

# İNSAN HAREKETİ SİMÜLASYONLARINDA DENEYSEL DEPLASMAN VERİSİNİN İŞLENMESİ

Selçuk HİMMETOĞLU<sup>1, a)</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Beytepe 06800, ANKARA

<sup>a)</sup>s.himmetoglu@hacettepe.edu.tr

İnsanlarla yapılan deneylerde, gönüllülerin hareketi video işaretleri ile takip edilebilmektedir. Deneysel olarak elde edilen deplasman verisi, insan hareketi simülasyonlarında girdi olarak kullanılabilir. Literatürdeki birçok çalışmada deplasman verisi sunulmuştur ve bunların dinamik simülasyon programlarında kullanılabilmesi için sayısallaştırılması gerekmektedir. Deplasman verisine eğriler uydurularak türevlerinin alınması ve karşılık gelen ivmelerin bulunmasına ihtiyaç vardır. İnsan hareketinin benzetimini doğru yapabilmek için deplasman verisinin dikkatle işlenmesi gerekmektedir. Bu bildiride, arkadan çarpmaya maruz kalan ortalama bir erkeğin kafa-boyun simülasyonu incelenmiştir ve T1 omuru (göğsün ilk omuru) dönüşünün işlenmesi anlatılmıştır. T1 omuru hareketinin girdi olarak verilmesinde kullanılacak çeşitli yöntemler tartışılmıştır ve sonuçlar deneysel olarak elde edilmiş gönüllü verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu bildiride insan hareketi simülasyonlarında girdi olarak kullanılacak verinin spline (bağ) fonksiyonlarıyla etkili bir şekilde tanımlanmasını içeren bir metodoloji tanıtılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İnsan hareketi, eğri uydurma, spline (bağ) fonksiyonu, kafa-boyun

## PROCESSING OF EXPERIMENTAL DISPLACEMENT DATA IN HUMAN MOTION SIMULATION

### ABSTRACT

In human subject experiments, the kinematics of the volunteers can be tracked by using video target markers. Using this experimentally obtained displacement data as an input, human motion simulations can be performed. In the literature, many papers report displacement data from experiments and these need to be digitised so that they can be applied in dynamic simulation softwares. It is required to fit curves to the displacement data in order to derive the corresponding acceleration by differentiation. The processing of the displacement data has to be done carefully to simulate human motion correctly. This paper presents several methods for the processing of T1 (first thoracic vertebra) rotation data in the simulation of the head-neck of an average male subjected to rear impact. These methods are evaluated by performing rear impact simulations including comparison with the experimentally obtained volunteer data. This paper introduces a methodology for the effective use of the spline functions in Matlab to specify input motion in human motion simulations.

**Keywords:** Human motion, curve fitting, spline function, head-neck

### 1. GİRİŞ

İnsan modellerinin deneysel verilerle doğrulanması gerekmektedir. Bunun için dinamik simülasyon yazılımlarında sistemi hareket ettirecek matematiksel fonksiyonlar gereklidir. Bu matematiksel fonksiyonlar deplasman, hız veya ivme girdisi olarak tanımlanabilir. İnsanlarla yapılan deneysel

çalışmalarda insan üzerine yerleştirilmiş ivme ölçerler ve video işaretleri insan hareketinin veya kinematiğinin kayıt edilmesinde kullanılırlar [1,2]. Gönüllüler üzerinde yapılan çarpışma biyomekaniği alanındaki testler etik nedenler dolayısıyla çok sınırlı sayıdadır. Bu sınırlı sayıdaki çalışmalar bu yüzden çok değerlidir. Çarpışma biyomekaniği alanında

yayınlanmış çalışmalarda insan hareketi ivme ölçer veya deplasman verileri şeklinde verilmektedir [1,2]. İnsan modellerinin simülasyonlarında girdi olarak kullanılacak en elverişli fonksiyonlar deneysel ivme verileridir [3-5] çünkü direkt olarak sisteme uygulanan kuvvetlerle ilişkilidirler. Deneysel deplasman verileri ise hızlı kameraların insan üzerine yerleştirilen video işaretlerini takip etmesiyle elde edilir. Deplasman verilerini simülasyonlarda girdi olarak kullanırken çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Öncelikle bu veriler sayısaldir yani analog sinyaller veya fonksiyonlar değildirler. Deplasman verilerinin altında yatan ivme bilgisinin doğru bir şekilde hesaplanması gereklidir. Deplasman verilerine eğri uydurulup türevlerinin alınarak ivme fonksiyonlarının oluşturulması gerekmektedir. İvme fonksiyonlarının daha sonra insan modellerine girdi olarak verilmesi doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

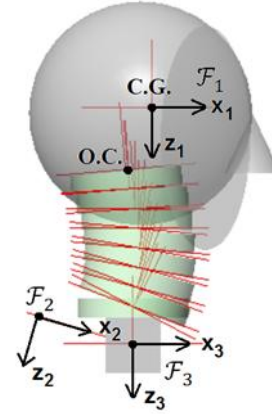
Bu bildiri de deplasman verilerinin ivme verisine dönüştürülmesi 6 farklı yöntemle yapılmıştır. Bu yöntemler karşılaştırılmış, avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır. Eğri uydurma işlemlerinde spline (bağ) fonksiyonlarının kullanılmasının önemi vurgulanmıştır. Örnek olarak bir ortalama erkek kafa-boyun modeli incelenmiştir ve arkadan çarpma simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda insan modelinin davranışı gönüllülerden alınan verilerle doğrulanmıştır.

## 2. KAFA-BOYUN MODELİ

Bu bildiri de yazar tarafından geliştirilen çoklu cisim ortalama erkek kafa-boyun modeli [3] kullanılarak deneysel deplasman verisinin işlenmesi ve simülasyonlarda kullanılması gösterilmiştir. Bunun için Japon Otomobil Araştırma Enstitüsü (JOAE) gönüllü testlerindeki veriler [1] kullanılmıştır ve kafa-boyun modeline bu gönüllü testlerinde uygulanan çarpışma koşulları uygulanmıştır.

Şekil 1'de 175 cm boya ve 75 kg ağırlığa sahip ortalama erkek kafa-boyun modeli ve üzerindeki eksen takımları gösterilmiştir. Bu testlerde ortalama boy ve kiloya sahip erkek gönüllüler katı bir koltuğa oturmuşlardır. Koltuğun başlığı yoktur. Bu koltuk bir kızağa bağlanmıştır ve kızak raylar üzerinde yerçekiminin etkisiyle kayarak zemindeki

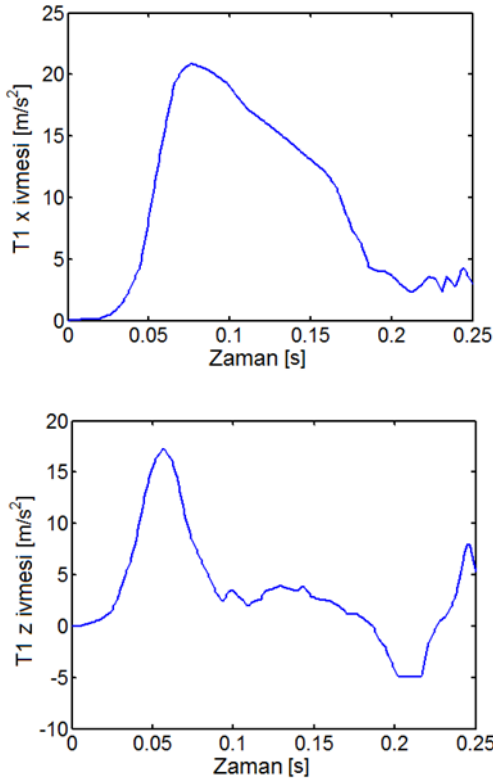
sönümleyiciye 6.2 km/saat ile çarpmaktadır. Kızağa takılan eksen takımının  $x$  eksenine yere paraleldir,  $z$  eksenine ise aşağıya doğru ve yere diktir. Kızak sadece öteleme hareketi yapmaktadır. Kafaya bağlanan  $\mathcal{F}_1$  isimli eksen takımının merkezi kafanın kütle merkezindedir (C.G.). T1 omuru göğsün ilk omurudur. T1'e bağlanan ivme ölçerin eksen takımı  $\mathcal{F}_2$  olarak adlandırılmıştır ve  $z_2$  eksenine T1 spinöz çıkıntısının üzerindeki derinin üstündedir. T1 omurunun anatomik eksen takımı ise  $\mathcal{F}_3$  olarak adlandırılmıştır ve bu eksen takımının merkezi T1 omurunun merkezi olarak alınmıştır. T1 omurunun merkezi, T1 ile göğüs kemiğine yerleştirilen video işaretlerinin orta noktasıdır [1]. Oksipital eklem çıkıntısı, Şekil 1'deki O.C. ile gösterilmiştir ve kafatası ile boyunun birleştiği noktayı gösterir.



Şekil 1. Kafa-boyun modeli ve eksen takımları

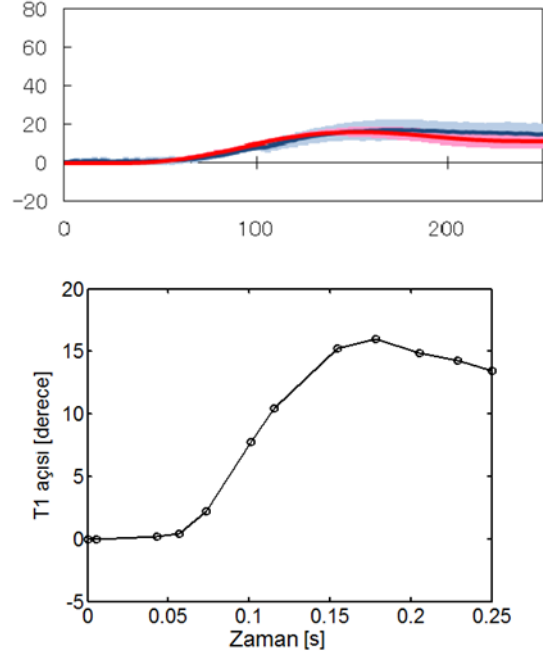
Kafa-boyun modelinin simülasyonunda arkadan çarpma etkisini verebilmek için T1 omurunun hareketi sisteme girdi olarak tanımlanmıştır. T1'e bağlanan ivme ölçerlerin ölçtüğü  $\mathcal{F}_2$  eksen takımında ifade edilen  $x$  ve  $z$  yönündeki ivmeler T1'in öteleme hareketini tanımlamak için kullanılmıştır ve Şekil 2'de verilmiştir. T1'in dönüşü, T1 ile göğüs kemiğine yerleştirilen video işaretlerinin yardımıyla hesaplanmıştır ve açısal yer değiştirme olarak [1] numaralı kaynakta verilmiştir. T1'in dönüşü veya açısı Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de üstteki grafikte erkek gönüllülerin T1 dönüşü mavi renkle gösterilmiştir. Koyu mavi eğri, gönüllü erkeklerin ortalama T1 dönüşünü ifade etmektedir. Mavi bölge ise ortalama T1 dönüşü eğrisine  $\pm 1$  standart sapma uygulanarak elde edilmiştir. Gönüllü erkeklerin ortalama T1 dönüşüne ait koyu mavi renkli eğri GetData Graph Digitizer uygulaması [6] ile sayısallaştırılmıştır ve Şekil 3'deki sayısal veri

elde edilmiştir. Sayısal hale getirilen her veri birer daire şeklinde gösterilmiştir. Sayısal verileri oluştururken her daire arasındaki değişimin yaklaşık olarak doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem deneysel verilerin incelenmesiyle elde edilmiştir. Bu uygulama sayısallaştırılmış verilerin sayısını sınırlamaya yardımcı olmaktadır. Bu sayısal hale getirilen veriler arasında Şekil 3'deki gibi doğrular çizildiğinde T1 açısı değişimi iyi bir şekilde modellenen ancak T1 dönüşünün altında yatan ivme fonksiyonu bu doğrular ile modellenmemelidir, yoksa T1'in açısal ivmesi hareket boyunca sıfır olur.



Şekil 2. T1 omurunun öteleme ivmeleri

T1 omurunun dönüş hareketini kafa-boyun sistemine girdi olarak verebilmek için sayısallaştırılmış T1 açısı verisine eğri uydurulması gerekmektedir. Elde edilen eğrinin türevleri alınarak T1'in açısal ivmesi hesaplanmalıdır. Böylelikle kafa-boyun sistemine girdi olarak T1 açısal ivmesinin verilmesi, T1 omuruna uygulanan toplam momentin gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlayacaktır. Bildirinin bir sonraki kısmında T1 açısı verisine eğri uydurarak T1 açısal ivme fonksiyonlarının elde edilmesi çeşitli yöntemler uygulanarak sağlanacaktır.



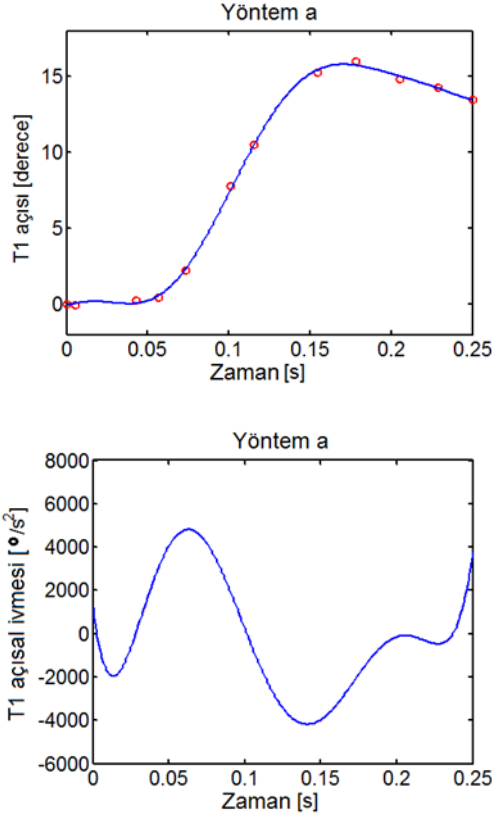
Şekil 3. T1 açısının sayısallaştırılması

### 3. T1 AÇISININ İŞLENMESİ

Şekil 3'de gösterildiği gibi sayısallaştırılan T1 açısına (veya deplasmanına) eğri uydurulması 6 farklı yöntemle yapılmıştır. Uydurulan eğrilerin iki defa türevi alınarak T1'e ait açısal ivmeler elde edilmiştir.

#### 3.1. Yöntem a

Sayısallaştırılan T1 açısına 8. dereceden bir polinom en küçük kareler yöntemiyle uydurulmuştur. Bu işlemi yaparken Matlab'in polyfit ve polyval fonksiyonları kullanılmıştır [7]. Daha sonra Matlab'in poyder komutu 2 defa kullanılarak T1'in açısal ivmesi hesaplanmıştır. Uydurulan deplasman eğrisi ve karşılık gelen açısal ivme Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu tür yüksek dereceli polinomlar uydurulduğunda Matlab yuvarlama hatalarının önemli düzeyde olabileceği uyarısını vermektedir. Bu durumda veriler ile polinom birlikte çizdirilip kontrol edilmelidir. Şekil 4'de görüldüğü gibi polinom, sayısal veri noktaları üzerinden geçmemektedir çünkü regresyon uygulanmıştır ve ölçülen T1 açısında deneysel hatalar olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4. Yöntem a - eğri uydurma ve açısal ivme

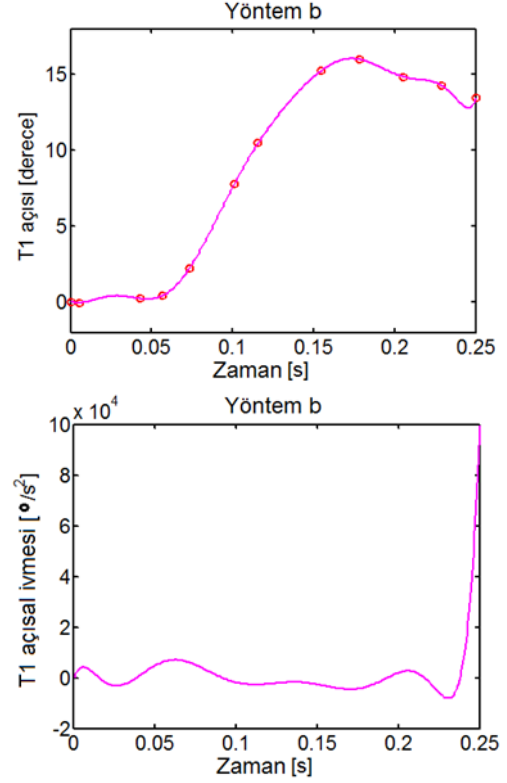
### 3.2. Yöntem b

Sayılaştırılan T1 açısı veri noktalarından hepsinden geçen tek bir polinom Matlab'in polyfit ve polyval komutları kullanılarak uydurulmuştur. Bu işlem bir aradeğerlemedir (interpolasyon) ve uydurulan polinom 11. derecedendir. Matlab bu yüksek dereceli polinom kullanımı için gene yuvarlama hatası konusunda uyarı verir. Özellikle derecesi 3'ten yüksek olan polinomlar veri noktaları arasında yüksek zıplamalar ve dalgalanmalar yapabilmektedir, böylelikle yüksek kesme hatalarına neden olmaktadır. Şekil 5'de görüldüğü gibi T1 açısına uydurulan bu 11. dereceden polinom, başlangıç ve bitiş zaman anlarında veriler arasında bir miktar zıplama oluşturmaktadır. Buna bağlı olarak açısal ivme değerlerinde fiziken mümkün olmayan yüksek miktarlar ortaya çıkabilmektedir. Polinomun 2. türevi Matlab'deki polyder komutunun arka arkaya kullanılmasıyla elde edilir.

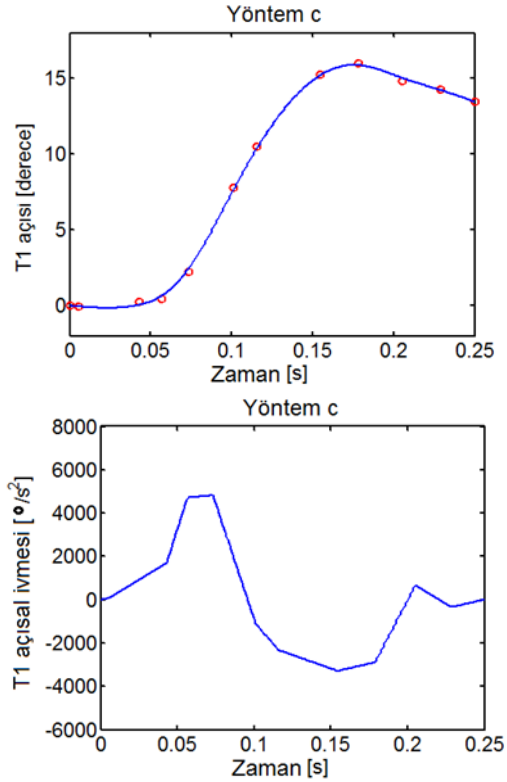
### 3.3. Yöntem c

Sayılaştırılan T1 açısı veri noktalarına yumuşatan bağ fonksiyonları (smoothing spline) uydurulmuştur. Bu bağ fonksiyonları 3.

derecedendir (kübik) ve regresyon bazlı fonksiyonlardır. Matlab'in içerisinde bulunan cftool [7] isimli etkileşimli programı kullanarak bu yumuşatan bağ fonksiyonları uygulanabilir (Şekil 6).



Şekil 5. Yöntem b - eğri uydurma ve açısal ivme

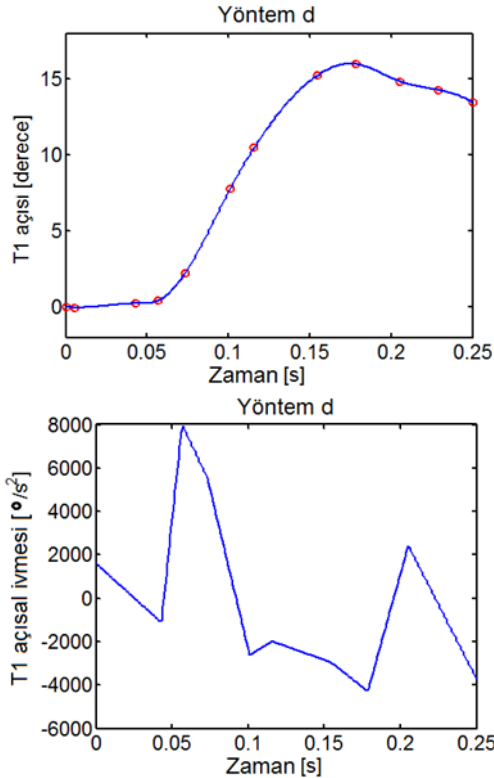


Şekil 6. Yöntem c - eğri uydurma ve açısal ivme

Yumuşatan bağ fonksiyonlarında bir yumuşatma parametresinin girilmesi istenir. Tecrübelerle dayanarak bu parametre için 0.999999 değeri uygun bir değer olarak seçilmiştir. Matlab'in fnder komutu arka arkaya kullanılarak yumuşatan bağ fonksiyonlarının 2. türevleri hesaplanır ve T1 açısai ivmesi elde edilir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, bu yumuşatan bağ fonksiyonlarının başlangıçta ve sonda 2. türevleri sıfır olarak tanımlanmıştır. Herhangi bir insan hareketi uygulamasında başlangıç ve bitiş zamanlarında ivmelerin sıfır olma zorunluluğu yoktur. Uydurulan bu bağ fonksiyonları kübik oldukları için karşılık gelen ivme fonksiyonları 1. derecedendir.

### 3.4. Yöntem d

Sayısallaştırılan T1 açısı veri noktalarından geçen 3. dereceden bağ fonksiyonları oluşturulmuştur (Şekil 7). Bu bağ fonksiyonlarının özelliği baştan ve sonan ikinci düğümlerinin olmayışlarıdır; bu yüzden düğüm olmayan bağ fonksiyonları (not-a-knot spline) olarak adlandırılırlar [7].



Şekil 7. Yöntem d - eğri uydurma ve açısai ivme

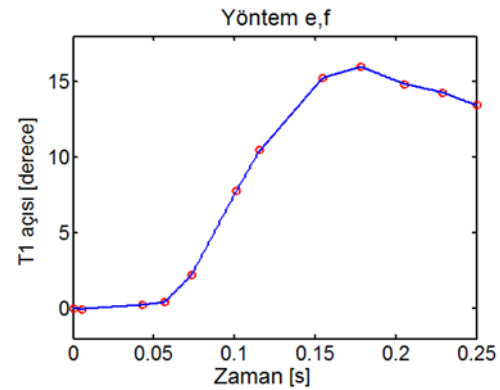
Bu tip bağ fonksiyonlarını oluşturmak için Matlab'in spline ve ppval komutları kullanılmıştır. T1 açısai ivmesini bulmak için

arka arkaya fnder komutu kullanılmıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi başlangıç ve bitiş zamanlarında açısai ivme sıfır değildir ve eğri uydurmaya bağlı olarak kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Düğüm olmayan bağ fonksiyonları oluşturulurken baştan ve sonan ikinci düğümlerdeki 3. türevlerin sürekli olduğu koşulu uygulanmaktadır.

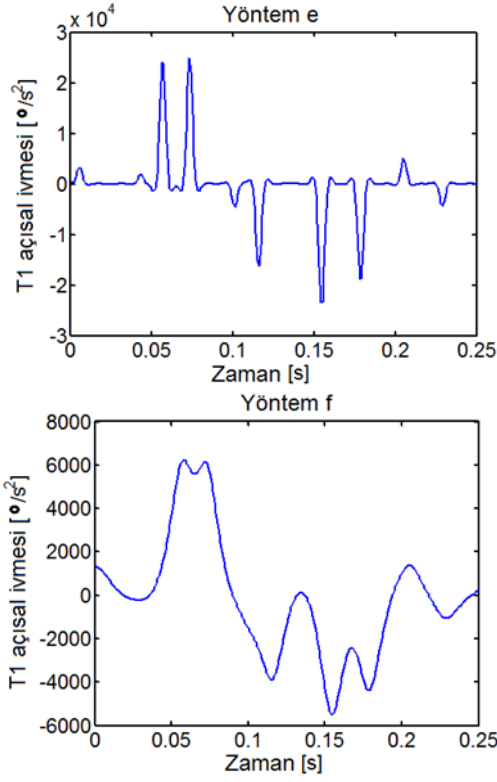
### 3.5. Yöntem e, f

Yöntem e ve f'de Matlab'in interp1 komutu kullanılarak sayısallaştırılmış T1 veri noktaları arasında doğrusal aradeğerleme kullanılarak 1 ms aralıklarla çok sayıda veri üretilmiştir (Şekil 8). Daha sonra bu çok sayıdaki noktalardan geçecek düğüm olmayan bağ fonksiyonları, spline ve ppval komutları yardımıyla oluşturulmuştur. fnder komutunu 2 defa kullanarak bağ fonksiyonlarının türevleri alınmıştır ve açısai ivmeler elde edilmiştir. Elde edilen açısai ivme fonksiyonları gürültülü olduğu için filtreler uygulanmıştır.

Yöntem e'de gürültülü açısai ivme fonksiyonları Otomotiv Mühendisleri Derneği'nin SAE J211-1 filtresinden geçirilmiştir. İvmeler, SAE J211-1 standardına uygun olarak CFC60 tipi 100 Hz'lik kesim frekansı kullanılarak filtrelenmiştir [8]. SAE J211-1 filtresi kullanılarak elde edilmiş ivmeler Şekil 9'da yöntem e olarak verilmiştir. SAE J211-1 filtresinden geçirilmesine rağmen halen gürültülü gözükten ivmelere ise Yöntem f'de yumuşatan bağ fonksiyonları uydurulmuştur. Bu son işlemden gene 0.999999'luk yumuşatma parametresi kullanılmıştır ve elde edilen T1 açısai ivmesi Şekil 9'da yöntem f olarak verilmiştir.



Şekil 8. Yöntem e,f - eğri uydurma

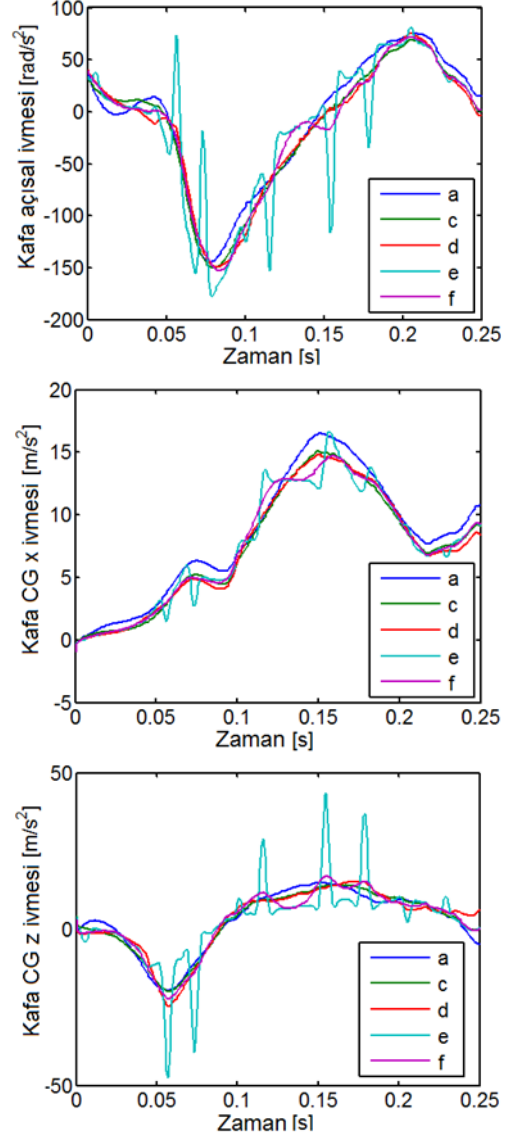


Şekil 9. Yöntem e, f - T1 açısai ivmesi

#### 4. SİMÜLASYONLAR

Bu bölümde, Şekil 1'de verilen kafa-boyun modelinin simülasyon sonuçları verilmiştir. Kafa-boyun modelindeki çarpışma etkisini verebilmek için T1 omurunun hareketi girdi olarak verilmiştir. T1 omurunun öteleme hareketi Şekil 2'deki ivmelerle sağlanmıştır. T1 omurunun dönüşü ise Yöntem a, c, d, e, f'de elde edilen açısai ivmelerle sağlanmıştır. Yöntem b'deki açısai ivme gerçekçi olmadığı için kullanılmamıştır. Simülasyonlar, VisualNastran 4D çoklu cisim dinamiği yazılımıyla gerçekleştirilmiştir.

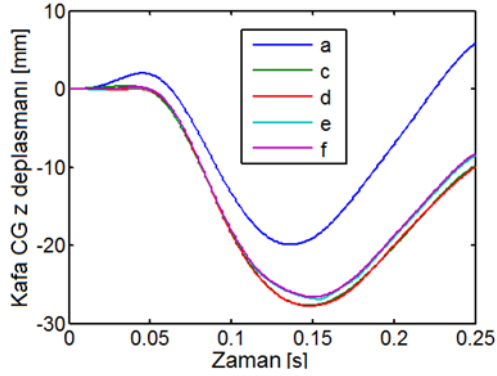
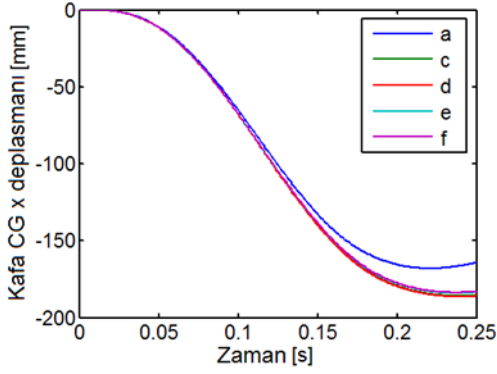
Şekil 10-13'de kafa-boyun modeli sisteminin deplasmanları ve ivmeleri gösterilmiştir. Şekil 10'da kafanın kütle merkezinin (CG) yere göre ivmeleri kafaya bağlanan  $\mathcal{F}_1$  isimli eksen takımında ifade edilmiştir. Şekil 11'de, kafanın kütle merkezinin deplasmanları kızığa göre verilmiştir ve kızak eksen takımında ifade edilmiştir. Şekil 12-13'de kafa ve T1'in açıları kızığa göre verilmiştir ve kızak eksen takımının y eksenini etrafında ifade edilmiştir. Şekil 12'de kafanın T1'e göre açısı ise kızak eksen takımının y eksenini etrafında ifade edilmiştir.



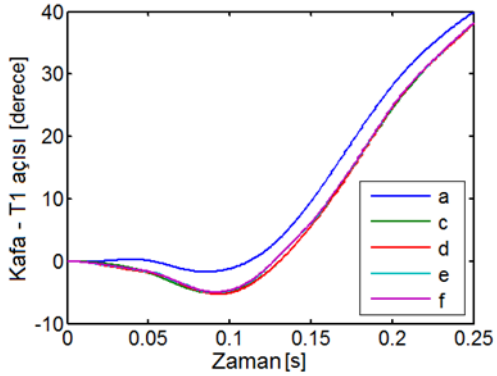
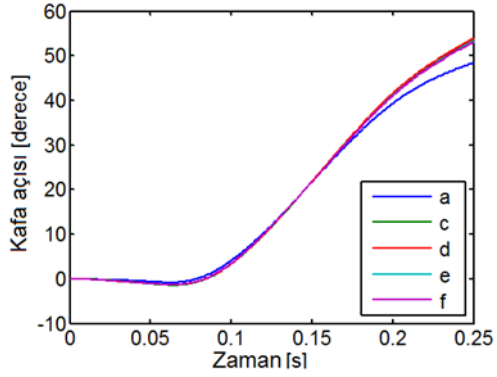
Şekil 10. Kafa kütle merkezi ivmeleri

Kafa ivmelerinde yöntem a diğer yöntemlere göre daha ayırık durmaktadır; yöntem e gürültülüdür; yöntem c-d sonuçları çok benzerdir. Kafa ve kafanın T1'e göre açıları yöntem a, diğer yöntemlere göre daha ayırık durmaktadır; diğer yöntemlere ait açıları ise neredeyse aynıdır. Yöntemler arasındaki en iyi farkı T1 açısı gösterir; sayısallaştırılmış gerçek T1 verisi (d.veri) ile karşılaştırıldığında yöntem a'da hata en yüksek çıkmaktadır; yöntem e-f'de hata en fazla 1.5 derece, yöntem c-d'de hata en fazla 2 derece olmaktadır. Kafa CG x deplasmanında yöntem a ayırıktır, diğer yöntemlerin sonuçları ise neredeyse aynıdır. Kafa CG z deplasmanında yöntem a ayırık durmaktadır; yöntem e-f bir grup, yöntem c-d

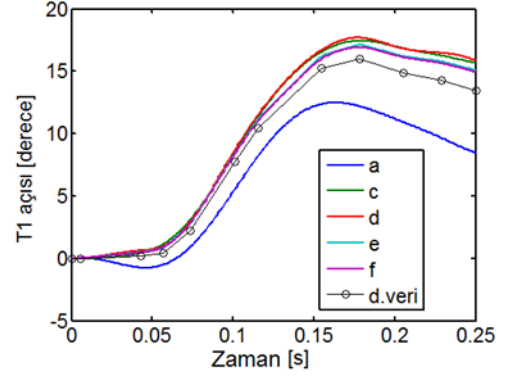
bir grup olup, aralarında en fazla 1 mm'lik fark vardır.



Şekil 11. Kafa kütle merkezi deplasmanları

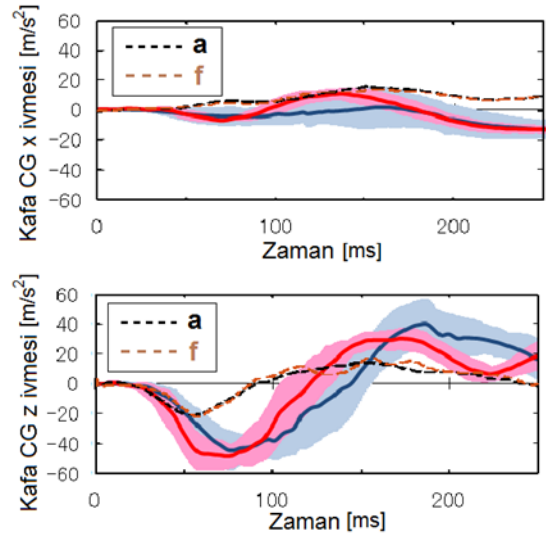


Şekil 12. Kafa - T1 açıları



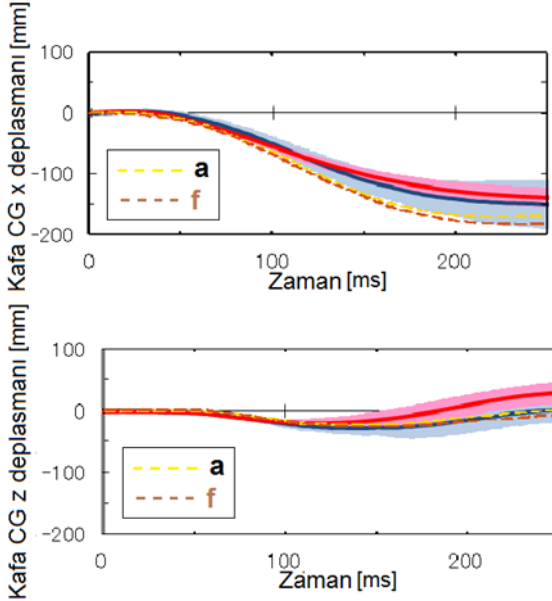
Şekil 13. T1 açısı

Şekil 10-13'de gösterildiği gibi yöntem c-d ile yöntem e-f'nin deplasman davranışları birbirine çok yakındır; yöntem a ise bu iki gruptan ayrık durmaktadır. Bildirinin bu kısmında yöntem a ve yöntem f'ye ait ivme ve deplasman tepkileri erkek gönüllülerin deneysel tepkileriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 14-16'da erkek gönüllülerin tepkilerine ait koridorlar mavi renkle gösterilmiştir. Pembe renkli koridorlar ise kadınlara aittir ve bu çalışmada kullanılmamıştır. Ortalama erkek kafa-boyun modelinin tepkileri kesik çizgilerle ve iki ayrı renkle yöntem a ve f için gösterilmiştir.

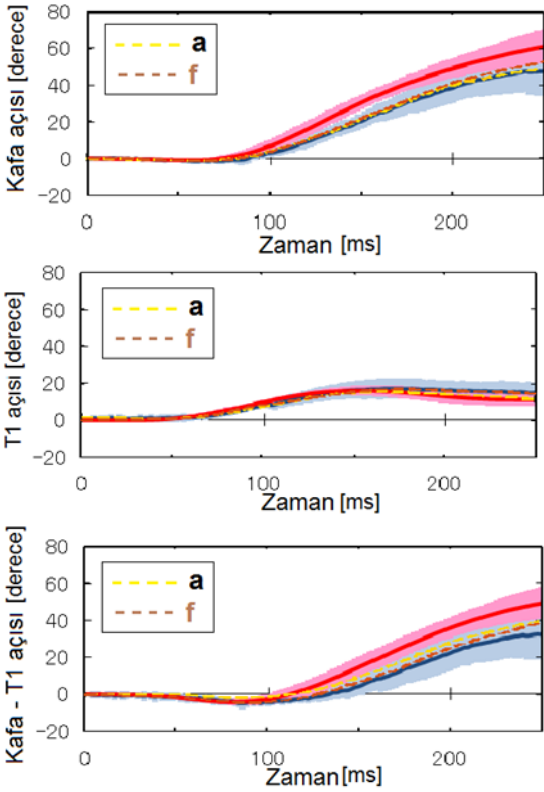


Şekil 14. Kafa ivmeleri - model ve deney sonuçları

Şekil 14'de görüldüğü gibi, kafa kütle merkezi ivmeleri büyüklük olarak deney sonuçlarına yakındır ancak modellerde ivme davranışını birebir yakalamak zordur [3-5].



Şekil 15. Kafa deplasmanları - model ve deney sonuçları



Şekil 16. Kafa ve T1 açıları - model ve deney sonuçları

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada arkadan çarpmaya maruz kalmış gönüllü erkeklerin hareketini benzetmek için ortalama erkek kafa-boyun modelinin T1 omuruna hareket girdisi verilmiştir. Deneysel verilerde T1'in öteleme hareketi ivme cinsinden verilmesine rağmen T1'in dönüşü deplasman cinsinden verilmiştir. Kafa-boyun sistemine T1

bölgesinden etkiyen yükleri doğru bir şekilde tahmin etmek için T1 omurunun dönüşünün de açısal ivme cinsinden bulunması gerekmektedir. T1'in dönüşünden açısal ivmesine geçiş yapabilmek için sayısallaştırılmış T1 açısı versine eğri uydurmak gerekir. Sonra uydurulan eğrinin 2 defa türevinin alınması, gerektiğinde filtrelenmesi ve yumuşatılması gerekmektedir.

T1 omurunun açısal ivmesini bulmada 6 yöntem uygulanmıştır. Sayısallaştırılan deplasman verisine yüksek dereceli tek bir aradeğerleme polinomu uydurmak en kaçınılması gereken yoldur. Sayısallaştırılan deplasman verisine en küçük kareler yöntemi ile bir polinom uydurmak uygun gözükabilir ve bu yöntem a'da uygulanmıştır. Yöntem a uygulanarak elde edilen kafa ve T1 deplasmanları gönüllü tepkilerine ait koridorlarla uyumludur ancak Şekil 13'de görüldüğü gibi T1 açısal ivmesinden T1 açısına simülasyon sonucunda geri dönüldüğünde, sayısallaştırılmış T1 açısına az bir hatayla geri ulaşmak mümkün olmamıştır.

Yöntem c-d birbirine çok yakın sonuçlar veren iki yöntemdir ancak yöntem d, yöntem c'ye göre daha çok tercih edilebilir çünkü ivmelerin başlangıç ve bitiş zamanlarında sıfır olmasını gerektirmez, böylelikle daha genel bir yöntemdir. Yöntem e-f deplasman verileri açısından birbirine çok yakın sonuçlar veren iki yöntemdir ancak yöntem e ivmelerde gürültülü sonuçlar vermektedir. Şekil 13'e bakıldığında sayısallaştırılmış deneysel T1 açısını simülasyon sonucunda en iyi veren yöntemler e ve f'dir. Elde edilen sonuçlara göre en başarılı yöntem, yöntem f olarak gözükmektedir. Yöntem f, gönüllü tepkilerini içeren Şekil 15 ve 16'daki koridorlar ile de uyumludur.

Deplasman verileri bu çalışmada yapıldığı gibi grafiksel yöntemler kullanılarak sayısallaştırılmıştır ancak T1 omurunun zaman sıfırdaki hızını kesin olarak bulmak mümkün değildir. İlk hızlar literatürdeki kaynaklarda bulunan insan deneylerinde de verilmez; sadece ivme ve deplasman verileri sunulur [1,2,5]. Bu yüzden elde edilen ivme eğrilerinden integrasyon sonucu (simülasyon sonucu) deplasman verilerine geri dönüldüğünde Şekil 13'deki gibi hatalar ortaya çıkmaktadır çünkü ilk hız değerleri tam olarak bulunamamaktadır. Zaman sıfır anında T1 açısı grafiğinden yeterli

çözünürlükte veri alınması T1'in ilk hızını daha iyi tahmin etmekte yardımcı olacaktır. Zaman sıfırda gönüllüler çok farklı şekillerde T1 omurlarını hareket ettirmiş olabilirler ve zaman sıfırda ivmelerin sıfır olma zorunluluğu bu yüzden yoktur. Bunun yanında dinamik simülasyonda uygulanan sayısal yöntemlerin de (Runge-Kutta formülasyonları) kesme hataları oluşturacağını unutmamak gerekir ve bu yüzden Şekil 13'de gösterildiği gibi sayısallaştırılmış T1 açısına simülasyon sonucunda aynen ulaşmak mümkün olmayabilir.

Yöntem a, c, d ve f'ye ait T1 açısız ivme grafikleri birbirinden farklı ama çok uzak olmadıkları halde bu yöntemler sonucu elde edilen deplasman ve ivme tepkileri birbirlerine yakındır. T1 açısız ivme fonksiyonları gerçeğe çok yakın bulunmasa bile deplasman tepkilerinde gerçekçi ve az hatalı sonuçlar elde etmek mümkün olabilmektedir [3-5].

Bu bildirideki grafiklerden görülebileceği gibi insan modellerinin deneysel ivme tepkilerini birebir yakalaması zordur. Öncelikle bu bildirideki kafa-boyun modeli bir çarpışma test mankeni formundadır ve insanın hareketini yaklaşık olarak verebilir. İnsan ve modelin deplasmanlarındaki ufak farklar iki defa türev alındığında ivme tepkilerinde daha büyük farklar yaratabilmektedir. Bunun yanında gönüllü davranışı koridorları ortalama tepki  $\pm 1$  standart sapma uygulanarak elde edilmiştir ve belirtilen koridorların dışında kalan gönüllü tepkileri de mevcuttur.

## 6. KAYNAKLAR

[1] Sato, F., Nakajima, T., Ono, K., Svensson, M., Brolin, K., Kaneoka, K. (2014). Dynamic cervical vertebral motion of female and male volunteers and analysis of its interaction with head/neck/torso behavior during low-speed rear

impact, *Proceedings of the International Research Council on Biomechanics of Injury, IRCOBI 2014*, Berlin, Almanya, 227–249.

[2] 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.

[3] Himmetoglu, S., Balci, T., Aydoğan, 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, 273-277.

[4] 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>

[5] 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.

[6] <https://getdata-graph-digitizer.com>. Get Data Graph Digitizer. Erişim: 20 Temmuz 2025.

[7] [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com). Matlab. Erişim: 20 Temmuz 2025.

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