

BİR ÇOKLU-CİSİM ERKEK KAFA-BOYUN MODELİNİN ÖNDEN ÇARPMAYA VERDİĞİ TEPKİNİN DOĞRULANMASI

Selçuk HİMMETOĞLU^{1, a)}

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

^{a)}s.himmetoglu@hacettepe.edu.tr

Bu bildiriye, ortalama boy ve kiloya sahip bir erkeğin kafa-boyun modeli önden çarpmaya maruz bırakılmıştır ve modelin tepkileri gönüllülerinki ile karşılaştırılmıştır. Bu gönüllü testleri geçmişte Amerika Birleşik Devletleri Deniz Kuvvetleri Biyodinamik Laboratuvar'ında yapılmıştır; insan modelleri ve çarpışma test mankenlerini doğrulamada en çok kullanılan testlerdir. Kafa-boyun sisteminin katılık ve sönümlenme özellikleri gönüllü tepkileriyle uyum sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Kafa-boyun sistemi, omurlar arası eklemlerdeki sanal motorların sağladığı torkların yardımıyla statik dengesini sağlayabilmektedir. Modelin tepkileri sanal motorların devrede olmadığı durum için de incelenmiştir ve gönüllü tepkileriyle karşılaştırılmıştır. Genel olarak model, gönüllü davranışlarıyla iyi uyum göstermektedir ancak kafa kütle merkezinin z yönündeki deplasmanı daha da iyileştirilmeye çalışılabilir.

Anahtar Kelimeler: Kafa-boyun modeli, gönüllü çarpışma testleri, önden çarpma

VALIDATION OF THE FRONTAL IMPACT RESPONSE OF A MULTI-BODY MALE HEAD-NECK MODEL

ABSTRACT

In this paper, a 50th percentile male multi-body head-neck model is subjected to frontal impact loading to validate its response against those of the volunteers. These volunteer tests which had been performed at the Naval Biodynamics Laboratory (NBDL) in the United States, are the most widely used tests to validate human-body models and crash test dummies. The stiffness and damping properties of the head-neck model are calibrated to comply with the volunteer responses. The head-neck model is able to stay in static equilibrium at rest in any posture of the system with the aid of the actuating torques applied at the intervertebral joints by virtual motors. The responses of the model are compared with those of the volunteers with and without these virtual motors. Overall, the model shows good agreement with the volunteers while head centre of gravity z displacement needs further improvement.

Keywords: Head-neck model, volunteer impact tests, frontal impact

1. GİRİŞ

Trafik kazalarında önden çarpmalarda ve aracın ani fren yapması durumunda kafa-boyun sistemi öne doğru eğilir; buna boyun fleksiyonu adı verilir. İnsan modellerinin ve çarpışma test mankenlerinin boyun fleksiyonu hareketinin doğrulanması gerekir. Fiziksel ve sayısal modellerin önden çarpmalardaki davranışının doğrulanmasında en yaygın olarak kullanılan gönüllü testleri 1980'lerin ilk yarısında Amerika Birleşik Devletleri New Orleans'da bulunan Deniz Kuvvetleri Biyodinamik

Laboratuvarı'nda (DKBL) yapılmıştır [1,2]. İnsanların yaralanmasına neden olacak çarpışma testleri yapılamayacağından dolayı, bilgisayar modelleri ve çarpışma test mankenlerinin kullanımı çok önemlidir. Bu bildiriye daha önce arkadan çarpmalar için doğrulanması başarıyla yapılmış bir kafa-boyun modeli [3] önden çarpmalar için de kullanılmıştır. DKBL'de yapılan önden çarpma testlerinde gönüllülerin oturma pozisyonu dikkate alınarak boynun fleksiyon ve ekstansiyon aralıkları, katılığı ve sönümlenme

katsayıları yeniden ayarlanmıştır. Kafa-boyun sisteminin statik dengede durabilmesi özellikle çarpışma öncesi insan duruşunun korunması için gereklidir. Çarpışma test mankenleri test öncesi statik dengede durabilmelidirler. Kafa-boyun modelinin herhangi bir duruşunda statik dengesinin sağlanması için modelde omurlar arasına sanal motorlar konulmuştur. Bu sanal motorlar Lagrange denklemlerinin yardımıyla sistemi statik dengede tutacak torkları hesaplarlar [4].

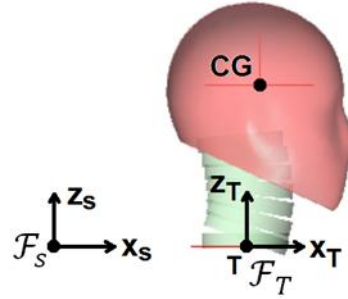
Fiziksel ve sayısal insan modellerinin gönüllü testleriyle doğrulanması kolay değildir, yüksek başarı elde etmek zordur [5-7]. Kas kasılması çarpışma anında insanın hareketini çok etkilemektedir [2-4,6,7]. Bu yüzden kas kasılmalarının hangi kombinasyonda ve nasıl, ne zaman etkin hale getirileceğini bulmak için gönüllü test sonuçlarıyla uyum sağlayacak şekilde optimizasyonlar yapılması gereklidir. Bu çalışmada sunulan kafa-boyun modeli kas kasılmasını, zamana bağlı olarak değişen viskoz sönümleme katsayıları kullanarak gerçekleştirmektedir. Bu açıdan model, çeşitli derecede kas kasılmasını pratik ve etkili bir şekilde modelleyebilmektedir [3,4].

Bu bildiride sunulan kafa-boyun modeli önden çarpma DKBL gönüllü testleri sonuçlarına yakın sonuçlar vermektedir ve özellikle ivme tepkilerini başarılı bir şekilde benzetebilmektedir. Deplasman tepkilerinde bir miktar daha iyileştirme elde etmek mümkün olabilir ve bunların tartışması bildirinin sonuçlar kısmında verilecektir.

2. DKBL GÖNÜLLÜ TESTLERİ

Kafa-boyun modelini doğrulamak için kullanılan Deniz Kuvvetleri Biyodinamik Laboratuvarı (DKBL) gönüllü testlerinde genç erkek denizciler katı bir koltuğa dik olarak oturmuşlardır ve yüksek ivmeli bir hızlandırıcıyla kısa süreli ivmelere maruz bırakılmışlardır. 5 gönüllü ile 9 test yapılmıştır [1]. Gönüllülerin ortalama boyu ve kilosu sırasıyla 169.1 cm ve 67.9 kg'dır. Gönüllülerin boy ve kilosu ortalamalarına çok yakındır. Bu gönüllü testleri ortalama erkek (175 cm ve 75 kg) insan modellerinin ve çarpışma test mankenlerinin (Hybrid III ve THOR gibi) önden çarpmaya karşı tepkilerinin doğrulanmasında kullanılmıştır [2,8]. DKBL testlerinde ivme ölçerler ve fotoğraf işaretleri

kafa-boyun sistemine bağlanmıştır. Çarpışma öncesi gönüllülerin göğsü, kalça bölgesi ve omuzları kemerlerle bağlanmıştır. Kolların savrulmasını engellemek için üst kol ve bilekler de bağlanmıştır. Koltuğa uygulanan çarpışma sinyalinin maksimum ivmesi 15g'dir ve hız değişimi 17 m/s'dir. Şekil 1'de gösterildiği gibi gönüllüler çarpışma öncesi ileriye doğru bakmaktadır. Laboratuvar eksen takımı \mathcal{F}_S olarak adlandırılmıştır. T1 omuruna (göğsün ilk omuru) merkezi T noktasında olan \mathcal{F}_T isimli eksen takımı yerleştirilmiştir. T noktası T1 omurunun gövdesinin en üst ve en ön köşesine yerleştirilmiştir. CG kafanın kütle merkezini göstermektedir. Çarpışma öncesi \mathcal{F}_S ve \mathcal{F}_T eksen takımları birbirine paraleldir.



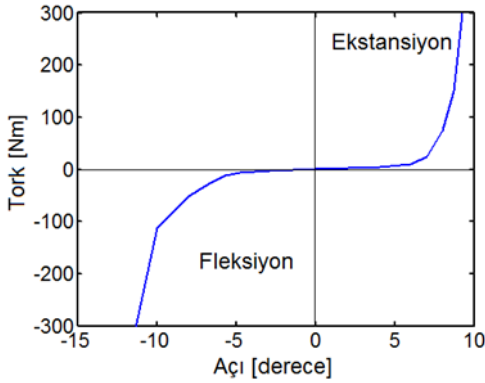
Şekil 1. Test düzeneği ve eksen takımları

3. KAFA-BOYUN MODELİ

Bu bildiride kullanılan ortalama erkek kafa-boyun modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu model ve geometrisi daha önce arkadan çarpma simülasyonları için doğrulanmış ve başarıyla kullanılmıştır [4,9]. Modelin geometrisi ve ataletsel özellikleri [9] numaralı kaynakta verilmiştir. Kafa-boyun modelinde 1 tane kafa, 7 tane boyun omuru ve 1 tane de göğsün en üst omuru (T1) vardır. Kafa-boyun modelinin kaza anında boyun fleksiyon hareketini de doğru olarak benzetebilmesi gerekmektedir. Boyun fleksiyonu önden çarpmalarda veya ani fren yapıldığı durumlarda ortaya çıkar. Arkadan çarpmalarda kafa-boyun geriye gidip koltuk başlığına çarpar ayrıca insan gövdesi koltuk sırtlığına yüklenir; daha sonra başlık ve sırtlık emdiği enerjiyi insana geri verince kafa-boyun ve gövde koltuktan geri teper. Geri tepen gövde emniyet kemeri tarafından durdurulunca kafa-boyunda gene fleksiyon hareketi oluşur.

Kafa-boyun modelinde her iki omur arasında dönel bir eklem vardır. Her bir dönel eklemdeki

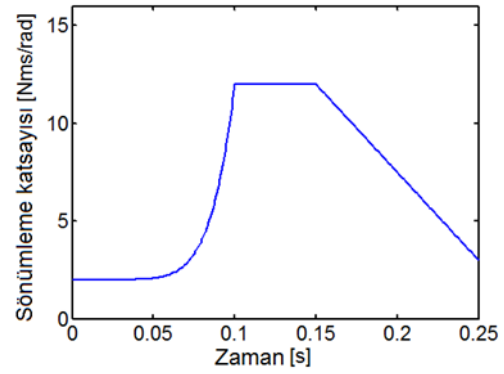
katılık Şekil 2'de tork açı ilişkisi şeklinde verilmiştir. Şekil 2'deki fonksiyon, modelin arkadan çarpma simülasyonları için kullanılan katılık fonksiyonunu [3] baz alarak ve bu çalışmada kullanılan gönüllü testlerinin doğrulanması sonucunda oluşturulmuştur. Arkadan çarpma simülasyonları için doğrulanmış kafa-boyun modelinin duruşu [3], sırtlık açısı 20-25 derece olan otomobil koltuklarında oturan bir insanın tipik vücut duruşuna göre ayarlanmıştır; buna göre boyun fleksiyon hareket aralığı 48 derece, ekstansiyon hareket aralığı ise 100 derece olarak ayarlanmıştır. Bundan farklı olarak DKBL testlerinde gönüllüler dik bir koltuğa oturmuşlardır; kafa ve gövde ayakta duran ve ileriye bakan birinin duruşuna sahiptir. Bu dik duruşa karşılık gelen boyun fleksiyon ve ekstansiyon hareket aralıkları sırasıyla 80 ve 75 derece olarak ayarlanmıştır; bu hareket aralıkları literatürdeki kaynaklara [10] ve DKBL gönüllü testlerinin sonuçlarına dayanarak belirlenmiştir. Hareket aralıkları 20-29 yaş aralığı için geçerlidir.



Şekil 2. Boyun eklemlerinin katılık fonksiyonu

Kafa-boyun sistemindeki yumuşak dokuların viskoelastik özelliklerini, dinamik durumda katılaşmasını ve kasların kasılma etkisini benzetebilmek için boyun omurlarındaki eklemlerde sönümleyiciler kullanılmıştır. Bu 8 adet sönümleyiciye ait viskoz sürtünme katsayısı Şekil 3'de görüldüğü gibi zamana göre değişmektedir. Bu sürtünme katsayısının değişimi çarpışmada etkin olan kasların elektromyografi sinyalleri ile uyumludur; bu yöntem pratiktir ve yazarın daha önceki çalışmalarında da başarıyla uygulanmıştır [3,4,6,9]. DKBL testlerinde gönüllü denizcilerin kas elektromyografi sinyalleri kaydedilmemiştir ama kendilerini çarpmaya

hazırlamak için kaslarını gerdikleri bildirilmiştir fakat ne kadar gerdikleri ölçülmemiştir [1]. Gönüllüler sağlıklı, aktif ve daha önceden boyun travması geçirmemiş genç denizciler oldukları için verdikleri tepki başka yaştaki ortalama erkeklerinki ile aynı olmayacaktır. Başka gönüllülerin kaslarını önceden kasma durumları da farklı olacağı düşünülmektedir daha genel bir toplum kesimine karşılık gelmesi açısından simülasyonlarda refleks kas kasılması olduğu varsayılmıştır. Şekil 3'de görüldüğü gibi, refleks kas kasılmasında kaslar 50 ms'den itibaren hemen kasılmaya başlarlar ve 100ms'den önce tam kasılma durumuna geçerler [2,3].

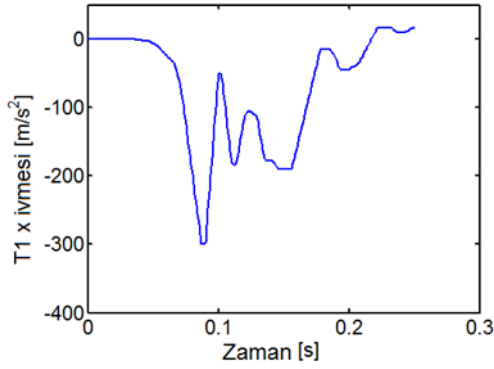


Şekil 3. Kas kasılması sinyali ve sönümleme eğrisi

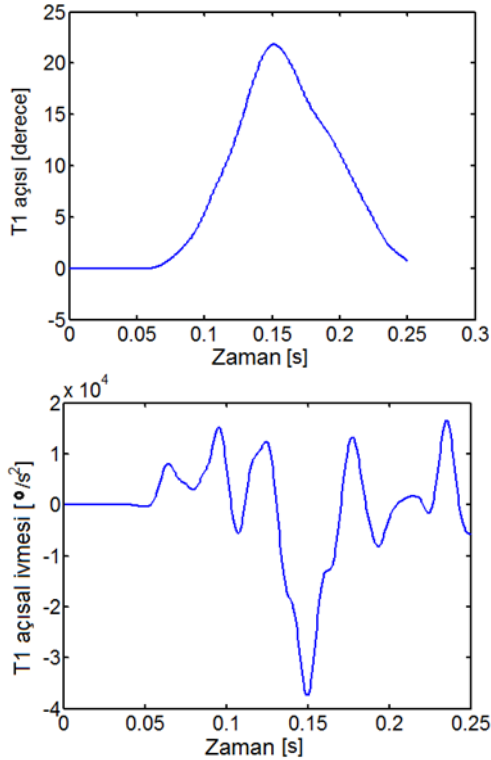
Modelde kafanın kütlesi 4.6 kg'dır ve kafanın döndüğü y eksenindeki atalet momenti 0.0240 kgm²'dir. Testlerde kafaya ivmeölçer ve fotoğraf işaretlerini içeren bir teçhizat takılmıştır; bu kafanın kütlesini, atalet momentini ve kütle merkezini bir miktar değiştirmiştir. Buna göre gönüllü testlerinde teçhizatla birlikte ortalama kafa kütlesi 4.69 kg ve y eksenindeki ortalama atalet momenti 0.0282 kgm² olmuştur [1]. Kafanın kütle merkezi konumu ve ataletsel özellikleri ile ilgili tartışma sonuçlar kısmında verilecektir. Kafa-boyun modelinde sistemin statik dengede kalmasını sağlayan sanal motorlar kullanılmıştır. Her bir omur ekleminde kullanılan bu sanal motorlar Lagrange denklemlerinin yardımıyla sistemi statik dengede tutacak torkları oluştururlar. Bu konuyla ilgili detaylı formülasyon [4] numaralı kaynakta verilmiştir.

4. SİMÜLASYON

DKBL testlerinin simülasyonunu yapmak için kafa-boyun modeline T1 omurunun hareketi girdi olarak verilmiştir. Test sonuçlarına göre T1'in laboratuvar eksen takımına göre z yönündeki hareketi ihmal edilebilir düzeydedir, bu yüzden T1'e laboratuvar eksen takımına göre x yönünde öteleme, y yönünde dönme tanımlanmıştır [1,2]. Şekil 4'de tanımlanan T1'in x yönündeki ivmesi gönüllülerin ortalama tepkisine karşılık gelmektedir [1]. Şekil 5'de T1'in y yönündeki ortalama dönüşü [1] ve bu dönüşe karşılık gelen açısal ivme verilmiştir. Açısal ivme, T1 açısı eğrisine bağ fonksiyonları uydurularak 2. türevin alınmasıyla elde edilmiştir [11].

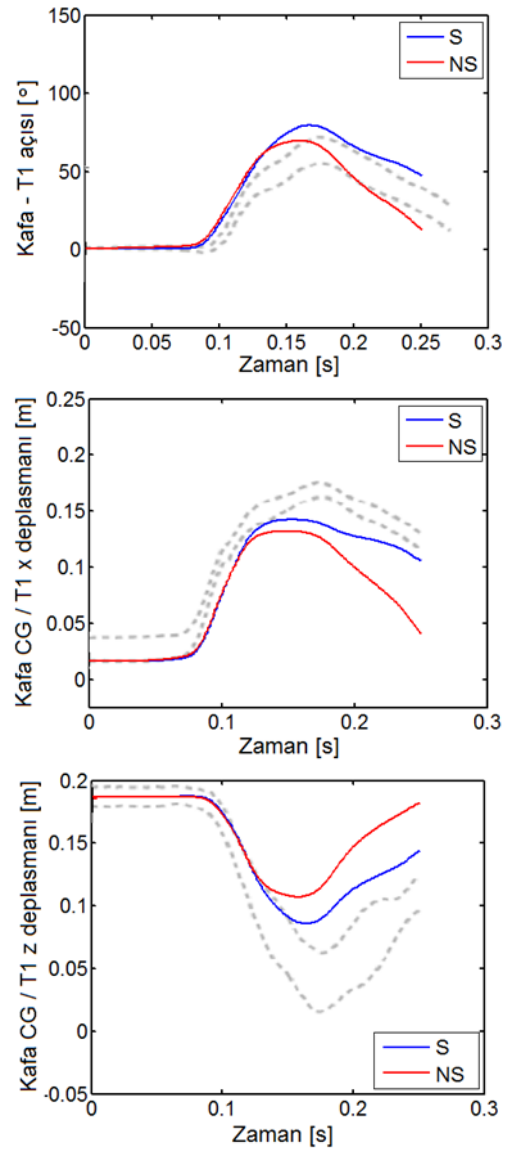


Şekil 4. T1 omurunun öteleme hareketi

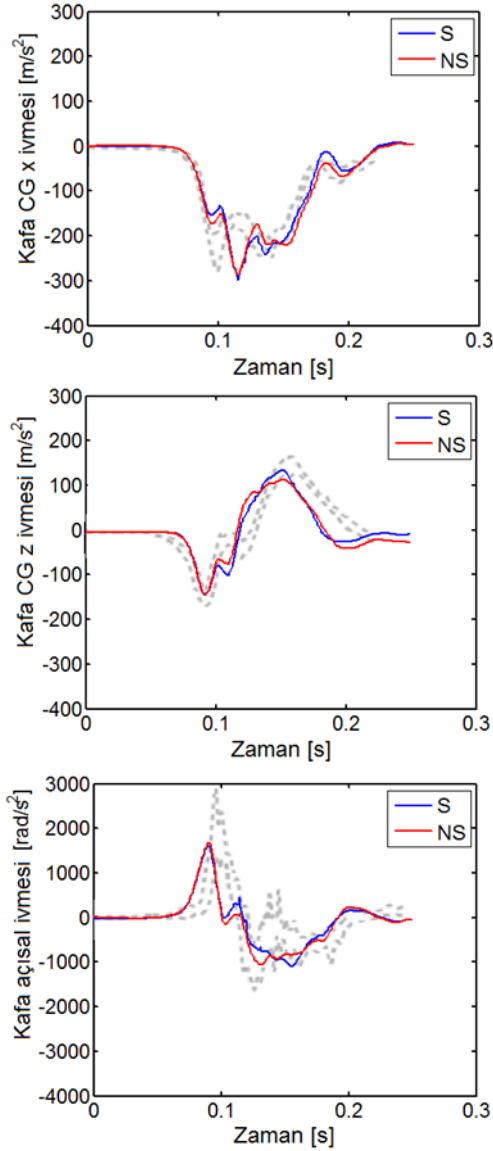


Şekil 5. T1 omurunun açısal hareketi

Sanal motorların statik dengeyi sağlamak için ürettiği torklar, omurlardaki eklemlerin hareket aralığının sonuna yaklaştıkça kademeli olarak azaltılır çünkü artık kafa-boyun sistemini sıkışan omurlararası diskler dengede tutacaktır ve sanal motor torklarına olan ihtiyaç azalacaktır. Şekil 6-7'de kafa-boyun modeli ile gönüllülerin tepkileri karşılaştırılmıştır. Gönüllü tepkileri ortalama tepki ± 1 standart sapma şeklinde gri kesik çizgilerle gösterilmiş koridorlarla ifade edilmiştir [1,2]. Mavi renkli model tepkisi sanal motorların devrede olduğu durumu (S), kırmızı renki model tepkisi ise sanal motorların devrede olmadığı durumu (NS) gösterir.



Şekil 6. Kafa'nın T1'e göre deplasmanları

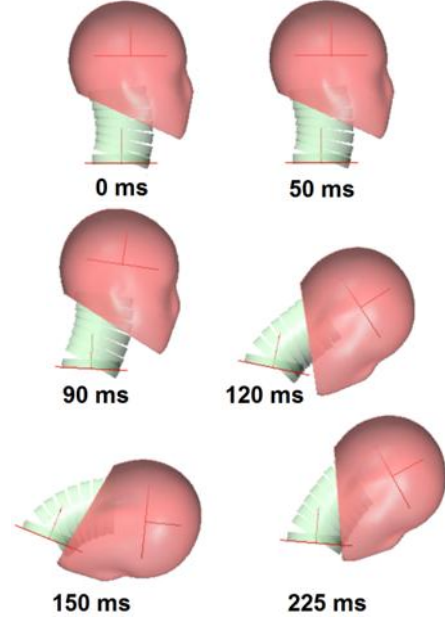


Şekil 7. Kafanın ivmeleri

Şekil 6'daki en üst grafikte kafanın T1'e göre açılma yer değiştirmesi verilmiştir. Şekil 6'da kafa kütle merkezinin (CG) T1 omurunun merkezine (T) göre deplasmanları, T1 omuruna bağlı \mathcal{F}_T eksen takımında ifade edilmiştir. Şekil 7'de kafanın toplam açılma ivmesi ve kafa kütle merkezinin toplam ivmeleri laboratuvar eksen takımında (\mathcal{F}_s) ifade edilmiştir.

Şekil 8'de kafa-boyun modelinin zamana bağlı olarak hareketi simülasyondan alınan resimlerle gösterilmiştir. 0-50 ms arasında kafa-boyun sistemi kendini dengede tutabilmektedir çünkü bu zaman aralığında T1'in ivmeleri sıfırdır. 90 ms civarında boyunun üst kısmında en belirgin ekstansiyon gerçekleşir. Daha sonra 120-150 ms arasında boyun tamamen fleksiyon

durumundadır. 150 ms'den itibaren kafa-boyun geriye doğru seker. Şekil 6'da da görüldüğü gibi kafa T1'e göre 80 dereceye kadar fleksiyon gösterir ve fleksiyon hareket aralığının sınırına gelinir.



Şekil 7. Kafa-boyun modeli simülasyonu

5. SONUÇLAR

Kafa-boyun modelinde statik dengeyi sağlayan sanal motorların olduğu (S) ve olmadığı (NS) her iki durumda da kafa ivmeleri gönüllü koridorları ile uyumludur. Kafa'nın T1'e göre deplasmanlarında sanal motorların etkisi belirginleşir. Sanal motorların olmadığı durumda boyun daha katı davranmaktadır, deplasmanlar azalmaktadır ve boyun fleksiyona uğradıktan sonra geri gelmesi daha çok olmaktadır çünkü model daha çok pasif olarak davranmaktadır. Sanal motorlar statik dengeyi sağladığı için boyundaki katılığı sağlayan yayların etkisini ve sistemin ağırlığını, her omur ekleminin hareket aralığının %80'lik kısmına ulaşana kadar dengeler. Şekil 3'de verilen kas kasılmasının benzetimini yapan sönümleyiciler modelin önden çarpmaya karşı direncinde en etkili olan elemanlardır.

Zaman sıfırda, yani çarpmanın başlangıcında, kafanın kütle merkezinin T1 omurunun merkezine göre konumu, gönüllülere ait koridorlar, sınırlar dışında değildir (Şekil 6). Ancak gönüllü testlerinde kafaya takılan ivmeölçer ve işaretleri taşıyan teçhizatın ağırlığından dolayı kafanın ağırlığı 0.53 kg

artmış ve buna bağlı olarak dönme merkezindeki atalet momenti 0.0075 kgm^2 kadar artmıştır [1]. Deneylerin yapıldığı 1980'lerin başındaki teknolojiden dolayı bu şekilde bir ağırlık değişimi olmuştur. Her ne kadar modeldeki kafa ağırlığı ve atalet momenti deneylerdeki ortalama değerlere yakın olsa da gönüllülerin kafa kütlesi ve kütle merkezi değişimleri ile ilgili bir hassasiyet çalışması yapılması daha iyi sonuçlar verebilir. Bunun dışında farklı kas kasılması sinyalleri ve buna bağlı olarak sönümleyici katsayısı değişimleri üzerinde de bir miktar daha çalışılabilir. Yalnız, kasların baştan sona gergin olması kafanın T1'e göre dönüşünü düşürecek ve kafa kütle merkezinin T1'e göre deplasmanlarını istenmeyecek şekilde düşürecektir.

Kafa kütle merkezinin T1'e göre z yönündeki deplasmanı daha da iyileştirilmeye çalışılabilir. Testlerde T1 omuru bölgesine takılan teçhizat omurgaya sıkı bir şekilde bağlanamamıştır. Bundan dolayı yapılan deplasman hesaplamaları düzeltilmeye çalışılmıştır [1], bu yüzden kafa kütle merkezi deplasmanlarına ait koridorlarda halen bir miktar hata olabilir.

Gönüllü tepkilerini birebir yakalamak zordur. Bunun yanında gönüllü davranışı koridorları, ortalama tepki ± 1 standart sapma uygulanarak elde edilmiştir ve belirtilen koridorların dışında kalan gönüllü tepkileri de mevcuttur [1]. Öncelikle bu bildiriye kafa-boyun modeli bir çarpışma test mankeni formundadır. Gerçek insan anatomisinin birebir kopyası değildir. Görece daha basit bir yapıya sahip olan kafa-boyun modelinin tepkileri endüstride kullanılan Hybrid III ve THOR çarpışma test mankenlerine göre çok daha doğru tepkiler vermektedir [8].

DKBL testlerindeki gönüllülerin boyunlarının çarpma öncesi duruşuna ait detaylı bir bilgi verilmemiştir; omurların merkezlerinden geçen herhangi bir eğri de verilmemiştir. Gönüllülerin boyunlarının uzunlukları da farklıdır [1]. Sadece 5 gönüllü kullanılmıştır ve bu sayı benzer boy ve kilodaki insanların genelini temsil etme konusunda yetersiz olabilir. Bu çalışmada hem önden hem arkadan çarpmalar için kullanılabilir bir kafa-boyun modeli geliştirilmek istenmiştir. Literatürdeki diğer insan modelleri ve çarpışma test mankenleri tasarımlarında olduğu gibi bu bildiriye kafa-boyun modelinin geometrik tasarımı da taktır.

Bu bildiriye sunulan kafa boyun modelinin yeni çarpışma test mankeni tasarımlarına da katkıda bulunması istenmektedir. Modelin hem arkadan hem de önden çarpmalarda kullanılabilir olması literatüre olumlu bir katkıdır.

6. KAYNAKLAR

[1] Thunnissen, J.G.M., Wismans, J.S.H.M., Ewing, C.L., Thomas, D.J. (1995) Human volunteer head-neck response in frontal flexion: a new analysis, *Proceedings of the 39th Stapp Car Crash Conference*, 439-460. SAE Paper 952721.

[2] Horst, van der M.J. (2002). *Human Head Neck Response in Frontal, Lateral and Rear End Impact Loading - Modelling and Validation*, Doktora Tezi, Technische Universiteit Eindhoven, Hollanda.

[3] Himmetoglu, S., Acar, M., Bouazza-Marouf, K., Taylor, A. J. (2009). A Multi-Body Human Model for Rear-Impact Simulation. *Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering*, 223(5), 623-638. DOI: 10.1243/09544070JAUTO985.

[4] Himmetoglu, S. (2022). Integration of muscle tone into a multi-body head-and-neck model for crash applications, *Proceedings of the 26th International Scientific Conference Transport Means*, Kaunas, Litvanya, 27-32.

[5] Davidsson, J., Ono, K., Inami, S., Svensson, M.Y., Lövsund, P. (1999). A comparison between volunteer, BioRID P3 and Hybrid III performance in rear impacts, *Proceedings of the 1999 IRCOBI Conference*, Sitges, İspanya, 165-178.

[6] Şen, F.N., Himmetoglu, S. (2025). A Female Multi-Body Head-and-Neck Model and Validation for Rear Impact Simulations, *Applied Sciences*, 15(12):6519. <https://doi.org/10.3390/app15126519>

[7] Putra, I.P.A., Iraeus, J., Sato, F., Svensson, M.Y., Thomson, R. (2022). Finite Element Human Body Models with Active Reflexive Muscles Suitable for Sex-Based Whiplash Injury Prediction, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10, 968939.

[8] Parent, D., Craig, M., Moorhouse, K. (2017). Biofidelity Evaluation of the THOR and

Hybrid III 50th Percentile Male Frontal Impact Anthropomorphic Test Devices, *Stapp Car Crash Journal*, 61: 227-276.

[9] Himmetoglu, S., Acar, M., Taylor, A. J., Bouazza-Marouf, K. (2007) A Multi-Body Head-and-Neck Model for Simulation of Rear Impact in Cars, *Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering*, 221(5), 527-541. DOI: 10.1243/09544070JAUTO467.

[10] Swinkels, R.A., Swinkels-Meewisse, I.E. (2014). Normal Values for Cervical Range of Motion, *Spine*, 39(5), 362-367.

[11] Himmetoğlu, S. (2025). İnsan hareketi simülasyonlarında deneysel deplasman verisinin işlenmesi, 22. *Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, 3-5 Eylül 2025.