

KATI BARIYERE ÖNDEN ÇARPAN BİR 2010 MODEL BİNEK ARACIN SONLU ELEMAN MODELİNİN DOĞRULANMASI

Selçuk HİMMETOĞLU^{1, a)} ve Aras Deniz EMEKSİZ^{1, b)}

¹Hacettepe Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Beytepe 06800, ANKARA

^{a)}s.himmetoglu@hacettepe.edu.tr, ^{b)}emeksiz27@gmail.com

George Washington Üniversitesine bağlı Ulusal Çarpışma Analizi Merkezi, tersine mühendislik kullanarak bazı araçların sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Bu modellere erişim açıktır ve araştırmacılar bunları çarpışma güvenliği analizlerinde kullanabilirler. Bu merkez tarafından oluşturulmuş 2010 model bir binek aracın sonlu elemanlar modeli gerçek çarpışma test verileri kullanılarak bu bildiride doğrulanmıştır. Doğrulama işlemi, katı bariyere 40 km/saat ve 56 km/saat ile önden çarpma senaryosunu içermektedir. Modelin daha önce yapılan doğrulamasındaki eksiklikler bu bildiride giderilmiş ve daha kapsamlı bir doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde aracın bagaj zemini, fren kaliperi, motor, arka koltuk ve ön eşiğinin yatay ve dikey yönde ivme, hız ve deplasman analizleri yapılmıştır. Aracın deformasyonu ve bariyer kuvvetleri de hesaplanmıştır. Model ile çarpışma test verileri arasında bazı farklılıklar olsa bile bu sonlu eleman modelinin araç güvenliği tasarımlarında kullanılması uygun görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma testi, sonlu eleman modeli, doğrulama, önden çarpma

VALIDATION OF THE FINITE ELEMENT MODEL OF A 2010 MODEL PASSENGER CAR IN RIGID BARRIER FRONTAL IMPACTS

ABSTRACT

National Crash Analysis Center of the George Washington University constructed finite element (FE) models of a number of cars through reverse engineering which are open source and can be used by researchers for crash safety analysis. In this paper, one of these car models, a 2010 model passenger car model is validated against crash test data in full width rigid barrier frontal impacts at 40 km/h and 56 km/h impact speeds. Previous attempts to validate this model were incomplete therefore this study presents a comprehensive evaluation of the fidelity of the model. The validation process includes the accelerations, velocities and displacements of the trunk floor centre, brake calipers, engine, rear seats and front sill in the longitudinal and vertical directions. The deformation of the car and the variation of the barrier force were also calculated. The results reveal that although there are some differences in the responses of the model and test results, the finite element model of the car can be used to develop vehicle safety designs.

Keywords: Crash test, finite element model, validation, frontal impact

1. GİRİŞ

George Washington Üniversitesine bağlı Ulusal Çarpışma Analizi Merkezi, tersine mühendislik kullanarak yaklaşık 10 adet aracın sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Bu modeller, Amerika Birleşik Devletleri'nin Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği Yönetimi [1] kurumunun internet sayfasında açık kaynak olarak bulunmaktadır. Bu modellerin

kullanılmadan önce doğrulanması gerekmektedir. Ulusal Çarpışma Analizi Merkezi bu modellerin doğrulamasını Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği Yönetimi'nin internet sayfasındaki çarpışma testleri veritabanını [1] kullanarak yapmıştır. Bu bildiride 2010 model Toyota Yaris aracının sonlu modelinin katı bariyere önden çarpma senaryosu incelenmiş ve doğrulama işlemleri

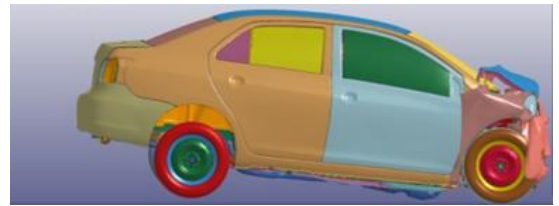
yapılmıştır. Ulusal Çarpışma Analizi Merkezi, bu aracın katı bariyere önden çarpma testinin doğrulanmasını daha önceden yapmış [2] olmasına rağmen bütün verilerin kullanılmaması nedeni ile daha kapsamlı bir analiz yapılması gerektiği düşünülmüştür. Katı bariyere 56 km/saat ile önden çarpma senaryosunun doğrulanmasında [2], sağ/sol arka koltukların yatay yönde (x) ivmeleri, motorun üst ve alt kısımlarının yatay yönde (x) ivmeleri, bariyer kuvveti ve araç deformasyonu incelenmiştir. Katı bariyere 40 km/saat ile önden çarpma senaryosunun doğrulanmasında [2], sağ/sol arka koltukların yatay yönde (x) ivmeleri, bariyer kuvveti ve araç deformasyonu incelenmiştir. Bu bildiriye ek olarak aracın bagaj zemini, fren kaliperi, motor, arka koltuk ve ön eşiğinin yatay ve dikey yönde ivme, hız ve deplasman analizleri yapılmıştır. Ayrıca aracın deformasyonu 3 farklı yöntemle hesaplanmıştır. Bu bildirinin sonuçlarına göre model ile çarpışma test verileri arasında bazı yerlerde küçük olmayan farklılıklar görülmüştür ama bu durum modelin araç güvenliği simülasyonlarında kullanımına engel değildir.

Katı bariyere önden çarpma testlerinde aracın önünün tamamı yük hücreleri ile donatılmış dik bir duvara (bariyere) çarpar. Bu testlerde aracın ön kısmındaki yapısal elemanların hepsi deformasyona uğradığı için aracın üzerindeki duvar yükü fazla olur ve böylelikle aracın ivmesi yüksek düzeyde olur. Bu tür testte yolcunun yüksek ivmelere karşı nasıl korunduğu incelenir. Burada önemli olan emniyet kemerinin ve hava yastıklarının bu yüksek ivmelere karşı yolcuyu ne ölçüde koruduğudur. Yolcu hareketini kısıtlayan ve enerjiyi emen emniyet kemeri ve hava yastığı tasarımlarının optimizasyonları için katı bariyere çarpma testleri önemlidir.

2. TEST VERİSİNİN İŞLENMESİ

2010 model Toyota Yaris aracının katı bariyere önden çarpma testi Şekil 1'de gösterilmiştir. Gerçek test ve model verilerinin analizinde yere sabitlenmiş ataletsel eksen takımı kullanılmıştır. Bu eksen takımının x eksenine göre yataydır ve aracın çarpışma öncesi duvara doğru ilerlediği yöndedir. Bu eksen takımının z eksenine ise yere dik ve yukarıya doğrudur. İvmeler ataletsel eksen takımına göre dir.

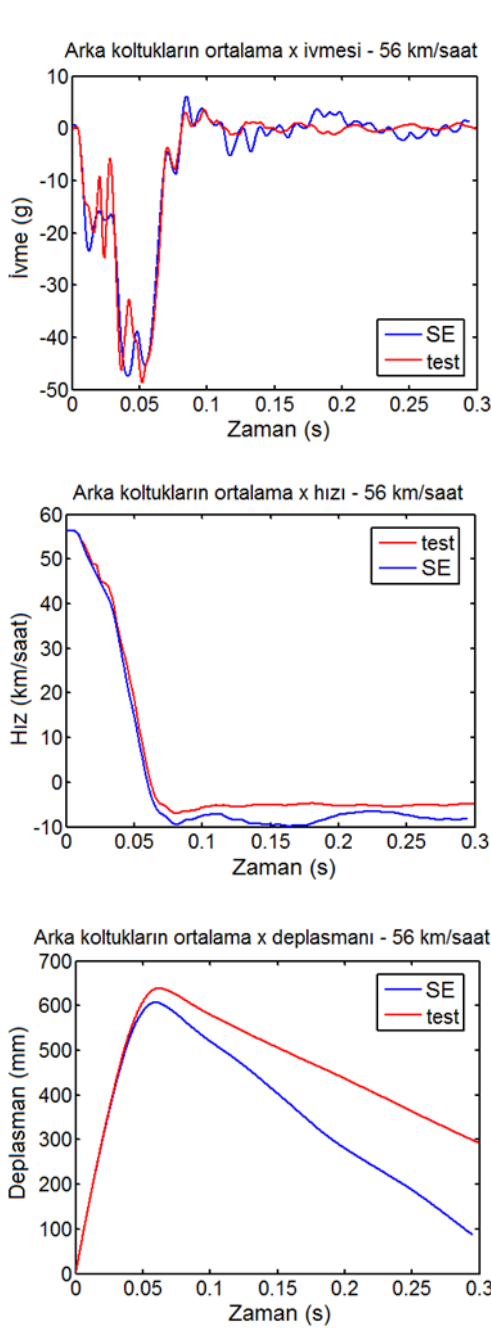
Katı bariyerden araca etkiyen toplam kuvvet, yük hücrelerinde ölçülen kuvvetlerin toplanmasıyla elde edilmiştir. Yük hücrelerindeki kuvvetler ilk önce Otomotiv Mühendisleri Derneği'nin SAE J211-1 filtresinden geçirilmiştir [3]. Yük hücrelerindeki kuvvetlerin filtrelenmesinde CFC60 tipi 100 Hz'lik kesim frekansına sahip filtre kullanılmıştır. Araca takılan ivme ölçerlerin verileri de gene SAE J211-1 standardına uygun olarak CFC60 tipi 100 Hz'lik kesim frekansı kullanılarak filtrelenmiştir. İvme verilerinin integrallerini alıp hız ve deplasman verilerine ulaşmak için ivme ölçer verileri ilk önce SAE J211-1 standardına uygun olarak CFC180 tipi 300 Hz'lik kesim frekansı kullanılarak filtrelenmiştir. İvme verisi filtrelendikten sonra yamuk kuralı uygulanarak hız ve zaman verileri elde edilmiştir. İvme ölçer ve yük hücresi verilerine ait zaman aralığı (adım büyüklüğü) 0.1 ms'den yüksek değildir. Çarpışma başladığında zaman sıfırdır. Gerçek çarpışma testinde kullanılan sensörlerin (ivme ölçer ve yük hücresi) bazıları bozulduğu için bunların verileri kullanılmamıştır.



Şekil 1. Çarpışma testi ve sonlu eleman modeli [1]

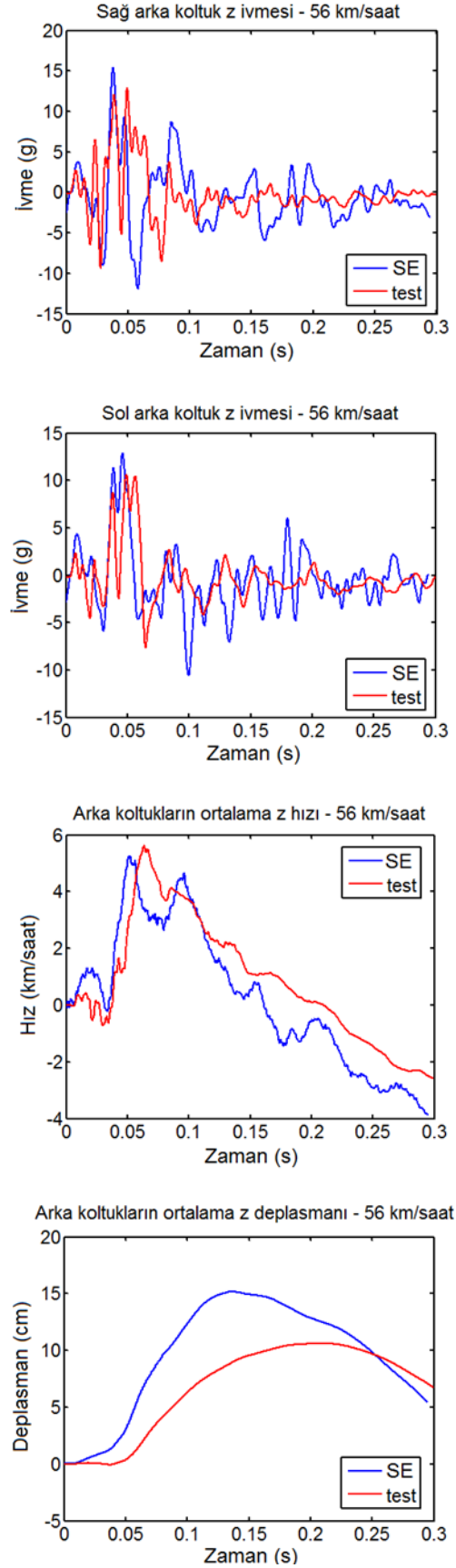
3. 56 KM/SAAT ÇARPIŞMA TESTİ

Katı bariyere önden 56 km/saat ile çarpma senaryosunda gerçek test ile sonlu eleman modeli (SE) verileri Şekil 2-7'de karşılaştırılmıştır. Sağ ve sol arka koltukların altında simetrik olarak bulunan ivme ölçerlerin verilerinin ortalaması alınarak Şekil 2'deki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2, aynı zamanda aracın deformasyona uğramayan kabininin yatay yönde yere göre ivmesini, hızını ve deplasmanını göstermektedir.



Şekil 2. Arka koltuk sonlu eleman ve test verileri x yönü

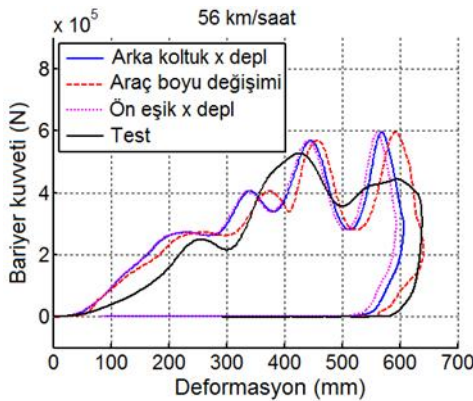
Aracın arka koltuklarının x deplasmanı aynı zamanda aracın önünün deformasyonuna da gösterir (aracın duvardan teması kestiği ana kadarki süre içerisinde geçerlidir). SE modeli ve testteki arka koltuk ivmeleri birbirine yakındır ancak hız ve deplasman verilerinde farklılıklar ortaya çıkmıştır. SE modelinde araç duvardan daha hızlı bir şekilde geri sekmiştir, böylelikle 0.3 s sonunda geriye daha çok gitmiştir. Gerçek testte araç daha fazla deformasyona uğramıştır (4 cm kadar).



Şekil 3. Arka koltuk sonlu eleman ve test verileri z yönü

Şekil 3'de arka koltukların z yönündeki ivme, hız ve deplasman verileri gösterilmiştir. Arka koltuk ivme değişimleri uyumludur ancak SE modelinde titreşimlerin genliği daha büyüktür. Şekil 1'de de görüldüğü üzere, SE modelinde aracın arkası daha çok yükselmiştir.

Şekil 4'de bariyerden araca etkiyen toplam kuvvetin aracın önünün deformasyonuna göre grafiği verilmiştir. Bariyer kuvveti deformasyon grafiği aracın katılığını veya direncini belirlemek için kullanılabilir [4]. Şekil 4'de görüldüğü üzere, gerçek teste aracın deformasyonu, her iki arka koltuğun altındaki iki noktanın ortalama x deplasmanı kullanılarak elde edilmiştir. SE modelinde ise deformasyon 3 farklı şekilde elde edilmiştir. İlk önce testteki gibi arka koltuk x deplasmanı kullanılmıştır. SE modelinde ayrıca aracın ön ve arka tamponlarından birer düğüm noktası seçilerek bu iki nokta arasındaki mesafenin değişimi aracın boyunun değişimi ve aracın deformasyonu olarak ölçülmüştür. Günümüzde araçların kapı eşikleri yolcu kabininin bütünlüğünü korumak için çok kuvvetli olarak tasarlanmıştır. SE modelinde aracın deformasyona uğramamış ön kapı eşiği üzerinde alınan bir düğüm noktasının x deplasmanı hesaplanmış ve bariyer kuvvetine göre değişimi sunulmuştur. SE modelindeki araç boyu değişimi testteki deformasyonu çok iyi vermektedir. İlk 500 mm'deki bariyer kuvveti değişimleri test ile model arasında uyumludur ancak 500 mm'den sonra bariyer kuvvetleri SE modelinde daha yüksek çıkmıştır. İlk 200 mm'de SE modelinin gerçek araca göre direnci daha fazla çıkmıştır.

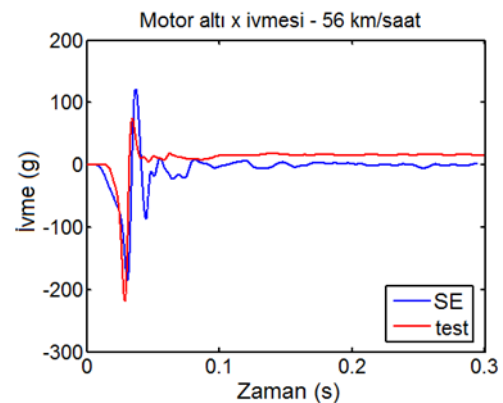
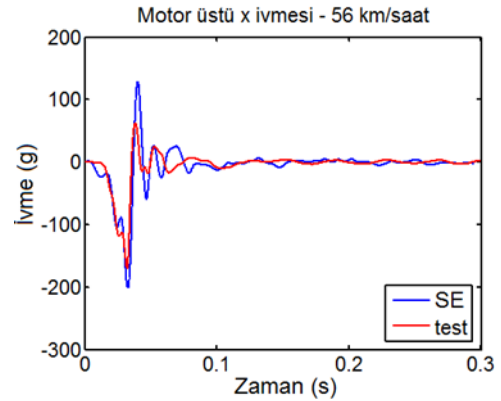


Şekil 4. Bariyer kuvveti ile deformasyon ilişkisi

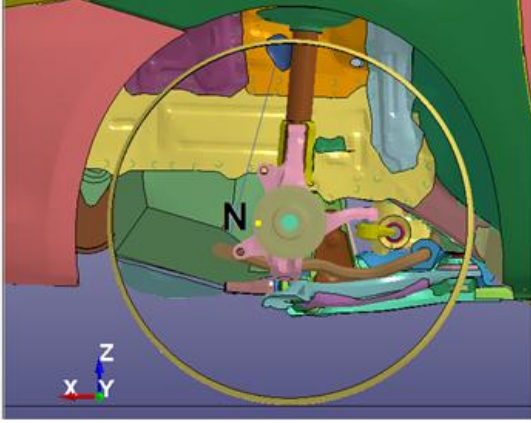
Motorun üst ve alt kısmında belirlenen noktaların x yönündeki ivmeleri Şekil 5'de

verilmiştir. İvmelerin tepe noktalarının zamanlaması modelde iyi bir şekilde yakalanmıştır. Tepe noktalarının ivme değerlerinde 50 g'lik sapmalar meydana gelmiştir. Çarpışma testlerine ait raporlarda ivme ölçerlerin koordinatları verilmiştir ve SE modelinde aynı koordinatlar üzerinden ölçümler yapılmıştır.

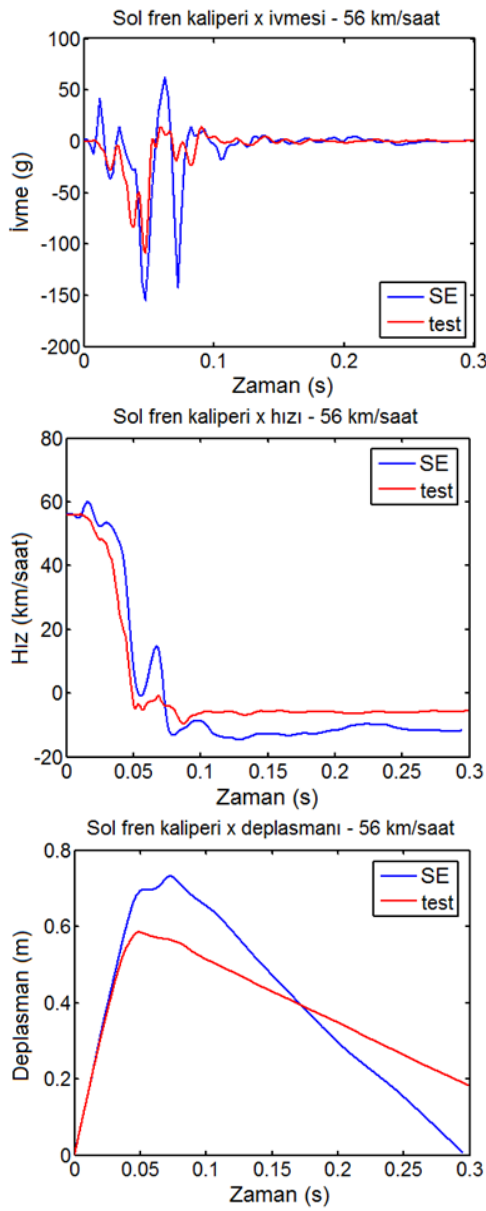
Fren kaliperi aracın fren yapmasını sağlayan balataları içeren mekanizmadır ve Şekil 6'da gösterilmiştir. SE modelinde fren kaliperi üzerinde ölçümleri alınan düğüm noktası sarı renkle ve N harfiyle gösterilmiştir. Şekil 7'de sol fren kaliperi üzerindeki noktanın x yönündeki ivme, hız ve deplasman grafikleri verilmiştir. Fren kaliperi ivmelerinde modelde daha yüksek genlikte titreşimler oluşmuştur. Sol fren kaliperindeki deformasyonlar teste göre daha fazla çıkmıştır (10 cm'e kadar). Fren kaliperi hareketi karmaşıktır çünkü motorun deplasmanından, aracın ve süspansiyon sisteminin deformasyonlarından etkilenmektedir; bu yüzden bu noktanın hareketini doğrulamak kolay değildir.



Şekil 5. Motor ivmeleri x yönü



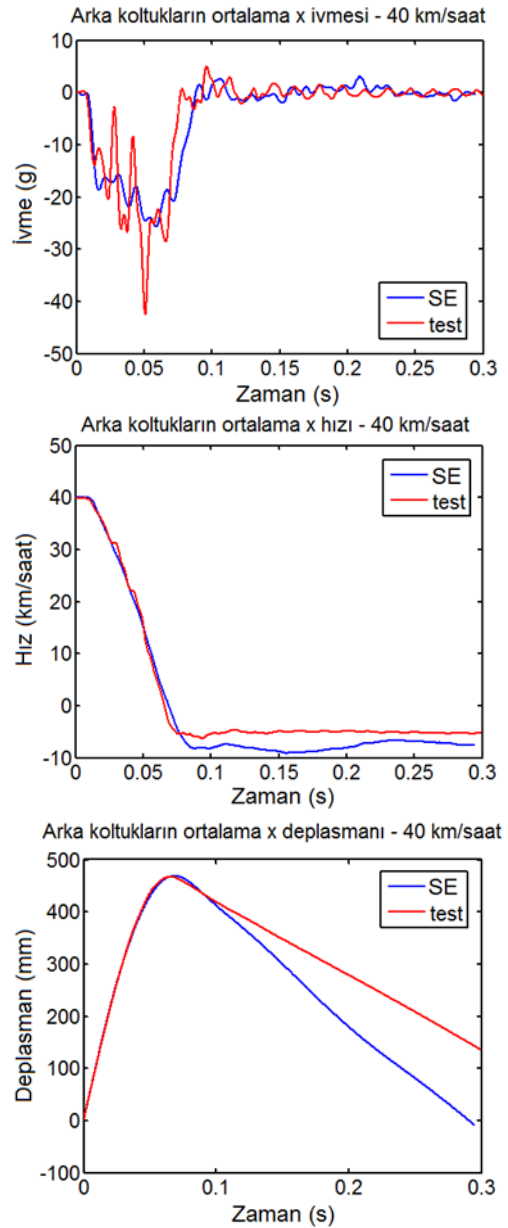
Şekil 6. Sol fren kaliperi düğüm noktası



Şekil 7. Sol fren kaliperi verileri

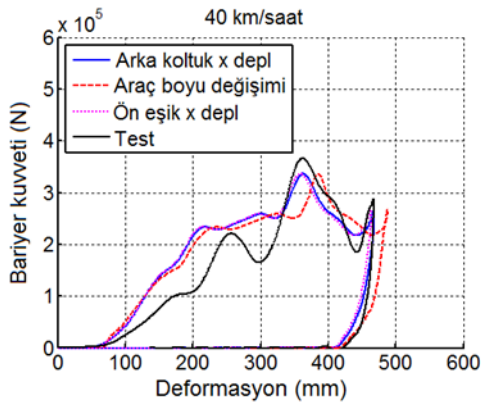
4. 40 KM/SAAT ÇARPIŞMA TESTİ

Katı bariyere önden 40 km/saat ile çarpma senaryosunda gerçek test ile sonlu eleman modeli (SE) verileri Şekil 8-13'de karşılaştırılmıştır. Arka koltukların altındaki iki noktanın ortalama hareketi Şekil 8'de verilmiştir. İvme test verisinde 50 ms'da keskin bir tepe görülmüştür; bu araçtaki elemanlarda görece daha sert bir yapının ezilmesi sırasında oluşmuştur. Test ivme verilerinde modele göre daha yüksek genlikte titreşimler oluşmuştur. SE modeli araca göre duvardan daha hızlı geriye sekmıştır ancak araçların maksimum deformasyonları hem model hem de test verisinde aynı çıkmıştır.

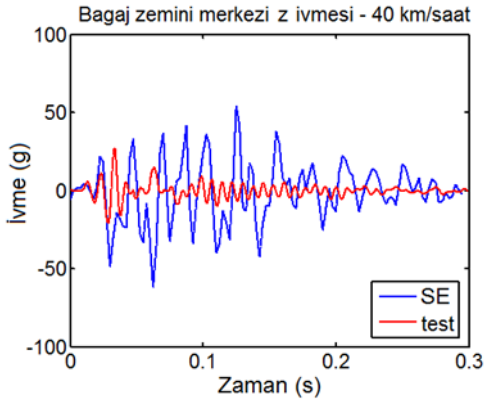


Şekil 8. Arka koltuk sonlu eleman ve test verileri x yönü

Şekil 9'daki bariyer kuvveti deformasyon ilişkisinde model ve test verileri 56 km/saat'e göre daha uyumludur. İlk 300 mm'de model direnci daha fazla çıkmıştır. Şekil 10'da bagaj zemininin z yönündeki ivmesi karşılaştırılmıştır. SE modelinde çok daha yüksek genlikte titreşimler ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni ise şudur. Gerçek testin aksine SE modeli simülasyonunda aracın bagajında sensörleri, kameraları çalıştırmak ve araca acil fren yaptırmak için gereken güç ünitesi yoktur. Ayrıca simülasyonda test mankenleri de yoktur. SE modelindeki bu eksik ağırlıklar yüksek genlikteki ivmeleri oluşturmuştur.



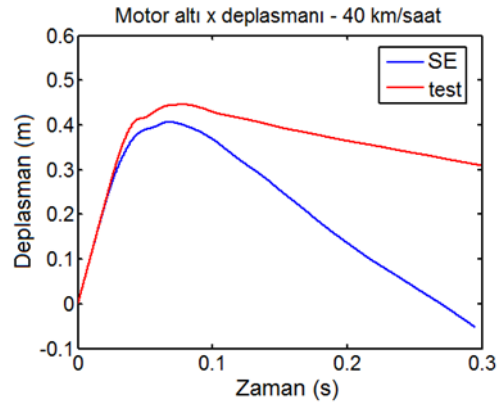
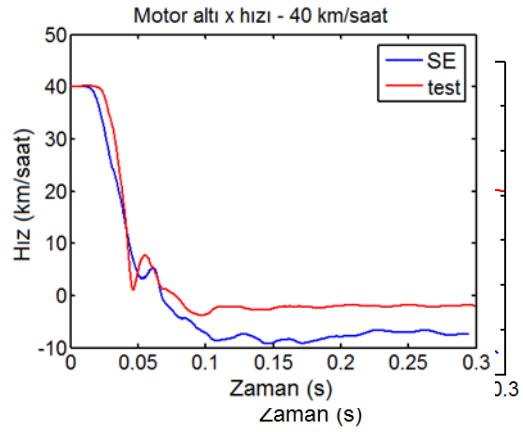
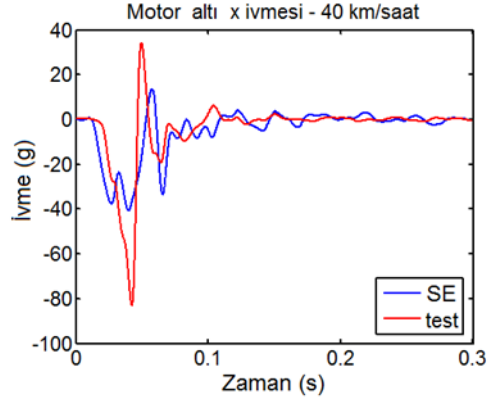
Şekil 9. Bariyer kuvveti ile deformasyon ilişkisi



Şekil 10. Bagaj zemini ivmesi z yönü

Motor altındaki noktanın x yönündeki hareketi Şekil 11'de verilmiştir. Testte modele göre daha yüksek ivmeler çıkmıştır. 50 ms civarında motor, bariyerin önünde ezilerek sıkışmış elemanlara temas ettikten sonra araca göre geriye gitmiştir. Bu geriye gidiş testte daha fazladır. Bu geriye gidiş durduktan sonra motor araçla birlikte hareket eder, aracın önü maksimum deformasyona uğrar ve araç motorla birlikte duvardan geri seker. SE modelinde

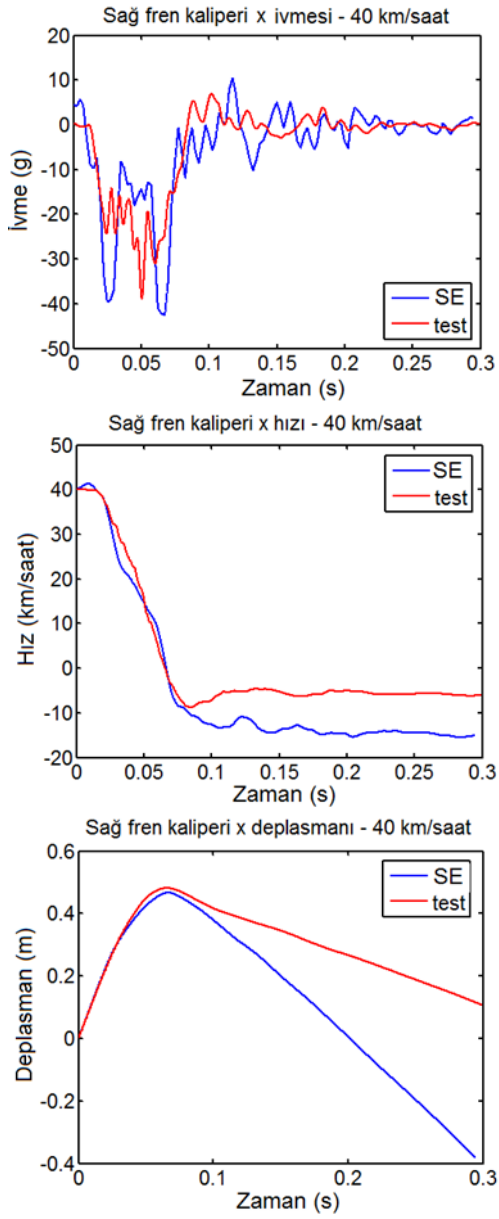
motorun araçla birlikte duvardan geri sekme hızı daha fazladır. Testte motor 100 ms'e kadar yere göre daha çok geriye gitmiştir ancak duvardan sekme başladıktan sonra yere göre geriye daha az gitmiştir.



Şekil 11. Motor altı hareketi x yönü

Şekil 12 ve 13'de sağ ve sol fren kaliperlerinin hareketleri verilmiştir. Kaliperlerin x yönündeki ivmelerinde tepe noktalarının büyüklüğü ve zamanlaması açısından SE modeli ve test arasında önemli farklar vardır. Her iki kaliperin duvardan sekme hızı ve duvardan geriye doğru yer değiştirmeleri sonlu elemen modelinde daha fazladır. Aracın maksimum deformasyona ulaştığı anda sağ fren kaliperinin deformasyonu

model ve testte aynıdır ancak sol kaliperin sonlu eleman modelinde deformasyonu daha fazla çıkmıştır.

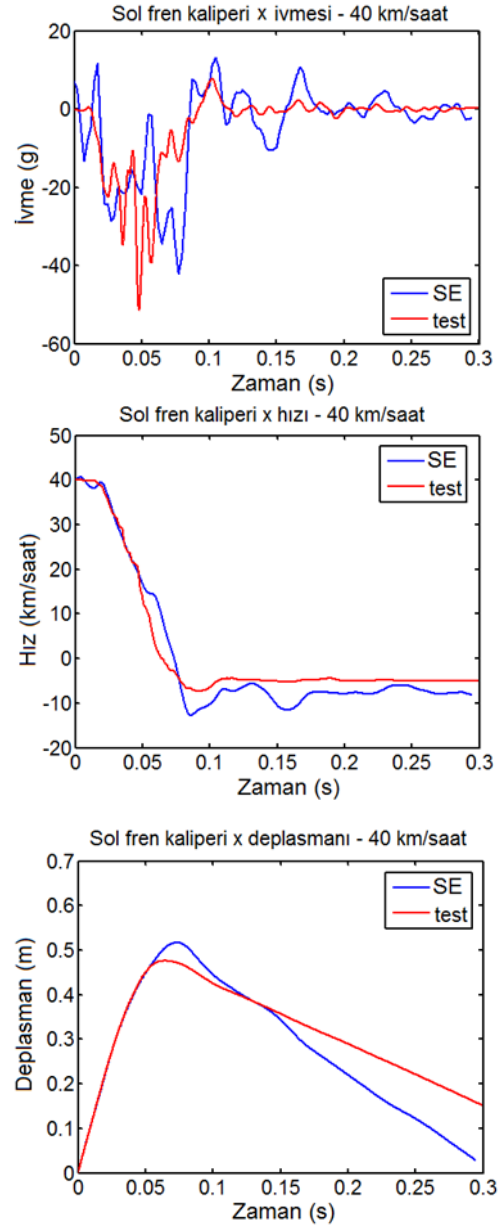


Şekil 12. Sağ fren kaliperi verileri

5. SONUÇLAR

Bu bildiriye 2010 model Toyota Yaris aracının sonlu eleman modelinin katı bariyere önden çarpma testindeki davranışının doğrulanması yapılmıştır. Aracın sonlu eleman modeli, George Washington Üniversitesine bağlı Ulusal Çarpışma Analizi Merkezi tarafından tersine mühendislik kullanarak LS-Dyna programında oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinin davranışı LS-PrePost programı kullanılarak analiz edilmiştir ve gerçek test verileriyle karşılaştırılmıştır.

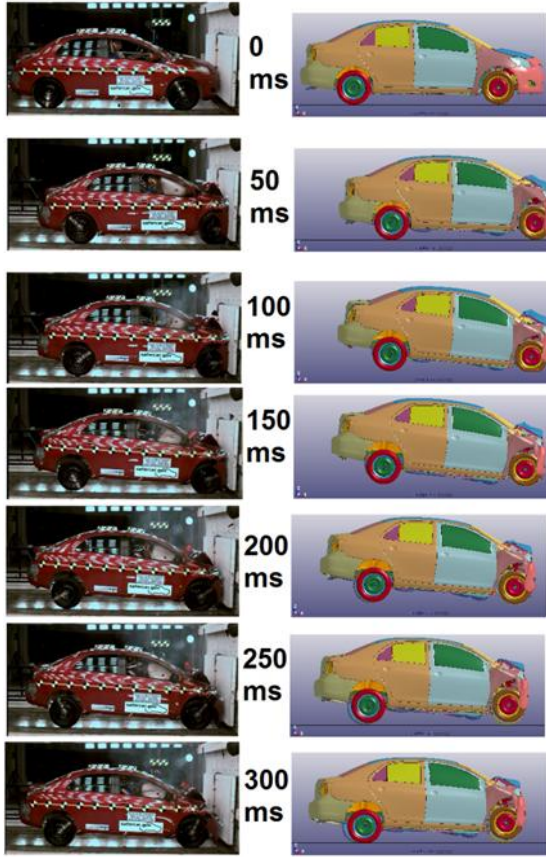
Önden katı bariyere çarpma test verileri sınırlı sayıda. Buna rağmen olabilecek bütün test verileri kullanılarak sonlu eleman modeli verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu açıdan bakıldığında bu bildiriye sunulan çalışma basılı literatürdeki en kapsamlı çalışmadır ve daha önce yapılan doğrulama çalışmalarına katkıda bulunmaktadır.



Şekil 13. Sol fren kaliperi verileri

Sunulan grafiklerde ve Şekil 14'deki resimlere bakıldığında sonlu eleman modelinde aracın arkası daha çok yükselmekte ve çarpışma etkisiyle daha çok dönmektedir. Sonlu eleman modeli duvardan (bariyerden) daha çok ve daha hızlı sekmektedir. Aracın önünün ezilmesi gerçek testte daha çok olmaktadır. Sonlu

eleman modelinde bariyer kuvvetleri genelde daha yüksek çıkmaktadır. Modellerin doğrulanmasında ivmeleri tutturmak kolay değildir [5-7], bu durum hız ve deplasman grafiklerine de yansımıştır. Çalışmanın bir sonraki safhasında Sprague-Geers MPC ve ANOVA metrikleri [2] de kullanılarak modelin değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu bildiri açık erişime sahip bu 2010 model Toyota Yaris modelini kullanmak isteyenler için bir el kitabı niteliğindedir. Model ile çarpışma test verileri arasında bazı yerlerde küçük olmayan farklılıklar görülmüştür ama bu durum modelin araç güvenliği simülasyonlarında kullanımına engel değerildir.



Şekil 14. Test ile sonlu eleman modeli davranışı - 56 km/saat

6. KAYNAKLAR

[1] www.nhtsa.gov. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Erişim: 12 Temmuz 2025.

[2] Marzougui, D., Samaha, R.R., Cui, C., Kan, C.-D. (2012). Working Paper NCAC 2012-W-005. National Crash Analysis Center (NCAC), The George Washington University, Amerika Birleşik Devletleri.

[3] Society of Automotive Engineers (SAE). (2007). SAE J211-1 (1995): Instrumentation for Impact Test, Part 1, Electronic Instrumentation. Warrendale, PA, Amerika Birleşik Devletleri.

[4] Wiacek, C., Nagabhushana, V., Rockwell, T., Summers, S., Zhao, L. (2015). Evaluation of frontal crash stiffness measures from the U.S. new car assessment program, *Proceedings of 24th ESV Conference*, Göteborg, İsveç.

[5] Himmetoglu, S., Yilmaz, K.B., Yildirim, B., Tekin, A. (2018). Derivation of crush force versus deformation behaviour of vehicles at different impact speeds, *Proceedings of the 22nd International Scientific Conference Transport Means 2018*, Trakai, Litvanya, 49-56.

[6] Marzougui, D., Mohan, P., Kan, S., Nagabhushana, V. caravan-V07-readme.pdf. www.nhtsa.gov. National Crash Analysis Center (NCAC), The George Washington University, Amerika Birleşik Devletleri. Erişim: 30 Haziran 2018.

[7] Himmetoglu, S., Balci, T., Aydogan, M. (2020). Validation of a simple multi-body head-and-neck model for efficient rear impact simulations, *Proceedings of the 24th International Scientific Conference Transport Means 2020*, Kaunas, Litvanya, 273-2