HAFİF ZIRHLI PERSONEL TAŞIYICI ARAÇLARIN DEVRİLME ANALİZİ VE SAYISAL OLARAK HESAPLANMASI

Kerem Çizmeci[1], Nahit Babaarslan[2], İzzet Özcan[3]

1. GİRİŞ

Bu çalışma ile hafif zırhlı, yüksek tonajlı araçların devrilme ile sonuçlanabilecek kazaları sonrasında personelin güvenliği, araç gövdesinin bütünlüğü ve dayanımları incelenmiştir. Literatürde, zırhlı araçlar için devrilme standartları ve regülasyonları olmadığından; sivil araçlara uygulanan regülasyonlar ve standartlar göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Çalışma, ticari sonlu elemanlar yazılımı olan "LS-Dyna" kullanılarak yapılan sayısal analizler ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modeller kullanılarak, zırhlı araç gövdesinin devrilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. YENİ NESİLKUNTER PLATFORMU

EJDER Kunter, 2011-2012 yıllarında geliştirme çalışmalarına başlanan ve devam eden yıllarda ise gerek yurt içi, gerekse yurt dışı pazarda ağırlıklı olarak TOMA varyantında son kullanıcı ile buluşan Nurol Makina'nın özgün bir kamyon platformudur. Geçmişten günümüze gelişen teknoloji, olanaklar ve sektörel deneyim birikimi ile beraber 2021 yılında Kunter platformu, sistem ve alt sistem mimarisi bakımından yeniden ele alınmıştır.

Yeni nesil Kunter platformu, taktik tekerlekli zırhlı araçlar konusunda elde edilmiş derin deneyim ışığında; re-

[1] Makina Mühendisi, Unvan: Kıdemli Uzman Tas. Müh., Nurol Makina Sanayi A.Ş., - *Kerem.Cizmeci@nurolmakina.com.tr*

[2] Makina Mühendisi, Unvan: Ana Yapısal Sistemler Takım Lideri, Nurol Makina Sanayi A.Ş., - *Nahit.Babaarslan@nurolmakina.com.tr*

[3] Makina Mühendisi, Unvan: Analiz Mühendisi, Nurol Makina Sanayi A.Ş., - *Izzet.Ozcan@nurolmakina.com.tr*

kabetin zorlaştığı ve müşteri beklentilerinin başkalaştığı savunma sektöründe, gereksinime daha hızlı yanıt verebilecek modüler altyapı, farklı biçimlere daha kolay dönüştürülebilecek ve çağın gerekliliklerine uygun bir şekilde geliştirilmiştir.

Resim 1. Ejder Kunter Personel Taşıyıcı

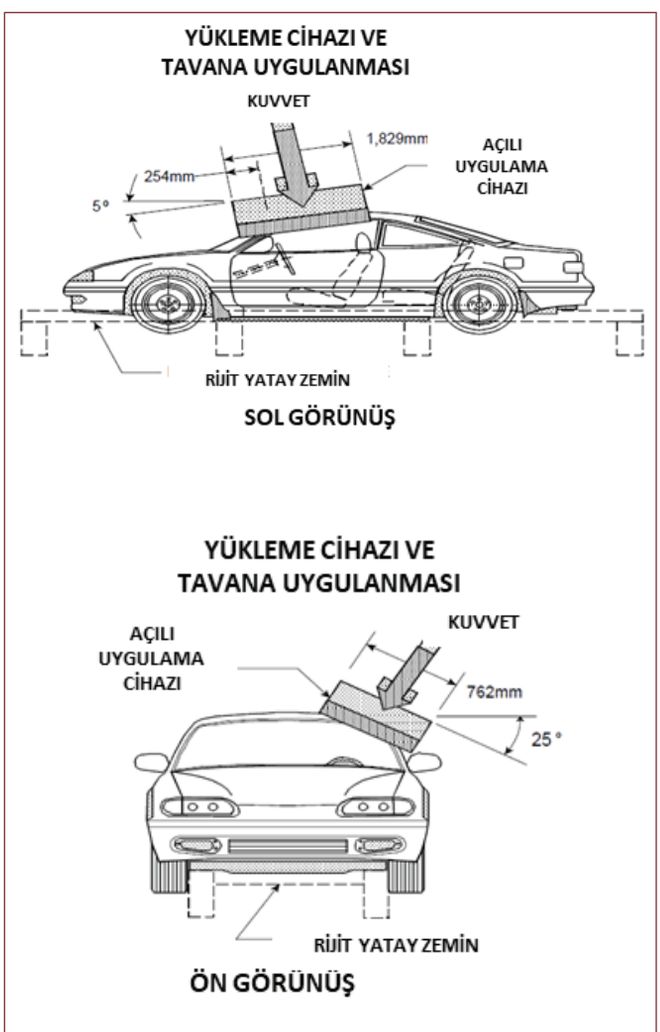
3. ÇALIŞMANIN AMACI

Yeni nesil Kunter projesi kapsamında, ana varyantlardan bir tanesi olan 14 personel kapasiteli hafif zırhlı ve ölçeklendirilebilir balistik korumaya sahip personel taşıyıcı geliştirilmektedir. Kunter APC olarak adlandırılan bu varyantın temel versiyonu hafif zırhlandırılmış olup, taşıdığı personel sayısı, araç hacmi ve teknik özellikler düşünüldüğünde, devrilme simülasyonları ile tasarımı doğrulamak, bir gereklilik haline gelmiştir. Proje boyunca gerçekleştirilen kapsamlı analiz çalışmalarının önemli bir adımı olan devrilme simülasyonları ile ağırlık optimizasyonları, gerekli yapısal bütünlüğün sağlanması ve araçtan dışa açılan kapı - kapak gibi sistemlerin devrilme senaryosundaki davranışları gözlemlenebilmiştir.

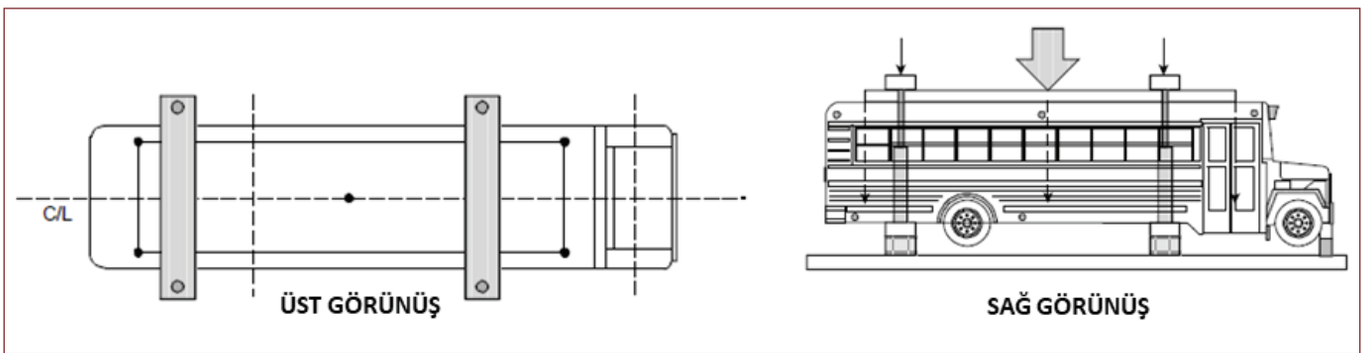
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Taşıtların kaza anındaki mekanik davranışları, içerisinde taşıdıkları sürücü ve/veya yolcuların can güvenliği açısından en önemli kriterlerden bir tanesidir. Taşıtlar, ağırlık, kullanım amaçları ve koltuk kapasitelerine göre sınıflandırıldığında, her bir sınıf için literatürde kabul gören farklı standartlar mevcuttur. Olası bir kaza ve istenmeyen devrilme, takla atma durumlarına karşı can güvenliğinin sağlanabilmesi için FMVSS 160, FMVSS 200 ve UN-ECE-66 standartları, taşıtlar için yaygın olarak kullanılan ve en çok kabul gören standartlardandır. Literatürde askeri personel taşıyıcı sınıfı araçlar için mobilite ve beka konularında çeşitli standartlar bulunurken; bu araçların devrilme durumlarında güvenlik ölçütlerini belirleyen herhangi bir standart bulunmamaktadır.

Nurol Makina bünyesinde tamamen özgün olarak tasarlanan askeri amaçlı personel taşıyıcı Ejder Kunter aracının tasarım süreçlerinde, devrilme anında personel güvenliğinin sağlanması için devrilme analizleri ve simülasyonları yapılmıştır. Yapılan analizlerde sivil araçlar için kabul görmüş olan standartlar kullanılarak yaklaşım yapılmıştır. Literatürde askeri araçlar için devrilme analizine daha önce rastlanmamış olması, çalışmanın özgünlüğüne büyük bir katkı sağlamış. ayrıca aracın güvenliği ile kullanıcı personelin can güvenliği açısından öne . çıkan bir çalışma olmuştur.



Resim 2. FMVSS 216 Standardı Araç Sol ve Karşıdan Görünüş [1]



Resim 3. FMVSS 220 Standardı Araç Üst ve Sağdan Görünüş [2]

4.1 FMVSS 216 Standartı

"Federal Motor Vehicle Safety Standart" FMVSS olarak kısaltılmış olan standardın Türkçe karşılığı "Birleşik Devletlere Ait Motorlu Araçlar Güvenlik Standartı"dır. FMVSS 216 standardı azami yüklü dolu ağırlığı 2.722 kg veya daha az olan binek otomobillerin, çok amaçlı binek araçların, kamyonların ve otobüslerin tavan bölgelerinin dayanıklılığı için kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu standardın ağır tonajlı araçlar için referans alınması uygun değildir. Resim 2'de bu standardın uygulaması gösterilmektedir.

FMVSS 216 standardına göre devrilme sonrasında aracın performansı, SWR ("Strength Weight Ratio") değerine göre, iyi ("good"), kabul edilebilir ("acceptable"), sınır ("marginal") ve zayıf ("poor") olarak değerlendirilir ve bu kabuller Tablo 1'de gösterilmiştir.

SWR: Deforme olmayan çarpışma plakasının 127 mm deplasmana ulaştığı andan hemen önceki reaksiyon kuvvetinin aracın boş ağırlığına oranı.

Ejder Kunter aracının dolu ağırlığı FMVSS 216 standardında izin verilen maksimum ağırlığı geçtiği için devrilme analizinde referans olarak FMVSS-216 standardı kullanılmamıştır.

4.2 FMVSS 220 Standardı

FMVSS220 standardı, okul otobüslerinin (servislerinin) devrilme anındaki kabin korumasının performans gerekliliklerini belirler. Standardın amacı; okul otobüslerinde devrilme ile sonuçlanabilecek kazalar sonrasında kabin içerisindeki ölüm ve yaralanma risklerini en aza indirmektir. FMVSS 216 standardından farklı olarak; aracın tavan bölgesine deforme olmayan, dikdörtgen düz bir plaka ile kuvvet uygulanır. Resim 3'te bu standardın uygulaması gösterilmektedir.

Testin başarılı sayılabilmesi için; deplasman belirli bir limiti geçmemeli, kuvvet en üst noktaya ulaştığında ve kuvvet kaldırıldıktan sonra otobüs üzerinde bulunan bütün acil çıkışların açılabilir olması şartı sağlanmalıdır. FMVSS 220 standardı özellikle okul taşıtlarının devrilme testlerine uygun olduğu için, Ejder Kunter aracının analizlerinde referans olarak kullanılmamıştır.

4.3 UN-ECE Reg66

UN-ECE Reg 66 standardı; 22'den fazla yolcu taşıyan, tek katlı, geniş hacimli otobüslerin şoför ve yolcu kabinlerinin devrilme anındaki performanslarının belirlenmesini ve değerlendirilmesini amaçlar. Genel ilke olarak; yerden belirli bir yükseklikte bulunan devrilme platformu aracılığıyla, otobüsün statik dengesini kaybettiği noktada, sahip olduğu potansiyel enerjinin kinetik enerji ve deformasyona dönüşmesi denklemi ile hesaplamalar yapılmaktadır. Otobüs içerisinde yaşam alanını temsil eden bir hacim belirlenir. Sonuç olarak devrilme sonrasında deformasyonun o bölgeye ulaşmaması ve yaşam alanı içerisine girmemesi gerekmektedir. Bu durumda, aracın devrilme anındaki mekanik olarak performansı güvenli olarak kabul edilmektedir.

$$E_R = M.g.h_1 = M.g\left[0.8 + \sqrt{h_0^2 + (B \pm t)^2}\right] \qquad (1)$$

Eşitlik 1: Statik dengenin kaybedildiği andaki potansiyel enerji denklemi

E_R : Statik dengenin bozulmadan hemen önceki referans potansiyel enerji

M : Test edilmek istenen aracın ağırlığı

h_0 : Ağırlık merkezinin statik dengenin korunduğu andaki sahip olduğu yüksekliği

h_1 : Ağırlık merkezinin statik dengenin bozulduğu andaki sahip olduğu yükseklik

t : Ağırlık merkezinin aracın orta merkez ekseninden olan dik uzaklığı

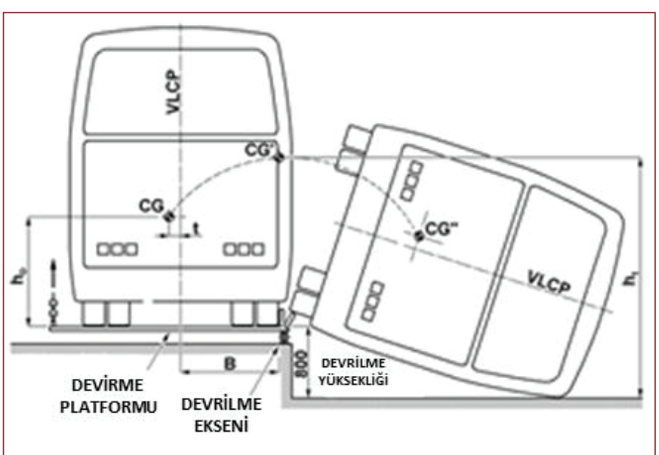
B : Aracın orta merkez ekseninin devrilme platformunda bulunan dönme merkezine olan uzaklığı

g : Yer çekimi i vmesi

VLCP : Dikey uzunlamasına merkez düzlem

CG : Ağırlık merkezi

Araç içerisinde bulunan şoför ve diğer bütün personelin devrilme ile sonuçlanan kazalar sonrasında ölüm ve yaralanma risklerini en aza indirebilmek amacıyla; kabin içerisinde bir yaşam alanı ("residual space") belirlenir. Belirlenen yaşam alanı dışarısında kalan üst yapıya ait yapısal unsurlar, ekipmanlar ve diğer parçaların; devrilme testleri ve simülasyonları sonrasında yaşam alanı içerisine girmemesi koşulu aranmaktadır. Diğer yandan; yaşam alanı içerisindeki hiçbir unsurun, deforme olmuş olan gövdenin dışına çıkmaması beklenir. Araç zemini tasarım koşullarına göre düz olmak zorunda değildir. Şoför kabini ile personel kabini arasında ve personel kabininin aracın sağ ve sol yerleşiminde zemin yükseklikleri farklı olabilir. Bu durumlarda yaşam alanı, değişen zemin yüksekliklerine göre değişken olabilmektedir. UN-ECE Reg66 standardına göre yaşam alanı aşağıdaki görselde belirtildiği gibi tanımlanmaktadır (Resim 5). Üretici firmalar güvenli tarafta kalmak için daha büyük ölçülerde yaşam alanı belirleyebilmektedir.

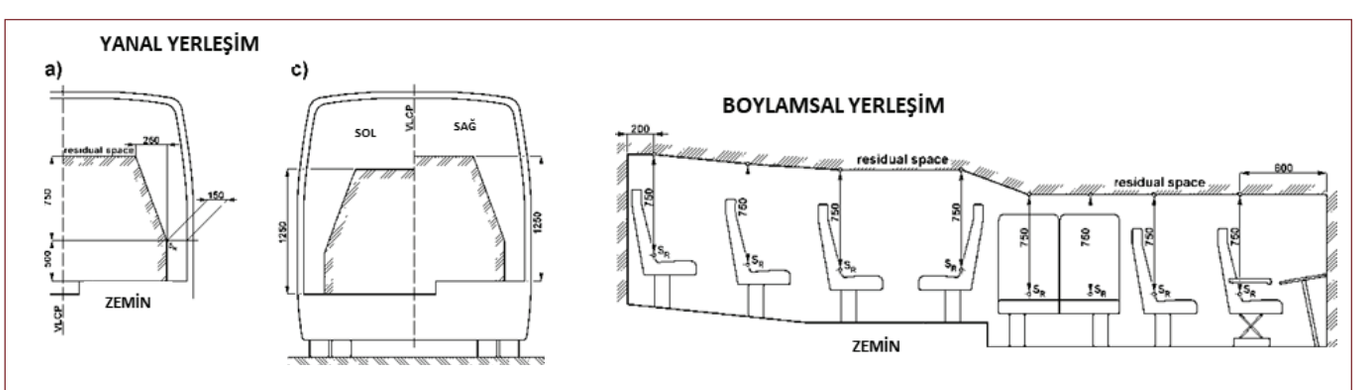


Resim 4. UN-ECE Reg66 Standardı Devrilme Düzeneği [3]

İstemler ve gereksinimlerinden dolayı, tasarlanan araçların sağ ve sol taraflarının simetrik olmadığı ve farklı mekanik özelliklerde olduğu durumlar olabilir. Bu gibi tasarımsal farklılıkların olduğu durumlarda; devrilme ile sonuçlanan kazalar sonrasında tanımlanan yaşam alanının mekanik olarak en riskli olduğu taraf belirlenerek, devrilme test ve analizlerinin o tarafta yapılması gerekmektedir.

Aracın test edilmek istenilen ağırlığında ve düz yolda statik konumdaki durumunda süspansiyon yükseklikleri belirlenmelidir. Fiziksel olarak yapılan test esnasında süspansiyon sistemi düz yolda statik durumdaki süspansiyon yükseklikleri ile aynı olacak şekilde kilitlenmelidir.

Nurol Makina bünyesinde özgün olarak tasarlanan Ejder Kunter zırhlı personel taşıyıcı aracın, devrilme ile sonuçla-



Resim 5. UN-ECE Reg66 Standardı Yaşam Alanı Belirlenmesi [3]

nabilecek kazalar sonrasında içerisinde bulunan 14 adet personelin can güvenliğini korumak ve yaralanma risklerinin en aza indirilebilmesi için gerçekleştirilen sayısal sonlu elemanlar analizlerinde UN-ECE Reg 66 standardı referans olarak kullanılmıştır.

5. KUNTER DEVRİLME SİMÜLASYONLARI

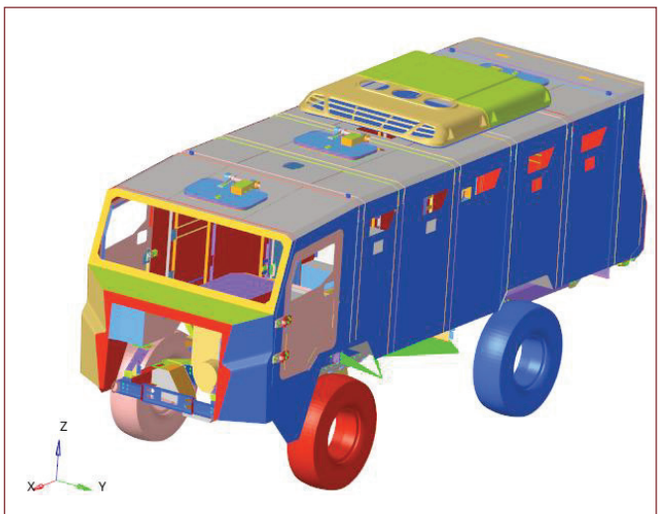
Nurol Makina bünyesinde tasarımı yapılan zırhlı araçların yaşam döngüsü boyunca içerisinde taşıdığı personelin can güvenliği ve yaralanma risklerinin en aza indirilmesi adına, tasarım süreçlerine paralel olarak çok çeşitli analiz çalışmaları sürdürülerek gerçek durumlara yakınsamalar yapılmaktadır. Analiz çalışmaları kapsamında Ejder Kunter zırhlı personel taşıyıcı aracın devrilme anındaki performans değerlerinin en iyi noktaya getirilmesi hedeflenmiştir. Sonlu elemanlar analizi; malzemelerin gerçekte olan mekanik davranışlarının sayısal yöntemler kullanılarak problemlere sayısal yaklaşımlar yapılmasını sağlamaktadır.

5.1 Hazırlık Çalışmaları ve Model Oluşturma

Ejder Kunter aracı tam bağımsız süspansiyon sistemi ile birlikte 4x4 çekiş sistemine sahip ve müşteri istekleri doğrultusunda balistik olarak ölçeklendirilebilir zırhlı personel taşıyıcıdır. Analiz çalışmalarında kullanılan tasarım 14 kişilik taşıma konfigürasyonu ile birlikte balistik olarak "Stanag-4569 Seviye 1" korumasına sahiptir.

Şoför kabini ile personel kabini arasında herhangi bir ayrım olmayıp; birleşik gövdeli bir tasarıma sahiptir. Aracın operasyon ağırlığı maksimum 19 ton mertebelerindedir. Analiz modeli içerisine; devrilme anında ve sonrasındaki performanslarının gözlemlenebilmesi amacıyla araç üzerinde bulunan kapılar, rampa ve kapak sistemleri kilit mekanizmalarıyla birlikte analiz edilmiştir. Motor, şanzıman, transfer kutusu, lastikler gibi otomotiv sistemlerine ait temsili geometriler, gerçek ağırlıkları ve ağırlık merkezleri ile birlikte modellenmiştir. Aracın gövde ve şasi gibi yapısal sistemleri gerçekle birebir model olarak analiz modeline dahil edilmiştir. Fiziksel olarak modele eklenmeyen diğer tüm ağırlıklar, aracın ağırlığına ve ağırlık merkezi bilgilerine eklenerek; noktasal ağırlık olarak analiz modeline ve çözümlere girmiştir.

Devrilme analizleri, sonlu elemanlar yazılımlarında açık

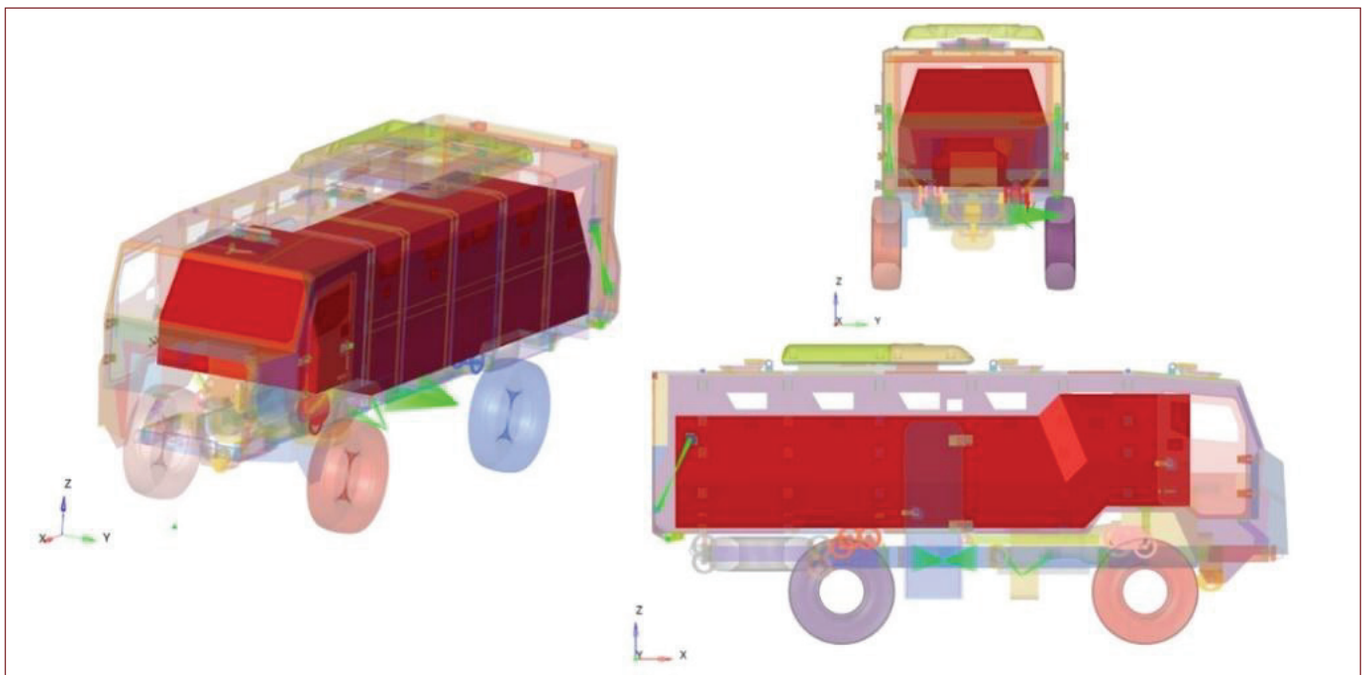


Resim6. Ejder Kunter Aracı Analiz Modeli Görseli

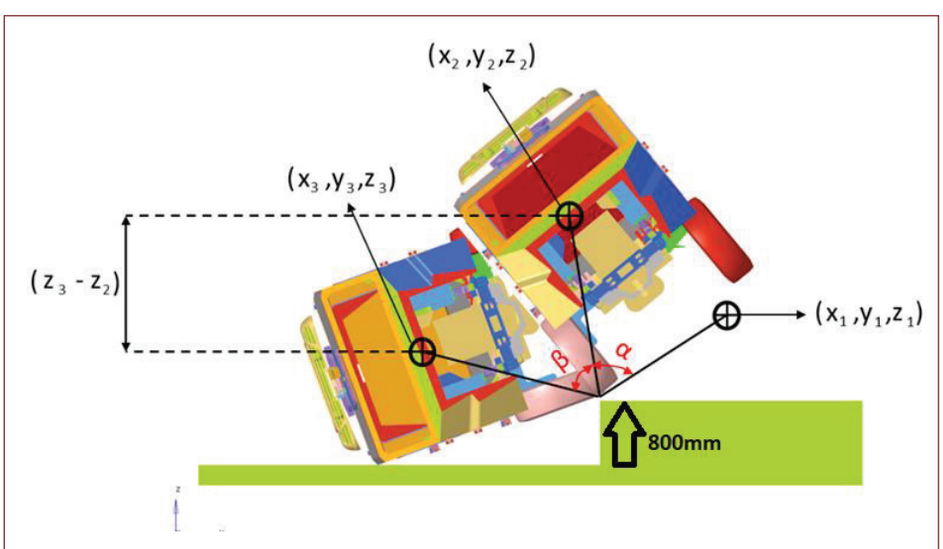
("explicit") yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Açık yöntem, merkezi fark zaman entegrasyonu kullanılarak zamana bağlı olarak gerçekleştirilir. Ejder Kunter zırhlı personel taşıyıcı devrilme analizi çalışmaları Nurol Makina ve Sanayi A.Ş. bünyesinde dış hizmet alımı ile birlikte yürütülerek; tüm sayısal çözümler için "LS-Dyna" ticari sonlu elemanlar analiz yazılımı kullanılmıştır.

Sonlu eleman modeli olarak aracın şasi ve gövdesi için iki boyutlu "Quad" eleman tipi (tam entegre kabuk eleman) kullanılmış olup diğer alt sistemleri ise deforme olmayan ("rigid") üç boyutlu elemanlar ile temsil edilerek modellenmiştir. Ejder Kunter zırhlı personel taşıyıcı araca ait hazırlanan sonlu elemanlar yöntemi analiz modelinde, en küçük 10 mm'lik eleman boyutu ile toplamda 1.278.500 adet eleman kullanılmıştır. Ejder Kunter aracının gövdesinde fiziksel olarak kullanılan ince tanecikli balistik çelikler ile birlikte şasi gibi yapısal unsurlarda kullanılan yüksek dayanıklı çelik malzemeler, analiz modeline yansıtılmıştır. Araçta kullanılan deforme olabilen yapılar için "MAT_098 - Simplified Johnson Cook" malzeme modeli kullanılmıştır. Böylelikle malzemelerin lineer olmayan bölgedeki davranışı dikkate alınmıştır. Motor bloğu, şanzıman, transfer kutusu, lastikler vb. sistemler "MAT_20 – Rigid" malzeme modeli ile tanımlanmıştır.

Analiz sınır koşulları UN-ECE Reg66 standardına uygun olarak, güvenli yaşam alanı hacmi oluşturulmuştur (Resim 7). Devrilme sonrasında gövde üzerinde bulunan yapısal unsurların kırmızı ile belirtilen güvenli yaşam alanı içerisine girmemesi gerekmektedir.



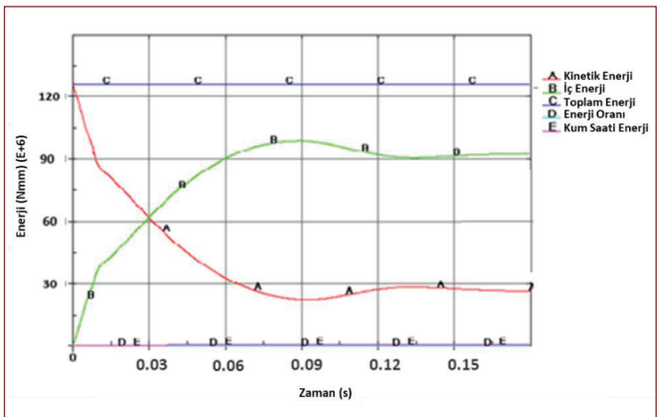
Resim 7. Ejder Kunter Aracı Analiz Modeli Yaşam Alanı Görseli



Resim 8. Ejder Kunter Aracı Analiz Modeli Devrilme Platformu

UN-ECE Reg66 standardına göre olan aracın yerden yüksekliği 800 mm ile başlangıç şartı Resim 8'de gösterilmiştir. Başlangıç hızı için Eşitlik 1'de belirtilen EC R66 standardındaki toplam potansiyel enerji denklemi kullanılmıştır. Aracın yerden yüksekliği, ağırlığı dikkate alınarak başlangıç hızı elde edilir ve sonrasında araç kendi ağırlığı ve ataleti ile serbest düşmeye bırakılır.

Devrilme durumunun başladığı potansiyel enerjinin hesaplanabilmesi için, aracın denge halindeki ağırlık merkezi ile yere temas ettiği andaki ağırlık merkezlerinin dikey eksendeki farkı kullanılarak yükseklik elde edilir. Aracın denge halindeki ve yere temas ettiği sıradaki pozisyonları Resim 8'de gösterilmiştir. Yükseklik aşağıdaki Eşitlik 2 ile elde edilmiştir. Enerjinin korunumu ile potansiyel enerji, kinetik enerjiye eşitlenerek temas halindeki hız değeri elde edilmiştir.



Resim 9. Zamana Göre Enerji Dağılım Grafiği

$h = z_3 - z_2$

Eşitlik 2: Potansiyel enerji yükseklik değişimi formülü

Devrilme analizi çözüm sürelerinin kısaltılması için, aracın statik dengesini kaybederek serbest düşme ile zemine temas ettiği andaki hızı hesaplanmıştır. Aracın gövdesinin zemine çarptığı andaki hızı, ilk hız olarak verilerek; analiz başlangıç koşulu oluşturulmuştur. Aracın zemine temas ettiği andaki hızı hesaplamak için; Eşitlik 3'te belirtilen EC R66 standardındaki toplam enerji eşitliği kullanılmıştır. Başlangıç şartı olarak aracın yere teması sırasında oluşan hız değeri "*INITIAL VELOCITY GENERATION" kartı ile tanımlanmıştır.

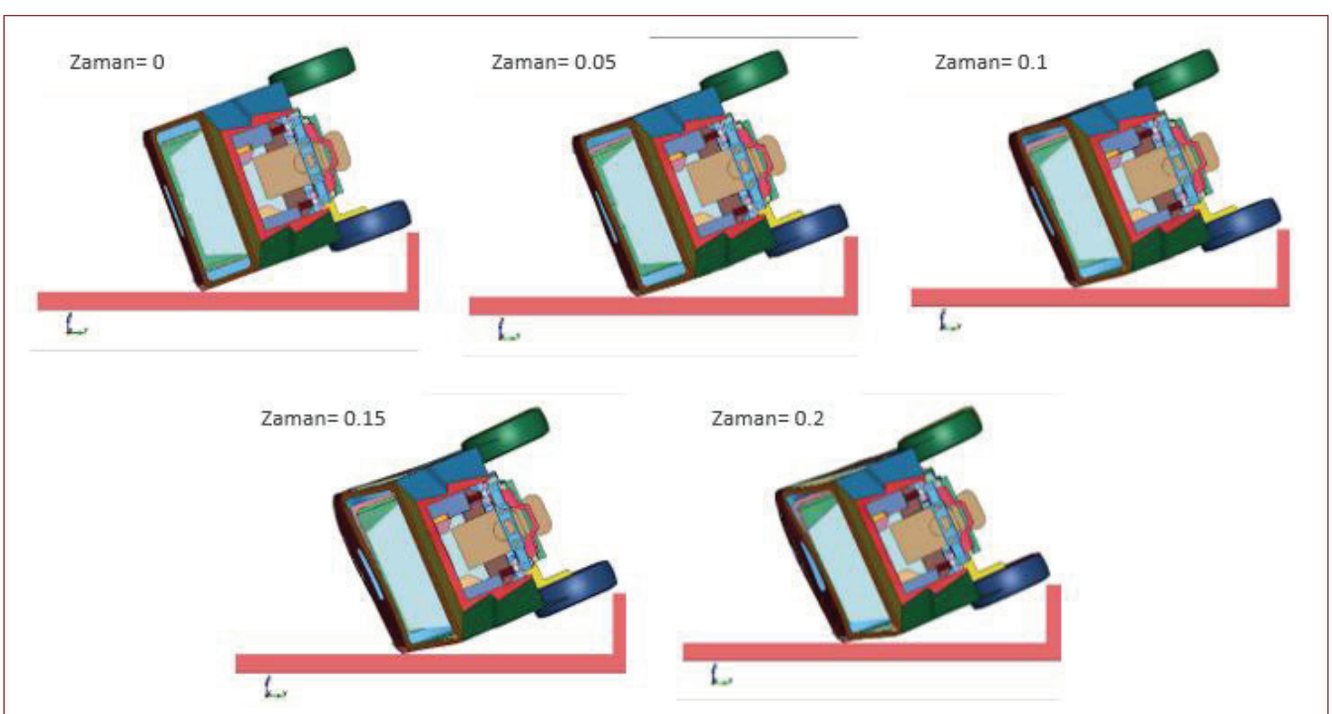
$E = 0.75.M.g.h = I.\omega^2$

Eşitlik 3: Aracın zemine temas ettiği andaki hız formülü

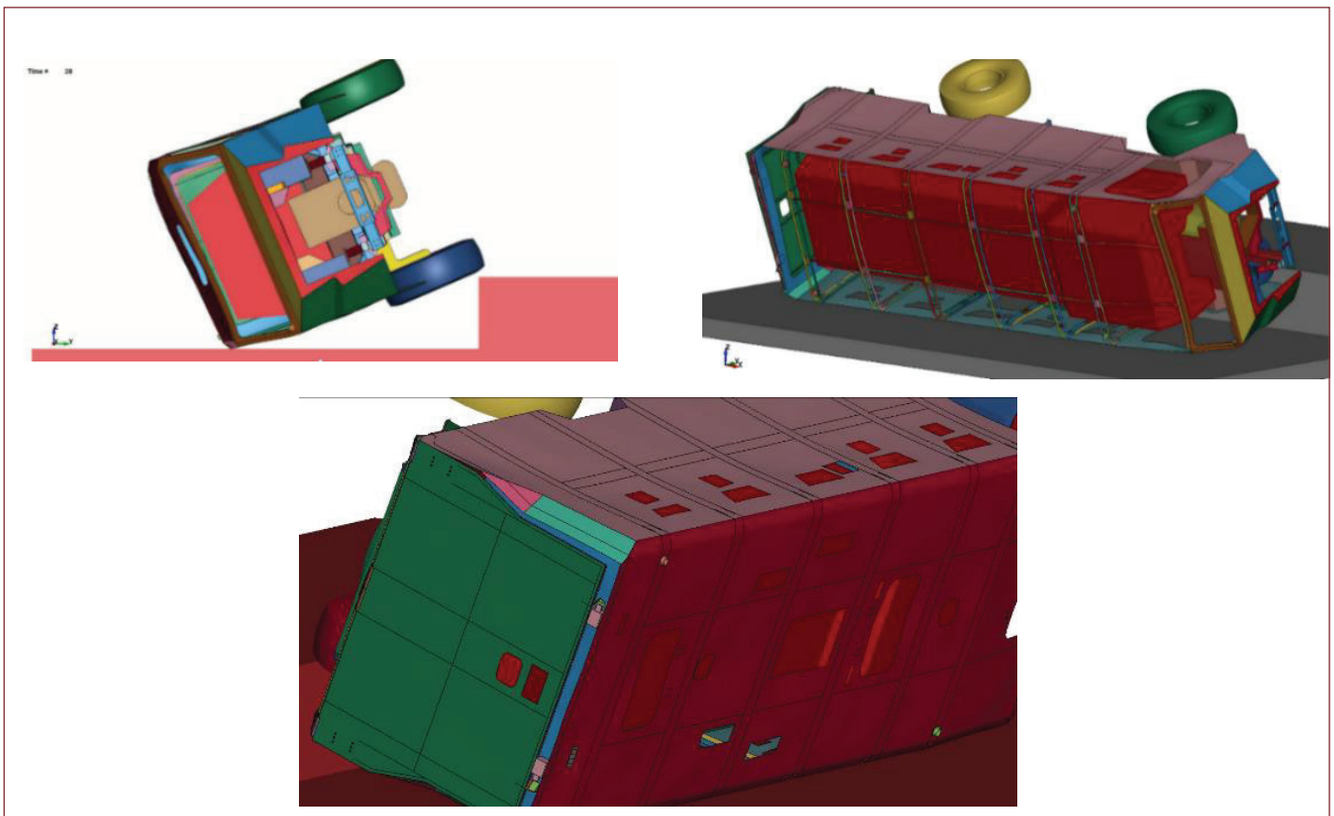
Açık ("explicit") yönteme göre, gerçekleştirilen çözümün doğruluğunun kontrolü için analiz süresi boyunca enerjinin toplamda sabit kalıp kalmadığı gözlemlenmelidir. Bu durumda, analiz başlangıcında elde edilen kinetik enerji azalarak iç enerjiye dönüşür ve toplam enerji ise sabit kalmalıdır. Resim 9'da aracın enerjisinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Enerji değişimi grafiği incelendiğinde kinetik enerji zamanla azalmış, iç enerji artmıştır. Bu süre zarfında ise toplam enerji sabit kalmıştır.

5.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ejder Kunter zırhlı personel taşıyıcı aracının devrilme analizleri sonrasında; gövdenin mekanik olarak bütünlüğünün koruduğu ve taşıdığı personelinin güvenli yaşam alanı içerisine herhangi bir mekanik unsurun ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Devrilme analizleri için uygulanan ilk iterasyon sonrasında araç üzerinde bulunan bazı kapakların ve rampaya ait kilit sistemlerinin devrilme sonrasın-



Resim 10. Aracın Belirli Zaman Adımlarındaki Deformasyon Görselleri



Resim 11. Ejder Kunter Aracı Devrilme Analizi Sonuç Görselleri

da deforme olduğu, aracın sürücü bölmesinde bulunan A kolonunda ortaya çıkan deformasyonun risk yarattığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak ikinci iterasyon ile birlikte, kapı, kapak ve rampa üzerinde bulunan kilit sistemlerinde de iyileştirme ve geliştirme çalışmaları uygulanarak ek önlemler alınmıştır. Ayrıca sürücü bölmesinde bulunan A kolonu üzerinde ek güçlendirmeler yapılmıştır. İkinci iterasyon sonrasında yapılan geliştirme ve iyileştirmeler sonucunda, devrilme sonrası aracın gövdesinin mekanik bütünlüğünde ve yaşam alanı içerisinde riskli herhangi bir durum gözlemlenmemiştir.

6. GELECEK ÇALIŞMALAR

Ejder Kunter aracına devrilme senaryosu sonlu elamanlar analizi, 8 çekirdekli bilgisayar ile yaklaşık 200 saat süren çözüm süresi ile gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışma olarak analiz çözüm süresinin azaltılması adına aracın 1/3 ölçekli modelinin analiz edilmesi ve tam model ile aynı sonuçların daha kısa sürede gerçekleştirilmesi, gerek duyulan ve ürün gamında yer alan diğer hafif zırhlı araçlar için de benzer çalışmaların gerçekleştirilmesi, geliştirilen platformların parametrik simülasyon modellerinin oluşturulması ve çarpışma analizlerinin yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

1. U.S Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, FMVSS-216 Roof Crush Resistance
2. U.S Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, FMVSS-220 Roof Crush Resistance
3. The Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)-Reg66, Uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure
4. Dassault Systèmes CATIA V5 R26, Documentation CATIA V5
5. LS-DYNA, Keyword User's Manual, R13-Vol 1