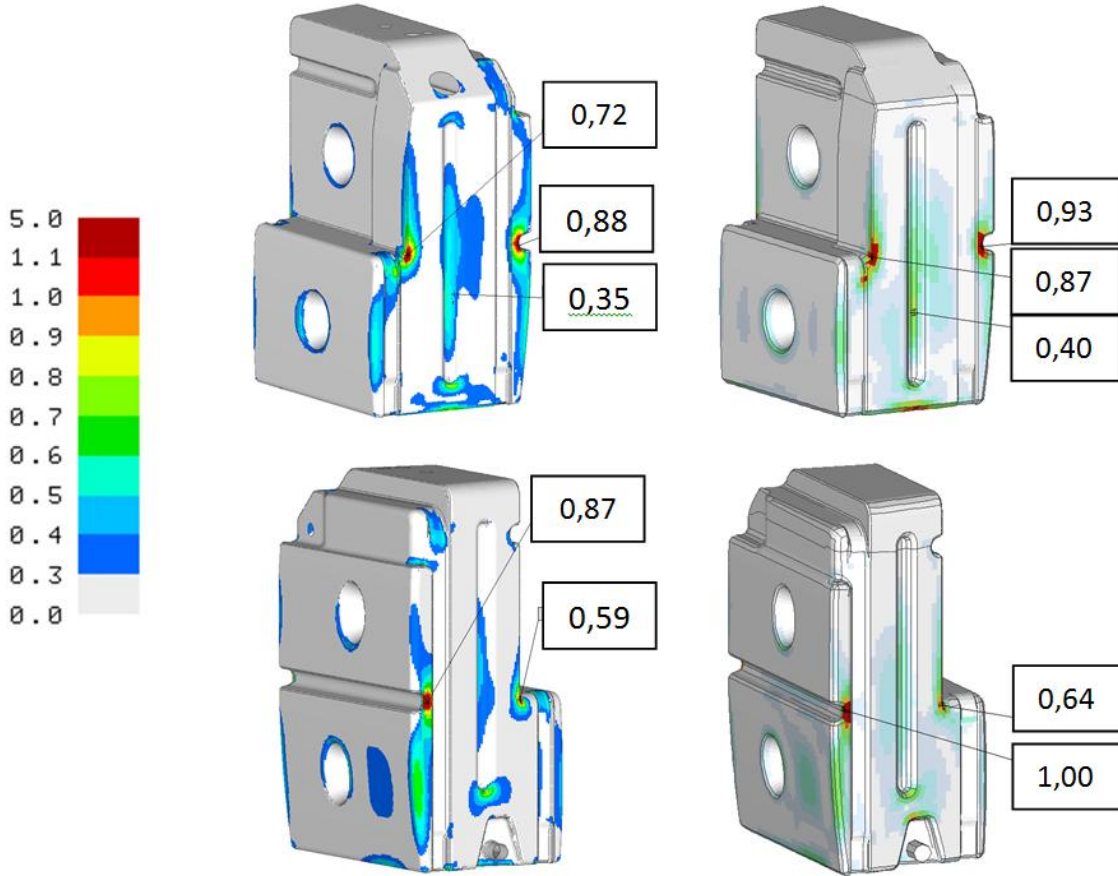
Belirtilmesi gerekir ki; statik analizler kapsamında çözdürölmüş olan 24 farklı yükleme koşulunun her hangi birinde elemanın gördüğü maksimum gerilme değeri sonuç olarak yansıtılmıştır. Bunun yanında dinamik analiz sonuçlarında ise zaman boyunca elde edilmiş olan maksimum gerilme gösterilmektedir.



Şekil 5: 7 mm cidar kalınlığına sahip tank üzerinde maksimum von Mises gerilmeleri dağılımı

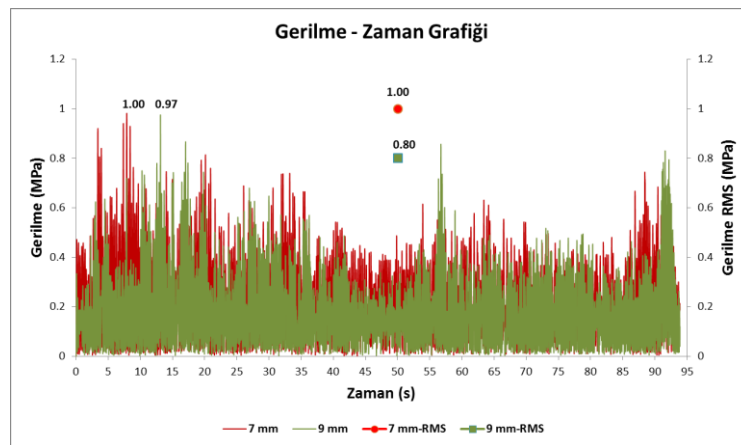
Şekil 5’te göröldüğü üzere 7 mm kalınlığa sahip tam dolu yakıt tankı için iki analiz metodolojisinde de maksimum gerilme bölgeleri ve büyüklükleri benzerlik göstermektedir. Özellikle birinci kırık bölgesinde ortaya çıkan 0,29 birimlik gerilme değeri iki metot için de aynıdır.

İki analiz metodunda da tankın gerilme yığılması ortaya çıkabilecek köşe bölgelerinde sarsma tablası testlerinde görölmeyen gerçek dışı gerilme değeri elde edilmektedir. Bu bölgeler de üretim metodundan kaynaklı olarak malzeme yığılmaları yaşandığı bilinmektedir. Bu sebeple bu bölgelerde değerlendirme sadece karşılaştırma amacıyla yapılmaktadır.



Şekil 6: 9 mm cidar kalınlığına sahip tank üzerinde maksimum von Mises gerilmeleri dağılımı

Belirtildiği gibi tüm bu çalışmalar Bilimi Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı destekli SAN-TEZ projesi kapsamında yapılmıştır. Bu projede kırık bölgelerinin ortadan kaldırılması amaçlardan biridir. Bu sebeple tank cidar kalınlığı öncelikle 9 mm'ye çıkarılmıştır. 9 mm'ye çıkarılan kalınlıkla beraber maksimum von Mises gerilmelerinde az bir düşme gözlemlenmiştir. Şekil 7'de birinci kırık bölgesinde zamana bağlı gerilme ve RMS değerleri karşılaştırılmaktadır. von Mises RMS değeri için %20 mertebelerinde bir düşme dikkat çekmektedir. Bu düşme tank yapısı üzerine gelen dinamik etkilerin azaldığını gösterir. 9 mm kalınlığa sahip tankta da 7 mm'lik tanka paralel olarak gerilme bölgeleri ve mertebeleri benzerdir.



Şekil 7: Birinci kırık bölgesindeki zamana bağlı gerilme ve RMS dağılımı

Tablo 3. Statik ve dinamik analiz sonuçları

Cidar Kalınlığı	Doluluk Oranı	Statik Analiz Sonuçları		Dinamik Analiz Sonuçları			
		1. Kırık Bölgesi	2. Kırık Bölgesi	1. Kırık Bölgesi	2. Kırık Bölgesi	1. Kırık Bölgesi	2. Kırık Bölgesi
		Maksimum von Mises Gerilmeleri	Maksimum von Mises Gerilmeleri	Maksimum von Mises Gerilmeleri	Maksimum von Mises Gerilmeleri	RMS	RMS
7 mm	100%	0.29	1.00	0.29	0.80	0.365	1.000
	75%	0.20	0.64	0.29	0.68	0.294	0.636
	50%	0.11	0.15	0.17	0.15	0.163	0.167
	25%	0.15	0.03	0.01	0.02	0.011	0.015
9 mm	100%	0.26	0.64	0.29	0.73	0.293	0.819
	75%	0.14	0.40	0.19	0.33	0.190	0.410
	50%	0.08	0.20	0.11	0.11	0.095	0.104
	25%	0.03	0.11	0.01	0.01	0.009	0.009

Farklı cidar kalınlığına ve doluluk oranlarına göre normalize edilmiş maksimum von Mises gerilme değerleri ve bunlara ait RMS sonuçları Tablo 3'te paylaşılmıştır. 7 mm ve 9 mm kalınlığa sahip tanklarda tam dolu durumda birinci kırık bölgesinde yaklaşık olarak aynı gerilmeler görülmektedir. Doluluk oranı azaldıkça hata oranları da artar. İkinci kırık bölgesinde de benzer şekilde değer olarak maksimum gerilmenin görüldüğü bölgeler kırık bölgeleridir ve maksimum %20 hata ile gerilme değerleri uyuşmaktadır.

Gerilme RMS değerleri sadece dinamik analizler sonucunda elde edilebilmektedir. Kendi içinde normalize edilmiş bu değerler ise kalınlık arttıkça dinamik etkilerin tank üzerinde azaldığını göstermektedir.

SONUÇLAR

Gerçekleştirilen statik ve dinamik analizler neticesinde görülen maksimum gerilme değerleri merteye ve bölge olarak benzerlik göstermektedir. Bunun yanında iki metodunda da kendi içerisinde güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Statik metodoloji ile çözüme çok hızlı ulaşılabilmektedir. Şirket içi geliştirilmiş bir kod yardımıyla doluluk oranı, tank geometrisi ve maksimum ivme değerleri göz önüne alınarak analiz girdi dosyası hızlı bir şekilde oluşturulabilmektedir. Analiz süreleri de dinamik analizle karşılaştırıldığında bir hayli düşüktür. Ancak metodoloji dinamik etkileri göz ardı etmektedir. Bu sebeple geliştirilen dinamik analiz metodu ile sarsma tablası testleri birebir simüle edilebilmektedir. Uzun bir modelleme ve çözüm süresi isteyen bu metod ile tanka ait mod şekilleri ve von Mises RMS sonuçları elde edilebilirken, dinamik etkilerin ne kadar baskın olduğunun anlaşılması bakımından önemlidir. Bunun yanında dinamik analiz sonucunda elde edilen modal gerilmeler ve katılım faktörleri ile de yorulma analizi yapılmasına izin vermektedir. Yapılan yorulma analizleri kırık bölgeleri çok daha belirgin bir şekilde göstermesi anlamında önemli bir çıktı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu bildiride ayrıntılarıyla anlatılması planlanan çalışmalar, Bilimi Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen, İstanbul Teknik Üniversitesi ile Mercedes-Benz Türk

A.Ş.'nin ortak yürüttüğü 0488-STZ-2013-2 kodlu SANTEZ projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] K. Liehr, Plastic fuel tanks in the federal republic of Germany and in Europe, *SAE Technical Paper* 880686, 1988, doi: 10.4271/880686.
- [2] Y. Kurihara, K. Nakazawa, K. Ohashi, S. Momoo, K. Numazaki, Development of multi-layer plastic fuel tanks for Nissan research vehicle-II, *SAE Technical Paper* 870304, 1987, doi: 10.4271/870304.
- [3] O. Pisciolaro, F.H. Comparini, Development of high capacity plastic fuel tanks for trucks, *SAE Technical Paper* 921513, 1992, doi: 10.4271/921513.
- [4] R.D. Stephens, R.L. Williams, G.A. Keoleian, S. Spatari, R. Beal, Comparative life cycle assesment of plastic and steel vehicle fuel tanks, *SAE Technical Paper* 982224, 1998, doi: 10.4271/982224.
- [5] O.R. Jaiswal, S. Kulkarni, P. Pathak, A study on sloshing frequencies of fluid-tank system: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- [6] Ansys Guide, *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*, Chapter 8.
- [7] X.L.J. Seykens, L.M.T. Somers, R.S.G. Baert, Modelling of common rail fuel injection system and influence of fluid properties on injection process: *Proceedings of VAFSEP2004*, Dublin, İrlanda, 2004.