TOPLU TAŞIMA ARAÇLARININ DEVRİLME GÜVENLİĞİ İÇİN ECE R66 REGÜLASYONUNU SAĞLAYABİLECEK SANAL MÜHENDİSLİK KABİLİYETİ GELİŞTİRİLMESİ

Özgün Küçük*, Sercan Sunar*, Mertcan Kaptanoğlu*

*HEXAGON STUDIO, KOCAELİ

ÖZET

Otobüs devrilme kazaları, önden ve yandan çarpma kazalarına nazaran diğer kaza türlerine göre en önemli kaza tipidir. Avrupa ülkelerinde, otobüslerin devrilme durumundaki deformasyon dayanımını sağlamaları ECE R66 regülasyonu ile zorunlu hale getirilmiştir. Regülasyonun belirttiği üzere, sertifikasyon hem araç bazında gerçek bir devrilme testiyle hem de ileri nümerik metotlara dayanan hesaplama teknikleri ile alınabilir (örn., doğrusal olmayan eksplisit dinamik sonlu elemanlar yöntemi). Bu makalede, aynı otobüs kesitinin deformasyon karakteristikleri fiziksel devrilme testi ile bilgisayar destekli devrilme simülasyonu arasında ECE R66 regülasyonuna göre korelasyon amaçlı karşılaştırılacaktır.

Anahtar kelimeler: ECE R66, Devrilme Güvenliği, Eksplisit Dinamik, SEM.

VIRTUAL ENGINEERING CAPABILITIES DEVELOPMENT TO ENSURE ECE R66 SAFETY REGULATION FOR ROLLOVER CRASHWORTHINESS OF PULIC TRANSPORT VEHICLES

ABSTRACT

Bus rollover is one of the most serious types of accident as compared to other modes of bus accidents. In the European countries, the certification of sufficient deformation strength when overturning is compulsory for the approval of a coach according to the ECE R66 regulation. According to the said regulation, the certification can be gained either by full-scale vehicle testing, or by calculation techniques based on advanced numerical methods (i.e. non-linear explicit dynamic finite element analysis). In this paper, same bus rollover sections will be compared between deformation characteristics of physical bus section rollover test and computational rollover simulation for correlation purposes according to ECE R66 regulation.

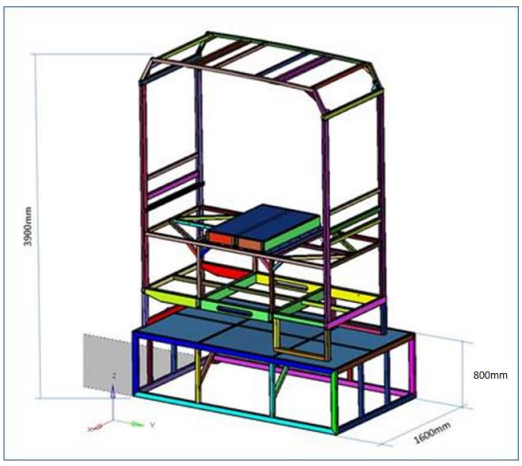
Keywords: ECE R66, Rollover Crashworthiness, Explicit dynamics, FEM.

1. GİRİŞ

Tubitak tarafından desteklenmiş "Toplu Taşıma Araçlarının Devrilme Kaynaklı Güvenliği İçin ECE R66 Regülasyonunu Sağlayabilecek Sanal Mühendislik Kabiliyeti Geliştirme" projesinde yapılan korelasyon çalışmasında kullanılmak üzere Hexagon Studio'nun daha önce tasarladığı bir otobüsün orta bölümünden bir kesit seçilmiştir. Bu kesit ile kontrollü bir devrilme testi gerçekleştirebilmek için özel sınır şartları belirlenmiştir. Belirlenen sınır şartlarını destekleyecek şekilde test fikstürü tasarlanmıştır. Test fikstürü, CATIA V5 yazılımı ile üç boyutlu parametrik çizim metodu kullanılarak tasarlanmıştır. Kesit ve fikstürün imalat teknik resimleri hazırlanmıştır.

2. TEST FİKSTÜRÜ VE DÜZENEĞİ

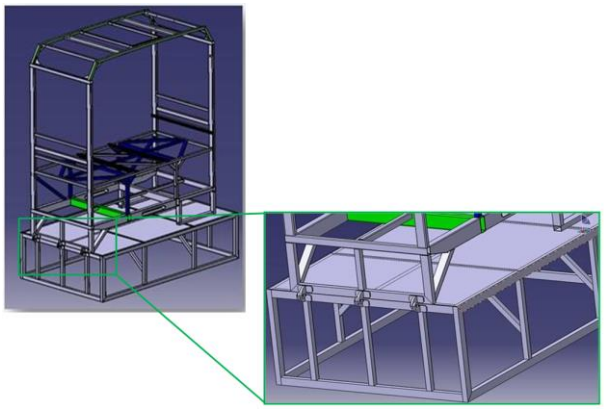
Araç kesitine, aracın tamamen imalatı tamamlanmış durumundaki ağırlık merkezi ve kütle dağılımı açısından üretilen aracı temsil etmesi için araç kesitinin merkezinin kesit izdüşümüne denk gelecek şeklide 600 kg ağırlık bağlanmıştır. Bu ağırlık aracın kesitteki ayak basma yüzeyine sabitlenmiştir. Kesitin genel ölçüleri ve eklenen ilave ağırlık Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Fikstürün ve otobüs kesitinin genel görünümü.

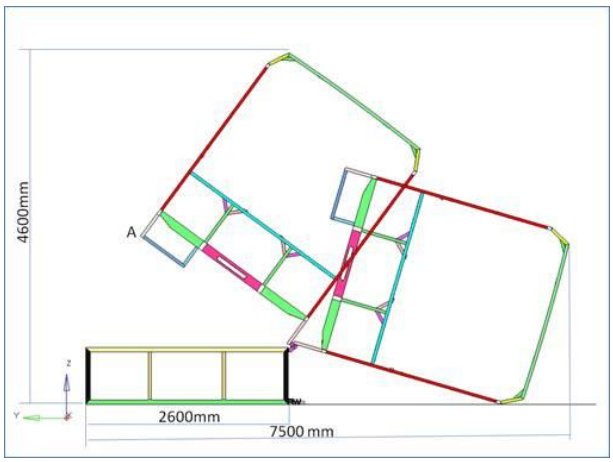
Şekil 2. Fikstürün ve otobüs kesitinin fotoğrafı.

Proje kapsamında yapılacak validasyon testinde kontrollü yer değiştirme verileri alabilmek için kesit ve fikstür menteşeler ile birleştirilmiştir. Devrilme testinde kesit, bu menteşeler üzerinden döndürülerek kontrollü bir düşme sağlanmış ve daha doğru yer değiştirme verileri toplanabilmiştir. Bu menteşe düzeneği Şekil 3'te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Test fikstüründeki menteşe düzeneği.

Gerçek devrilme testinde kesit, bir platform yardımıyla kararsız denge koşuluna gelene kadar yavaşça eğilir. Devrilme testi, kararsız denge koşulundan devrilme eksenine göre sıfır açısal hız ile başlar ve araç gövdesinin maksimum deformasyona uğradığı ana kadar devam eder. Devrilme testi platform zemine göre 800 mm yüksekte ve zemin ile paralel olacak şekilde konumlandırılır. Devrilme anında temasın yaşanacağı yüzey pürüzsüz bir beton yüzey olmalıdır. Otobüs kesitinin devrilmeye başladığı kararsız denge konumu ve aracın zemine ilk temas konum Şekil 4'te gösterilmektedir.

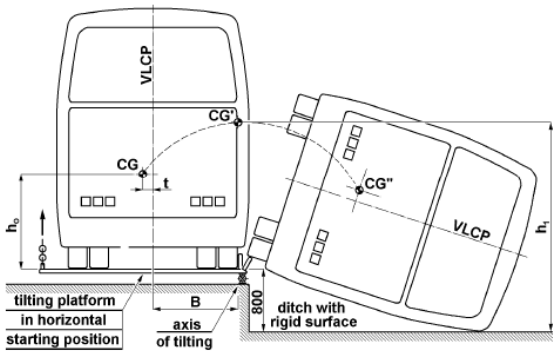


Şekil 4. Aracın devrilmeye başladığı kararsız denge konumu ve zemine ilk temas ettiği konum.

3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ DEVRİLME SİMÜLASYONU

3.1. Enerji Hesaplaması

Aracın, kararsız denge konumundan zemine ilk temas anına kadar kaybettiği potansiyel enerjiden aracın kazandığı kinetik enerji hesaplanmıştır. Bilgisayar destekli devrilme simülasyonu, aracın zeminine temas ettiği ilk noktadan başlayacak olup aracın kazandığı kinetik enerji kullanılarak hesaplanan açısal hız değeri simülasyona başlangıç hız değeri olarak tanımlanmıştır. Ayrıca yer çekimi etkisi de hesaplamalara dahil edilmiştir.



Şekil 5. Otobüs kesiti devrilme testi şematik gösterimi.

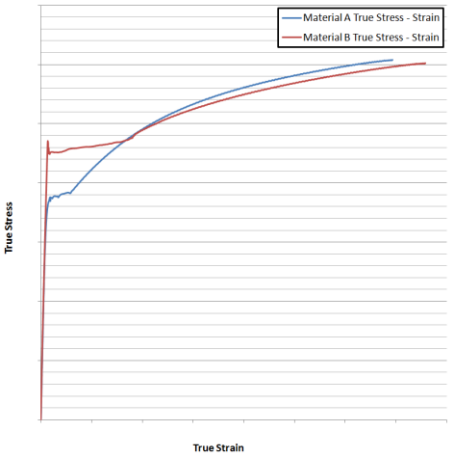
Devrilme sırasında ağırlık merkezinin hareketi nedeniyle kazanılan toplam enerji ECE R66 regülasyonuna göre aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$E^* = 0.75\ M\ g\ \Delta h \qquad (1)$$

Bu formülde; M aracın ağırlığı, g yer çekimi ivmesi ve yükseklik farkı $\Delta h = h_{CG\ I} - h_{CG\ II}$ olarak değerlendirilir.

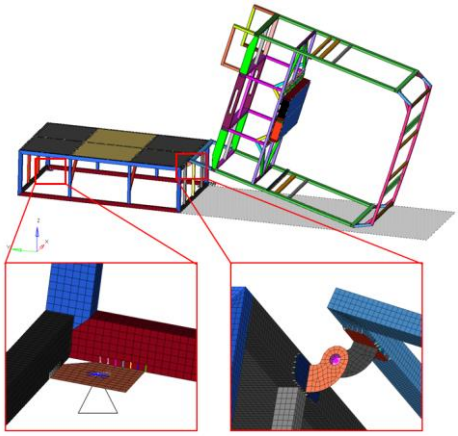
3.2. Sonlu Elemanlar Modeli

Bilgisayar destekli hesaplama modellerinin gerçek testler ile doğrulanması için hazırlanacak otobüs kesitinin ve test fikstürünün sonlu elemanlar modelleri HyperMesh ve HyperCrash sonlu elemanlar hazırlayıcı yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Kesit modelleri, QEPH formülasyonuna sahip birinci dereceden 4 düğüm noktalı kabuk eleman ile modellenmiştir. QEPH eleman formülasyonu fiziksel "hourglass" stabilizasyonu için kullanılır ve iyi bir hassasiyet / maliyet oranı sağlar. QEPH eleman formülasyonu iyi sonuçlar vermesi için sonlu elemanlar yapısı yeterince sık olarak modellenmiştir ve tria elemanların sayısının toplam eleman sayısından %5 fazla değildir. Bu kabuk elemanlar, kalınlık boyunca 5 integrasyon noktasına sahiptir. "Membrane Strain" nedeniyle deformasyon sırasında kabuk elemanların kalınlık değiştireceği göz önünde bulundurulmuştur. Plastisite hesaplamaları için 3 Newton iterasyonlu "iterative projection" yöntemi kullanılmıştır. Düğüm modellerindeki profilleri birbirlerine bağlayan kaynak bağlantıları simülasyon modelinde rijit elemanlar ile modellenmiştir.

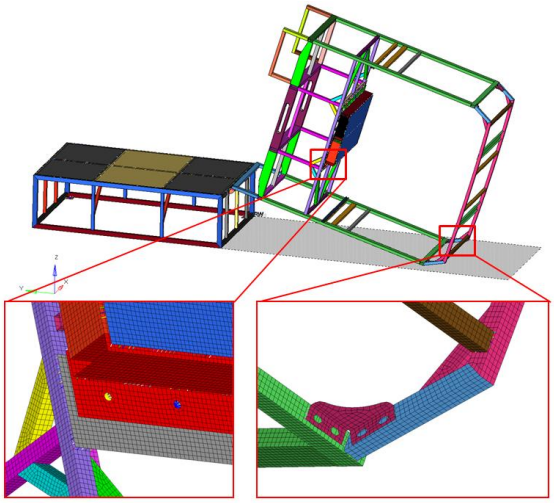


Şekil 6. Otobüs kesitinde ve test fikstüründe kullanılan malzemelerinin gerçek gerilme - gerinim eğrileri.

Devrilme analizinde kullanılan malzemenin özelliklerini elde etmek için İTÜ Biyomekanik ve Mukavemet Laboratuvarında çekme deneyi yapılmıştır. Test sonuçları baz alınarak yapılan hesaplamalar ile gerçek gerilme – plastik birim uzama eğrisi (true stress – plastic strain curve) hesaplanmıştır. Bu hesaplanan elasto-plastik şekil değiştirme davranışı RADIOSS sonlu eleman çözücüsünde bulunan "Elastic Plastic Piecewise Linear Material (LAW36)" isimli malzeme modeline girdi olarak tanımlanmıştır. Otobüs kesiti ve test fikstürü malzeme modellerine çekme testi baz alınarak kırılma (failure) kriteri de tanımlanmıştır. Bilgisayar destekli devrilme simülasyonundaki bütün temasın durumları kayabilen temas (Interface Type 7) olarak tanımlanmıştır. "Interface Type 7" temas algoritması, burkulmaların görüldüğü yüksek hızlı çarpışma simülasyonlarında tercih edilen bir temas algoritmasıdır. "Interface Type 7" temas algoritmasının avantajı; temas durumda oluşan burkulmaların gövdenin direngenliğini düşürmesini hesaba katıp gerekli hassasiyeti sağlamasıdır. Temas durumunda, araç ile zemin arasındaki sürtünme durumu Cloumb sürtünme yasası formülasyonu kullanılarak tanımlanmıştır.



Şekil 7. Otobüs kesiti devrilme analizinin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları - 1.



Şekil 8. Otobüs kesiti devrilme analizinin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları - 2.

Otobüs kesitinin devrilme simülasyonunda zaman integrasyonu, yüksek deformasyonlar, lokal burkulmalar ve plastik deformasyonlar nedeniyle doğrusal olmayan eksplisit dinamik sonlu elemanlar çözücü kodu olarak RADIOSS programı kullanılmıştır. Devrilme analizinde kullanılacak olan sonlu elemanlar modeli HyperMesh ve HyperCrash programları kullanılarak oluşturulmuştur. Devrilme analizinin sonuçları ve regülasyona göre deformasyon

miktarları değerlendirilmesi HyperView ve HperGraph programları kullanılarak değerlendirilmiştir.

4. FİZİKSEL DEVRİLME TESTİ

4.1. Testin Tanımı

"Toplu Taşıma Araçlarının Devrilme Kaynaklı Güvenliği İçin ECE R66 Regülasyonunu Sağlayabilecek Sanal Mühendislik Kabiliyeti Geliştirme" projesinde yapılmış olan korelasyon çalışmasında kontrollü bir devrilme testi gerçekleştirilmiş ve hareketli görsel ile deplasman eğrileri korelasyonlarında kullanılacak veriler analiz verileri ile karşılaştırılmıştır.

Test numunesi üzerinde belirlenen bölgelere Quadrant Symmetry Point'ler yerleştirilerek test sonrası TEMA yazılımında point bölgeleri tanımlanmış ve mesafe değerleri için görüntüler üzerinde analizler yapılmıştır.

Şekil 9. Test Numunesi Görseli

4.2. Test Ekipmanları

Analiz sonuçlarının hareketli görsel korelasyonunda kullanılacak görüntülerin elde edilmesi ve deplasman eğrileri korelasyonunda kullanılacak verilerin elde edilebilmesi için gerçekleştirilen test ve sonrasındaki çalışmalarda aşağıdaki donanımlar ve yazılımlar kullanılmıştır;

- Yüksek Hızlı Kamera
- LED Aydınlatma
- Image Systems TEMA Yazılımı
- Quadrant Symmetry Point

Analiz sonuçlarını doğrulacak teknik özelliklere (hız, çözünürlük, vb.) sahip Photron F FASTCAM Mini UX100 type 800K-M-16G monochrome yüksek hızlı kamera kullanılmıştır.

Şekil 10. Photron F FASTCAM Mini UX100 type 800K-M-16G monochrome yüksek hızlı kamera.

Şekil 10'da görseli verilen kesit devrilme testinde kullandığımız yüksek hızlı kamera 1280 x 1024 piksel CMOS sensör çözünürlüğüne ve 4000 fps çekim hızına sahiptir. Analiz korelasyonunda istenilen yüksek hızlara çıkabilmek için Monochrome seçilmiştir.

Kameraya entegreolarak Şekil 11'de görseli verilen Navitar marka; "TV Zoom Lens G6X16 16-100 mm, f 1/1.9,1" lens kullanılmıştır.

Şekil 11. Navitar TV Zoom Lens G6X16.

Luxmetre ile yapılan ölçümler sonucunda lens için f:26 mm ve diyafram açıklığı olarak 1.9 ve 2.8 ayarlarının seçilmesi uygun görülmüştür. Odak uzaklığının seçilmesinde numune - kamera arası mesafe de göz önünde bulundurulmuştur.

Test sırasında görüntülerin belirlenen hızlarda yüksek çözünürlüklü olarak alınmasında ışıklandırmanın katkısı oldukça fazladır. Bu nedenle Focus LED marka PR231 model numaralı 4 adet Led spot kullanılmıştır. Spotlar numune üzerine kontrast farkı yaratacak ve ışık patlaması yapmayacak şekilde yerleştirilmiştir.

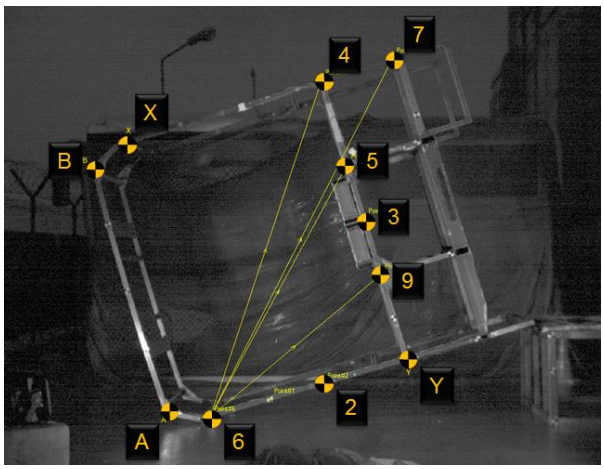
Şekil 12. Focus LED PR231 LED projektör.

Işıklandırma için LED aydınlatmaların seçilmesi test sırasında numunenin istenilen kısımlarının bölgesel olarak aydınlatılmasında ve belirli açılarda yerleştirilerek ışık patlamalarının önüne geçilmesinde etkili olmuştur. Işık patlamalarının önlenmesi ve ışık sıcaklığının 5600 °K olması araç kesiti üzerinden deplasman ölçümü almak üzere yerleştirilmiş Quadrant Symmetry Point'lerin TEMA görüntü işleme yazılımı tarafından sorunsuz bir şekilde algılanmasını sağlamıştır.

4.3. Test Hazırlıkları ve Uygulaması

Fiziksel devrilme testi için 1:1 ölçekli araç kesiti numunesi 800mm yüksekliğe sahip platformun üzerinden menteşe etrafından dönecek şekilde kararsız konuma gelene kadar kaldırılmış ve serbest düşüşe bırakılmıştır. Devrilme testi sırasında araç kesiti üzerinde herhangi bir dinamik etki oluşturmamak için açısal hız 5 derece/s'yi aşmayacak şekilde kesit devrilinceye kadar yana doğru yatırılmıştır.

Şekil 13. Yüksek hızlı kamera ve LED projektörlerin enstrümantasyon lokasyonları.



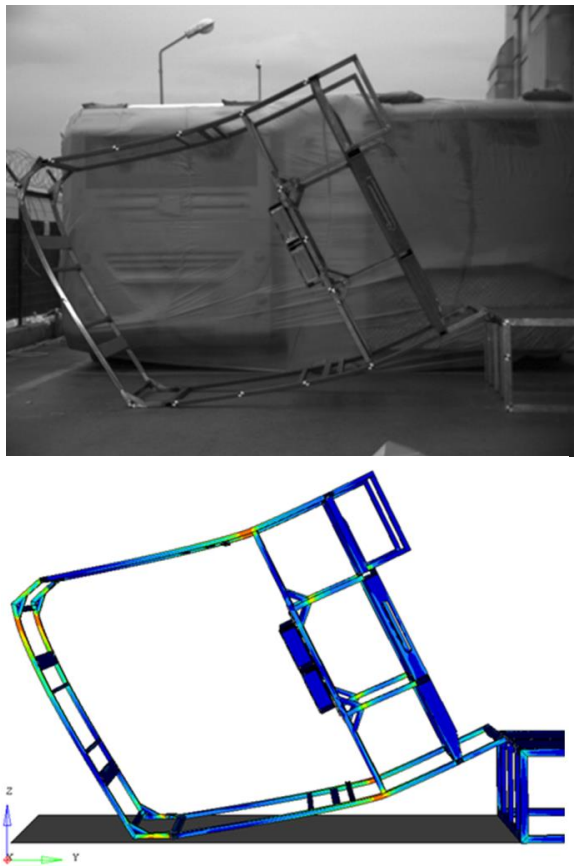
Şekil 14. Deformasyon ölçümü alınan referans noktalar.

Şekil 13, LED aydınlatmalar ve kameranın yerleştirilme düzenini göstermektedir. 12 metrelik numune - kamera arası mesafe, kameranın odak uzaklığının en verimli şekilde olduğu değer göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Numune üzerindeki boyutsal deformasyonların anlaşılması için Quadrant Symmetry Point'ler, numunenin çeşitli bölgelerine yerleştirilmiştir. Point'lerin lokasyonları belirlenirken, bilgisayar destekli simülasyonda kullanılacak verilerin ölçülmesi konusu ön planda tutulmuştur. Referans nokta ölçümlerinin yapılabilmesi için Quadrant Symmetry Point'lerin çekimler sırasında görünür olması gerekmektedir. Bu amaçla LED projektörlerin lokasyonları, kamera diyafram açıklığı ve odak uzaklığı eş zamanlı olarak belirlenmiştir.

5. BİLGİSAYAR DESTEKLİ SİMÜLASYON İLE FİZİKSEL TESTİN KORELASYONU

5.1. Korelasyon Çalışmaları

Proje kapsamında daha önce yapılan çalışmalar ile araç kesitinin ilgili bölgesi üretilmiş ve test için gerekli fikstür tasarımı yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Yine bu çalışmalarla eşzamanlı olarak, sonlu elemanlar modeli oluşturularak uygun sınır şartları ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile fiziksel testlerin korelasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu korelasyon çalışmalarında, bilgisayar destekli matematiksel hesaplamalar ile fiziksel testteki deformasyon karakteristikleri karşılaştırılacaktır.



Şekil 15. Otobüs kesitinin fiziksel testte ve bilgisayar destekli simülasyonunda ulaştığı maksimum deformasyon anındaki görseli.

Şekil 15'te verilen test ve analiz görsellerinde devrilme durumunda oluşan deformasyon zamana bağlı olarak ardışık bir şekilde verilmiştir. Öncelikle araç kesiti zemine temas etmiştir ve elasto-plastik olarak enerji absorbe etmeye başlamıştır. Düğüm

noktaları bükülerek plastik menteşe özelliği göstermeye başlamıştır. Maksimum dinamik deformasyon oluştuktan sonra yapı enerji absorbasyonunu tamamlamıştır. Deformasyon sırasında yapının biriktirdiği elastik enerji yapının geri yaylanmasını sağlamıştır.

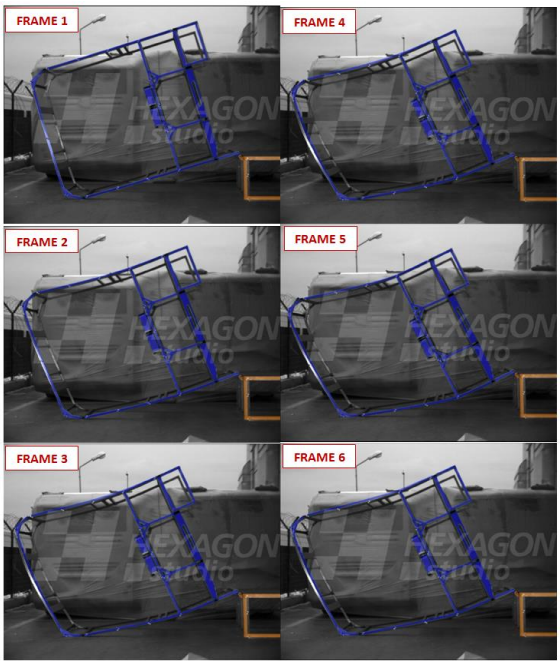
Gerçekleştirilen kesit devrilme testleri esnasında yüksek hızlı kamera ile kayıt yapılmış ve yapının davranışı ile ilgili veriler bu çekimler sayesinde elde edilmiştir. ECE R66 regülasyonunda da tarif edildiği gibi, alınan yüksek hızlı kamera görüntüleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri ile korelasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Korelasyon çalışmaları 3 ana korelasyon başlığı altında gerçekleştirilmiştir. Bu başlıklar;

a) Hareketli görsel korelasyonu,

b) Deplasman eğrilerinin korelasyonu,

c) Yırtılma bölgelerinin korelasyonu,

Olarak belirlenmiştir.



Şekil 16. Kesit devrilme testi ve simülasyonunda oluşan deformasyon görüntülerinin üst üste konarak zamana bağlı olarak ardışık bir şekilde karşılaştırılması.

5.2. Korelasyon Çeşitleri

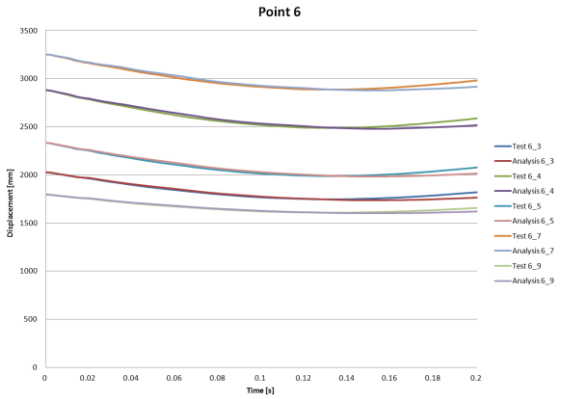
5.2.1. Hareketli görsel korelasyonu

Test esnasında yapılan yüksek hızlı kamera ölçümü ile, analiz sonucu elde edilen hareketli görseller üst üste konumlandırılmış ve korelasyon sağlanmıştır. Şekil 16'da görüldüğü gibi hareketli görseller üst üste konumlandırıldığında, sonlu elemanlar analizi ve test esnasında oluşan deformasyonların birbiri ile örtüştüğü ve başarılı bir korelasyon yakalandığı tespit edilmiştir.

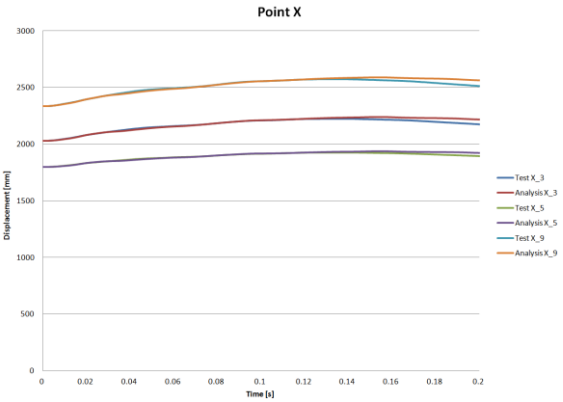
5.2.2. Deplasman eğrilerinin korelasyonu

Kaydedilen video ile yapılan görsel korelasyon çalışmaları çok olumlu sonuçlar vermesine rağmen, analiz ile testin korelasyonun metrik olarak yapılması ve hata payının ortaya konması hedeflenerek korelasyon çalışmaları bir adım öteye götürülmüştür. Test esnasında hızlı kamera ile çekilen görüntüler işlenerek, yapının farklı noktaları için deplasman verileri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, belirlenen noktalar arasındaki mesafenin değişim grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler, test esnasında otobüs gövdesinde oluşan deformasyonu metrik olarak ortaya koymaktadır. Deplasman korelasyonu çalışmaları kapsamında, analizlerde aynı noktalardan deplasman grafikleri alınmış ve testler ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu korelasyon karşılaştırmasında 4 farklı noktadan alınan ölçümlerde %95 - %97 arasında değişen bir korelasyon sağlanmıştır. Maksimum hata oranı %5 mertebesinde olmuştur. Korelasyon başarılı şekilde sağlanmıştır.



Şekil 17. Nokta 6'nın test ve simülasyondan alınan deplasman eğrilerin korelasyonu.

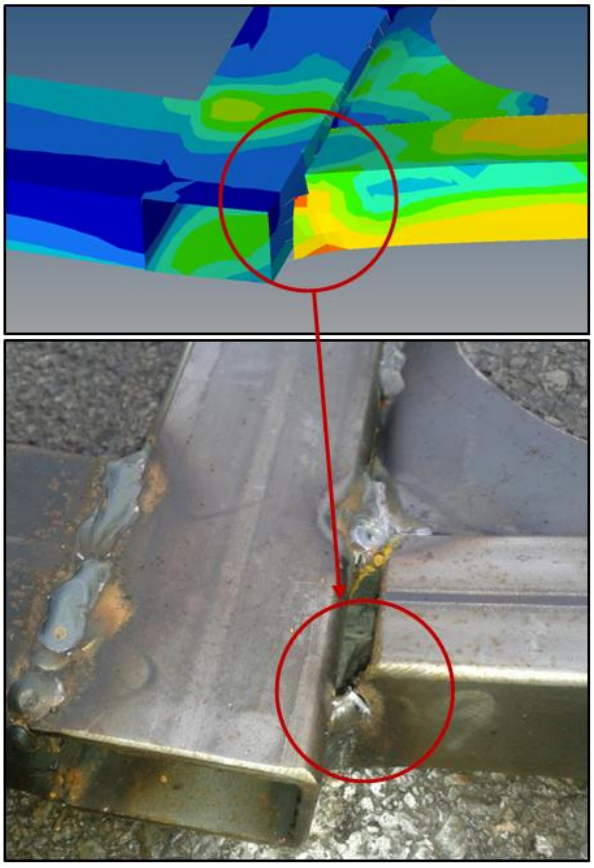


Şekil 18. "X" noktasının test ve simülasyondan alınan deplasman eğrilerin korelasyonu.

5.2.3. Yırtılma Bölgeleri Korelasyonu

Sonlu elemanlar analizlerinde laboratuvar ortamında yapılan malzeme testleri ile elde edilen malzeme mekanik özellikleri kullanılmıştır. Bu mekanik özellikler ile yapının elastik bölgesindeki mekanik özellikleri, plastik bölgesindeki gerilme-gerinme eğrisi ve lokal çatlak ve yırtıkların başladığı nokta tespit edilmektedir. Yapılan simülasyonlarda, araç gövdesinin yer ile temas ettiği bölgede kaynak dibinde lokal çatlak tespit edilmiştir. Bu lokal çatlakların fiziksel testte de tespit edilmesi ve bu konuda da simülasyon ile test arasında korelasyon olması hedeflenmiştir.

Testlerde, sonlu elemanlar analizleri ile aynı bölgelerde çatlakların olduğu tespit edilmiştir ve yırtılma davranışı olarak da analizlerin test ile korelasyonu olduğu görülmüştür.



Şekil 19. Yırtılma bölgesi - Sonlu elemanlar modeli ve test sonucu.

6. SONUÇ

Otobüs kesiti için yapılan fiziksel devrilme testleri ve bilgisayar destekli devrilme simülasyonları sonucunda 3 farklı korelasyon yöntemi ile, sonlu elemanlar analiz sonuçlarının test ile korelasyonu sağlanmıştır. Korelasyon çalışmaları onay kuruluşuna da raporlanarak, aracın ECE R66 onayı sanal analizler ile alınmıştır.

KAYNAKLAR

1. ECE 66-02 Regulation(2010): "**Large Passenger Vehicles With Regard To The Strength Of Their Superstructure**", Rev.1 / Add.65 / Rev.1 / Amend.2,
2. Küçük, Ö.(2015), "**Rollover Crashworthiness Of A Multipurpose Coach**", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ
3. Kaptanoğlu, M., Küçük, Ö.(2014), "**Rollover Crashworthiness Of A Multipurpose Coach**", 7. Otomotive Teknolojileri Kongresi, Bursa.
4. Arslan, A., Kaptanoğlu. M.(2010), "**Bir Ticari Araç İçin R-14 Regülasyonuna Uygun Koltuk Bağlantılarının Geliştirilmesi**", 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
5. Arslan, A., Kaptanoğlu, M., Şenocak, E.(2012), "**Kuzey Amerika Pazarı İçin Geliştirilen Bir Aracın FMVSS 208 Regülasyonuna Göre Uygunluğunun Sanal Olarak Doğrulanması**", 6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
6. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L.(2005), "**The Finite Element Method**", Sixth Edition.
7. Bathe, K-J.(1996), "**Finite Element Procedures**", Prentice Hall.
8. Belytschko, T., Lin J.L. and Tsay C.S.(1984), "**Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**", 42:225-251.
9. Belytschko T. and Leviathan I.(1992), "**Physical stabilization of the 4-node shell element with one-point quadrature**", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 113:321-350.
10. Bojanowski, C., Wekwzer, L., Kwasniewski, L., Kownacki, J.(2009), "**Florida Standard For Crashworthiness And Safety Evaluation Of Paratransit Buses**".
11. Srinivasulu, T.(2012), "**Bus Rollover Simulation Using Body Sections In RADIOSS**", HTC.
12. Hashemi, R.(2005), "**UN-ECE Regulation 66: Strength Of Superstructure During Rollover**", APSN Workshop on Bus & Truck Passive Safety, Prague.
13. Deshmukh, P.S.(2006), "**Rollover And Roof Crash Analysis Of Low Floor Mass Transit Bus**", Master Thesis, Wichita State University.
14. Gadekar, G.B., Kshirsagar, S., Anilkumar, C.(2005), "**Rollover Strength Prediction Of Bus Structure Using LS-DYNA 3D**", Altair CAE Users Conference 2005.
15. Fukamachi, K., Miyamoto, S., Nagasawa, H., Uchino, S.(2000), "**Study Of Crashworthiness Of Super High Decker Large Sized Bus By CAE Approach**", FISITA World Automotive Congress, Seoul 2000.
16. **RADIOSS Theory Manual**, v12, Altair Engineering, Inc.

17. Jim A. Kuypers, (2010), "**Framing Analysis From a Rhetorical Perspective**", P. D'Angelo and J. A. Kuypers, eds., Doing News Framing Analysis, Routledge
18. Image Systems SE, "**TEMA Software**", URL: http://www.imagesystems.se/image-systems-motion-analysis.aspx
19. Adobe CA, "**After Effects Software**", URL: http://www.adobe.com/tr/products/aftereffects.html
20. Rafael C. Gonzalez; (2008) "**Digital Image Processing**", Prentice Hall. pp. 1–3.