

T.C.  
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# FUTBOL TOPLARININ ÇARPIŞMA DİNAMİKLERİ

Asım TUNÇEL

Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı

Doktora Tezi

ANKARA

2024



T.C.  
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## FUTBOL TOPLARININ ÇARPIŞMA DİNAMİKLERİ

Asım TUNÇEL

Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı

Doktora Tezi

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN

ANKARA

2024

**FUTBOL TOPLARININ ÇARPIŞMA DİNAMİKLERİ****Asım TUNÇEL****Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN**

Bu tez çalışması 31/05/2024 tarihinde jürimiz tarafından “Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı’nda doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

<b>Jüri Başkanı:</b>	Prof. Dr. Sadettin KİRAZCI Orta Doğu Teknik Üniversitesi Eğitim Fakültesi	(imza)
Üye:	Prof. Dr. Erbil HARBİLİ Selçuk Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesi	(imza)
Üye:	Doç. Dr. Şükrü Alpan CİNEMRE Hacettepe Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesi	(imza)
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Arif Mithat AMCA Hacettepe Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesi	(imza)
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ÇELİK Hacettepe Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesi	(imza)

Bu tez, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri tarafından uygun bulunmuştur.

Prof. Dr. Müge YEMİŞÇİ ÖZKAN  
Enstitü Müdürü

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.<sup>(1)</sup>
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren ... ay ertelenmiştir.<sup>(2)</sup>
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

31/05/2024

(imza)

Asım TUNÇEL

<sup>1</sup>“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

(1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

(2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

(3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir \*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan iş birliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir. Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

\* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

## ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığımı beyan ederim.

(imza)

Öğr. Gör. Asım TUNÇEL

## TEŞEKKÜR

Eğitim sürecim boyunca Ben Sweetland'ın “Başarı bir yolculuktur, varış noktası değil” sözü motivasyonumun düştüğü başaramayacağım dediğim anlarda tekrardan ayağa kalkmamı sağladı. Lisans eğitimine geç başlayan 40 yaşında doktora derecesini almaya çalışan, hayallerinin peşinde yorulmadan koşmaya ve yola devam etmeye adanmış bir ömürde karşıma çıkan ve bir şeyleri başarma isteğimi gerçekleştirmemde bana yardımcı olan;

Lisans eğitimimin 2. yılında tanıştığım, akademisyenliği düşünmemi sağlayan, duruşu, hayat felsefesi ve bilime bakışıyla bana ışık tutan, bugünlere gelmemde büyük emekleri olan tez danışmanım, çok değerli öğretmenim Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince beni yalnız bırakmayan, desteklerini esirgemeyen, birçok kez vakitlerinden ayırarak araştırma düzeneğinin kurulmasında, verilerin toplanmasında hep yanımda olan bana fikirler veren, ufkumu açan Dr. Öğr. Üyesi Arif Mithat AMCA'ya ve tüm bunlara ek olarak tez ile ilişkili yayın aşamasında her türlü yardımını esirgemeyen değerli kardeşim Arş. Gör. Dr. Nihat Şükrü ÖZGÖREN'e ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecinde tanıştığım, o süreç içerisinde ve hala bana değer katan, her daim desteğini hissettiğim çok kıymetli hocam Prof. Dr. Erbil HARBİLİ'ye teşekkür ederim.

Bu yolculuğa çıktığımda hep yanımda olduğunu bildiğim ancak çok ihmal ettiğim annem Zülbiye TUNÇEL'e ve yukarıda bir yerden beni izleyip desteklediğini hissettiğim, bildiğim babam Sebahattin TUNÇEL'e bana ışık tuttıkları ve öğretmenliği sevdirdikleri için teşekkür ederim. Bu süreç içerisinde ihmal ettiğim anneme, aileme destek olan abim Hasan TUNÇEL'e varlığı ve desteği için teşekkür ederim. Bitmeyecek olan bu yolculuğumda beni yalnız bırakmayan, sürekli benimle birlikte yürüyen, koşan, düşen, ağlayan, zaman zaman vazgeçtiğimde ve düştüğümde kaldıran ve kaldırmaya devam edecek olan, bana her daim destek olan sevgili eşim Gülşah TUNÇEL'e sabrı ve desteği için teşekkür ederim.

## ÖZET

**Tunçel, A., Futbol Toplarının Çarpışma Dinamikleri, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı, Doktora Tezi, Ankara, 2024.** Bu çalışmanın amacı futbol toplarının çarpışma dinamiklerini belirleyerek çarpışma süresince meydana gelen enerji dağılımını (ÇSED) ortaya koymaktır. Farklı markalara ait top 3 farklı iç basınçta (0.6, 0.8, 1.0 bar) kırılmaz bir cama (1x1x0.007m) 9'ar kez atıldı. Topun camda bıraktığı izi ve çarpışma dinamiklerini belirlemek için iki adet yüksek hızlı kamera (Photron SA3, 120k, Japonya) kullanıldı. Kameralar senkronize edildi ve saniyede 6000Hz görüntü ve 1/10000 pozlama hızında kaydedecek şekilde ayarlandı. Tüm çarpışmalar girinti miktarı (GM), temas yüzey alanını (TYA), tepki kuvveti ve ÇSED belirlemek için Python programlama dili kullanılarak işlendi ve ÇSED yeni bir metodolojik yaklaşım geliştirilerek belirlendi. TYA, GM ve kuvvet sonuçlarının doğruluk kontrolü yapıldı. Verilerin doğruluğu belirlendikten sonra ÇSED hesaplandı. ÇSED sonuçlarının ortalaması (OTK) alınarak elde edilen sonuçların doğruluğu literatürde yer alan formül ile karşılaştırıldı. Kuvvet, TYA ve GM sonuçları, kök ortalama kare hatası ve Spearman sıra korelasyon analizi ile test edildi. ÇSED sonuçlarının doğruluğunu belirlemek için Student T Testi kullanıldı. Toplar arasındaki OTK ve GM'ye göre farklılıklar tek yönlü ANOVA testi ile incelendi. Farklılığın kaynaklandığı gruplar Tukey testi ile analiz edildi. Markaya göre 1.0 bar iç basınçta OTK değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu belirlendi ( $F=3,246$ ,  $p<0,05$ ). GM, 1.0 bar iç basınçta istatistiksel olarak anlamlı derecede farklıydı ( $F=4,838$ ,  $p<0,05$ ). GM ve ÇSED davranışı markalara göre önemli farklılıklar gösterdi. ÇSED, topun kalitesine bağlı, markadan bağımsız olarak daha yüksek iç basınç değerlerinde azalmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, resmi futbol maçlarında top iç basıncının 0,6 ile 1,1 bar arasında değişebileceği dikkate alındığında, yüksek iç basınç değerlerinde top kalitesinin çarpışma dinamikleri açısından kritik bir faktör haline geldiğini ortaya koymuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Futbol, çarpışma dinamiği, toparlanma katsayısı, enerji kaybı, top kalitesi

## ABSTARCT

**Tunçel, A., Collision Dynamics of Soccer Balls, Hacettepe University Graduate School Health Sciences, Sport Sciences and Technology Program Doctor of Philosophy Thesis, Ankara, 2024.** The purpose of this study was to present energy dissipation during the collision (EDDC) by determining the collision dynamics. The soccer balls' that have different brands were kicked nine times toward unbreakable tempered glass (TG) (1x1x0.007m) in three inner pressures (0.6, 0.8, 1.0 bar). The two high-speed cameras (SA3 120K, Japan) were used to determine collision dynamics and ball imprint area on TG. The cameras synchronized and were set to record 6000 Hz in a second and 1/10000 shutter speed. All collision were processed to determine indentation amount (IA), contact surface area (CSA), force and energy dissipation (ED) by using Python programming language, and a new methodological approach was developed for determine EDDC. The accuracy control for CSA, IA and, force results were made. EDDC was calculated after determining the truth of the obtained data. The accuracy of the results by taking average of the EDDC results (MED) was compared with the formula that was placed in the literature. The force results were analysed by Spearman's rank correlation. The CSA, model-experiment IA, and force results were analysed by root mean square error and Spearman's rank correlation. The Student-T Test was used for accuracy determination of EDDC results. The differences among the ball brands to the ED and IA were examined with one-way ANOVA test. Tukey test was used to determine for difference between groups, It was found that the MED was statistically significant different in 1.0 bar inner pressure according to ball brand ( $F=3.246$ ,  $p<0.05$ ). In addition, the IA was statistically significant different in 1.0 bar inner pressure ( $F=4.838$ ,  $p<0.05$ ). IA and EDDC showed significant differences according to the brands. EDDC, depending on the ball quality, decreased at higher inner pressure values regardless of the brand. Consequently, the present study exhibited that ball quality becomes a critical factor in collision dynamics at high inner pressure values, considering that ball inner pressure may vary between 0.6 and 1.0 bar in official soccer matches.

**Keywords:** Soccer, collision dynamics, impact, coefficient of restitution, ball quality, energy dissipation

## İÇİNDEKİLER

ONAY SAYFASI	iii
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	iv
ETİK BEYAN	v
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
ABSTARCT	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
ŞEKİLLER	xv
TABLOLAR	xvii
<b>1. GİRİŞ</b>	1
1.1. Çalışmanın Kapsamı	1
1.2. Çalışmanın Amacı	5
1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımlar	6
1.4. Çalışmanın Önemi	6
<b>2. GENEL BİLGİLER</b>	7
2.1. Futbol	7
2.2. Futbol Topunun Yapısı ve Tarihsel Gelişimi	8
2.3. FIFA Top Kalite Sınıflandırma Programı	10
2.3.1. Fifa Basic	12
2.3.2. Fifa Quality	12
2.3.4. Fifa Quality Pro	12
2.4. Top Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Kalitesi	12

2.5. Çarpışma	13
2.5.1. Futbol Topunun Çarpışma Dinamiği	14
2.5.2. Çarpışmanın Fazları	15
2.5.3. Deformasyon	16
2.5.4. Elastisite Katsayısı	17
2.5.5. Elastisite Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	18
2.5.6. Çarpışma Sırasında Topun Yaptığı İşin Belirlenmesi	19
2.5.7. Sönümlenme Katsayısı	20
2.5.8. Toparlanma Katsayısı	21
2.6. Çarpışmanın Analizi	24
2.6.1. Çarpışmanın Kinetik ve Kinematik Analizi	24
2.6.2. Kuvvet Platformu ile Tepki Kuvvetlerinin Ölçülmesi	25
2.6.3. Görüntü Analizi Yöntemi	25
2.6.4. Python Programlama Dili	27
2.7. Modelleme	29
<b>3. GEREÇ ve YÖNTEM</b>	<b>31</b>
3.1. Topun Çarpışma Davranışını Belirlemek İçin Görüntü Analizi	33
3.1.1. Veri Toplama ve Araştırma Dizaynı	33
3.1.2. Verilerin Sayısallaştırılması ve Filtreleme	36
3.1.3. Top Girinti Miktarının Belirlenmesi	37
3.1.4. Top Temas Yüzey Alanının Yan Kameradan Elde Edilen Verilerden Belirlenmesi	38
3.1.5. Topun Cama Temas Ettiği Yüzey Alanının Belirlenmesi	39
3.1.6. Temas Yüzey Alan Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü	41
3.1.7. Çarpışma Kuvvetin Belirlenmesi	41

3.1.8. Topun Dinamik Modelinin Oluşturulması	42
3.1.9. Top Girinti Miktarı Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü	44
3.2. Kullanılan Görüntü Analizi Yönteminin Doğruluk Kontrolü	44
3.2.1. Verilerin Sayısallaştırılması ve Filtreleme	46
3.2.2. Kuvvetin Belirlenmesi	47
3.2.3. Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Yönteminden Elde Edilen Verilerin İşlenmesi	47
3.2.4. Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Sonuçlarının Uyum Kontrolü	48
3.3. Histeresiz Döngü Alanı Enerji Kaybı ve Enerjetik TK Hesabı	48
3.4. Tüm Çarpışma Süresince Toptaki Enerji Dağılımı (ÇSED) Hesaplanması	49
3.5. Tüm Çarpışma Süresince Toptaki Enerji Dağılımı Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü	51
3.6. İstatistik	51
<b>4. BULGULAR</b>	52
4.1. Top Çarpışma Dinamikleri Sonuçları	52
4.1.1. Ortalama Çarpışma Süre, Hız ve Girinti Bulguları	52
4.1.2. Tüm Çarpışmalara Ait Hızların Histerezis Döngü Grafikleri	57
4.1.3. Görüntü Analizi Kuvvet Sonuçları	58
4.2. Top Girinti Miktarı Sonuçları ve Uyum Analizi Sonuçları	60
4.3. Temas Yüzey Alan Sonuçları ve Uyum Analizi Sonuçları	69
4.4. Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Yöntemi Sonuçları	71
4.5. Enerjetik TK Hesaplaması İçin Histerezis Döngü Alan Sonuçları	74
4.6. Çarpışma Süresince Topun Yaptığı İş ve Elastik Potansiyel Enerji	76
4.7. Çarpışma Süresince Enerji Dağılımı (ÇSED) Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü	77
4.8. İç Basınca ve Markalara Göre OTK Sonuçlarının Karşılaştırılması	78
4.9. İç Basınca Göre Girinti Miktarlarının Karşılaştırılması	79

4.10. Çarpışma Süresince Belirlenen Enerji Dağılımı Sonuçları	80
<b>5. TARTIŞMA</b>	84
5.1. Temas Yüzey Alanı Sonuçları	85
5.2. Model-Deney Girinti Sonuçları	87
5.3. Görüntü Analizi Yöntemi Doğruluk Kontrolü	89
5.4. Toparlanma Katsayısı ve Çarpışma Süresince Enerji Dağılımı Sonuçları	90
5.5. Toplar Arasındaki Farklılıkların Karşılaştırılması	92
<b>6. SONUÇ ve ÖNERİLER</b>	96
6.1. Sonuçlar	96
6.2. Öneriler	97
<b>7. KAYNAKLAR</b>	99
<b>8. EKLER</b>	
<b>Ek-1:</b> Etik Kurul Onayı	
<b>Ek-2:</b> Tez Çalışması İntihal (Orjinallik) Raporu	
<b>Ek-3:</b> Dijital Makbuz	
<b>Ek-4:</b> İstatistiksel Analiz Program Dosyaları	
<b>Ek-5:</b> Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Çözümlemeleri	
<b>Ek-6:</b> Çarpışma Dinamikleri	
<b>Ek-7:</b> Histerezis Döngü Alanları ve Çarpışma Süresince Enerji Dağılımı Hesabı	
<b>Ek-8:</b> Tez ile İlişkili Yayın	
<b>9. ÖZGEÇMİŞ</b>	

## SİMGE VE KISALTMALAR

$\dot{x}$	Doğrusal hız
$\ddot{x}$	Doğrusal ivme
$A$	Alan
<b>BF</b>	Bası fazı
$c$	Sönüm katsayısı
<b>ÇSED</b>	Çarpışma süresince enerji dağılımı
$E$	Elastisite katsayısı
<b>ED</b>	Enerji dağılımı
<b>EPE</b>	elastik potansiyel enerji
<b>F</b>	Kuvvet
<b>FA</b>	İngiliz Futbol Birliği
<b>FIFA</b>	Uluslararası Futbol Federasyonları Birliği
<b>GIY</b>	Görüntü işleme yöntemi
<b>GM</b>	Girinti miktar
<b>GMB<sub>x</sub></b>	Topun geometrik merkezinin yatay eksenindeki konumu
$k$	Yay
<b>L</b>	Topun çapı
<b>L<sub>0</sub></b>	Topun çapı
<b>m</b>	Kütle
$r_b$	Topun yarıçapı
$t$	Zaman
<b>TCX<sub>x</sub></b>	Top temas ettiği anda temperli camda yatay eksenindeki konumu
<b>TF</b>	Toparlanma fazı
<b>TK</b>	Toparlanma katsayısı
<b>TYA</b>	Temas yüzey alanı
<b>u</b>	girinti miktarı
<b>UEFA</b>	Avrupa Futbol Federasyonları Birliği

$u_{maks}$	Maksimum girinti
$x$	Yer değiştirme
$\Delta L$	Topta meydana gelen anlık girinti miktarı
$\sigma$	Stres
$\epsilon$	Gerinim



## ŞEKİLLER

Şekil	Sayfa	
2.1.	16.yy İtalya’da topun şişirilmesi.	8
2.2.	2018 yılına kadar Dünya Kupalarında oynanan futbol topları.	10
2.3.	2022 yılında Katar’da düzenlenen 22. Dünya Kupasında kullanılan toplar.	10
2.4.	(a) ileriye doğru yüksek spin, (b) ileriye doğru düşük spin, (c) spin yok, (d) geriye doğru düşük spin, (e) geriye doğru yüksek spin.	15
2.5.	(a) İlk temas anı, (b) Maksimum deformasyon anı – bası fazı, ilk temas anından maksimum deformasyona kadar olan süreç, c) Temas bitişi ve topun eski şekline dönme anı, toparlanma fazı, maksimum deformasyondan top eski şekline dönene kadar geçen süreç.	16
2.6.	Elastisite katsayısının grafik gösterimi.	18
3.1.	Akış şeması.	32
3.2.	Top temas yüzey alanlarını belirlemek için araştırma alanı dizaynı. YHK, Yüksek hızlı kamera, PC, Bilgisayar	34
3.3.	Kalibrasyon kafesi noktaları.	37
3.5.	Topun girinti miktarının ve temas yüzey alanının belirlenmesi.	38
3.6.	a) Orijinal görüntü b) Canny kenar belirleme algoritması sonrası görüntü c) Temas yüzey alanının belirlenmesi.	40
3.7.	(a) Kütle Yay Damper modeli, (b) Kütle Yay Damper modeli serbest cisim diyagramı.	43
3.8.	Araştırma alanı dizaynı.	46
3.9.	(a) 2 boyutlu yer değiştirme filtreli ve filtresiz veriler, (b) Serbest düşme sayısallaştırma örnek görüntü, (c) Piksel cinsinden filtreli ve filtresi konum verileri.	47
3.10.	Çarpışma süresince histerezis döngüsü.	49
4.1.	Puma marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.	53
4.2.	Adidas marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.	54
4.3.	Uhlsport marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.	55
4.4.	Molten marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.	56
4.5.	Black marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.	57
4.6.	İç basınca göre tüm atış hızları ve ortalama hız histerezis grafikleri.	58
4.7.	Farklı iç basınçlarda tüm topların girinti yüzdesine göre histerezis alanları.	59

4.8.	Puma 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.	61
4.9.	Adidas 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.	62
4.10.	Uhlsport 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.	62
4.11.	Molten 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.	63
4.12.	Black 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.	63
4.13.	Puma 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.	64
4.14.	Adidas 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.	64
4.15.	Uhlsport 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.	65
4.16.	Molten 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.	65
4.17.	Black 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.	66
4.18.	Puma 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.	66
4.19.	Adidas 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.	67
4.20.	Uhlsport 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.	67
4.21.	Molten 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.	68
4.22.	Black 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.	68
4.23.	Top temas yüzey alanında kullanılan iki farklı yöntemde elde edilen sonuçlar için 3 farklı top ve vuruşun grafiği.	69
4.24.	Her iç basınç koşulu için topların cama bıraktıkları iz ve yan kameradan hesaplanan elde edilen temas yüzey alan sonuçlarının ortalama ve standart sapma değerleri.	70
4.25.	Uhlsport 1.0 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.	72
4.26.	Uhlsport 0.8 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.	72
4.27.	Uhlsport 0.6 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.	73
4.28.	Puma 1.0 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.	73
4.29.	Puma 0.8 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.	73
4.30.	Puma 0.6 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.	73
4.31.	Girinti oranına göre histerezis alanlarının ortalama kuvvet grafiği.	76
4.32.	Girinti oranına göre histerezis alanlarının ortalama grafiği.	77
4.33.	Çarpışma süresinde toplarda meydana gelen enerji dağılımları.	81
4.34.	Çarpışma süresince iç basınçlara göre enerji dağılımı.	82

**TABLULAR**

<b>Tablo</b>		<b>Sayfa</b>
<b>2.1.</b>	FIFA Top Kalite Sınıflandırma Programı test sınırlılıkları.	11
<b>3.1.</b>	Farklı markalara ait 5 numara futbol topunun özellikleri.	35
<b>3.2.</b>	Test için seçilen topun üretim özellikleri.	36
<b>3.3.</b>	Kuvvet platformu ve görüntü analizinde kullanılan topun yapısal özellikleri	46
<b>4.1.</b>	Top çarpışma dinamiklerinin ortalama ve standart sapma değerleri.	52
<b>4.2.</b>	Histerezis döngü hesaplama sonuçları.	60
<b>4.3.</b>	Model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.	61
<b>4.4.</b>	İki farklı temas yüzey alanı hesaplamasının karşılaştırma sonuçları.	71
<b>4.5.</b>	Kuvvet platformu (ölçülen) ve deneysel çalışma (kestirilen) sonuçlarının karşılaştırılması.	72
<b>4.6.</b>	Histerezis döngü hesaplama sonuçları.	75
<b>4.7.</b>	Hesaplanan OTK ve enerjetik TK değerlerinin Student T sonuçları.	78
<b>4.8.</b>	Farklı markalara ait topun TK sonuçlarının karşılaştırılması.	79
<b>4.9.</b>	Farklı markalara ait topun iç basınca göre girinti oranlarının karşılaştırılması.	80

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Çalışmanın Kapsamı

Dünya üzerinde 270 milyondan fazla lisanslı sporcusu olan futbol dünyadaki en popüler sporlardan biridir (1-3). İki takım sınırları belirli bir alanda, önceden belirlenmiş kurallar dahilinde birbirlerine skor üstünlüğü kurmaya çalışır. Skor üretmek adına oyuncular aralarında paslaşarak rakip takım kalesine şut çekerler. Genellikle ayak ve kafa ile yapılan bu aksiyonlar sezon boyunca antrenman ve maçlarda yüzlerce kez tekrar eder (4). Pas ve şut aksiyonları topa vurmaya gerektirir ve bu da iki nesnenin (oyuncunun uzuvları ve top) ani bir şekilde doğrudan temasını içerir. Top ve oyuncu arasındaki bu temas çarpışma olarak değerlendirilir. Bu çarpışma topa vuran uzvun hızı, sertliği, top hızı ve iç basıncı gibi parametrelerden etkilenir (5-7). Dolayısıyla topun üretiminde kullanılan malzeme ve topun yapısal özellikleri, çarpışma dinamikleri üzerinde etkili olan faktörler olarak ortaya çıkmaktadır.

Oyunun temel ögesi olan futbol topunun yapısal özellikleri, zaman içerisinde şekillenmiştir. 1855'te küresel deri kaplama yapıda üretilen futbol toplarının bu yapısı 1872'de İngiliz Futbol Federasyonu (FA) tarafından zorunlu hale getirilmiştir (8). Uluslararası Futbol Federasyonu Birliği (FIFA), oyun kurallarında topun ağırlığı (410-450 gr), çevresi (68-70 cm), iç basıncı (0.6 – 1.1 bar) ve yapısal özellikleri (deri veya uygun kaplama malzemesi) FA tarafından belirlenen şekline sadık kalarak belirlemiştir (4, 8). Son yıllarda araştırmacılar topun yapısal özelliklerinin çarpışmada yaptığı etkileri anlamakla ilgilenmiş ve bu sayede çarpışma özelliklerinin belirlenmesinin yaralanmaların önlenmesi (9-11) ve performansın artırılması için faydalı olduğu görülmüştür (4, 7, 12, 13). Bu çalışmaların çoğu, yapılan vuruşlarda (ayak ve kafa) topun özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin neden olduğu çarpışma dinamiklerini incelemiştir (1, 4, 9, 10). Ancak, çarpışma 100 milisaniyeden daha kısa bir sürede gerçekleştiği için top ile uzuv arasındaki etkileşim birkaç çalışmada gösterilmiştir (13, 14). Çarpışmada topta meydana gelen girinti miktarı, etki ettiği kuvvetler, temas sürelerinin incelendiği bu çalışmalar, çarpışmada üretilen kuvvetlerin topun geliş hızına paralel olarak arttığını (6, 13, 15-17), artan bu kuvvetlerin daha fazla top girintisine neden olduğunu ortaya koymuştur (18). Buna ek

olarak, topun iç basıncının maksimum kuvvet ve itme (impulsif) kuvvet değerlerini etkilediği ifade edilmektedir (7). Ayrıca artan top iç basıncı temas süresi ve girinti miktarını azaltır (4, 6, 19). Literatürde belirtilen bu çarpışma özelliklerinin topun viskoelastik malzeme özelliklerinden etkilendiği de belirtilmiştir (4, 6).

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte futbol topları farklı kalite ve özelliklerde üretilmektedir (20). Panel sayısı ve şekli, dikiş yöntemi veya panel yapıştırma yöntemi, üretimde kullanılan malzeme (deri veya kauçuk) top üretiminin önemli özellikleri olarak öne çıkmaktadır. Hangi yöntem ve malzemenin kullanıldığına bağlı olarak bu özellikler topun maliyetini ve kalitesini etkilemektedir (2). FIFA, uluslararası maçlarda kullanılan top kalitesini standartlaştırmak için yedi aşamalı bir test protokolü kullanmaktadır. Bu testler çarpışma dinamikleri açısından büyük önem taşımaktadır ve bazı araştırmalar topun panel sayısı, şekli, dikişli veya dikişsiz yapısı gibi yapısal özelliklerin topun hareket dinamiklerini etkilediğini göstermektedir (21, 22). Dolayısıyla oyunda kullanılan topun kalitesinin çarpışma dinamikleri üzerindeki etkisi oyuncuların aksiyonları üzerinde etkili olabilmektedir (17) ve bir futbol topu oyun sırasında maksimum  $33-35 \text{ ms}^{-1}$  hızlara ulaşabilir (10, 14). Dolayısıyla bu hızlardaki bir topun çarpışmada etki ettiği kuvvetlerin yarattığı stresler oyuncuda bir sarsıntı etkisi oluşturur (23).

Çarpışmanın büyüklüğü ve sarsıntı, futbol topunun üretim malzemesinin kalitesi ve mekanik özelliklerinden etkilenir (6). Çarpışma dinamiği kuvvet, girinti ve temas yüzeyi özelliklerini ve toparlanma katsayısını (TK) içerir. Futbol topu, viskoelastik özelliklerine bağlı olarak çarpışma sırasında enerji kaybeder. TK, çarpışma sırasındaki enerji kaybını (dağılımını) temsil eder. Futbol topunun çarpışma davranışı iki aşamaya ayrılır: Bası fazı ve toparlanma fazı. Bası fazında, futbol topun temas yüzeyinde topun geometrik merkezine doğru girinti oluşturacak şekilde kuvvet uygular. Bu girinti ve kuvvet bir stres oluşturur. Top maksimum girintiye ulaştığında, orijinal şekline dönene kadar toparlanma fazına geçer. Bununla birlikte, çarpışmada bası ve toparlanma fazlarında topun mevcut kinetik enerjisi ısı enerjisine dönüşür. Ancak toparlanma fazında tepki kuvvetinin etkisiyle sürtünme daha azdır ve dolayısıyla toparlanma fazında daha az enerji kaybı meydana gelir (5, 24-26). Buna ek olarak çarpışmanın etkisiyle oluşan stres, çarpışma süresi boyunca topun yapısal

özelliklerine göre bir gerinim oluşturur ve enerji dağılımı futbol topunun yapısal özelliklerine bağlı olarak değişebilir.

Çarpışma dinamiklerini inceleyen çalışmalarda tepki kuvvetleri, girinti miktarı, topun aerodinamik özellikleri sıklıkla rapor edilirken (4, 7, 12, 13, 18, 27), çarpışma boyunca topta meydana gelen enerji dağılımı ve top kalitesinin çarpışma dinamikleri üzerindeki etkisi belirsizliğini korumaktadır. Bu çalışma, farklı markalara ait futbol toplarının çarpışma dinamiklerini belirleyerek tüm çarpışma süresince oluşan enerji dağılımını anlamayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, bu çalışma kapsamında çarpışma sırasında meydana gelen top girinti miktarı ve temas yüzey alanının hesaplanmasını sağlayacak bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Beş ayrı markaya ait, farklı yapısal özelliklerdeki futbol toplarının enerji dağılımlarını hesaplamak için metot geliştirilmiş ve enerji dağılımları çarpışma süresince hesaplanarak toplar arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Toplam 6 bölümden oluşan bu doktora tezinin bölüm içerikleri aşağıdaki gibidir.

Bölüm 2 – GENEL BİLGİLER’de futbol tarihinin kısa bir açıklaması, futbol topunun tarihsel süreçteki gelişimi ve FIFA’nın futbol topu sınıflandırma programının açıklanması, çarpışmanın tanımlanması ve futbol topunun çarpışma dinamiklerinde yer alan parametrelerin açıklamaları yapılmıştır. Kullanılan görüntü işleme yöntemi için kullanılan programlama dili ve bu programlama dilinde yer alan görüntü işleme kütüphanelerinin işleyişleri açıklanmıştır.

Bölüm 3 – GEREÇ ve YÖNTEM’de farklı markalara ait futbol toplarının çarpışma dinamiklerini belirlemek için kurulan araştırma alanının tasarlanma aşamaları anlatıldı. Çarpışma dinamiklerinden girinti miktarı, temas yüzey alanı, enerjetik toparlanma katsayısı, çarpışma süresince tepki kuvvetleri, ÇSED ve OTK değerlerinin nasıl elde edildiği açıklandı. Buna ek olarak görüntü analizi kullanılarak elde edilen bu sonuçların doğruluğunu test etmek için gerçekleştirilen uygulamalar ve uyum kontrolü için yapılan analizler açıklandı. Ayrıca, görüntü analizinden elde edilen tepki kuvvetlerinin doğruluğunu kontrol etmek için tasarlanan araştırma alanı ve verilerin elde edilmesi detaylı şekilde anlatıldı. Sonuçların uyum kontrolü hakkında bilgi verildi. Tüm sonuçların doğruluğu kanıtlandıktan sonra ÇSED sonuçlarının nasıl elde edildiği ve doğruluk kontrolünün nasıl yapıldığı açıklandı.

Bölüm 4 – BULGULAR’da araştırma süresince elde edilen tüm verilere ait istatistiksel veriler tablolarda ortalama ve standart sapma olarak sunuldu. Ayrıca çarpışma dinamiklerini oluşturan verilerin tüm denemelere ait ortalama davranışı sergileyen grafikler sunuldu. Görüntü analizi sonucu elde edilen çarpışma dinamiklerinin ilk işleme aşaması olan yer değiştirme, hız, kuvvet ve ivme grafikleri sunularak veriler hakkında detaylı sunum yapıldı. Sonrasında tüm iç basınç koşulları altında etki eden tepki kuvvetlerinin tüm çarpışma süresince girinti oranına göre histerezis döngü grafikleri sunuldu. Tepki kuvvetlerinin ortalama ve standart sapma değerleri tablo olarak verildi. Tepki kuvvetleri sunulduktan sonra temas yüzey alan sonuçlarının uyum analizi sonuçları tablo ve grafikler halinde sunuldu. Buna ek olarak kütle yay damper modeli oluşturularak elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ait istatistiksel verilerin tablosu ve grafikleri sunuldu. Her iki bulgu ile çarpışma dinamiklerinin parametrelerinden olan girinti miktarının görüntü analizi ile elde edilen sonuçlarının doğruluğu ortaya kondu. Ayrıca ÇSED değerlerini hesaplayabilmek için çarpışmanın her anında tepki kuvvetleri belirlendi. Belirlenen bu tepki kuvvetlerini elde etmek için kullanılan görüntü analiz yönteminin doğruluğunu test etmek için kuvvet platformu kullanılarak tasarlanan araştırma alanından doğrudan ölçülen ve görüntü analizinden kestirilen sonuçların uyum analizleri ve uyum grafikleri sunuldu.

Tüm doğrulama adımlarının uyumlu olduklarına yönelik bulgular grafik ve tablolar halinde sunulduktan sonra geliştirilen yeni yöntem ile ÇSED’yi elde edebilmek için hesaplanan elastik potansiyel enerji (EPE) ve çarpışma süresince topun yaptığı iş sonuçları sunuldu. ÇSED’yi içeren sonuçların doğruluğunu test etmek için Stronge (7)’nin enerjetik TK hesaplaması her top için tüm iç basınç koşullarında yapıldı. Elde edilen sonuçlar bu çalışmada elde edilen ÇSED sonuçlarının ortalama değerleri (OTK) ile karşılaştırıldı ve istatistiksel analiz sonuçları tablo olarak sunuldu. Elde edilen sonuçların doğruluğu ortaya koyduktan sonra farklı toplara ait tüm iç basınç koşulları altındaki enerji dağılımı davranışları grafik olarak sunuldu. Toplar arası karşılaştırmalara ait istatistiksel analizler tablolar halinde sunuldu.

Bölüm 5 – TARTIŞMA’da araştırma sonucunda elde edilen bulgular literatürde yer alan çalışmalardan yararlanılarak tartışılmış, ÇSED’yi elde etmek için kullanılan yöntemi uygulayabilmek ve elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek

için yapılan uygulamalar ve bu uygulamalara ait sonuçlar tartışılmıştır. Enerjetik TK'nın elde edilmesinin öneminden bahsedilmiş, çarpışmada topun davranışının daha anlaşılır ve açıklanabilir olması açısından geliştirilen yöntem ile elde edilen ÇSED sonuçlarının önemi ön plana çıkarılmıştır. Buna ek olarak top üretiminde kullanılan malzemenin kalitesinin çarpışma dinamikleri üzerindeki önemi tartışılmıştır.

Bölüm 6 – SONUÇ ve ÖNERİLER'de araştırma sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenerek, yapılan çıkarımlar ile gelecek çalışmalar için öneriler belirtilmiştir.

## 1.2. Çalışmanın Amacı

Bu araştırmanın amacı futbol toplarının çarpışma dinamiklerini belirleyerek tüm çarpışma süresince topta meydana gelen enerji kaybını ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada yer alan alt amaçlar;

Farklı futbol toplarında çarpışma sırasında meydana gelen girinti miktarlarının belirlenmesi,

Futbol toplarının çarpışma sırasında temas yüzey alanlarının belirlenmesi ve elde edilen sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için yöntem geliştirilmesi,

Futbol toplarının çarpışma sırasında oluşturduğu girinti miktarının uyum kontrolü için kütle yay damper modelinin oluşturulması,

Çarpışma süresi boyunca enerji dağılımı sonuçlarını belirlemek için çarpışmanın her anındaki tepki kuvvet değerlerinin elde edilmesi,

Tepki kuvvetlerinin elde edilmesi için kullanılan görüntü analizi yönteminin doğruluğunun test etmek için kuvvet platformu ve görüntü analizi sonuçlarının karşılaştırılması,

Tüm çarpışma süresince enerji dağılımının belirlenerek farklı markalardaki toplara ait enerji davranışının karşılaştırılması olarak belirlenmiştir.

### **1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Varsayımlar**

Bu araştırmada kullanılan topların çarpışma davranışının analizinde top tek bir yay olarak varsayılmıştır. Çarpışma sırasındaki topta meydana gelen girintinin yayın sıkışması, tekrar eski haline gelmesi de yayın gevşemesi olarak varsayılmıştır. Topun dinamik davranışını ifade eden kütle yay damper sistemi için diferansiyel denklemler 4. Derece Runge-Kutta yöntemi kullanılarak üzülmüştür.

### **1.4. Çalışmanın Önemi**

Futbol topunun çarpışma dinamiklerinden olan TK değeri çarpışmada topta meydana gelen enerji kaybı hakkında bilgi verir. Literatürde tek bir değer olarak ifade edilmektedir. Ancak arpışma tek bir anlık durum değildir. Çok kısa bir sürede gerçekleşen çarpışma süresince topta meydana gelen enerji kaybı devam etmektedir. Bu süre boyunca meydana gelen enerji kaybının belirlenmesi topun çarpışmadaki davranışının açıklanması için önemlidir. Ayrıca topun yapısal özelliklerinden kaynaklanan farklılıkların daha net şekilde temsil edilmesi ve anlaşılması açısından önemlidir. Bu düşünceyle bu araştırma çarpışma dinamiklerinin incelenerek tüm çarpışma süresince meydana gelen enerji kaybı sonuçlarını ortaya koyarak farklı yapısal özelliklere sahip topların çarpışma davranışlarının anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Futbol

Top ile oynanan oyunlar içerisinde en popüler sporlardan birisi olan futbol, 11 kişiden oluşan 2 farklı takımın belirli kurallar dahilinde rakip takıma gol atarak skor üstünlüğü kurmaya çalıştığı bir spordur (28). İlk olarak nerede ve kimler tarafından oynandığı kesin olarak bilinmese de tarihi kalıntılar; Çin, Roma, Yunan, Mısır, Maya ve Sümer medeniyetlerinde oynandığını ortaya koymaktadır (29, 30). Milattan önce (MÖ) 2500 yıllarında Çinli askerlerin eğitim faaliyeti olarak oynadıkları belirtilmektedir. Ayrıca Kaşgarlı Mahmut'un Divan-i Lügat'it Türk kitabının birinci cildinde Türklerin kız ve erkeklerden oluşan karma takımlarda "tepük" adını verdikleri oyunu oynadıkları ve oyunun kurallarının futbol kurallarına çok benzediği bilinmektedir (29). MÖ 206 ve milattan sonra (MS) 220 yılları arasında Çinlilerin oynadığı cuju adında (topa vurma) ismiyle oynanan bir oyun olduğu, daha sonra ise Kore, Japon toplumlarında da kameri adında oynandığı tarihsel kanıtlarla ortaya konmuştur (31). Orta Çağ'dan beri şehirlerde ve köylerde minimum kurallar ile oynanan futbol 19. yy başlarında sanayileşme ve şehirleşmenin etkisiyle artan boş zamanları değerlendiren bir eğlence aracı olmuştur. 1863 yılında İngiltere Futbol Birliği (FA) kurulmasıyla yazılı kurallar konularak oyun içerisindeki şiddetin azaltılması amaçlanmış ve bu uygulama günümüz modern futbolunun başlangıcı olmuştur (28, 31). 1904 yılında kurulan Uluslararası Futbol Federasyonları Birliği (FIFA) ile birlikte uluslararası anlamda futbolda örgütlenmesi gerçekleşmiş ve futbol yaygınlaştırılmaya çalışılmıştır.

FIFA, 21. yy başında yaklaşık 250 milyon futbolcu ve 1.3 milyardan fazla insanın futbolla ilgilendiğini belirtmiştir (28). 2010 yılında düzenlenen Dünya kupasındaki tüm maçları televizyon başında izleyen seyirci sayısının toplam 26 milyardan fazla olduğu FIFA tarafından belirtildi. Bunun yanı sıra 2022 Katar'da düzenlenen Dünya Şampiyonasının Katar ekonomisine 17 milyar dolarlık ekonomik etki yarattığı ve FIFA'nın bu organizasyondan yaklaşık 5 milyar dolar gelir ettiği belirtildi. Futbolun popülaritesinin ve oyuna olan ilginin giderek artması bir temaşa sporu olan futbol oyununun güzelleştirilmesi ve hızlanması için kuralların

değiştirilmesi, futbolcular içinde performans artımı için yeni bilgilerin ortaya konmasını gerektirmiştir. Bu durum yıllardır spor bilimcilerin ilgisini çekmiş ve performans artırımı için antrenman yöntemleri, beslenme, ekipman vb. parametreler ile ilgili araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Oyunun en önemli ekipmanı olan futbol topu da bunların en başında gelmektedir.

## 2.2. Futbol Topunun Yapısı ve Tarihsel Gelişimi

Futbol topunun yapısal özellikleri, tarihsel süreçte kullanılan malzemelerin ve teknolojinin gelişimiyle zaman içerisinde değişiklik göstermiştir. 19. yy başlarında standart bir formu olmayan futbol topu genellikle şişirilmiş hayvan mesanesi veya deriden yapılmaktaydı. Hayvan derisinden yapılan topların içerişine saman ya da kum konulmaktaydı. Esneklik ve ağırlık özellikleri nedeniyle oynanması açısından zorluklar meydana geldiği belirtilmektedir (32, 33).



**Şekil 2.1.** 16.yy İtalya'da topun şişirilmesi (Taylor (32)).

18. yy ortalarında sonralarına kadar olan süreçte kauçuk iç lastiklerin üretilmeye başlaması istenen boyutlarda topların üretilmesine olanak sağlamakla birlikte toplara belirli standartlar getirilmesini kolaylaştırdı (33). Deri ve mesaneden

yapılan topların yerini kauçuk veya lastik malzemelerle kaplanmış toplar aldı. Bu dönemde top şekli daha düzenli hale getirildi. İlk olarak 1855 yılında küre şeklinde yapısından sonra İngiliz Futbol Birliği 1872 yılında bu özelliği zorunlu hale getirdi (34).

1880'lerden itibaren, futbol toplarının dış yüzeyinde genellikle deri kullanılmaya başlandı. Üretimde kullanılan deri malzeme daha dayanıklı, pürüzsüz bir yüzeye ek olarak topun uçuş (aerodinamik) özelliklerinin de iyileşmesini sağladı. 1904 yılında kurulan FIFA tarafından, FA'nın şekline sadık kalarak belirlediği oyun kurallarında topun çevresi, kütlesi, iç basıncı ve yapısal özelliğini (sırasıyla; 68-70cm, 410-450gr, 0.6-1.1 bar, deri ya da uygun kaplama maddesi) netleştirdi (4, 34).

20. yy ortalarından sonra gelişen üretim teknolojileri ile poliüretan (PU), polivinil klorür (PVC) ve termoplast poliüretan (TPU) gibi sentetik malzemeler ile üretilmeye başlanan futbol toplarının kalitesinin daha da artmasını sağlandı. 21. yy başlarında ise artık yenilikçi yaklaşımlar geliştirilerek topun uçuş karakteristiği üzerine gelişimler şekillenmeye başlamıştır. Topların panel sayıları, dikiş ya da panel yapıştırma şekilleri, yüzey yapısı gibi özellikler topun kalitesi için önemli hale gelmeye başladı. Birbirine bağlanan 32 adet 5 kenar panele sahip olan futbol topu yıllar içerisinde gelişen üretim teknolojisi ile 8'li, 12'li, 14'lü paneller kullanılarak üretildi ve bu toplar dünya kupası, olimpiyat oyunları gibi büyük organizasyonlarda kullanıldı (35, 36). 1930'dan 2018'e kadar düzenlenen Dünya Kupalarında kullanılan topların (Şekil 2.2.) evrim süreci ve 2022 Dünya Kupasında kullanılan 2 farklı top (Şekil 2.3.) futbolun en önemli unsuru olan futbol topu üretiminin ve ticari pazarlamasının bir unsuru olarak ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde farklı markalar değişik kullanım amaçları ve kitlelere yönelik çeşitli kalitelerde futbol topları üretmektedir. Hali hazırda 70'ten fazla markanın 2000'den fazla top modeli olduğu FIFA tarafından belirtilmektedir (19). Bu kadar çok üretimin olduğu bir pazarda FIFA yapısal özelliklerini belirlediği futbol toplarının kalitesini kontrol etmek için bir program geliştirmiş ve bu program sayesinde üretilen topların sınıflandırmasını yapmış, bu şekilde de her kesimden insanın ulaşabildiği topların kalitesi hakkında bilgi sahibi olmasını amaçlamıştır.



**Şekil 2.2.** 2018 yılına kadar Dünya Kupalarında oynanan futbol topları (KreedOn Network sitesinden 23.05.2023 tarihinde alındı).



**Şekil 2.3.** 2022 yılında Katar’da düzenlenen 22. Dünya Kupasında kullanılan toplar.

### 2.3. FIFA Top Kalite Sınıflandırma Programı

Oyunun popülaritesi arttıkça, FIFA, üreticilerle birlikte sürekli olarak oyunun ekipman kalitesini iyileştirmekle ilgilenir (37). Oyunun en önemli ekipmanı şüphesiz ki futbol topudur. FIFA maçta yapılan ilk dokunuş ile 90’ıncı dakikadaki son dokunuşta da topun aynı şekilde tepki vermemesinin oyunculara ve izleyicilere haksızlık olacağını düşünmektedir. Bu haksız rekabetin önüne geçmek için 7 aşamalı bir test yaparak futbol toplarını kalitelerine göre sınıflandırmaktadır (19). Bu testte topun ağırlığı, çevresi ve şekli, basınç kaybı, sekmesi, su tutma seviyesi ve dengesi

ölçülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda FIFA PRO QUALITY, FIFA QUALITY ve FIFA BASIC şeklinde 3 farklı kalite sınıflaması yaparak topların üzerine üreticilerin bu ibareleri koymalarını sağlamaktadır (Tablo 2.1.). Böylece FIFA'nın dünya genelinde futbol topu satın alan kişilerin top üzerinde yer alan kalite sınıflamasına bakarak futbol toplarını almalarını amaçlamaktadır. Her bir kalite sınıflandırması, yerel düzeyde en küçük yaş gruplarından FIFA Dünya Kupası'na kadar oyunun farklı seviyelerindeki ihtiyaçlara uygun olarak ürünlerin, teknolojilerin ve oyun yüzeylerinin belirli güvenlik ve performans kriterlerini doğrulamak için tasarlanmıştır. 70'ten fazla lisanslı markanın 2000'den fazla futbol topu modeline kalite sınıflandırması yapan FIFA bu top modellerinin %65 FIFA PRO QUALITY, %22 FIFA QUALITY ve %13'ünün FIFA BASIC sınıflarına ait kalitede toplar olduğunu belirtmektedir (19).

**Tablo 2.1.** FIFA Top Kalite Sınıflandırma Programı test sınırlılıkları.

Test	FIFA QUALITY PRO SIZE 5	FIFA QUALITY SIZE 5	FIFA BASIC SIZE 5	FIFA QUALITY SIZE 4	FIFA BASIC SIZE 4
Çevre (cm)	68.5 – 69.5	68.0 -70.0	68.0 – 70.0	63.5 – 66.0	63.5 – 66.0
Yuvarlaklık maksimum (%)	1.5	1.8	1.8	1.8	1.8
Sekme Yüksekliği (cm)					
20° oda sıcaklığı	135-155	125-155	125-155	110-160	110-160
5°	Min:125	Min:115	Min:115	Min:115	Min:110
3 test sonucunda en düşük ve en yüksek sekme arasındaki fark	Mak:10	Mak:10	Mak:10	Mak:10	Mak:10
Su Emme (%)	10	10	10	10	10
Ağırlık Değerleri (g)	420-445	410-450	410-450	350-390	350-390
Basınç Kaybı (%)	15	20	25	25	25
Şekil ve Boyut					
Çevre (Değişim)	Mak:1.5cm	Mak:1.5cm			
Yuvarlaklık	Max:1.5%	Max:1.5%	-	-	-
Basınç (Değişim)	Max:0.1 bar	Max:0.1 bar			
Dikiş/dalgalanma	Değişim yok	Değişim yok			

### **2.3.1. Fifa Basic**

Bu standart, futbol için temel performans, doğruluk, güvenlik ve dayanıklılık kriterlerini karşılayan ürünleri belirlemek üzere tasarlanmaktadır. Odak noktası, oyunun tüm seviyelerinde kullanımı için satın alınabilir olmasını sağlarken minimum standartlar belirlemektir (19).

### **2.3.2. Fifa Quality**

Bu sınıflandırmada yer alan ürünlerin, oyun yüzeylerinin ve teknolojilerin dayanıklılığını ve güvenliğini FIFA BASIC standardından daha fazla vurgulamaktadır. Temel performans ve doğruluk kriterleri test edilir, ancak asıl odak noktası kapsamlı kullanımı sağlamaktır (19).

### **2.3.4. Fifa Quality Pro**

En üst düzeyde kullanım için tasarlanmış ürünlerin yapısının birinci sınıf performans, doğruluk ve güvenliğe sahip olduğu belirtilmektedir. Bu kalite işaretine sahip ürünler, oyun yüzeyleri ve teknolojiler, optimum performans ve en üst düzeyde kullanım için tasarlanmış toplardır (19).

## **2.4. Top Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Kalitesi**

FIFA kalite programında sınıflandırmış olsa da piyasada kullanılan toplar üretim maliyetleri açısından fiyat politikaları olarak farklılaşmaktadır. Bu farklılık oyunun kalitesi kadar sporcuların sağlığı içinde önemlidir. Futbol maçı sırasında top oldukça yüksek hızlarda oyuncularla temas etmektedir. Bu yüksek hızların kafaya ya da vücuda çarptığında oyuncularda sarsıntı etkisi yarattığı belirtilmektedir (38-40). Bu durum da topun kalitesinin sporcu sağlığı açısından önemli olduğu düşüncesini ortaya çıkarmaktadır. Her ne kadar FIFA tarafından lisanslanmış olsalar dahi farklı markaların ürettiği toplar ticari ve ekonomik etkenlerle kalite açısından farklılaşabilmektedir. Nitekim FIFA'nın 3 farklı sınıflama yaparak topları kategorize etmesi bu düşüncemizi desteklemektedir. Farklılaşan bu topların çarpışmada etki edebileceği stresler düşünüldüğünde bu topların çarpışma dinamiklerinin anlaşılmasını önemli hale getirmektedir. Bu sebeple farklı topların çarpışma dinamiklerinin

anlaşılması ve çarpışma sırasında yapısal özelliklerinden kaynaklanan enerji dağılım davranışlarını anlamak bu araştırmanın odak noktası olmuştur.

Gelişen teknoloji ile birlikte topların üretiminde kullanılan malzemeler ve kaliteleri farklılaşmaktadır. Top üretiminde kullanılan malzeme ve tekniğe göre topun maliyeti artarken, kullanım ömrü de malzeme kalitesine göre değişmektedir. Son yıllarda topların panellerinin yapışmasında termal ısı yöntemi yaygın olarak kullanırken bu yönteme ek olarak el yapımı ve makine dikişi olarak da üretilmektedirler. Dayanıklılık, su emilimi, aerodinamik özellikler açısından termal ısı ile üretilen topların daha kaliteli olduğu belirtilmektedir. Ancak maliyet açısından ise diğer yöntemlerle üretilen toplara nazaran daha pahalıdırlar (11). Topun yapıştırılması kadar iç mesanenin dayanıklılığı ve kalitesi de önemlidir. Son yıllarda toplar yaygın olarak lateks, butil ve sentetik lastikten üretilmektedir. Dayanıklılık ve kullanım açısından en iyisinin lateks iç mesaneler olduğu ancak maliyet açısından ise diğer malzemelerden farklı olduğu belirtilmektedir (41). Kullanılan malzemenin topun kalitesini etkilediği literatür bilgisiyle desteklenmektedir. Dolayısıyla topun kalitesinin çarpışma sırasındaki davranışının belirlenerek çarpışma dinamikleri üzerinde etkisinin anlaşılması önemli hale gelmektedir.

## 2.5. Çarpışma

Futbol topu bir oyun aracı olsa da oyuncu ve top iki farklı nesne olarak çarpışmanın unsurlarıdır. Çarpışma, iki farklı nesnenin etkileşimleri sonucu temas anlarında üzerlerinde anlık ya da sonsuz değişimler meydana getiren fiziksel bir olay olarak tanımlanır (7). Çarpışma, nesnelere hızlarını, momentumlarını ve enerjilerini değiştirirken, çarpışmanın türüne ve koşullarına bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabilir (5, 7). Stronge (7), iki nesnenin çarpışmasını doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere iki terminolojiye ayırmıştır. Doğrusal çarpışmada çarpışan nesnelere temas ya da çarpışma noktaları kütle merkezlerinden geçen bir doğru oluşturduğu, doğrusal olmayan çarpışmalarda ise en az bir nesnenin kütle merkezlerinin dışında olması olarak ifade etmiştir. Buna ek olarak çarpışan nesnelere kütle, hızı, çarpışma açısı ve temas kuvveti gibi faktörler çarpışma sonuçlarını tahmin etmeye yardımcı olur. Bu tahminler nesnelere güvenliği ve etkileşimlerinin anlaşılmasına yardımcı

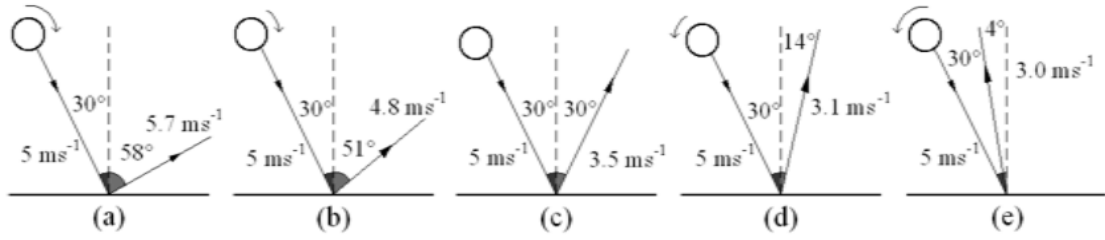
olurken, çarpışmaların sonuçlarını tahmin ederek tasarım ve güvenlik önlemlerinin geliştirilmesine olanak tanır (7, 42).

Futbolda çarpışma analizleri oyuncuların top ile yaptığı aksiyonlarda meydana gelen etkilerin incelenmesi için sıklıkla çalışılmaktadır. Özellikle son yıllarda kafa vuruşlarında meydana gelen çarpışmanın sporcular üzerinde bıraktığı etki araştırmacıların ilgisini çekmiştir (9, 34, 43-46). Futbolda yapılan teknik vuruşların çarpışmanın etkisini azalttığı raporlanmıştır (47), ancak bazen top kontrolsüz bir şekilde de oyunculara çarpabilmektedir. Bölüm 2.2.'de anlatıldığı üzere futbol toplarının yapısı farklılaşmaktadır ve ortaya çıkan bu yapısal farklılıklarının çarpışma üzerinde etkisinin anlaşılması farklı özelliklere sahip topların çarpışmadaki davranışlarının anlaşılmasına imkan sağlayacaktır.

### **2.5.1. Futbol Topunun Çarpışma Dinamiği**

Spor karşılaşmalarında kullanılan toplar oyuncunun ayağı, vücudu, zemin ya da başka bir nesneyle çarpışarak oyun içerisinde yüzlerce darbeye maruz kalır (48, 49). Bu darbelerin oluşturduğu dinamik, topun bir nesneyle temas ettiğinde nasıl davrandığını ifade eder (50). Topun bu davranışının açıklanması, topun özelliklerinin tanımlanması kadar oyuncular üzerinde bıraktığı etkiyi anlamak içinde önemlidir.

Stronge (7) çarpışan nesnelere hız ve kuvvetlerinin çarpışmada önemli parametreler olduğunu ifade eder. Dolayısıyla topun çarpışma öncesi geliş açısı, hızı ve sahip olduğu dönme (spin), çarpışma açısından önemli hale gelmektedir (47, 51). Topun çarpışma öncesinde sahip olduğu bu özellikler temas süresince kaymaya neden olacağı, dolayısıyla topun çarpma davranışının doğrusal olmayan çarpışma olarak değerlendirilmesi gerektiği ortaya konmaktadır. Bu bilgiye ek olarak topun çarpışma öncesi davranışı kadar çarpışma sonrası davranışı da oldukça önemlidir. Çarpışma öncesinde dönüye sahip toplar, sahip oldukları dönmenin (spinin) yönü ve büyüklüğüne göre geliş açısına göre farklı çıkış açıları ve geliş hızlarından farklı çıkış hızları sergilemektedirler (47, 48). Bu bilgi Stronge (7)'nin bilgisini doğrulamaktadır.



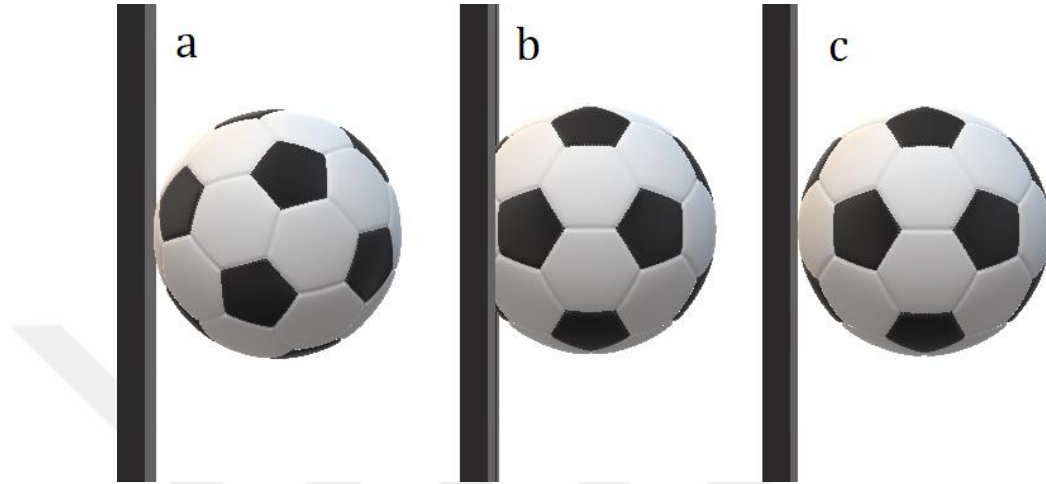
**Şekil 2.4.** (a) ileriye doğru yüksek spin, (b) ileriye doğru düşük spin, (c) spin yok, (d) geriye doğru düşük spin, (e) geriye doğru yüksek spin. (Collins ((47)) araştırmasından revize edilmiştir).

Oyun içerisinde topun bir cisimle çarpışma süresi yaklaşık olarak 0.01 saniyeden daha kısa sürede gerçekleşir (50). Bölüm 2.2’de anlatılan yapısı gereği bir iç mesanenin çevresini çeşitli malzemelerle kaplandıktan sonra iç mesanesi hava ile doldurulan topun çarpışmadaki davranışı viskoelastik bir davranış olarak ortaya konmaktadır (49). Viskozite, bir malzemenin gerilim altında deformasyona karşı direncini ifade ederken, esneklik, uygulanan kuvvet sonucu malzemede meydana gelen şekil değişikliğinin kuvvet kaldırıldığında eski şekline dönmesi olarak ifade edilir (52). Çarpışma sırasında topta, diğer cisme temas eden yüzeyinde şekil değişikliği meydana gelir ve bu şekil değişikliği topun viskozitesi ile ilgilidir. Bir futbol topunun viskoelastik özellikleri, nasıl sektirdiğini ve pas ya da şut benzeri vuruş yapıldığında veya kafaya çarptığında nasıl hissettirdiğini etkiler (4, 41, 47, 49). Dolayısıyla bir maçta yaklaşık 2.000 darbeye maruz kalan futbol topu yüksek düzeyde performans tutarlılığı ve tek tip davranış sergileyebilen, oyun içerisinde maruz kaldığı yüklere dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Nitekim etkili bir tasarım için de ekipman üreticilerinin, oyunu temsil eden dinamik yük koşulları altında topların mekanik darbe özelliklerini anlamaları gerekir (6, 53). Ayrıca üretilen topların üretim kalitesinin çarpışma karakteristiğini üzerindeki etkisinin anlaşılması üretim tekniklerinin iyileştirilmesine yardımcı olabilir. Bu doğrultuda da topun çarpışma dinamikleri için çarpışmanın fazları, deformasyon, girinti, toparlanma katsayısı, esneme özelliği, sönüm katsayısı gibi çarpışma özelliklerinin anlaşılması gerekmektedir.

### 2.5.2. Çarpışmanın Fazları

Çarpışma süresince topun temas yüzeyinde şekil değişikliği topun hızından kaynaklı ivmesinden dolayı bir bası etkisi yaratır ve topun temas ettiği yüzeye doğru

deforme olmasına neden olur. Topta oluşan deformasyon maksimuma ulaşıncaya kadar olan evreye bası evresi denir. Maksimum deformasyona ulaşıttan sonra topta oluşan şekil değişikliğinin eski haline gelmesi için geçen evreye de toparlanma evresi denilmektedir (5, 7, 54).



**Şekil 2.5.** (a) İlk temas anı, (b) Maksimum deformasyon anı – bası fazı, ilk temas anından maksimum deformasyona kadar olan süreç, c) Temas bitişi ve topun eski şekline dönme anı, toparlanma fazı, maksimum deformasyondan top eski şekline dönene kadar geçen süreç.

### 2.5.3. Deformasyon

Topun herhangi bir objeye çarpmasıyla birlikte ortaya çıkan kuvvetler neticesinde temasın ilk anından itibaren topun yapısal özelliklerinden (esneklik, TK, iç basınç vb.) kaynaklı temas yüzeyinde geometrik kütle merkezine doğru şekil değişikliği topun çapına doğru girinti oluşturur. Bu girinti topta deformasyon meydana getirir. Meydana gelen bu deformasyon sonucu topun geometrik kütle merkezine doğru bir girinti oluşur ve bu girinti sonuçları belirlenerek çarpışmanın etkisi anlaşılmaya çalışılmaktadır (13, 27, 55).

Topun geliş hızı arttıkça meydana gelen deformasyonun miktarı artmaktadır. Ancak iç basınç arttığında deformasyon miktarı azalır. Dolayısıyla topun iç basınç özelliği topun deformasyonunda önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Çarpışma sırasında topun iç basıncı topun sertliğini ortaya koyan ana parametredir ve oluşan deformasyon üzerinde etkilidir (56-58). Dışardan bir kuvvet etki etmediği sürece topun iç basıncı topun şeklinin korunmasını sağlar. Ancak bir darbeye maruz

kaldığında darbe sonucunda sıkışan bölgede meydana gelen şekil değişikliğiyle topun içerisindeki hava sıkışır ve maksimum deformasyon gerçekleştikten sonra sıkışan hava genişerek topun normal şekline dönmesini sağlar. İç basınç topun elastik davranışı belirlerken yüksek iç basınçlarda deformasyon daha az meydana gelir. Bunun tam aksine düşük iç basınçlar daha fazla deformasyonlara neden olur. Ancak iç basınç çarpışmada meydana gelen şekil değişikliğinde önemli bir parametre olarak ortaya çıkarken topun geliş hızı, etki ettiği kuvvet, topun malzeme kalitesi gibi özellikler de şekil değişikliği üzerinde etkiye sahiptir (59, 60).

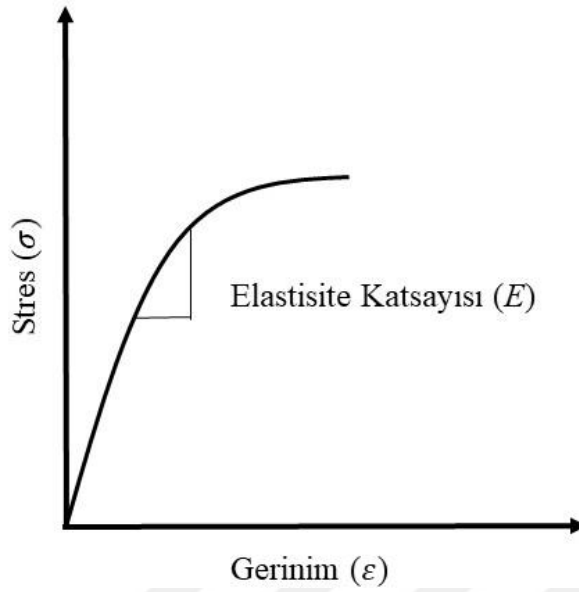
#### 2.5.4. Elastisite Katsayısı

Bir malzemenin üzerine uygulanan yüke cevap olarak deforme olmaya karşı koyma özelliği olarak tanımlanır. Elastisite katsayısı, mühendislik, malzeme bilimi ve fizik gibi birçok alanda önemli bir rol oynar. Malzeme seçimi, tasarım ve yapıların dayanıklılığını değerlendirme gibi uygulamalarda kullanılır. Katı cisim mekaniğinde kuvvet ve yer değiştirme stres ( $\sigma$ ) ve gerinim ( $\varepsilon$ ) olarak normalleştirilir (61). Şekil 2.7.'den de anlaşılacağı üzere stres uygulanan kuvvetin ( $F$ ), malzeme üzerinde ne kadarlık bir kesit alanına ( $A$ ) etki ettiğiyle hesaplanabilirken, gerinim malzemenin üzerine etki eden stres sonucu malzemenin ilk haline ( $L$ ) oranla ne kadarlık bir yer değiştirme ya da deformasyon ( $\Delta L$ ) meydana getirdiğinin bilinmesiyle belirlenebilir (62).

$$\sigma = F/A \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (2.2)$$

Cisimlerin üzerlerine uygulanan strese karşı bir dayanma sınırı vardır ve cisimde bozunum gerçekleştiğinde uygulanan stresle başa çıkamamaktadır. Başlangıçtaki stabil konumunun üzerine gelen her yük artışıyla malzemenin deforme olma miktarı doğrusal olarak artar ve limit noktasına kadar olan bölge elastik bölge olarak adlandırılır. Elastisite katsayısı eğrinin elastik bölgesinde etki eden gerilim ve stresin oranı olarak tanımlanır. Malzemeye uygulanan yük elastik bölgede sonlandırıldığında başlangıç şekline dönerse mükemmel elastik malzeme olarak tanımlanır (52).



Şekil 2.6. Elastisite katsayısının grafik gösterimi.

### 2.5.5. Elastisite Katsayısının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Malzeme üzerine uygulanan stresin oluşturduğu gerinim tek ekseninde gerçekleştiğinde Hooke Yasası ile ilişkilidir (Eşitlik 2.3.) ve elastisitenin temel kanunudur. Ancak malzemeye uygulanan stres sonucunda oluşan deformasyon (sıkışma ya da uzama) miktarı iki ekseninde (dikey ve yanal) gerçekleşiyorsa eşitlik 2.4.'teki gibi Poisson oranı ( $\nu$ ) ile ifade edilir (61). Bunun yanı sıra malzeme üzerine etki eden stresin birim alan başına oluşturduğu gerilim ise Young Modülü ya da elastisite katsayısı olarak belirtilmektedir (Eşitlik 2.5.) (61, 62).

$$F = -kx \quad (2.3)$$

$$\nu_{xy} = -\varepsilon_y / \varepsilon_x \quad \nu_{zx} = -\varepsilon_z / \varepsilon_x \quad (2.4)$$

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.3.'te  $k$ , elastisite katsayısı,  $x$ , sıkışma ya da gerinim miktarıdır.

Malzemenin elastikliği ya da geri dönüşebilir deformasyon kapasitesinin bilinmesini sağlayan parametredir. Elastisite katsayısı, bir malzemenin elastik bölgesindeki davranışını tanımlar. Elastik bölge, malzemenin geri dönüşebilir şekilde

deformasyona uğradığı bir aralığı ifade eder. Malzeme elastik bölgeden çıktığında plastik deformasyon başlar, yani malzeme kalıcı bir şekilde değişir. Malzemenin yapısına göre elastisite katsayısı artar ya da azalır. Kauçuk gibi malzemelerden üretilen futbol toplarının elastisite katsayısı deformasyona daha yatkın oldukları için düşüktür. Ancak deformasyona karşı daha dirençli sert yapıdaki malzemelerin elastikiyet katsayısı daha yüksektir. Dolayısıyla elastiklik katsayısı doğrudan malzemenin deformasyonu ile ilişkilidir. Çarpışmada topta meydana gelen şekil değişikliği sonucu oluşan deformasyon, bir yayın sıkışması ve uzaması olarak ifade edilebilir ve Hooke Yasasıyla açıklanabilir.

### **Hooke Yasası**

Hooke Yasası, doğrusal elastik davranışı tanımlar. Cisim üzerine bir kuvvet uygulanıp gerildiğinde veya sıkıştırıldığında cisimde oluşan deformasyona bir tepki olarak bu sıkışmanın bir kuvvet üreteceğini belirtir. Sıkışma ya da deformasyon sonucu üretilen bu kuvvet, cismin uyguladığı kuvvet ile doğru orantılıdır. Birçok farklı fiziksel sistemi tanımlamada kullanılan bu yasa, özellikle elastik malzemelerin davranışını açıklamada yaygın olarak kullanılır (62, 63). Topun çarpışma sırasında bası fazında bir yayın sıkışması toparlanma fazında ise bir yayın uzama durumuna geçmesi olarak düşünülür. Her iki fazda da topun maruz kaldığı kuvvetlerin oluşturduğu deformasyon (girinti) miktarı ile arasında doğrusal bir ilişki vardır ve bu kuvvetlerin oluşturduğu girinti miktarı yayın yaptığı iş olarak ortaya çıkmaktadır. Mekanikte bir yayın iş yapma kapasitesini açıklamak için de Hooke Yasası kullanılmaktadır.

#### **2.5.6. Çarpışma Sırasında Topun Yaptığı İşin Belirlenmesi**

Bir çarpışma sırasında top bir yay olarak düşünüldüğünde, bu yay üzerine etki eden kuvvetler neticesinde top sıkışır ya da gerilir. Kuvvet bir yaya etki ettiğinden enerjisinin tamamı elastik potansiyel enerjiye (*EPE*) aktarılır ve bu elastik potansiyel enerji yayda depolanarak başka bir enerji biçimine aktarılır. Bir nesne elastik olarak deforme olduğunda enerjisinin tamamı *EPE*'ye aktarılacaktır. Bu nedenle yapılan iş depolanan *EPE*'ye eşit olacaktır. Doğrusal bir çarpışmada elastik malzemenin *EPE*'si Hooke yasası ile açıklanabilir. Yayın elastik katsayısı ( $k$ ) ve girinti miktarı ( $x$ )

malzeme üzerine etki eden kuvvetin oluşturduğu gerininin yayda ne kadarlık bir *EPE* depoladığını verir.

$$EPE = \frac{1}{2} kx^2 \quad (\text{joule}) \quad (2.6)$$

Futbol topunun yapısal özellikleri ve şeklinden dolayı çarpışma sırasında yoğun bir malzeme şeklinde olarak düşünülür. Yani çarpışma sırasında tek bir noktadan ziyade bir temas yüzey alanına sahiptir. Bu doğrultuda hacimli malzemelerin çarpışma sırasında depoladıkları *EPE* miktarının hesaplanması için elastikiyet katsayısı (*E*), yüzey alanı (*A*) ve gerinim ya da sıkışma miktarlarının ( $\Delta L$ ) ve malzemenin ilk uzunluğunun (*L*) bilinmesi gerekmektedir. Eşitlik 2.8. kullanılarak topun hacmine göre *EPE* miktarı belirlenebilmektedir.

$$EPE = \int \frac{EA\Delta L}{L} d\Delta L = \frac{EA}{L} \int \Delta L d\Delta L = \frac{EA\Delta L^2}{2L} \quad (2.7)$$

$$\frac{EPE}{AL} = \frac{E\Delta L^2}{2L^2} \quad (2.8)$$

### 2.5.7. Sönümlenme Katsayısı

Viskoelastik davranış gösteren malzemelerin mekanik davranışları yay ve sönümlenme (damper) ile tanımlanmaktadır (61, 64, 65). Buradaki yay elastiklik katsayısını ifade ederken sönümlenme katsayısı ise sıkışma ya da çekme gerinmesinde malzemenin sönümlenme hızını belirler. Sönümlenme iki cismin çarpışmasında cisimlerin sahip oldukları enerjilerindeki kaybı hesaplamayı dolayısıyla çarpışmanın etkisinin anlaşılmasını sağlayan bir kavramdır (64). Çarpışma sırasında etki eden kuvvetin sönümlenme hızını ve miktarını veren bir değer olarak ortaya çıkmaktadır. Sönümlenme değeri büyük olan çarpışmalarda yüksek hızda sönümlenme yaşanırken, küçük olan çarpışmalarda sönümlenme hızı düşüktür. Dolayısıyla çarpışma süresince etki eden salınım ve titreşimler daha uzun süre devam eder. Bu değer çarpışmanın türünden de etkilenmektedir. Futbol topunun çarpışma modelleri yapılırken Eşitlik 2.9.

ile ifade edilen sönümlenme katsayısının ( $c$ ) hesaplanması gereklidir. Topun kütlesi ( $m$ ) kadar esnemeye karşı direnci ( $k$ ) ile de ilişkilidir. Topun üzerine uygulanan kuvvete ve bu kuvvetin oluşturduğu gerilime bağlıdır.

$$c = 2\sqrt{km} \quad (2.9)$$

### 2.5.8. Toparlanma Katsayısı

Toparlanma katsayısı bir çarpışmada nesnelere esnekliğini temsil eden, çarpışma sırasında kaybedilen enerjinin incelendiği bir yöntemdir. Çarpışma hızı, açısı, malzeme özelliği, kayma, sürtünme gibi özelliklere bağlıdır (5). 0 ile 1 arasında bir değer olarak temsil edilen TK'nın 1 olması çarpışma sırasında enerji kaybının olmadığı ve tamamen esnek (elastik) bir çarpışmanın olduğunu ifade eder. TK değerinin 0 olması ise çarpışma sırasında tüm kinetik enerjinin kaybolduğu ve çarpışan nesnelere birbirine yapıştığını yani elastik olmayan (inelastik) bir çarpışma olduğunu belirtir (7, 58, 66, 67). Pratikte tüm nesnelere TK değerleri genellikle 0.9-1 arasında değerlere sahiptir ve çarpışmada kinetik enerjinin kaybolduğu ve çarpışan nesnelere geliş hızlarından daha düşük çıkış hızlarına sahip oldukları anlamına gelir. TK, sporda kullanılan toplar, mekanik sistemler ve hatta biyolojik sistemler dahil olmak üzere çok çeşitli malzeme ve sistemlerin davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır (48).

Newton ilk olarak 1686 yılında aynı toplar arasındaki enerji kaybını (kinematik -  $e$ ) çarpışma öncesi ve sonrası cisimlerin hızlarından (Eşitlik 2.10.) belirlemeye çalışmıştır (7). Newton'dan sonra Poisson (kinetik -  $e_*$ ) çarpışmayı fazlara ayırarak momentumdaki değişimi (Eşitlik 2.11.) inceleyerek tanımlamıştır. Stronge (enerjetik -  $e_*^2$ ) çarpışmadan kaybolan enerjiyi belirlemek için çarpışma fazlarında yapılan iş üzerinden (Eşitlik 2.12.) belirleyen bir yöntem geliştirmiştir (7). Ahmad ve ark (5), Stronge (7) ve Flores (68) çarpışma sırasında temas yüzeyinde sürtünme ve kayma olmadığı sürece tüm denklemlerin sonuçlarının aynı olacağını belirtmişlerdir. Buna ek olarak çarpışmada kayma ve sürtünmenin olduğu durumlarda yalnızca enerjetik TK'nın (Eşitlik 2.12.) doğru sonuçlar vereceği belirtilmektedir.

$$e = \frac{v_1}{v_0} \quad 2.10$$

$$e_* = \frac{p_f - p_c}{p_c} \quad 2.11$$

$$e_*^2 = \frac{W_r}{W_c} \quad 2.12$$

$e$ , kinematik TK,  $v_1$ , çıkış hızı,  $v_0$ , geliş hızı,  $e_*$  kinetik TK,  $p_f$ , çarpışma boyunca oluşan itme,  $p_c$ , bası fazında oluşan itme,  $e_*^2$ , enerjetik TK,  $W_r$ , tüm çarpışma boyunca yapılan iş,  $W_c$ , bası fazı boyunca yapılan iş.

Özellikle futbol topu ile yapılan çalışmalarda TK hesaplamaları fazlaca kullanılmaktadır. Mevcut çalışmalarda genellikle topların TK değerleri FIFA'nın belirlediği iç basınç sınırları altında 0.80 ile 0.88 aralığında değişmektedir (58). Topun çarpışmada kaybettiği enerjiyi ya da çıkış hızının geliş hızına oranı ya da fazlar arasındaki impulsif kuvvet-momentum farklılıklarının oranı olarak belirtilir ve genellikle serbest düşme analizleri ile belirlenmeye çalışılır (48). Ancak oyunun doğası gereği topun sahip olduğu spin ve açılı çarpışmalardan etkilendiği için gerçek oyun koşulları altın toparlanma katsayısının belirlenmesi tartışılmaktadır. Bunun için de Stronge (7) ve Ahmad ve ark. (5)'in da belirttiği üzere enerjetik TK'nın hesaplanmasının gerekliliği belirtilmektedir.

TK değeri tek bir sayısal değer olarak ifade edilmektedir. Ancak temas süresi boyunca enerjinin korunumu yasasına göre sürekli enerji dağılımı olması gerekmektedir. Tek bir TK değerinin hesaplanmasının temel nedenlerinden biri yüksek hızlarda meydana gelen çarpışma anının yeterli veri elde edebilecek kalitede ekipman ve metodoloji eksikliğinden olduğu düşünülmektedir. Bu düşünceyle bu araştırmada yüksek hızlarda elde edilen görüntüler üzerinden topun çarpışma süresi boyunca enerji davranışı anlaşılmaya çalışılmıştır.

Toparlanma katsayısı cisimlerin hızına bağımlı olmanın yanı sıra cismin ve cismi oluşturan malzemenin şekline bağlıdır ve çarpışmanın sertliği malzeme özellikleri ile de belirtilmektedir (69-71). Aynı zamanda çarpışmada cisimlerin sahip

olduğu kinetik enerjinin nasıl davrandığını belirlemeye yarar. Çarpışma basitleştirildiğinde malzeme özellikleri hakkında bilgi verir. Dolayısıyla topun yapısal özelliklerinin çarpışmadaki etkisinin anlaşılması için TK önemli bir parametre olarak ortaya çıkar.

Literatürde TK ile yapılan araştırmalarda genellikle serbest düşme (kinematik TK) çalışmaları yapılmaktadır. Serbest düşmenin kullanılması 2 ana parametre için tercih edilir. Hesaplamanın kolay olmasının yanı sıra topun dikey ekseninde hareketiyle çarpışmada kayma meydana getirmemesi ve doğrusal bir çarpışma oluşması yapılan hesaplamada doğru sonuçlar elde edilmesini sağladığı için serbest düşme testleri tercih edilir (5, 7). Yüksek maliyetli ekipman gerektirmemesi de başka bir sebebidir. Ancak serbest düşmede topun çarpışma anında ki hızı  $\sim 6$  m/s'dir ve bu hızlar oyun içindeki gerçek hızları yansıtmamaktadır. Top oyunun doğası gereği doğrusal çarpışmayı bir müsabakada nadiren yapar ve yine serbest düşme testiyle topun impulsif (kinetik) kuvvet analizleri ile topun toparlanma katsayısı hesaplanmaya çalışılır. Kinematik TK hesaplamasına benzer nedenlerden dolayı oyunun doğasındaki sonuçları yansıtmamaktadır. Nitekim, Stronge (7), enerjetik TK hesabının oyunun doğasında var olan çarpışmaların analizi için önemli olduğunu belirtir. Topun çarpışma süresince yaptığı iş üzerinden hesaplama yapan enerjetik TK hesabı topun geliş açısı ve çarpışma anındaki kaymalarından etkilenmez. Ancak Ahmad ve ark (5), Ismail ve Stronge (72) topun geliş açısı sabit ve çarpışma anında kayma olmadığında bu 3 yöntemde aynı sonucu vereceğini belirtmişlerdir.

TK değeri topun çarpışma sırasında kaybettiği enerji hakkında bilgi verir. Yani topun temas süresi boyunca ne kadar enerji kaybettiğini açıklar. Literatürde TK hesaplamasına yönelik formüller sonucunda tek bir değer elde edilir ve bu değer topun çarpışmada kaybettiği enerji olarak ifade edilir. Ancak çarpışmanın süresi her ne kadar çok kısa olsa da bu süre içerisinde (temas süresi boyunca) topta meydana gelen enerji dağılımı devam etmektedir. Dolayısıyla çarpışma süresince topun enerji davranışının anlaşılması TK'ya ek olarak daha detay bilgiler barındırabilir. Bu düşünce ile bu araştırmada ÇSED davranışlarını belirlemek amaçlanmıştır. Bu davranışın enerjetik TK değerleri ile uyumunu ortaya koyarak elde edilen sonuçlar neticesinde farklı marka topların ÇSED davranışları anlaşılmasına çalışılmıştır.

## 2.6. Çarpışmanın Analizi

Futbol topunun çarpışma davranışı çok kısa sürede gerçekleşen, çarpışan iki cisim arasında Newton hareket yasalarına göre kuvvetler ortaya çıkan bir durumdur. Bu durum biyomekanik alanının konusu olmakla birlikte, çeşitli teknolojik ekipman ve donanımlar yardımıyla analiz edilmeye çalışılır.

### 2.6.1.Çarpışmanın Kinetik ve Kinematik Analizi

İnsan hareketini tanımlamayı amaçlayan biyomekanikte aynı zamanda ekipman gelişimi, güvenliği içinde araştırmalar yapılmaktadır. Bunu yaparken objelerin hareket sırasındaki davranışını inceler. Hareketi (kinematik) ve harekete neden olan etmenleri (kinetik) anlamaya çalışan biyomekanik alanı iki bölüme ayrılır. Hareketi oluşturan kuvvetleri göz ardı ederek hareketin kendisini inceleyen kinematik, hareketi meydana getiren üyelerin doğrusal ve açısal pozisyonlarının zamana bağlı değişimleri ve türevleri (hız ve ivme) belirler. Kinetik analiz ise cisimleri harekete geçiren kuvvetleri anlamayı amaçlar. Kinetik analiz, hareketin kinematik değişkenleri, dışsal kuvvetler ve eylemsizlik özelliklerinden yararlanarak harekete neden olan içsel kuvvetleri ve torkları hesaplanması sağlamaktadır. Kinetik ve kinematik analizde kullanılan hesaplama yöntemlerine göre ters dinamik ve dinamik analiz olarak iki yönteme ayrılır. Yer değiştirme verilerinden hız, ivme ve açısal değişimlerin belirlenmesi ters dinamik analiz olarak ortaya çıkarken, kuvvet ve tork verileri üzerinden hareketin tanımlanması için yapılan hesaplamalara dinamik analiz denir.

Biyomekanikte ekipman tasarımı, güvenliği gibi araştırmalarda malzemenin hareket sırasında maruz kaldığı yüklere karşı davranışı incelenerek malzemenin kullanılabilirliği, güvenliği gibi incelemeler de yapılmaktadır. Bu incelemelerde meydana gelen hareketin değişik koşullar altındaki davranışlarını belirlemek için modelleme çalışmaları da yapılmaktadır.

Futbol topunun çarpışma davranışının incelenmesi, çarpışmanın dinamiklerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Topun etki ettiği kuvvetleri için en önemli analiz yöntemi kuvvet platformu ile çarpışmada etki eden kuvvetleri belirleme olsa da futbol topunun çarpışma dinamiklerinde yer alan

deformasyon, girinti miktarı, toparlanma katsayısı hesaplamaları için yüksek hızlı kameralar ile görüntü analizi yöntemi kullanılmaktadır. Topta meydana gelen girintiler, bu girintilerin oluşturduğu deformasyonların farklı marka ve iç basınç koşulları altındaki davranışları, çarpışmada oluşan tepki kuvvetleri ve topta meydana gelen enerji kayıpları belirlenerek çarpışmanın etkisi anlaşılmaya çalışılır.

### 2.6.2. Kuvvet Platformu ile Tepki Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Kuvvet platformları üzerine etki eden kuvvetleri voltaja çeviren gerinim ölçerler (strain guage) ya da piezoelektrik kristaller gibi yük sensörleri içeren katı ve düz platformlardır. Genellikle köşelerinde bulunan yük sensörleri ile 3 ekseninde toplamda 12 ölçüm yaparlar. Bu 12 bağımsız ölçüm sonuçları bir araya getirilerek bileşke kuvvete çevrilir. Aynı zamanda bu değerlerden yararlanarak kuvvet platformu merkezine göre çarpışmadaki momentleri belirler (73). Futbol topunun çarpışma davranışında topun etki ettiği kuvvetlerin belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. Topun tepki kuvvetlerine ek olarak görüntü analizi ile desteklenerek çalışmalar yapılmakta ve çarpışma dinamikleri anlaşılmaya çalışılmaktadır (13, 18, 28).

### 2.6.3. Görüntü Analizi Yöntemi

Tözeren (74), Descartes'in 17.yy başlarında insan vücudunu, ruh tarafından yönlendirilen hareketleri yapan bir makine olarak tanımladığını belirtir. Leonardo Da Vinci'nin ise 30'dan fazla erkek ve kadın kadavrasını inceleyerek insan içyapısını anlamaya çalıştığı ve resmettiğini söyler. İnsanı, yaptığı hareketi ve harekete neden olan etmenleri tanımlama isteği yüzlerce yıl öncesine dayanır. *Hayvanların Hareketi Üzerine* isimli Aristoteles'in kitabı ile hareketi anlama isteği süreci Rönesans (14-17. yy) döneminde bedenin içyapısı ile ilgili merakın giderilmeye çalışılmasıyla devam etmiştir. Bu dönemde kas iskelet sistemi, kasların yapısı, kasılma durumunda kasların şekilleri gibi çizimler mevcuttur. Aydınlanma çağıyla birlikte nitel değerlendirmelere ek olarak nicel değerlendirme yapılmaya başlanmıştır. Jules Etienne Marey hareket yakalama çalışmalarında çoklu pozlama özelliğine sahip fotoğraf makinesi ve video kamera kullanarak hareketi anlamaya çalışmıştır. Koşma, sıırıkla atlama hareketlerini inceleyen Marey günümüzdeki kullanılan optik yakalama sistemlerinin öncüsü olarak kabul edilmektedir. Eadweard James Muybridge çoklu fotoğraf kaydedebilen bir cihaz

icat ederek insan hareketini incelemeye çalışmıştır. Basamak inme-çıkma, yürüme gibi hareketlere ilgi duyan Muybridge, Marey ile birlikte günümüzde kullanılan hareket yakalama tekniklerinin öncüsü olmuşlardır (75, 76).

Teknolojisinin günümüzdeki gelişimi yüksek hızlardaki hareketleri yakalayacak şekilde gelişmiştir. Bir futbol topunun çarpışma süresi  $\sim 0.01$  saniyede gerçekleşir. Çarpışma sırasında meydana gelen etkiyi yakalayabilmek için yüksek hızlı kameralar ve güçlü ışıklar kullanılmaktadır. Topun çarpışma süresince hareketi yakalanarak yer değiştirme verilerinden ters dinamik hesaplamalar ile çarpışma dinamikleri (hız, ivme, girinti miktarı, çarpma açısı) incelenmektedir. Böylelikle topun çarpışma sırasında etki ettiği kuvvetler ve çarpışma dinamikleri anlaşılmasına çalışılmaktadır. Bu süreçlerin etkin bir şekilde anlaşılması için yüksek hızlarda kaydedilen çarpışma görüntülerinin işlenmesi gerekmektedir.

### **Görüntünün İşlenmesi**

Görüntü analizinde incelenmek istenen hareket için görüntü üzerinde subjektif değerlendirmeleri ortadan kaldıracak objektif verilerin olması hareketin, ya da hareket ile ilgili dinamiklerin tanımlanması, herkes tarafından kabul edilebilir olması açısından önemlidir. Dolayısıyla kaydedilen bu görüntüler sayısallaştırılarak nicel olarak ifade edilmektedir. Sayısal veriler üzerinden dinamik ve ters dinamik hesaplamalar yapılarak verilerin yorumlanabilir, anlamlı hale getirilmesi hareketi ve hareketin doğasının anlaşılması için önemlidir.

Yüzyıllardır insan hareketinin anlaşılmasına çalışıldığı süreçte günümüz teknolojisinde hareketi, yansıtıcı işaretler üzerinden elde edebilen otomatik takip yapabilen kızılötesi görüntü yakalama sistemleri mevcuttur. Ayrıca yüksek hızlarda görüntü yakalayabilme özelliğine sahip kameralar ve bu cihazlardan elde edilen görüntüleri sayısallaştırma işlemi için (araştırmacı kontrollü) sayısallaştırma programları mevcutken, günümüz bilgisayar programlama dilleri içerisinde yer alan kütüphaneler yardımıyla görüntü işleme yöntemleri kullanılarak otonom olarak bir kullanıcıyı müdahalesi olmadan hareketler sayısallaştırılarak tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada topun çarpışma davranışı belirlemek için tamamen ücretsiz olan ve günümüzde yaygın olarak kullanılan programlama dillerinden Python programlama

dili ve içerisinde yer alan kütüphaneler kullanılmıştır. Bölüm 2.6.4'ten itibaren Python programlama dili ve görüntü işlemede kullanılan kütüphaneler hakkında bilgi verilmektedir.

#### **2.6.4. Python Programlama Dili**

Python, üst düzey, yorumlanmış, genel amaçlı bir programlama dilidir. 1980'lerin sonunda Guido van Rossum tarafından oluşturulan program ilk olarak 1991'de kullanıma sürüldü. Nesne tabanlı programlamayı ve belirli bir oranda da fonksiyonel programlamayı destekleyen genel amaçlı programlama dilidir. Girintilere dayalı basit söz dizimi dilin öğrenilmesini ve akılda kalmasını kolaylaştırır. Öğrenilmesi kolay ve ücretsiz olduğu için dünya genelinde okullarda yaygın olarak öğretilen programlama dilidir. Sanal makine gibi çalışır. Her türlü işletim sisteminde çalışır. Veri analizi, makine öğrenimi, oyun geliştirme, robotik uygulamalar yapılabilirken makine öğrenimi ve yapay zeka için popüler bir dildir. Web sunucularına bağlanma, düzenli ifadelerle metin arama, dosyaları okuma ve değiştirme gibi çeşitli görevler için modüller içeren zengin bir standart kitaplık sunar. Python, web geliştirme, bilimsel bilgi işlem, veri analizi, yapay zeka ve daha fazlası gibi çeşitli görevler için yaygın olarak kullanılır. Python'un popülaritesi son yıllarda hızla artmakta ve onu dünyanın en popüler programlama dillerinden biri haline getirmektedir. Kullanım kolaylığı açısından PyCharm, Spyder, IDLE, Sublime Text 3, Visual studio code, Atom, Jupyter gibi kod düzenleyicilere sahiptir (77, 78). Bu araştırmanın her aşamasında Spyder (versiyon:3.10) kod düzenleyicisi kullanılmıştır. Varsayılan bir modül yapısı vardır. Builts-ins modülü birçok kullanışlı özellik içerir. Fakat bu modüllere ek olarak problemin çözümüne yönelik ihtiyaca göre kütüphaneler yüklenerek kullanıcılar için kolaylık sağlayabilmektedir.

#### **Python'da Görüntü Sayısallaştırma İşlemleri**

Görüntü işleme, matematiksel algoritmalar kullanılarak dijital görüntülerin işlenmesi ve analiz edilerek herkes tarafından anlaşılabilir, kabul edilebilir sonuçlar ortaya koyma işidir. Python programlama dili görüntü işleme için OpenCV, Scikit-Image ve PIL (Python Imaging Library) gibi bir dizi kitaplığa ve çerçeveye sahip popüler bir programlama dilidir. Bu kitaplıklar, görüntü filtreleme, görüntü

segmentasyonu, özellik çıkarma ve daha fazlasını içeren çok çeşitli görüntü işleme işlevleri sağlar. Dolayısıyla dijital görüntüleri işleyerek herkes tarafından kabul edilebilen sayısal objektif sonuçlar ortaya koyabilen kütüphaneler içermektedir (77-81).

### **Modüller**

Modüller bazı işlevlerin kolaylıkla yerine getirilmesi için birtakım fonksiyonları ve nitelikleri içerisinde barındıran araçlardır. Program içerisinde tanımlanan bir fonksiyon aynı program içerisinde fonksiyona tanımlanan isim ile istenildiği kadar çağırılabilir. Modüllerde aynı fonksiyonlar gibi farklı programlar ve dosyalar içerisinde çağırılarak tekrar kullanılmasını sağlar. Bu kullanım kolaylığı programcıya düzenli çalışma, daha az kod yazımı ve bir kez yazılan kodun tekrar kullanımını açısından fayda sağlar. Python programla dilinde hazır modüller ve kullanıcının kendi tanımladığı modüller olmak üzere ikiye ayrılır. Hazır modüller Python içindeki standart kütüphane modülleri ve üçüncü şahıs modülleridir. Standart kütüphaneler Python geliştiricileri tarafından yazılıp programlama diline eklenen modüller iken üçüncü şahısların yazdığı modüller ise ek yazılım indirip kullanılan python kütüphanesine eklenmesi gereken modüllerdir. Dolayısıyla Python içerisinde yer alan standart kütüphaneler her zaman kullanıma açıkken diğer modülleri indirme ve yükleme ihtiyacı vardır. Modüller fonksiyonları sınıfları veya değişkenleri barındıran Python dosyaları olarak tanımlanır. Birden çok modül birleştirilerek paketleri, birden çok paketin birleşmesi ile de kütüphaneler oluşturulmaktadır. Python içerisinde yer alan bu kütüphaneler kod yazımında kullanıcının işini kolaylaştırmak adına oldukça önemli araçlardır (78).

### **NumPy Kütüphanesi**

Python programlama dili için çok boyutlu dizileri ve matrisleri destekleyen, desteklediği bu diziler üzerinde çalışacak matematiksel işlevler ekleyen bir kütüphanedir. Numpy dünyada en popüler olarak kullanılan kütüphanelerden birisidir. Geleneksel Python listelerinden 50 kat daha hızlı çalışarak objeleri sıralar. Numpy liste dizilerinin tersine bellekte referans yeri denen tek bir yerde depolanır ve işlemler çok verimli şekilde verilere erişir ve işlenir. Listelerden daha hızlı olmasının nedeni olarak

belirtilirken en yeni CPU'lar ile çalışmak üzere optimizasyonları yapılmıştır. Numpy kısmen Python'da yazılmış olmakla birlikte hızlı hesaplama gerektiren işlemler C ve C+ programlarında yazılmıştır. Kütüphane <https://github.com/numpy/numpy> ya da <https://numpy.org/> adreslerinden indirilip yüklenmektedir (79).

### **Matplotlib Kütüphanesi**

Python programlama dili ve sayısal matematik uzantısı Numpy için bir çizim kitaplığıdır (80).

### **OpenCv Kütüphanesi**

Gerçek zamanlı bilgisayar uygulamalarında kullanılan açık kaynaklı görüntü işleme, makine öğrenimi ve bilgisayar görüşü kütüphanesidir. Bugünkü görüntü analizi temelli teknolojik aletlerin gerçek zamanlı çalışmasını ve üretilen birçok teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Nesne, yüz tanımanın yanı sıra el yazısını tanıma düzeylerine erişmiştir. C ve C++ ile en iyi şekilde çalışabilirken Python ya da JAVA'da da çalışmaktadır. Python'da OpenCV'yi çağırırken C/C++ kaynağından çalışmaktadır (81).

## **2.7. Modelleme**

Modelleme, herhangi bir deney yapmaksızın sistem hakkındaki soruların cevaplarının bulunmasını sağlayan araç olarak değerlendirilirken, biyomekanikte modelleme çalışmaları, mekanik etkileşimlerin daha iyi anlaşılması için kullanılan bir yaklaşımdır. Katı cisim modellemesi, fiziksel olarak var olan nesnelerin veya sistemlerin bilgisayar tabanlı temsillerinin (simülasyonlarının) oluşturulması ve analizi yapılmasıdır. Hareketin mekanik özelliklerini incelemek ve analiz etmek için kullanılır. Buna ek olarak malzeme seçimi ve malzemenin zorlu koşullar altında davranışı konusunda bilgi sağlar (82).

Bir futbol topu, iç içe geçmiş farklı yapısal malzemelerden oluşur. Bu malzemeler iç mesane, dış kaplama, dikişler ve topun iç basıncından oluşur. Çarpışma sırasında top yapısal özelliklerinden (iç basınç, dış yüzey malzemesi, vb) kaynaklı şekil değişikliğe uğrar ve çarpışma sonrası eski şeklini alır. Dolayısıyla aynı yapısal

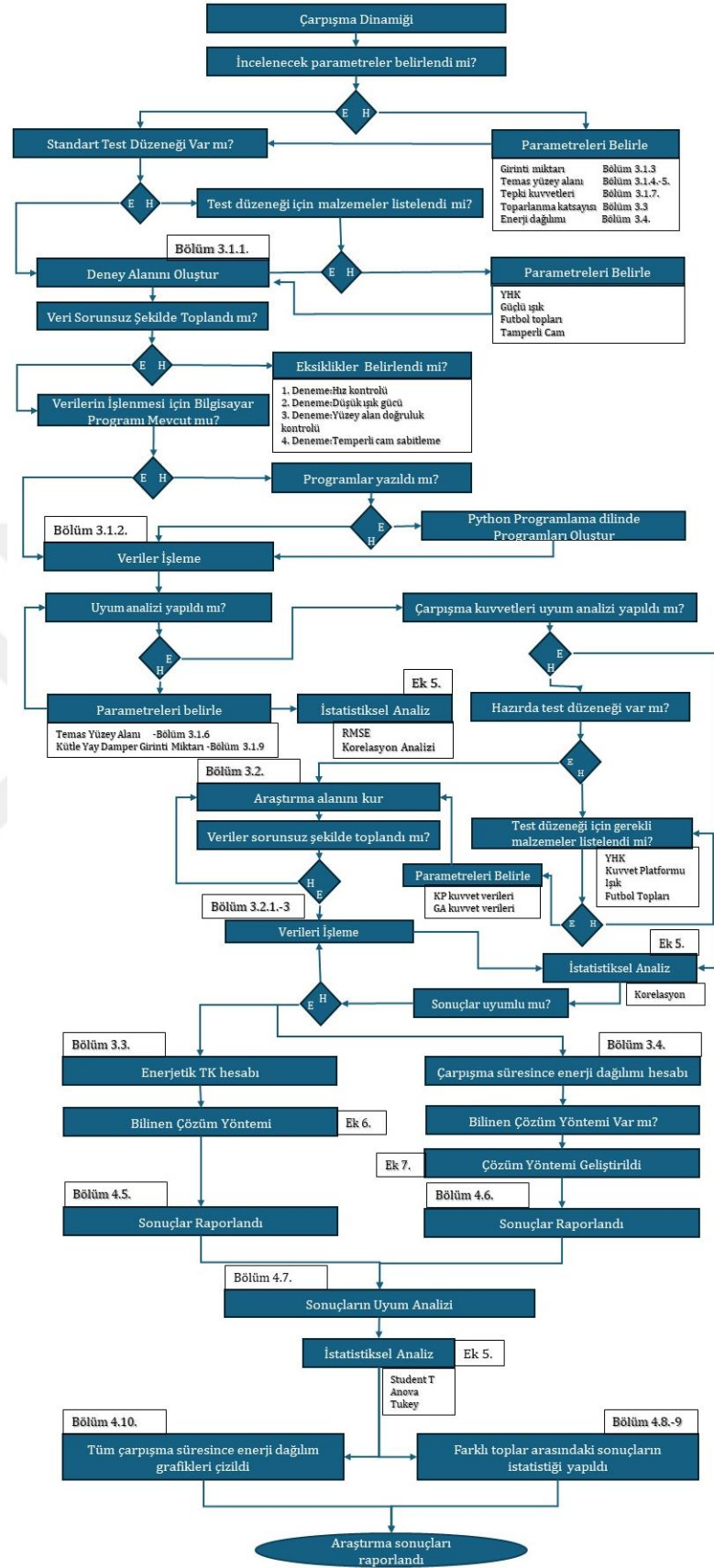
özelliklere sahip toplar koşullar değişmedikçe çarpışma sırasında aynı davranışı sergiler. Topun çarpışma sırasında temas ettiği yüzeyde uygulanan kuvvetin yönüne doğru girinti meydana gelirken çarpışma boyunca topun hızı sönümlenir ve ortaya çıkan bu durum mekanik ilkelerde yer alan kütle-yay-damper sistemiyle açıklanır (83).

Çarpışmada gerçekleşen girinti miktarı topun sıkışma ve gevşemesi ile ilgiliyken temas süresince topun hızındaki azalış sönüm katsayısıyla ilgilidir (6). Dolayısıyla aynı özelliklere sahip bir topun davranışı koşullar değişmedikçe sabit olacaktır. Bu durumda bilinen kütle, yay ve damper özellikleri kullanılarak çarpışmada topun davranışı modellenerek anlaşılabilir. Nitekim bu çalışmada da çarpışma sırasında topta meydana gelen girinti miktarının doğruluk kontrolü için dinamik modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem hakkında detaylı bilgi Bölüm 3.4.'te detaylı olarak açıklanmıştır.

### 3. GEREÇ ve YÖNTEM

Bu araştırmanın ana amacı doğrultusunda topun çarpışma dinamikleri belirlenerek çarpışma süresince meydana gelen enerji dağılımı hesaplandı. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için girinti miktarı, top temas yüzey alanı ve çarpışma süresince oluşan tepki kuvvetlerinin belirlenmesi gerekiyordu. Bu doğrultuda araştırma sürecinde çarpışma dinamiklerini içeren verileri elde etmek için tasarlanan araştırma alanı, elde edilen verilerin doğruluk analizleri ve çarpışma süresince enerji dağılımının belirlenmesi sırasında yapılan işlemleri içeren akış şeması Şekil 4.1.'de verilmiştir. Akış şemasında yapılan işlemlerin anlatıldığı ilgili bölümlere atıf yapılmış ve bölümlerde yapılan işlemler detaylı şekilde açıklanmıştır. Araştırmanın ana amacına ulaşmak için aşağıda yer alan adımlamalar takip edilmiş ve sonuçlar raporlanmıştır.

1. Çarpışma dinamiklerini belirlemek için araştırma alanı tasarımı
2. Verilerin işlenmesi
3. Temas yüzey alan sonuçlarının doğruluk kontrolü
4. Girinti miktarı sonuçlarının doğruluk kontrolü
5. Görüntü analizinden elde edilen kuvvet sonuçlarının doğruluk kontrolü
6. Enerjetik TK hesaplaması
7. ÇSED hesaplaması için geliştirilen yöntem
8. Belirlenen ED sonuçlarının doğruluk kontrolü
9. Toplar arası farklılıkların analizi ve sonuçların raporlanması



Şekil 3.1. Akış şeması.

### 3.1. Topun Çarpışma Davranışını Belirlemek İçin Görüntü Analizi

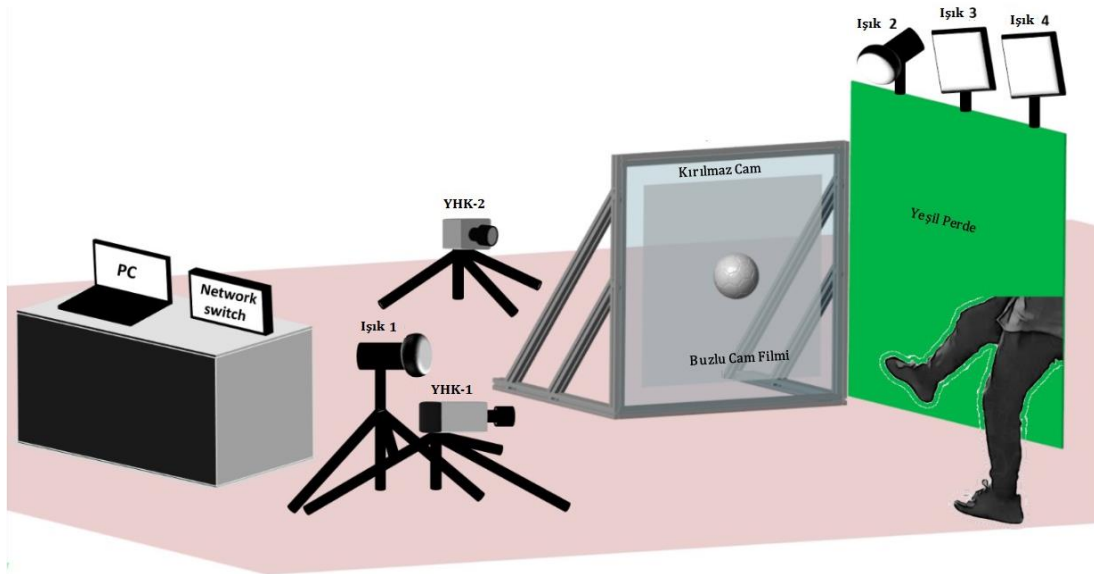
#### 3.1.1. Veri Toplama ve Araştırma Dizaynı

Veri toplama aşamasına geçebilmek adına 4 kez ön araştırma yapılmış ve test düzeneği kurulmuştur. Her aşamada edinilen tecrübe ve elde edilen görüntülerinin analizinde eksiklikler belirlenerek nihai araştırma alanı tasarlanmıştır (Bkz. Araştırma Alanı). Birinci araştırmada iki yanında motor bulunan ve motorların ucunda yer alan döner silindirlere topu alıp fırlatan bir top atma makinesi kullanıldı (Jugs, Amerika). Makineye beslenen topun silindirlere bir tanesinin önce temas etmesi topta spin oluşturmuş ve çarpışma noktasını değiştirmiştir. Buna ek olarak makinenin üzerinde yer alan motorların dönme hızını arttıran üzerinde akım arttırıcı düğme ayarlanmasına rağmen top hızlarının çarpışmadaki geliş hızı aralıklarının fazla olduğu belirlenmiştir. Kullanılan ekipmanların ve araştırmacının güvenliğini korumak adına top atma makinesi yerine tecrübeli eski bir sporcunun atış yapması istenmiş ve yapılan analizde daha net ve kontrollü vuruşlar yapılabildiği belirlenmiştir. Kurulan ikinci araştırma alanında ise, yüksek görüntü yakalama hızlarında topun görüntüsünü yakalayabilmek için kullanılan ışıkların yetersiz olduğu belirlenmiştir. Üçüncü araştırma alanında elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde ise ÇSED'yi hesaplamak için gerekli olan temas yüzey alan sonuçlarının doğruluğunu test etme ihtiyacı doğmuş ve dördüncü kez bir temperli cam kullanılarak araştırma alanı tasarlanmıştır. Yapılan ön işlemlerde elde edilen sonuçların çarpışma dinamiklerinin belirlenmesi ve temas yüzey alan sonuçlarını elde ederek uyum kontrolleri yapılmasına uygun olduğu belirlenmiş ve farklı topların çarpışma davranışlarını ortaya koymak için araştırma alanı tasarlanmıştır.

#### Araştırma Alanı

Çarpışma dinamiklerini belirlemek için özel bir araştırma alanı tasarlandı (Şekil 3.2.). Çarpışma yüzeyi olarak 1 x 1 x 0,007 m (genişlik, yükseklik, kalınlık) boyutunda temperli cam (TC) kullanıldı. TC'yi dikey konumda sabitlemek için 45 mm alüminyum profillerle çerçevesi yapıldı. Çarpışma sırasında topların hareketini yakalamak için aynı lenslere (Nikon, Japonya) sahip iki yüksek hızlı kamera (Photron SA3 120K, Japonya) kullanıldı. Topun hareketini kaydetmek için hareket düzlemine dik bir

kamera yerleştirildi. Görüntü işleme prosedürünü iyileştirmek için hareket düzleminin arkasına arka plan olarak yeşil bir ekran perdesi yerleştirildi. Futbol topunun çarpma sırasında bıraktığı izi kaydetmek için ikinci kamera TC'nin arkasına yerleştirildi. Top izi görüntüsünü daha iyi hale getirmek için TC'nin ön yüzeyi buzlu cam filmle kaplandı. Kare yakalama hızı ve pozlama hızı sırasıyla 6000 Hz ve 1/10000 saniyeye olarak ayarlandı. 6000 Hz frekansta görüntü çözünürlüğü 512x512 piksel boyutlarında elde edildi. Yüksek kare hızı ve yüksek pozlama hızı, hareket yakalama alanının güçlü bir şekilde aydınlatılmasını gerektirdi. Hareket yakalama alanını aydınlatmak için iki adet 24 watt gücünde LED panel ışığı (Felloni TP-LONI-LPD30, İtalya), bir adet 100 watt'lık (Godox SL-100, Çin) ve bir adet 150 watt gücünde beyaz LED video ışığı (Godox SL-150, Çin) kullanıldı. Kameraların aynı anda kayda başlaması için senkronizasyon ayarları Photron Fastcam Viewer (PFV4) yazılımı kullanılarak yapıldı ve kameraların eş zamanlı görüntü kaydetmeleri sağlandı.



**Şekil 3.2.** Top temas yüzey alanlarını belirlemek için araştırma alanı dizaynı. YHK, Yüksek hızlı kamera, PC, Bilgisayar

### Veri Toplama

Optimal bir test, çarpmadan önce topun hareketini standartlaştırmak için bir top atma makinesi gerektirir. Deney düzeneğinde hareket yakalama alanının yakınına yerleştirilen test ekipmanları (kameralar ve aydınlatma ekipmanları) (Şekil 3.2.) top atma makinesindeki herhangi bir çarpmadan dolayı zarar görebilmektedir. Dolayısıyla






bu çalışmada, kısa mesafeden yapılan vuruşlar, 3 metre uzaktan TC'nin merkezine doğru araştırmacı tarafından drop vuruş olarak atıldı. Farklı markalara ait topların ortalama geliş hızlarının benzer hızlarda olması için çok düşük ya da çok hızlı vuruşlar kaydedilmemiştir. Ayrıca TC'nin merkezine gelmeyen atışlar kaydedilmemiştir.

Beş farklı markaya ait top (FIFA Uluslararası Maç Standardı, No:5) 0.6, 0.8 ve 1.0 bar iç basınç değerlerinde test edilmek üzere seçilmiştir. Her topun çapı ve ağırlığı, top üzerinde dijital bir basınçölçer ola hava kompresörü ile (Black&Decker Air Station ASI 300, Çin) şişirilip belirlenen iç basınç ayarlandıktan sonra bir analog bir çap ölçer (Holtain, Birleşik Krallık) ve bir dijital terazi (Suofei SF400, Çin) kullanılarak ölçüldü. Futbol toplarının her bir iç basınç koşulundaki ağırlık ve çap özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Ayrıca topların üretim özellikleri Tablo 3.2.'de görülmektedir. Her bir top, her bir iç basınç değerinde TC'ye doğru dokuz kez atıldı. Toplam 135 atışın video kaydı yapıldı ve her atışa ait ham veriler, her kamera için PFV4 (Amerika) yazılımı aracılığıyla MRAW dosya tipinde kaydedildi.

**Tablo 3.1.** Farklı markalara ait 5 numara futbol toplarının özellikleri.

	<b>İç Basınç (Bar)</b>	<b>Puma</b>	<b>Adidas</b>	<b>Uhlsport</b>	<b>Molten</b>	<b>Black</b>
Ağırlık (gr)	0.6	424.1	430.2	426.5	411.3	416.3
	0.8	425.7	431.0	427.2	413.5	417.7
	1.0	427.0	432.0	428.5	414.0	419.0
Çap (cm)	0.6	21.5	21.5	21.6	22.0	22.0
	0.8	21.5	21.5	21.6	22.0	22.1
	1.0	21.6	21.5	21.6	22.0	22.1

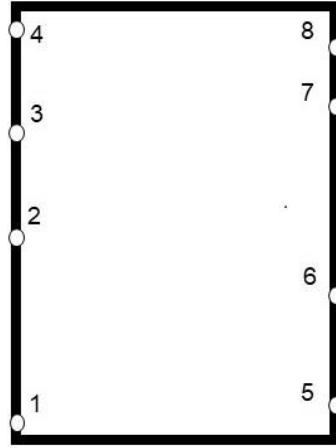
**Tablo 3.2.** Test için seçilen topların üretim özellikleri.

Parametre	1	2	3	4	5
Marka	Puma	Adidas	Uhlsport	Molten	Black
					
Model	Orbita 6 1TB FQP	Uniforia Pro	Elysia	F5A2810	Quantum
PS	32	12	32	32	32
Deri	PU	PU	PU	PU	Barex
PY	ThB	ThB	ThB	MD	MD
İM	Kauçuk	Bütıl	Lateks	Lateks	Bütıl

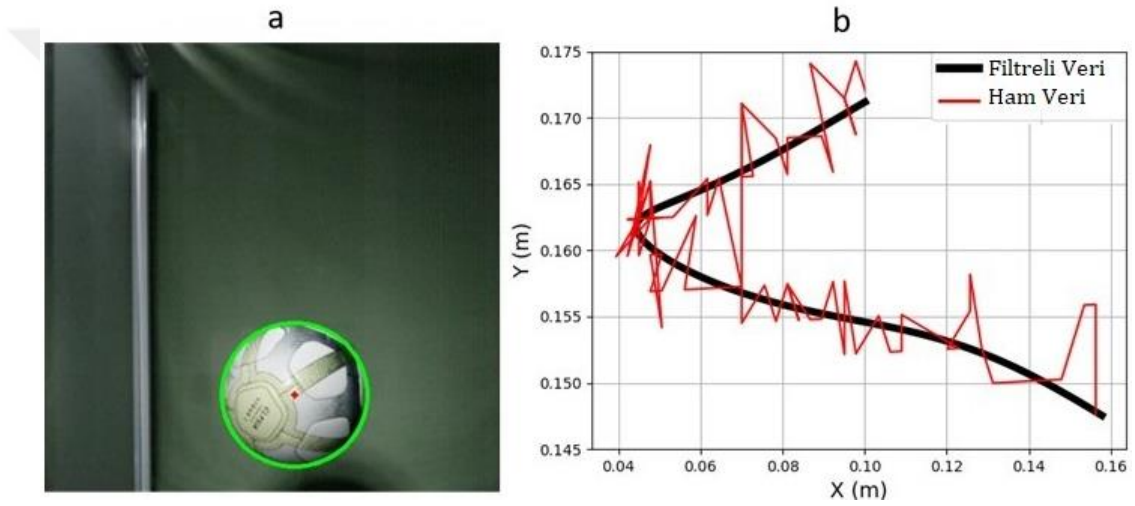
PY, Panel Yapıştırma Şekli; PS, Panel Sayısı; ThB, Termal Yapıştırma; MD, Makine dikişi; PU, Polyurethane der; İM, İç mesane.

### 3.1.2. Verilerin Sayısallaştırılması ve Filtreleme

MRAW dosya tipinde kaydedilen görüntüler bilgisayar ortamında PFV4 yazılımı ile en az kayıpla JPEG dosya tipinde kaydedildi. Topun geometrik merkezinin yer değiştirme verilerini elde etmek için OpenCv (versiyon:4.5.5) kütüphanesinde yer alan Hough dönüşümünün bir alt sınıfı olan HoughCircle dönüşümü kullanıldı (Şekil 3.4a.). HoughCircle dönüşümü bir görüntüde verilen sınırlılıklar içerisinde olan daire ya da daireleri belirlemek için kullanılır (84) ve görüntüdeki daireleri tanımlamayı amaçlar. OpenCv kütüphanesinde bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan tek yöntem Yuen ve ark (85) tarafından sunulan HOUGH\_GRADIENT yöntemidir. Bu yöntem ile görüntüde yer alan topun kenar tespiti yapıp olası daire merkezi bulunduktan sonra merkez için en iyi yarıçap bulundu. Elde edilen piksel dosya tipindeki veriler kalibrasyon görüntüsünde (Şekil 3.3.) yer alan bilindik koordinatlar kullanılarak afin dönüşüm metodu ile metrik sisteme x ekseninde  $0.30 \pm 0.37$  cm, y ekseninde  $0.07 \pm 0.05$  cm hata ile sırasıyla  $\%0.86 \pm 1.03$ ,  $\% 0.47 \pm 0.39$  hata oranı ile dönüştürüldü. Yer değiştirme verileri sayısallaştırmada ortaya çıkan piksel kaymaların neden olduğu pürüzün düzeltilmesi için yazılan veri işleme programı ile çarpışmadaki veriyi bozmayacak şekilde 4. dereceden  $0.07$  Hz Butterworth alçak geçiren filtre ile düzeltildi (Şekil 3.4b.).



Şekil 3.3. Kalibrasyon kafesi noktaları.



Şekil 3.4. (a) Topun etrafına çember oturtma ve GMB'nin konumu (b) GMB'nin ham ve filtreli 2B konumu.

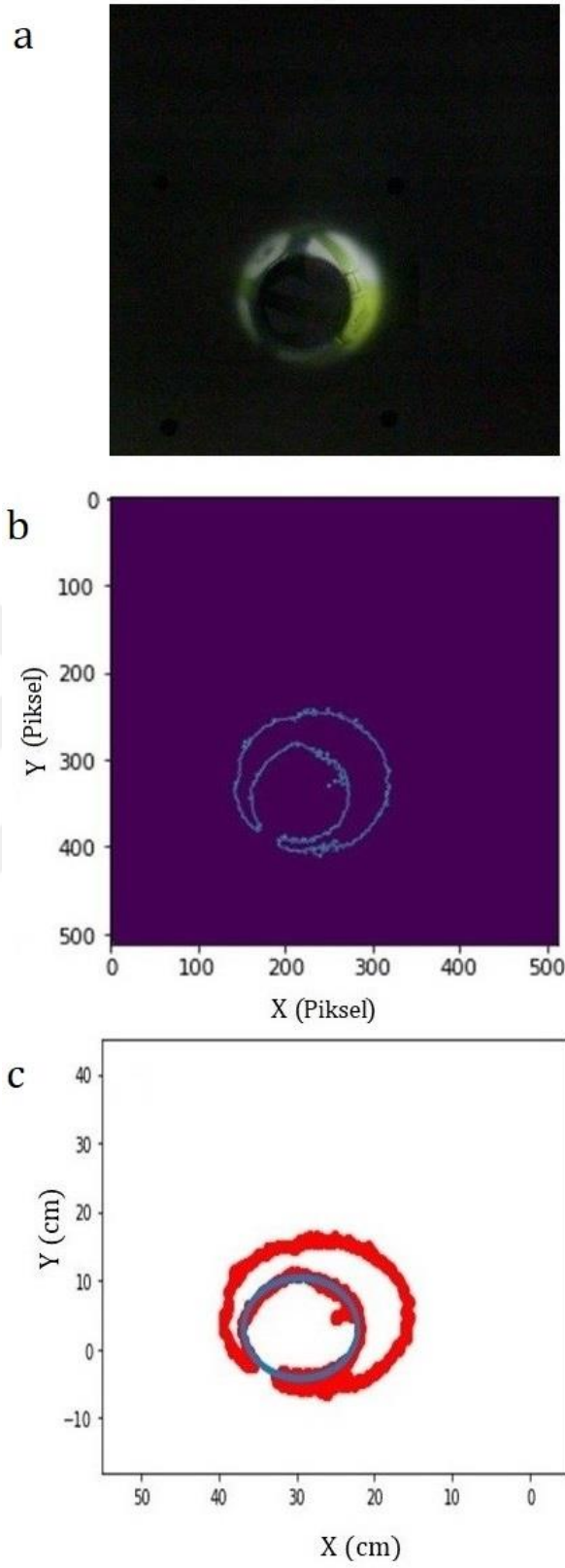
### 3.1.3. Top Girinti Miktarının Belirlenmesi

Çarpışma başladığında topun temas yüzey alanında deforme olan bölgede topun merkezine doğru bir girinti meydana gelir. Yan kameradan alınan görüntüde görüldüğü gibi top temas bölgesinde düz bir şekil alır (Şekil 3.5.). Girinti miktarını ( $u$ ) hesaplamak için ilk temas anındaki görüntüde TC üzerinde sabit bir koordinat ( $TCX$ ) tanımlandı. Daha sonra her görüntüdeki girinti miktarı Eşitlik 3.1. kullanılarak hesaplandı. Eşitlik 3.1.'de  $r_b$ , top yarıçapıdır,  $TCXx$ , ilk temas anında belirlenen topun cama temas ettiği ilk anda TC'deki yatay eksenindeki konumu ve  $GMBx$ , topun geometrik merkezinin yatay eksenindeki konumudur (13, 18, 27, 58).



### 3.1.5. Topun Cama Temas Ettiği Yüzey Alanının Belirlenmesi

Topun yataydaki hareketini inceleyerek temas yüzey alanını basit trigonometrik hesaplamalarla yapan araştırmalarda elde edilen sonuçların doğruluğu hakkında bilgi verilmemiştir (13, 27, 58). Bu doğrultuda bu araştırma sürecinde topun temas yüzey alanı hesabında kullanılan yöntemin doğruluğunu test etmek için ön kameradan topun camda bıraktığı izi hesaplanmıştır. Topun çarpışma sırasında TC'de bıraktığı izi OpenCv içerisinde yer alan Canny kenar tespiti algoritması ile belirlendi. Bu algoritma görüntülerdeki yüksek kontrastlı bölgeler yani kenarları, belirlemek için görüntüdeki gürültünün azaltılması, görüntüdeki yoğunluğun belirlenmesi, yoğunluğun olmadığı bölgelerin bastırılması ve histerezis eşik ile belirlenen alanın kenar olup olmadığına karar verilmesini içeren bir dizi işlem gerçekleştirir (86, 87). Şeki 3.6b.'de görüldüğü üzere cama temas eden topun kenarları belirlenmiştir. Temas yüzey alanını hesaplayabilmek için belirlenen kenarların piksel tipinde 2 boyutlu koordinatları OpenCV'de yer alan HoughLineP fonksiyonu kullanılarak elde edildi (88). Her karedeki top izi verileri, kalibrasyon düzleminin görüntüsünde (Şekil 3.3.) yer alan bilindik noktalar kullanılarak afin dönüşüm algoritması ile metrik sisteme dönüştürüldü.



**Şekil 3.5.** a) Orijinal görüntü b) Canny kenar belirleme algoritması sonrası görüntü c) Temas yüzey alanının belirlenmesi.

Şekil 3.6b.'den anlaşılacağı üzere Canny algoritması temas yüzeyi ve topun dış çember kenarları olmak üzere iki kenar belirlemiştir. İki kenardan iç çember topun temas yüzey alanını oluşturmaktadır. 2 farklı çember olması dış çember koordinatlarının hesaplamaya katılmaması gerekliliğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla belirlenen dış çember koordinatlarını hesaplamaya dahil etmemek için topun bilinen çapından daha küçük bir genişleme miktarı topun temas başlangıcından itibaren ayarlanmış ve çarpışma süresi boyunca yalnızca iç çemberi oluşturan koordinatlar kullanılarak her bir ana ait izin alanı Rangarajan ve Kanatani (89) tarafından Circle-Fit kütüphanesinde geliştirilen hyperLSQ algoritması kullanılarak belirlendi (Şekil 3.6c.). Bu algoritma iç çember koordinatlarına bir daire yerleştirilerek topun cama bıraktığı izin merkez koordinatları ve yarıçap sonuçlarını verirken elde edilen yarıçap kullanılarak Eşitlik 3.5. ile topun cama bıraktığı izin alanı hesaplandı.

### 3.1.6. Temas Yüzey Alan Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü

Literatürde yan kameradan temas yüzey alanı hesabı için konik taban yüzey alanı formülünün kullanılabileceği belirtilirken, herhangi bir deneysel çalışma bulgusu verilmemiştir (13). Bulguların verilmemesi bu hesaplama yönteminin kullanılabilirliğinin test edilmesi gerekliliğini ortaya çıkardı. Bu hesaplama yöntemini doğrulamak adına Bölüm 3.1.5.'te belirtilen yöntemle topun camda bıraktığı izin temas yüzey alanı hesaplandı. Yan kameradan elde edilen temas yüzey alan sonuçları ve topun cama bıraktığı izin alan sonuçlarının uyumu değerlendirmek üzere kök ortalama kare hatası (RMSE) ve Sperman korelasyon analizi yapıldı, her iki yöntem arasındaki uyumun yüksek doğrulukta ve ilişkide olduğu belirlendi. Sonuçlar Bölüm 4.3.'te sunulmuştur. Böylelikle elde edilen temas yüzey alan sonuçlarının doğruluğu ortaya konarak ÇSED'yi belirlemek için kullanılabileceğine karar verildi.

### 3.1.7. Çarpışma Kuvvetin Belirlenmesi

Klasik mekanik yaklaşımda temas sırasındaki reaksiyon kuvvetleri Newton'un ikinci hareket yasasına ( $F = ma$ ) uyularak hesaplanabilir. Ancak topun TC ve kuvvet platformu ile temas halinde olan yüzeyi çarpışma sırasında hareket halinde değildir. Bu nedenle her an için hesaplanan temas yüzey alanı kullanılarak hesaplanan topun kütlesi, topun toplam kütesinden çıkarılmalıdır. Çarpışma sırasında ortaya çıkan

reaksiyon kuvvetlerini ( $F$ ) belirlemek için, topun her andaki kütlesi Eşitlik 3.4a. kullanılarak hesaplandı; burada  $m_b$ , temas olmadığında topun kütlesidir. Sonuçta ortaya çıkan reaksiyon kuvvetleri daha sonra Eşitlik 3.4b. kullanılarak hesaplandı; bu eşitlikte  $m(t)$  topun kütlesidir,  $v$ , GMB'nin belirli bir zaman anında bileşke hızıdır ve  $\Delta t$ , verilerin örnekleme aralığıdır (1/6000 s). GMB'nin anlık hız ve ivmesi Eşitlik 3.4b.'de görüldüğü gibi merkezi fark yöntemi kullanılarak hesaplandı.

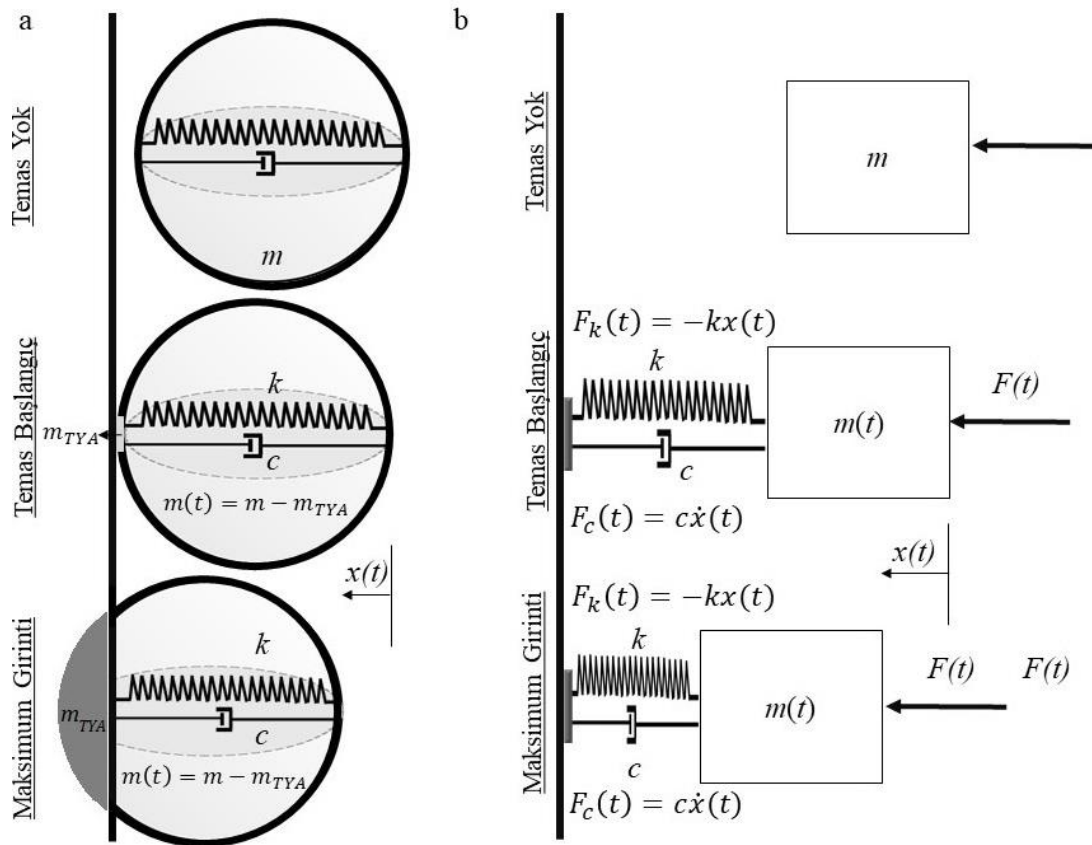
$$m(t) = m_b - \frac{\pi(r_k^2(t) + IA^2(t))m_b}{4\pi r_b^2} \quad (3.4a)$$

$$F = m(t) \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{\Delta t} \quad (3.4b)$$

### 3.1.8. Topun Dinamik Modelinin Oluşturulması

Bölüm 2.7.'de bahsedildiği üzere modeller sistemlerin davranışı hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Top çarpışma sırasında elastik bir davranış sergilerken topun BF ve TF evrelerindeki davranış bir yay davranışiyken, ilk temas anından topun çarpıştığı cisimden ayrılana kadar geçen süreçte de hızında değişim meydana gelir. Ayrıca çarpışma süresince topun temas ettiği yüzey alanının ( $m_{TYA}$ ) sahip olduğu kütle hareket etmediği için topun toplam kütlesinden ( $m$ ) ayrılır ve çarpışma süresince topun kütlesi ( $m(t)$ ) değişir (Şekil 3.7a.). Bu doğrultuda topun çarpışma davranışına ait kütle-yay-damper sistemi üzerine etki eden kuvvetlerin serbest cisim diyagramı Şekil 3.7b.'de ifade edilmiştir. Topun geliş açısına göre çarpışma noktası değişebilir. Ancak çarpışma noktası değişse bile ilk temas anından itibaren top geometrik merkezine doğru şekil değiştirir. Dolayısıyla top tek bir yay ve damper kullanılarak modellenebilir. Bu doğrultuda araştırmada kullanılan topların deneysel çalışmadan elde edilen yay ve damper özellikleri kullanılarak oluşturulacak dinamik bir modelden elde edilen girinti miktarı sonuçları deneysel çalışmadan elde edilen girinti miktarı sonuçlarının doğruluğunu test etmek için kullanılabilir (83). Topun yay ve damper özellikleri sırasıyla Eşitlik 3.6. ve Eşitlik 3.7. kullanılarak hesaplanmıştır. Kütle yay damper sistemlerinde (Şekil 3.7b.) hareketli bir kütle üzerine etki eden kuvvetler toplandığında Eşitlik 3.8. elde edilir. Eşitlik 3.8. temel hareket eşitliği olarak

alındığında çarpışma süresine meydana gelen değişikliklerin belirlenmesi için Eşitlik 3.9. ile her bir andaki kuvvet sonuçları belirlenebilir. Buna ek olarak daha öncede belirtildiği üzere girinti miktarı topta oluşan deformasyon ve yüzey alanını etkileyen önemli bir faktördür. Oluşturulacak olan matematiksel modelin yüksek doğruluk ve hassasiyette olması araştırma sonuçlarının güvenilirliğinin yüksek olması için önemlidir. Runge-Kutta yöntemi daha fazla hesaplama adımları içerdiği için Euler yöntemine göre daha yüksek hassasiyete ve doğruluğa sahiptir (90). Bu doğrultuda Eşitlik 3.9. kullanılarak oluşturulan dinamik model ile Python dilinde 4. Dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çarpışma sırasındaki girinti miktarları hesaplandı. Bu hesaplamada topun bilinen kütle, yay, damper katsayılarına ek olarak başlangıç hızı verilerek modelin davranışı çarpışmanın başladığı ilk andan (ilk temas anı) maksimum deformasyonun olduğu ana kadar belirlendi.



**Şekil 3.6.** (a) Kütle Yay Damper modeli, (b) Kütle Yay Damper modeli serbest cisim diyagramı.

$$F = -kx \quad (3.6)$$

$$c = 2\sqrt{km} \quad (3.7)$$

$$0 = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (3.8)$$

$$F_{top} = -kx - cxt \quad (3.9)$$

$F_{top}$ , topun doğrusal kuvveti;  $x$ , yer değiştirme;  $t$ , zaman;  $m$ , topun kütlesi;  $k$ , yay sabiti;  $c$ , sönüm katsayısı;  $\dot{x}$ , hız;  $\ddot{x}$ , ivme.

### 3.1.9. Top Girinti Miktarı Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü

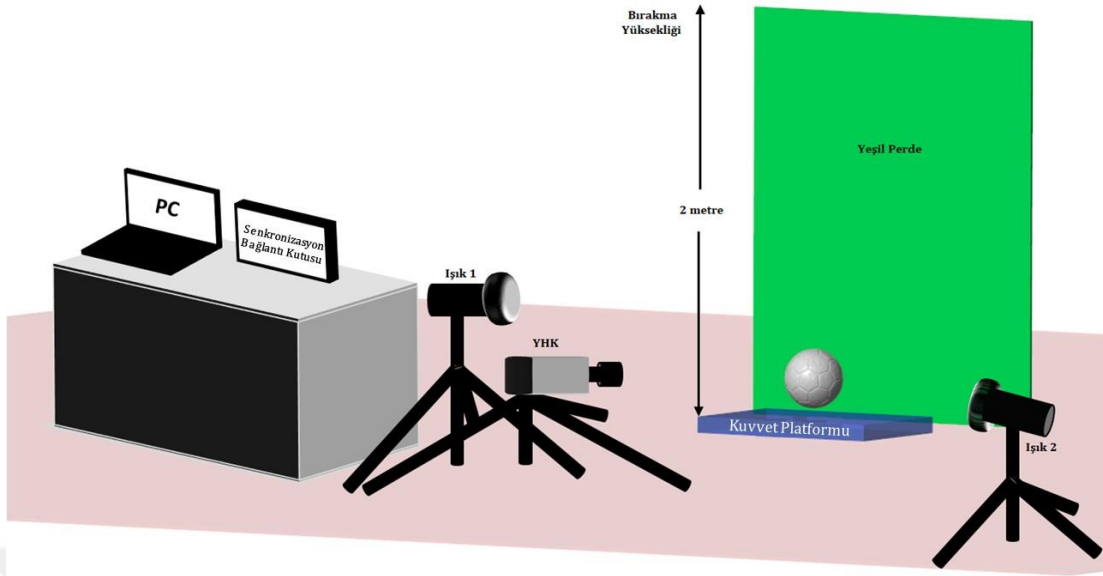
Top girinti miktarı çarpışmada meydana gelen deformasyonun, dolayısıyla temas yüzey alanını belirleyen ana unsurlardandır. Bölüm 3.1.6.'da temas yüzey alanı sonuçlarının uyum kontrolü hakkında bilgi verilmiştir. Ancak görüntü analizinden elde edilen girinti miktarının doğruluğunu test etmek için Bölüm 3.1.8.'de açıklanan kütle yay damper modeli oluşturulmuş, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile modelden elde edilen girinti miktarı sonuçlarının uyumu kontrol edilmiştir. Yapılan RMSE ve korelasyon analizi sonuçlarında yüksek doğrulukta uyum belirlenen sonuçlara ait bulgular Bölüm 4.2.'de sunulmuştur. Böylelikle bu araştırmanın alt amaçlarından olan ÇSED'yi belirlemek için yan kameradan elde edilen temas yüzey alanı ve girinti sonuçlarının doğruluğu test edilmiş ve kanıtlanmıştır.

### 3.2. Kullanılan Görüntü Analizi Yönteminin Doğruluk Kontrolü

ÇSED'yi belirleyebilmek için çarpışmanın her anındaki tepki kuvvetlerinin hesaplanması gereklidir. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan görüntü işleme yönteminden elde edilen tepki kuvveti sonuçlarının doğruluğunu test etmek ve topun serbest düşüş sırasındaki tepki kuvvetlerini belirlemek amacıyla Şekil 3.8.'deki çalışma alanı tasarlandı. Tepki kuvvetlerini ölçmek amacıyla bir adet Kistler (Kistler Instrumente AG, Winterthur CS., model:9260AA6) kuvvet platformu kullanıldı. Kuvvet platformu saniyede 4000 veri alacak şekilde ayarlandı. 4 adet piezoelektrik sensör ile üç eksenle kuvvet ölçebilme özelliğine sahip kuvvet platformu 16 pin bağlantı kablosu (Model 1791A) ile bir adet analog/dijital dönüştürücü (A/D) ünitesine

(Model 5691A1) bağlandı. Sensörlerden gelen analog sinyali 16-bit çözünürlükte dijitalle dönüştüren (data acquisition) bu veri toplama ünitesinin bilgisayar bağlantısı bir adet 2.0 USB kablo kullanılarak kuruldu. A/D aracılığıyla dijitalle dönüştürülen yer tepki kuvvetlerinin görüntülenmesi ve kaydedilmesi için Kistler marka kuvvet platformları ile uyumlu çalışan BioWare yazılımı (versiyon 5.4.8.0) kullanıldı. Kuvvet platformunun kalibrasyonu için bir defaya mahsus olmak üzere BioWare yazılımı kullanılarak öncelikle Kistler'in 9260AA6 model kuvvet platformu için sunduğu teknik veri formunda yer alan her bir sensörün hassasiyet kazanç matrisi girildi. Üzerine miktarı bilinen bir kütle yerleştirilerek kuvvet platformunun kazanç matrisinin doğruluğu test edildi. Kalibrasyon prosedüründeki ikinci işlem kuvvet platformunun üzerine kendi ağırlığı dışında (5 kg) herhangi bir kuvvet etki etmezken sensörlerin algıladığı voltaj ofset değerinin okunarak kaydedilen dijital sinyalin sıfıra çekilmesidir. Bu işlem her bir hareket yakalama seansından önce kuvvet platformu üzerine top bırakılmadan önce tekrar edildi. Böylelikle top çarpışma sırasında, kuvvet platformunun teknik özelliklerinin belirtildiği dokümana göre  $\pm 0.001$  N doğrulukla ölçüm yapılması sağlandı.

Görüntü analizi kullanılarak yapılan ters dinamik hesaplamalar için topun serbest düşüş sırasında kuvvet platformuna çarptığı alanı görecekte 1 adet Photron (SA3, 120K, Japonya) marka yüksek hızlı kamera yerleştirildi (Şekil 3.8.). Kamera görüntü kaydetme frekansı saniyede 2000 Hz, perde hızı 1/10000 sn olarak ayarlandı. Tablo 3.3.'te yapısal özellikleri verilen farklı markalara ait 2 futbol topu 3 farklı iç basınçta koşulunda 3'er kez 2 m yükseklikten bırakıldı. Topun çarpışma görüntüleri ve kuvvet platformu sonuçları kaydedildi. Yüksek hızlı kameradan elde edilen görüntüler MRAW dosya tipinde bilgisayar ortamına kaydedildi. Kuvvet platformundan elde edilen veriler ise metin belgesi (.txt) dosya tipinde bilgisayar ortamına kaydedildi.



Şekil 3.7. Araştırma alanı dizaynı.

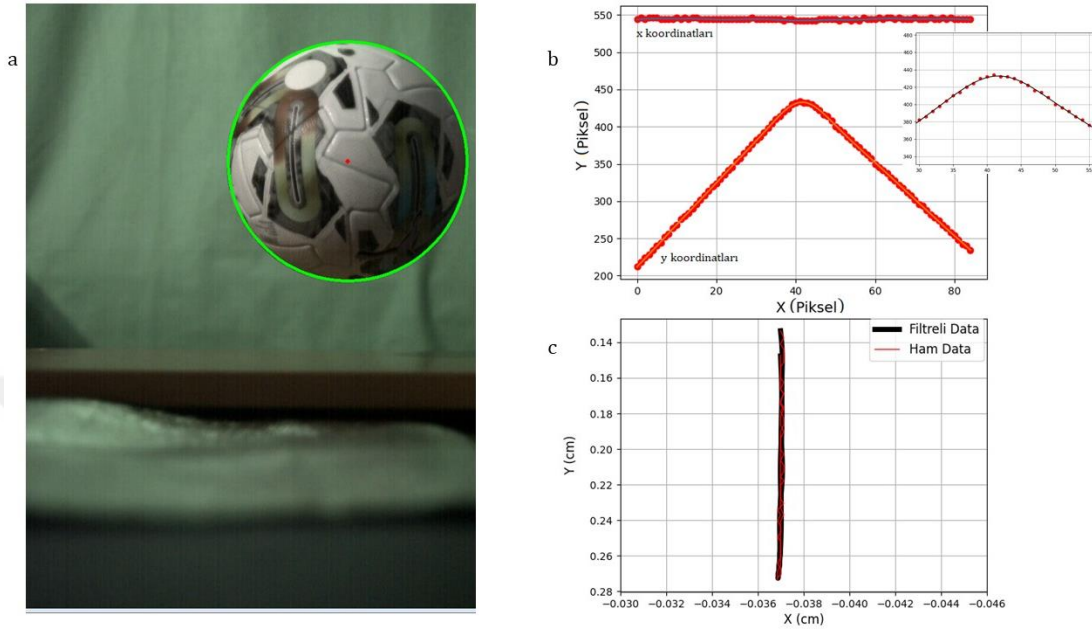
Tablo 3.3. Kuvvet platformu ve görüntü analizinde kullanılan topların yapısal özellikleri

Marka	İç Basınç (Bar)	Ağırlık (gr)	Çap (cm)
Puma	0.6	424.1	426.5
	0.8	425.7	427.2
	1.0	427.0	428.5
Uhlsport	0.6	21.5	21.6
	0.8	21.5	21.6
	1.0	21.5	21.6

### 3.2.1. Verilerin Sayısallaştırılması ve Filtreleme

MRAW dosya tipinde kaydedilen görüntüler bilgisayar ortamında PFV4 yazılımı ile en az kayıpla JPEG dosya tipinde kaydedildi. Araştırmada kullanılan topların geometrik merkezi koordinatlarına ait veriler Python programlama dilinde yer alan OpenCV (versiyon:4.5.5) kütüphanesindeki `HoughCircle` komutu kullanılarak yazılan program ile piksel dosya tipinde elde edildi (Şekil 3.9a.). Kalibrasyon görüntüsünde yer alan bilindik koordinatlar kullanılarak piksel dosya tipindeki veriler afin dönüşüm (affine transformation) metodu ile metrik sisteme dönüştürüldü (Şekil

3.9b.). Yer değiştirme verilerine sayısallaştırma s¼recinde meydana gelen piksel kaymalarının neden olduğu p¼r¼z¼n d¼zeltilmesi i¼in Python'da yazılan program ile 4. dereceden 0.07 Hz butterworth al¼ak ge¼irgen filtre uygulandı (şekil 3.9c.).



**şekil 3.8.** (a) 2 boyutlu yer değiştirme filtreli ve filtresiz veriler, (b) Serbest d¼řme sayısallaştırma ¼rnek g¼r¼nt¼, (c) Piksel cinsinden filtreli ve filtresi konum verileri.

### 3.2.2. Kuvvetin Belirlenmesi

Topun serbest d¼řme sonucunda kuvvet platformuna temas ettiği andan temasın bittiği ana kadar kuvvet değerleri B¼l¼m 3.1.7.'de yer alan y¼ntem ile g¼r¼nt¼ analiziyle hesaplandı. Ayrıca kuvvet platformu ile ¼arpıřmadaki tepki kuvvetleri kaydedildi.

### 3.2.3. Kuvvet Platformu ve G¼r¼nt¼ Analizi Y¼nteminden Elde Edilen Verilerin İşlenmesi

Kuvvet platformu (4000 Hz) ve kamera g¼r¼nt¼ hızı (2000 Hz) birbirinden farklı olduğu i¼in verinin uyum kontrol¼ i¼in ¼arpıřma zamanına g¼re elde edilen veriler normalize edildi (Eşitlik 3.5.). Elde edilen sonu¼ları istatistiksel olarak karşılaştırmak i¼in kuvvet platformu verileri 2'li paketler haline getirildi. G¼r¼nt¼ analizi y¼nteminden elde edilen veriler ile karşılaştırılabilir hale getirildi. Elde edilen sonu¼ların uyumu karşılaştırıldı.

$$z = \frac{x_i - x_{min}}{x_{maks} - x_{min}} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5.'te  $x_i$ ; anlık zaman,  $x_{min}$ ; temas başlangıç zaman,  $x_{maks}$ ; maksimum temas süresi.

### 3.2.4. Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Sonuçlarının Uyum Kontrolü

Bu araştırmanın sonucunda ÇSED belirlenebilmesi için çarpışma süresince her andaki kuvvet sonuçlarının elde edilmesi gerekliydi. ÇSED hesaplaması Bölüm 3.4.'te detaylı şekilde açıklanmıştır. Bu doğrultuda görüntü analizinden elde edilen kuvvet sonuçlarının doğruluğunu test etmek için Bölüm 3.2.3.'te belirtildiği şekilde işlenen ve karşılaştırılabilir hale getirilen verilerin korelasyon analizinde birbirleriyle yüksek ilişkide olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tüm denemelere ait çizilen grafiklerde çarpışma süresince kuvvet platformuyla ölçülen ve görüntü analizinden kestirilen sonuçların uyumu ortaya konmuştur. İlgili sonuçlara ait bulgular Bölüm 4.4.'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde çarpışma süresince enerji dağılımını belirlemek için gerekli olan parametrelerin görüntü analiziyle yüksek doğrulukta elde edildiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bundan sonraki bölümlerde enerjetik TK ve çarpışma süresince enerji dağılımının nasıl hesaplandığı açıklanacaktır.

### 3.3. Histeresiz Döngü Alanı Enerji Kaybı ve Enerjetik TK Hesabı

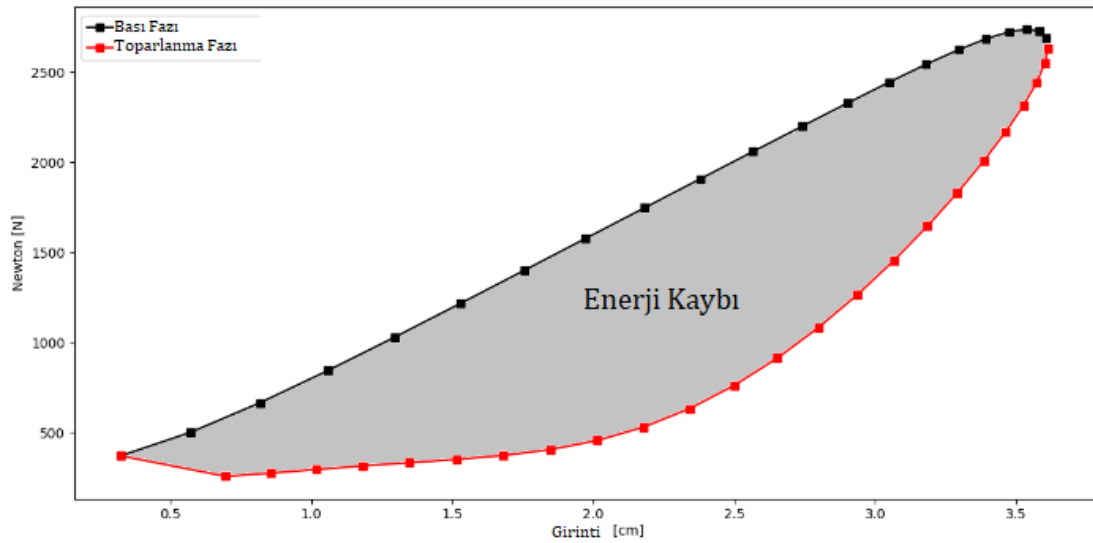
Çarpışmada topun bası fazı ve toparlanma fazlarında uyguladığı kuvvetin histerezis grafiğinde girinti miktarı ile oluşturduğu alan enerji kaybı olarak belirtilir (7). Stronge (7) çarpışma sırasında topun kaybettiği enerjinin ( $e_*$ ) histerezis alanının bası fazında yapılan işe oranının karekökünün negatifi olarak tanımlamıştır (Eşitlik 3.12.). Stronge (7)'nin bu tanımlamasında çarpışmada kaybedilen enerji miktarının belirlenmesi için her iki fazda yapılan işin hesaplanması gereklidir. Bu doğrultuda bu araştırmada histerezis alanın hesaplanması için çarpışma süresince bası ve toparlanma fazlarında etki eden kuvvetlerin (Şekil 3.10.) oluşturduğu eğrilerin altında kalan alanlar (sırasıyla,  $BF_a, TF_a$ ) Numpy kütüphanesindeki “trapz” fonksiyonu kullanılarak hesaplandı (Eşitlik 3.10., 3.11.). Çarpışma süresince topun yaptığı toplam işi belirlemek için her iki fazda elde edilen değerler toplandı. Histerezis alanının

hesaplaması için Eşitlik 12. kullanıldı. Araştırmada farklı markalara ait topların çaplarında farklılıklar olduğu için sonuçları karşılaştırabilmek adına her girinti miktarın topun çapına oranı hesaplanarak işlendi ve toplar arasındaki farklılıklar ortadan kaldırıldı. Eşitliklerde  $u_{maks}$ , maksimum deformasyon,  $n$ , çarpışma süresince geçen her andır.

$$BF_a = \sum_{n=1}^{u_{maks}} F_n(t) + F_{n+1}(t) \quad (3.10)$$

$$TF_a = \sum_{n=u_{maks}}^{t_{son}} F_n(t) + F_{n+1}(t) \quad (3.11)$$

$$e_* = \sqrt{\frac{(TF_a + BF_a) - BF_a}{BF_a}} \quad (3.12)$$



Şekil 3.9. Çarpışma süresince histerezis döngüsü.

### 3.4. Tüm Çarpışma Süresince Toptaki Enerji Dağılımı (ÇSED) Hesaplanması

Eşitlik 3.12.'ye göre topta meydana gelen enerji dağılımı tek bir değerle ifade edilir. Ancak çarpışmanın dinamik doğasından dolayı çarpışma sırasında enerji

dağılımı (ED) süreklidir. Bu yüzden TK, topun yapısal özelliklerine bağlı olarak çarpışma boyunca değişir ve dolayısıyla çarpışmanın her anındaki enerji dağılımı değerleri, topun mekanik özellikleri hakkında detaylı bilgi taşıyabilir. Bu noktadan hareketle, çarpışmanın her zaman aralığı için ED değerlerini hesaplamak amacıyla Hooke Yasasına dayalı yeni bir metodolojik yaklaşım geliştirildi.

Elastikiyet katsayısı ( $E$ ), gerilim/gerinim eğrisinin önemli bir parametresidir. Çarpışma sırasında top üzerinde darbe yönüne doğru gerilimi temsil eden bir girinti ( $L$ ) meydana gelir. Gerinim, çarpışmada etki eden stresin yarattığı girinti miktarıyla açıklanır. Bu durum yayın sıkışması veya gerilmesi gibidir ve yay katsayısı ( $k$ ) ile açıklanabilir. Yay sıkıştırıldığında veya gerildiğinde elastik potansiyel enerji ( $EPE$ ) depolanır. Ve bu enerji Hooke Yasası ve yapılan iş ile açıklanabilir (Eşitlik 3.13.). Topun temas alanındaki girintinin oluşturduğu temas yüzey alanı ( $A$ ) ve topun çapı ( $L_0$ ), birim gerinim başına bilgi sağlar (Eşitlik 3.14). Eşitlik 3.14. yeniden yazıldığında  $E$  değeri Eşitlik 15. ile bulunur. ÇSED belirlemek için Python'daki SciPy kütüphanesindeki "cumtrapz" fonksiyonu kullanılarak BF ve TF için kümülatif kuvvet ( $F_c$ ) hesaplandı. Böylece her aralıktaki ED değerleri, her iki faz boyunca depolanan enerji miktarı nedeniyle Eşitlik 3.16. kullanılarak topun anlık mekanik özelliklerinden tahmin edilebilir. Eşitlik 3.16. ile her an için elde edilen ÇSED değerlerinden literatür ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için BF ve TF'nin ortalaması alınarak tek bir OTK değeri elde edildi.

$$EPE(t) = \frac{1}{2} k(t) L^2(t) \quad (3.13)$$

$$EPE(t) = \frac{E(t)A(t)\Delta L^2(t)}{2L_0^2} \quad (3.14)$$

$$E(t) = \frac{2L_0(t)EPE(t)}{A(t)\Delta L^2(t)} \quad (3.15)$$

$$\text{ÇSED}(t) = 1 - \frac{F_c(t)}{E(t)} \quad (3.16)$$

### 3.5. Tüm Çarpışma Süresince Toptaki Enerji Dağılımı Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü

Bu araştırmanın alt amacı doğrultusunda geliştirilen yeni metodolojik yaklaşım ile elde edilen ÇSED sonuçlarının doğruluğunu test etmek için Bölüm 3.3.'te belirtilen yöntemle hesaplanan enerjetik TK sonuçları kullanıldı. Çarpışma süresince elde edilen enerji dağılımı sonuçlarının enerjetik TK sonuçları ile karşılaştırılabilir olması için ÇSED sonuçlarının ortalaması alınarak veri karşılaştırılabilir hale getirildi.

### 3.6. İstatistik

Araştırma sonucunda elde edilen bulgular ortalama ve standart sapma olarak sunuldu. Kuvvet platformu ve görüntü analizi ile elde edilen kuvvet değerleri arasındaki ilişki Spearman Sıra Korelasyonu ile analiz edildi. Ayrıca iki farklı yöntem ile hesaplanan top temas yüzey alan sonuçları ve model ile deneysel çalışmadan elde edilen top girinti miktarı sonuçları arasındaki doğruluğun kontrolü ortalama kök ortalama kare hatası (RMSE) (Eşitlik 3.17.) ve Spearman Sıra Korelasyonu ile değerlendirildi. Bulunan RMSE değerleri beklenen maksimum değerlere oranlanarak RMSE yüzde değerleri hesaplandı (91). İki farklı yöntemle hesaplanan TK değerlerinin normal dağılım analizi Shapiro Wilks testi ile test edildi. Normal dağılım gösteren veriler analizi Student T testi ile analiz edildi. Farklı markalara ait topların OTK ve girinti sonuçları arasındaki farklılıkların analizi ANOVA testi ile değerlendirildi. ANOVA sonucunda farklılık belirlendiğinde ise Tukey's posthoc testi yapılarak farklılığın hangi gruptan kaynaklandığı belirlendi. Anlamlılık düzeyi 0.05 olarak kabul edildi. Anova testi sonuçları için Cohen etki büyüklüğü <0.10 küçük, <0.25 ortalama ve >0.40 yüksek olarak alındı. Tüm istatistiksel analizler Python programlama dili *STATISTICS* kütüphanesi kullanılarak yazılan programlar ile yapıldı. (Ek-4)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (3.17)$$

## 4. BULGULAR

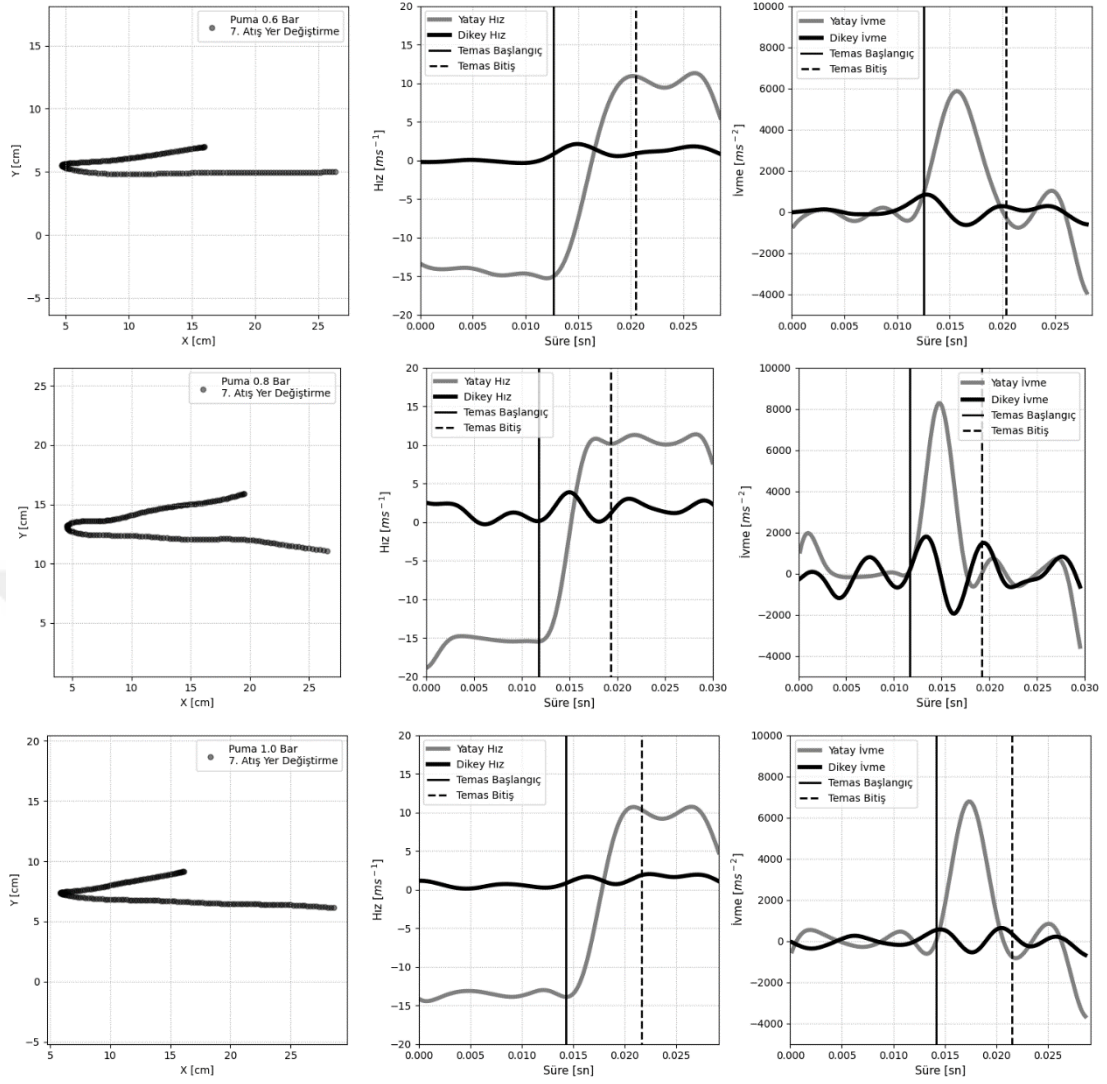
### 4.1. Top Çarpışma Dinamikleri Sonuçları

#### 4.1.1. Ortalama Çarpışma Süre, Hız ve Girinti Bulguları

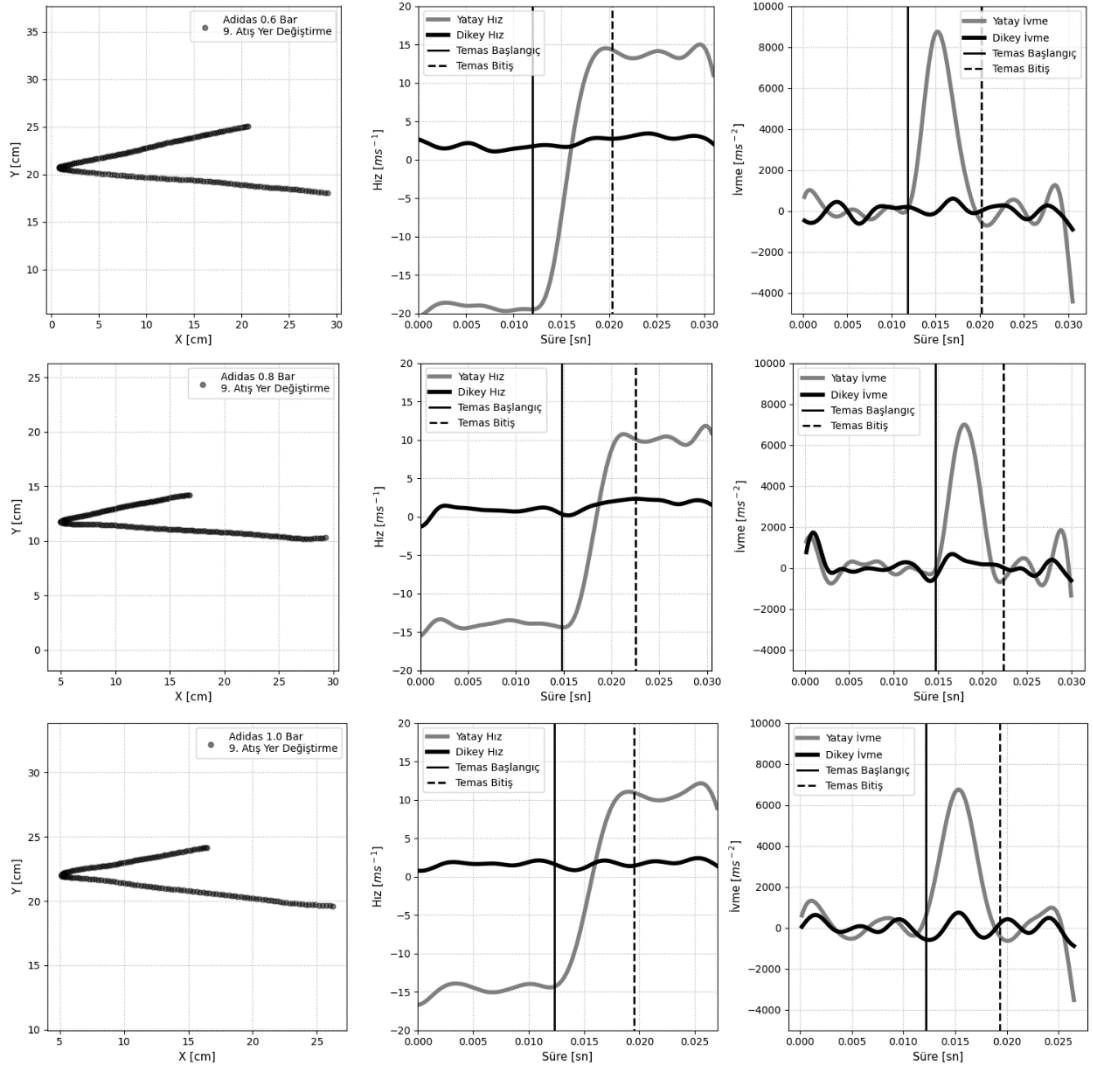
Araştırmada kullanılan toplara ait geliş hızı, çıkış hızı, temas süresi ve maksimum girinti oluşana kadar geçen sürenin ortalama ve standart sapmaları Tablo 4.1.'de verilmiştir. Topların geometrik merkezlerinin yer değiştirme, hız ve ivme sonuçlarına ait örnek grafikler Şekil 4.1.-5.'de sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** Top çarpışma dinamiklerinin ortalama ve standart sapma değerleri.

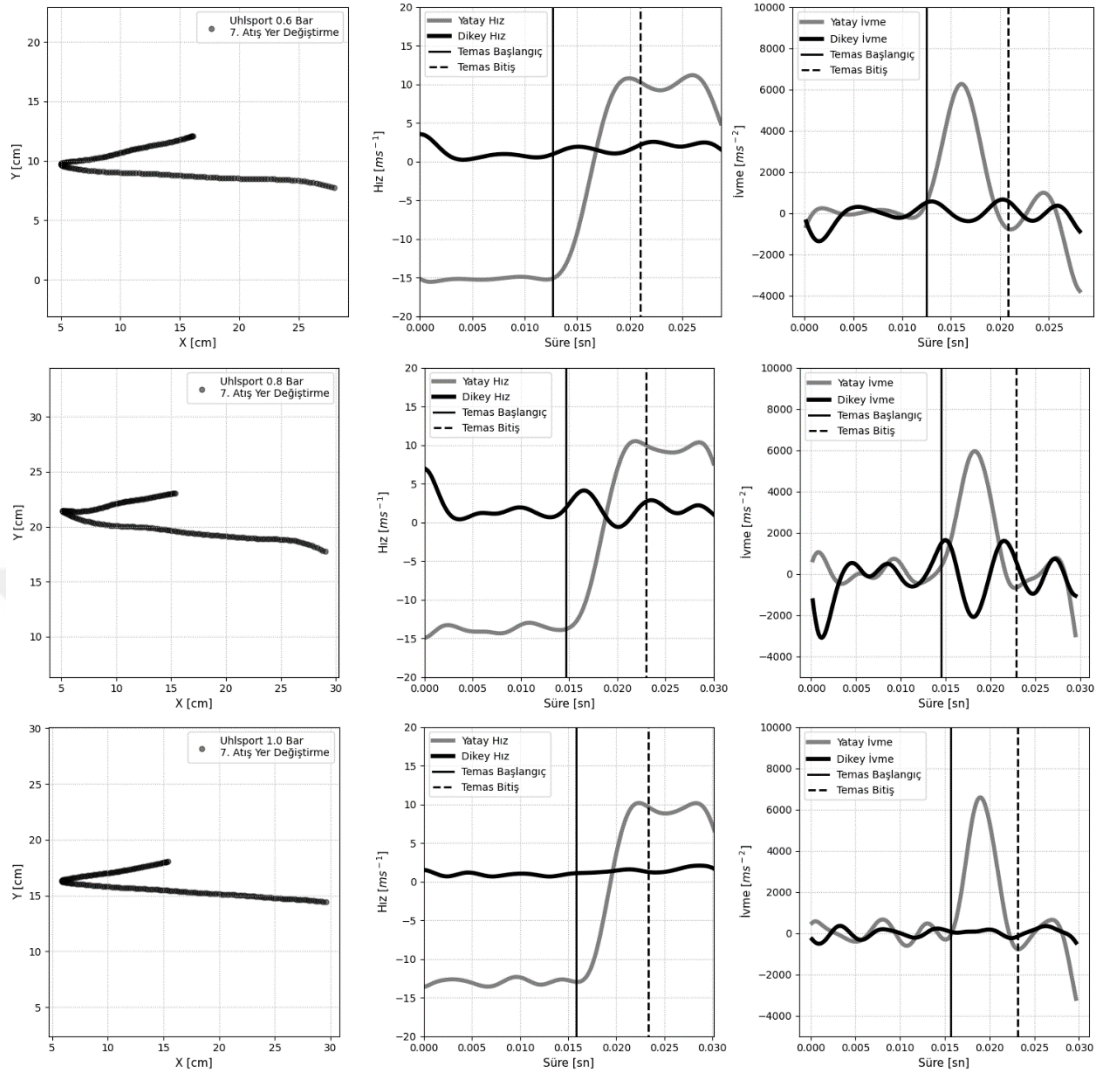
	Parametreler	Puma $\bar{x} \pm \sigma$	Adidas $\bar{x} \pm \sigma$	Uhlsport $\bar{x} \pm \sigma$	Molten $\bar{x} \pm \sigma$	Black $\bar{x} \pm \sigma$
0.6 Bar	Geliş Hızı (m/sn)	13.5±1.79	13.8±3.38	13.7±2.54	12.4±1.88	13.0±2.35
	Çıkış Hızı (m/sn)	9.46±0.53	9.83±1.29	10.01±0.55	8.68±0.74	9.22±0.64
	Girinti (cm)	3.52±0.51	3.28±0.72	3.47±0.63	3.12±0.31	3.19±0.52
	Temas Süresi (ms)	8.49±0.53	8.27±1.29	8.54±0.53	8.59±0.74	8.25±0.64
	Maks Girinti Süresi (ms)	4.03±0.53	3.86±1.29	3.97±0.47	4.01±0.74	3.86±0.64
0.8 Bar	Geliş Hızı (m/sn)	13.8±2.83	13.2±1.48	14.3±2.21	12.7±2.15	13.7±2.56
	Çıkış Hızı (m/sn)	9.77±0.69	9.57±0.43	9.55±0.62	9.37±0.78	9.38±1.03
	Girinti (cm)	3.44±0.56	3.13±0.31	3.54±0.58	3.10±0.53	3.09±0.53
	Temas Süresi (ms)	8.03±0.69	7.81±0.43	8.46±0.52	8.05±0.78	7.68±1.03
	Maks Girinti Süresi (ms)	3.86±0.69	3.7±0.43	3.97±0.5	3.79±0.78	3.62±1.03
1.0 Bar	Geliş Hızı (m/sn)	13.4±1.80	13.5±1.72	13.8±2.34	12.3±2.49	12.0±2.76
	Çıkış Hızı (m/sn)	9.92±0.81	10.05±0.46	9.77±0.74	9.36±0.49	8.64±0.90
	Girinti (cm)	3.22±0.30	3.00±0.32	3.29±0.51	2.90±0.56	2.51±0.54
	Temas Süresi (ms)	7.86±0.81	7.33±0.46	7.73±0.65	7.73±0.49	7.18±0.90
	Maks Girinti Süresi (ms)	3.74±0.81	3.45±0.46	3.66±0.58	3.68±0.49	3.42±0.90



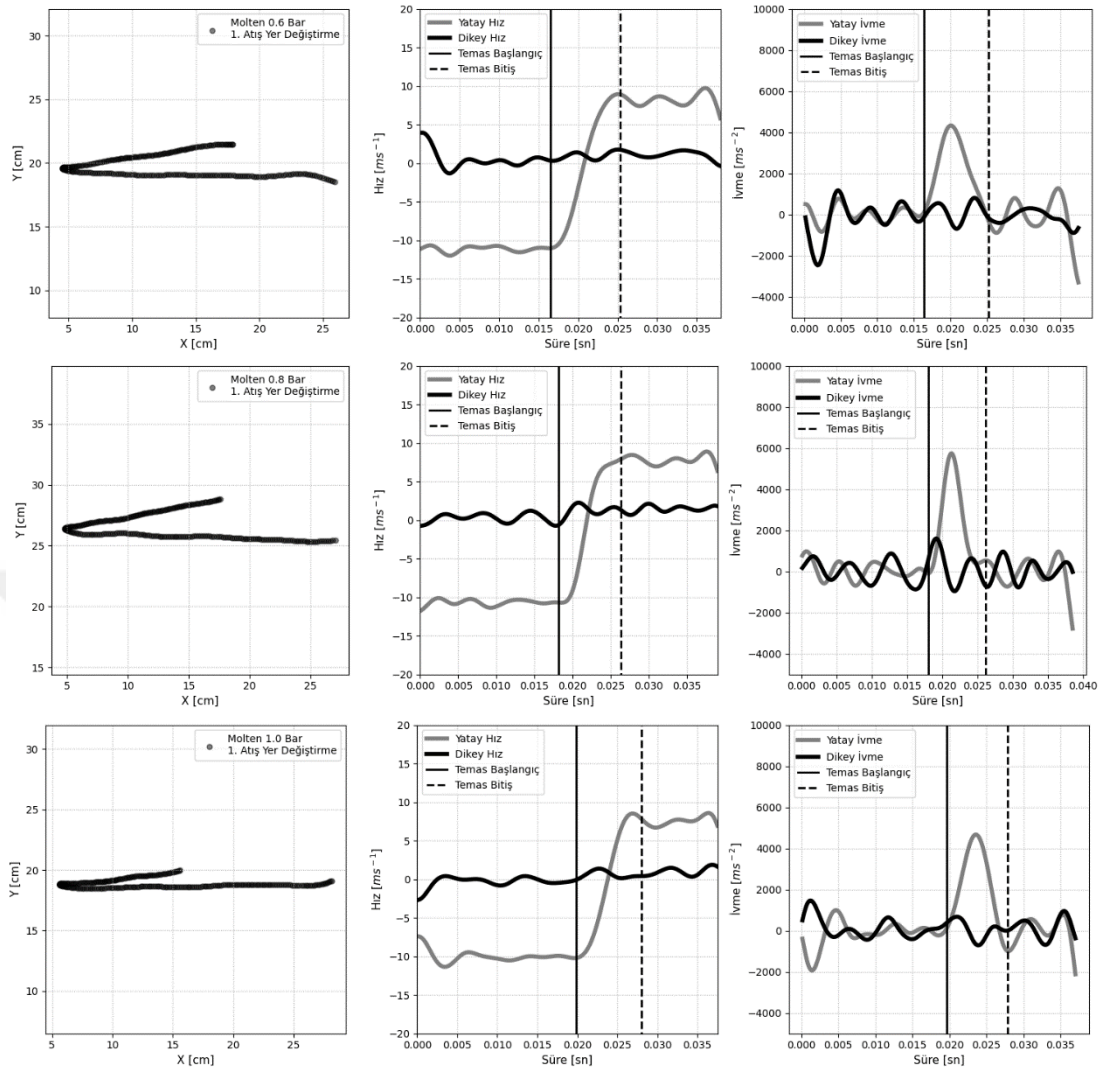
Şekil 4.1. Puma marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.



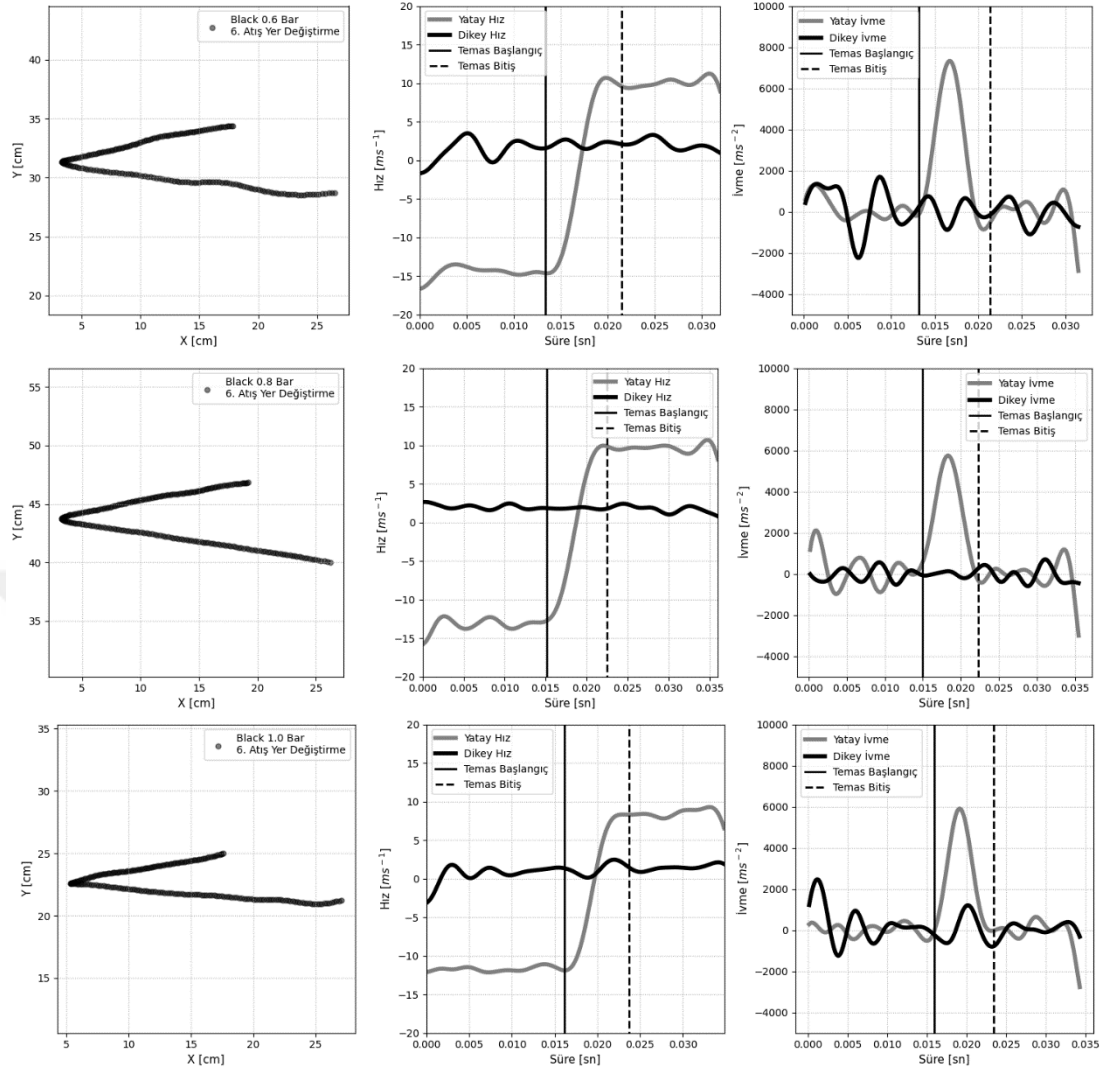
Şekil 4.2. Adidas marka topun yer değıştirme hız ve ivme örnek grafikleri.



Şekil 4.3. Uhlisport marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.



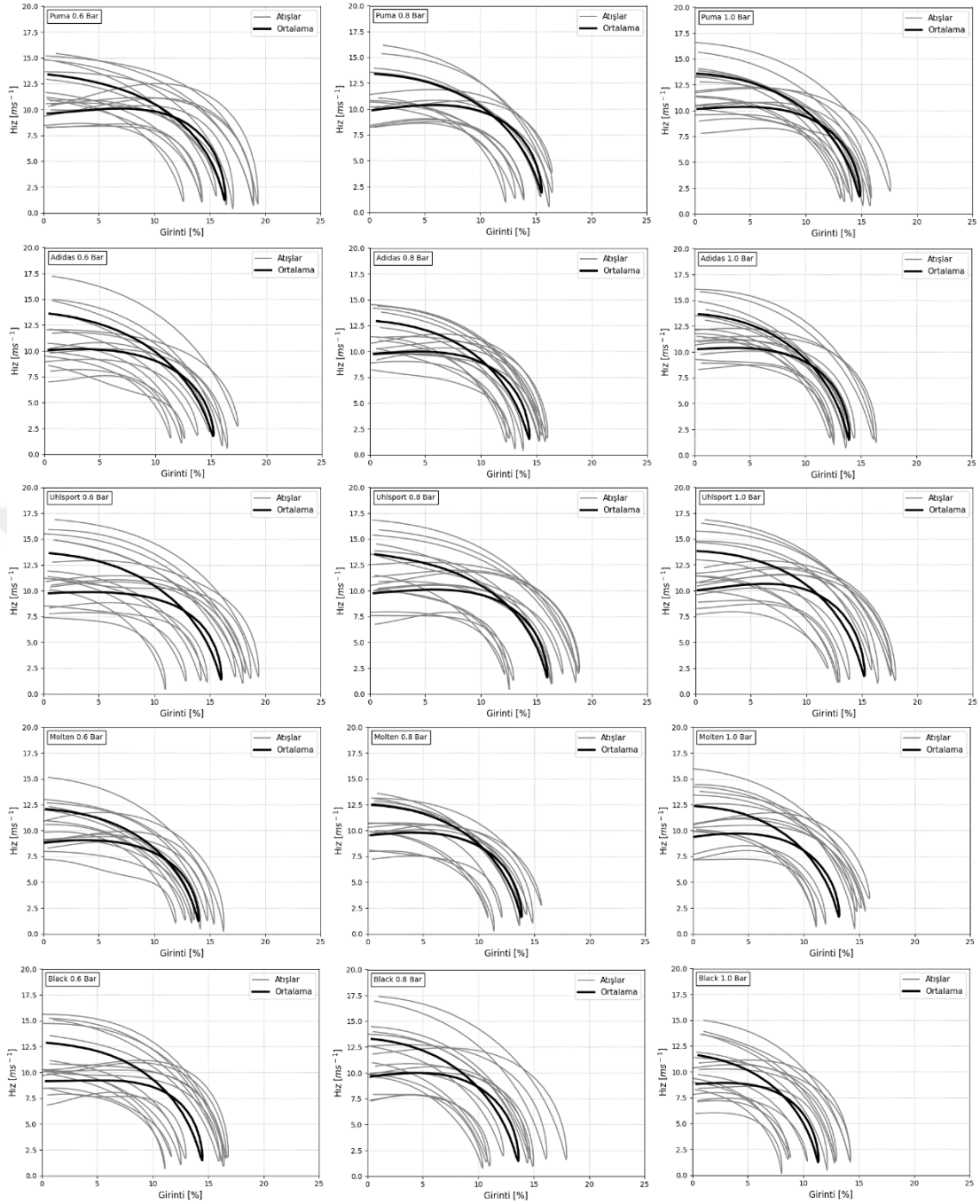
Şekil 4.4. Molten marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.



**Şekil 4.5.** Black marka topun yer değiştirme hız ve ivme örnek grafikleri.

#### 4.1.2. Tüm Çarpışmalara Ait Hızların Histerezis Döngü Grafikleri

Tüm iç basınç koşullarında yapılan atışların girinti oranına göre hız ve ortalama hız histerezis grafiği Şekil 4.6.'da sunulmuştur. Topun çarpışma öncesi ilk temas anındaki geliş hızı arttığında topta meydana gelen girinti miktarının arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, iç basınç arttıķça topun geliş hızına göre girinti miktarının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca yüksek hızlarda görüntü yakalanmasının avantajı sonucu topların neredeyse durma noktasına gelip sonrasında tepki kuvveti ile birlikte hızlandığı ortaya konmuştur. Tüm sonuçlar dikkatlice incelendiğinde topların maksimum girinti sonrası tepki kuvvetine rağmen başlangıçta deformasyonda küçük toparlanmalarla birlikte toparlanma fazına girdikleri görölmüştür.

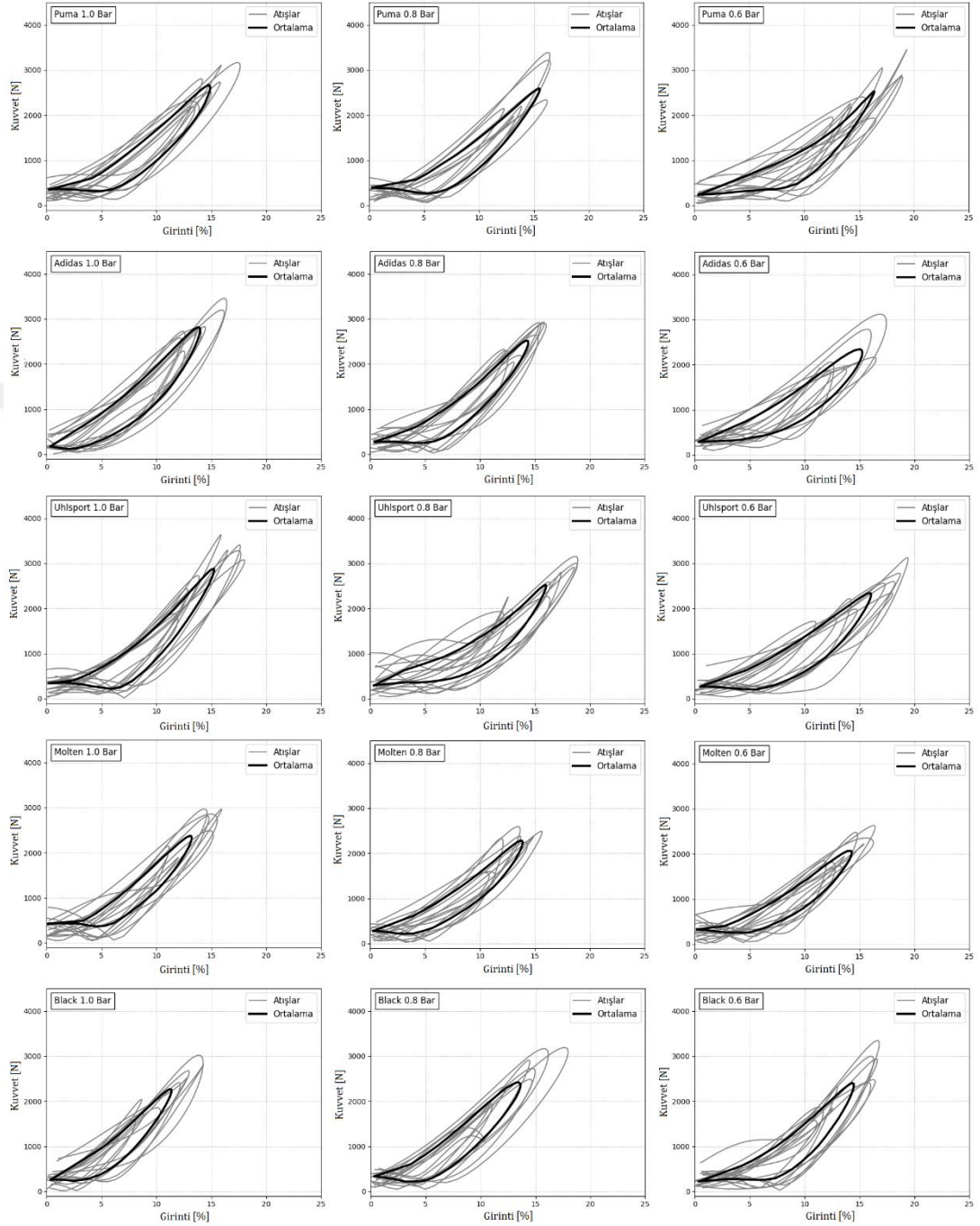


**Şekil 4.6.** İç basınca göre tüm atış hızları ve ortalama hız histerezis grafikleri.

#### 4.1.3. Görüntü Analizi Kuvvet Sonuçları

Çarpışma süresince görüntü analizinden elde edilen tepki kuvvetlerinin girinti oranına göre davranışlarını içeren histerezis grafikler Şekil 4.7.'de sunulmuştur. Ayrıca her iç basınç koşulu altında yapılan tüm atışlara ait maksimum kuvvetlere ait

ortalama ve standart sapma verileri Tablo 4.2.'de sunulmuştur. Topun iç basıncı arttıkça topta meydana gelen kuvvetlerin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.7. Farklı iç basınçlarda tüm topların girinti yüzdesine göre histeresis alanları.

**Tablo 4.2.** Histerezis döngü hesaplama sonuçları.

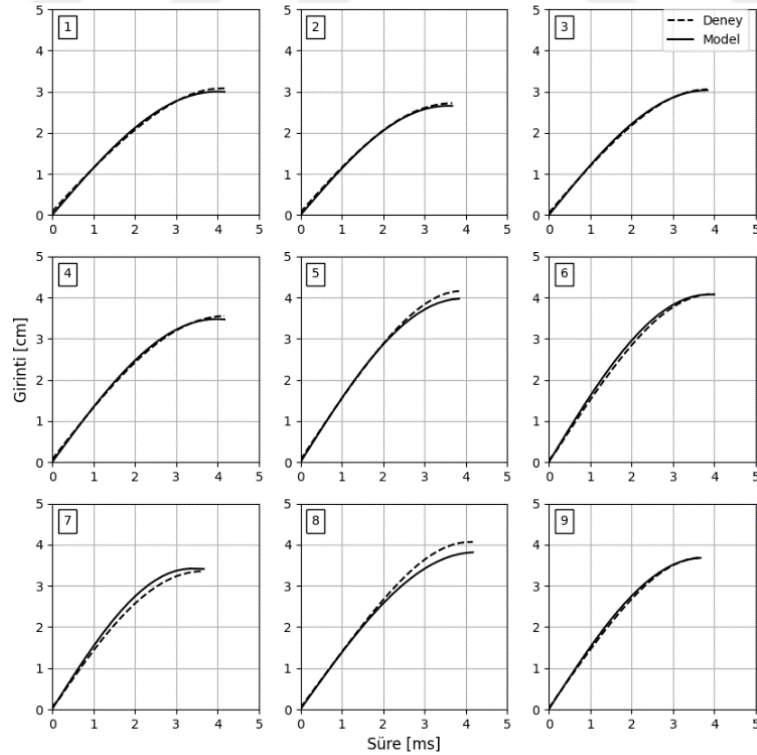
	Parametreler	Puma $\bar{x} \pm \sigma$	Adidas $\bar{x} \pm \sigma$	Uhlsport $\bar{x} \pm \sigma$	Molten $\bar{x} \pm \sigma$	Black $\bar{x} \pm \sigma$
0.6 Bar	Geliş Hızı (m/s)	13.5±1.79	13.8±3.38	13.7±2.54	12.4±1.88	13.0±2.35
	Girinti (%)	16.41±2.39	15.28±3.35	16.06±2.93	14.22±1.42	14.54±2.40
	Maks Kuvvet (kN)	2.55±0.52	2.38±0.62	2.34±0.46	2.10±0.32	2.42±0.59
0.8 Bar	Geliş Hızı (m/s)	13.8±2.83	13.2±1.48	14.3±2.21	12.7±2.15	13.7±2.56
	Girinti (%)	16.02±2.63	14.59±1.47	16.40±2.69	14.12±2.37	13.99±2.40
	Maks Kuvvet (kN)	2.61±6.48	2.56±3.51	2.54±4.52	2.30±4.90	2.45±6.11
1.0 Bar	Geliş Hızı (m/s)	13.4±1.80	13.5±1.72	13.8±2.34	12.3±2.49	12.0±2.76
	Girinti (%)	14.91±1.41	13.98±1.50	15.27±2.37	13.22±2.54	11.38±2.44
	Maks Kuvvet (kN)	2.68±4.04	2.82±3.34	2.90±5.77	2.40±5.38	2.29±5.07

#### 4.2. Top Girinti Miktarı Sonuçları ve Uyum Analizi Sonuçları

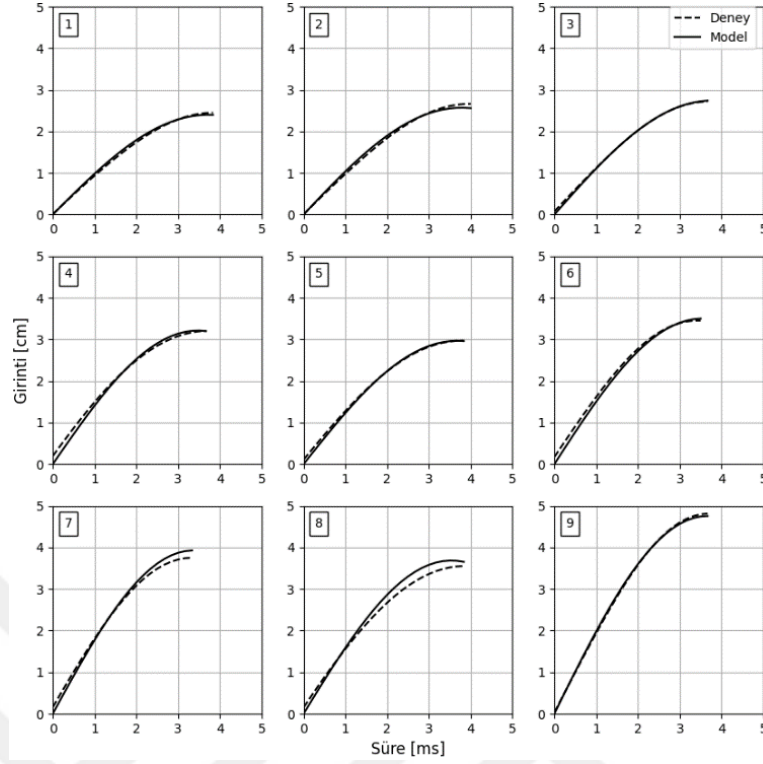
Araştırma sonucunda deneysel çalışma ve kütle yay damper modelinden elde edilen maksimum girinti sonuçlarına ait ortalama ve standart sapma değerler Tablo 4.3.'te sunulmuştur. Ayrıca Tablo 4.3.'te topta meydana gelen girinti miktarının doğruluğunu kontrol etmek için yapılan istatistiksel analiz sonuçları da verilmiştir. Model ve deney sonuçları arasındaki girinti miktarlarının RMSE sonuçları karşılaştırıldığında toplar arasında 1 mm'den daha düşük sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Buna ek olarak yapılan RMSE yüzde sonuçlarının %5'ten daha küçük değerler olduğu ve yüksek doğrulukta tahmin sınırları (<%10) içerisinde olduğu belirlenmiştir. Ek olarak farklı iç basınç koşulları altında yapılan tüm atışların çarpışmanın ilk temas anından maksimum deformasyon anına kadar olan davranışlarına ait model ve deney sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.8.-22.'de sunulmuştur.

Tablo 4.3. Model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.

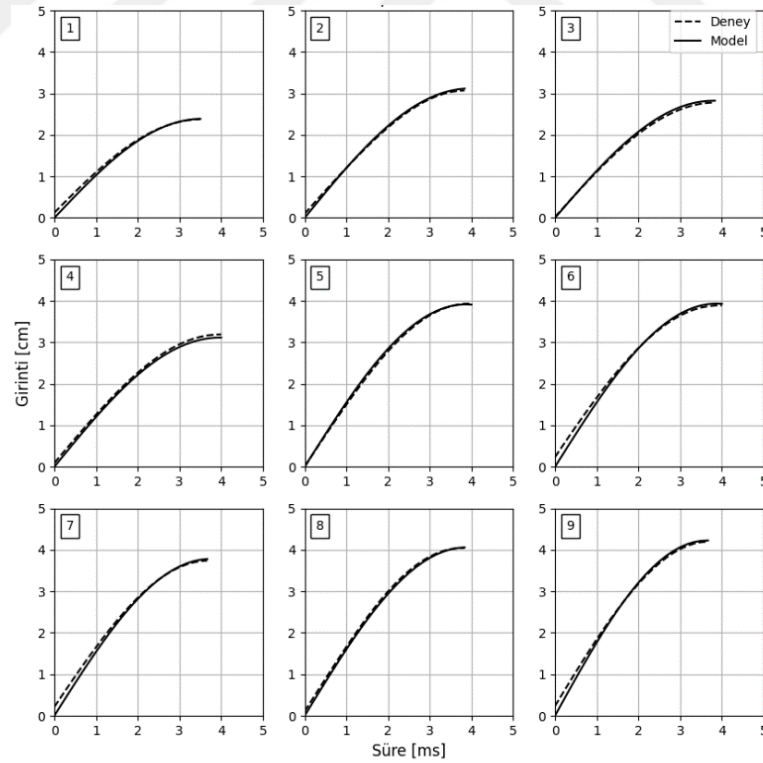
Parametreler	Puma $\bar{x} \pm \sigma$	Adidas $\bar{x} \pm \sigma$	Uhlsport $\bar{x} \pm \sigma$	Molten $\bar{x} \pm \sigma$	Black $\bar{x} \pm \sigma$
<b>0.6 Bar</b>					
Model Girinti (cm)	3.45±0.23	3.30±0.33	3.61±0.17	3.10±0.11	3.19±0.19
Deney Girinti (cm)	3.52±0.30	3.28±0.35	3.60±0.18	3.12±0.12	3.19±0.20
RMSE (cm)	0.08±0.08	0.06±0.03	0.02±0.01	0.05±0.02	0.05±0.03
RMSE (%)	2.41±0.23	1.91±0.63	0.78±0.10	2.06±0.52	1.84±0.44
<b>0.8 Bar</b>					
Model Girinti (cm)	3.26±0.26	3.00±0.12	3.47±0.10	2.94±0.25	2.97±0.24
Deney Girinti (cm)	3.40±0.32	3.09±0.10	3.45±0.07	3.05±0.29	3.00±0.22
RMSE (cm)	0.13±0.06	0.10±0.02	0.06±0.02	0.10±0.03	0.04±0.04
RMSE (%)	4.58±0.59	3.57±0.47	1.96±0.31	3.59±0.41	1.81±0.66
<b>1.0 Bar</b>					
Model Girinti (cm)	3.10±0.18	2.906±0.12	3.17±0.13	2.88±0.14	2.51±0.13
Deney Girinti (cm)	3.21±0.18	3.003±0.13	3.29±0.15	3.01±0.17	2.51±0.18
RMSE (cm)	0.10±0.04	0.096±0.03	0.11±0.04	0.12±0.04	0.06±0.01
RMSE (%)	3.73±0.21	3.476±0.12	3.73±0.5	4.4±0.67	3.06±0.64



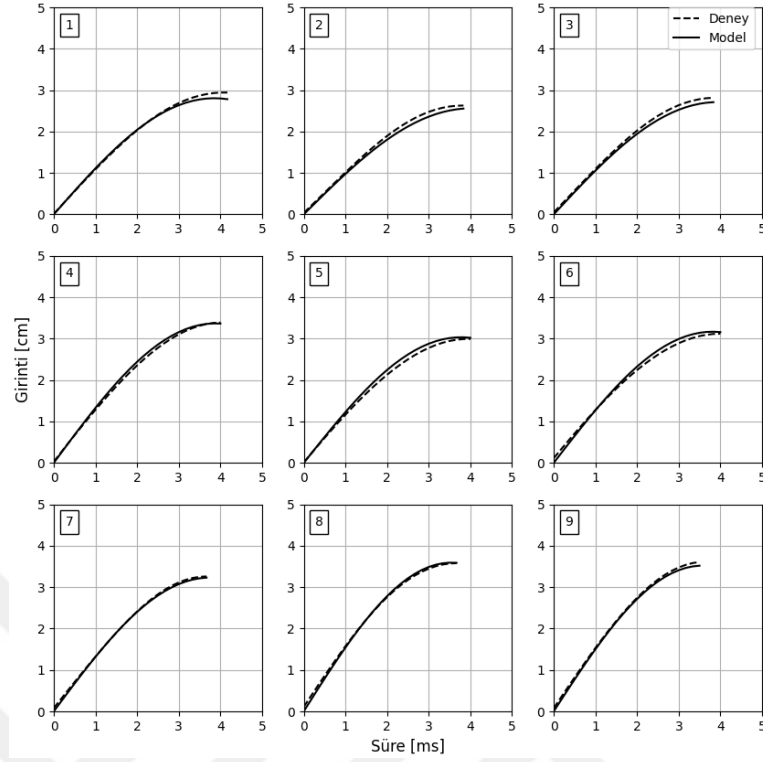
Şekil 4.8. Puma 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.



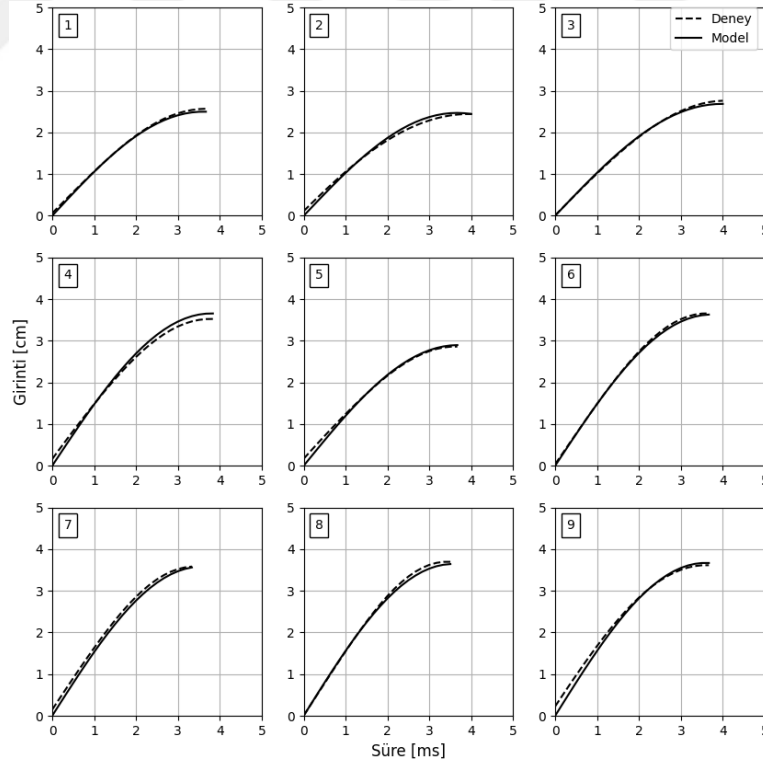
Şekil 4.9. Adidas 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.



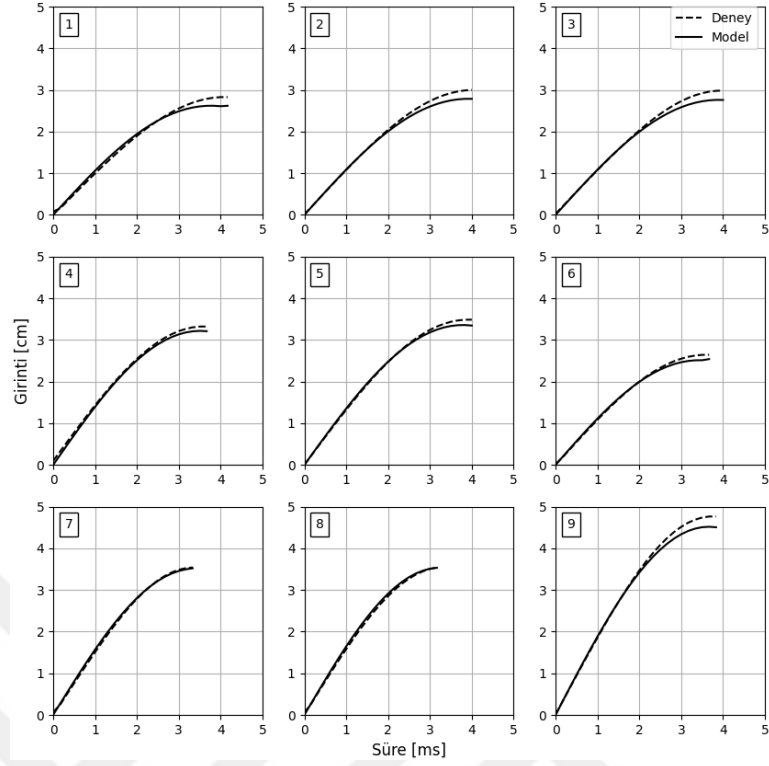
Şekil 4.10. UhlSPORT 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.



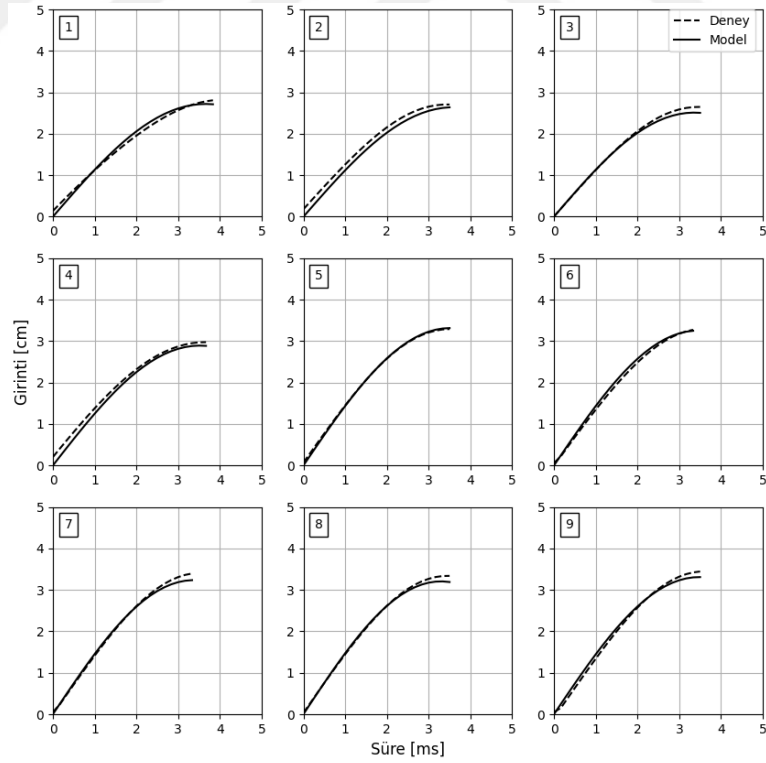
Şekil 4.11. Molten 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.



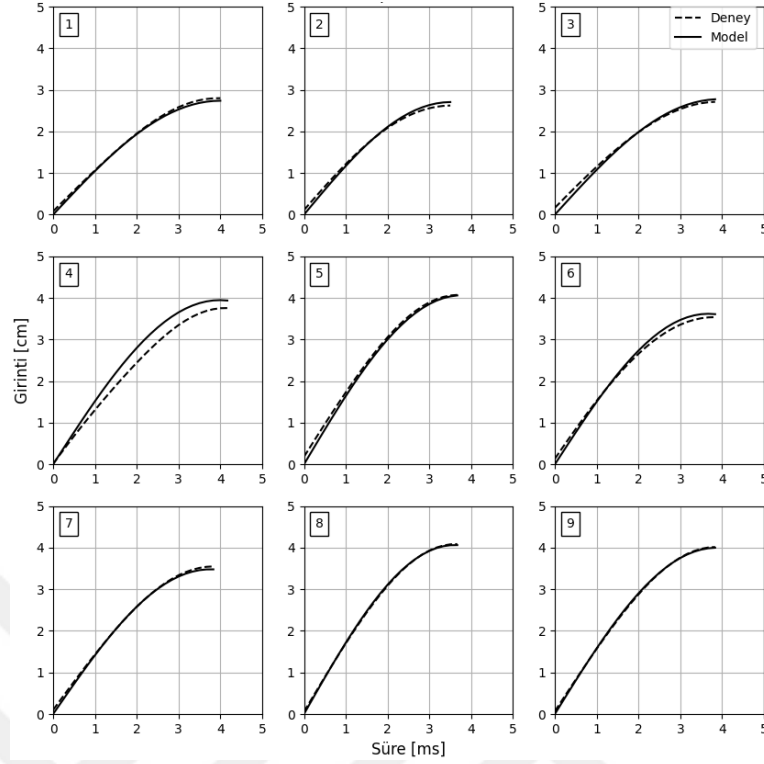
Şekil 4.12. Black 0.6 bar model ve deney girinti sonuçları.



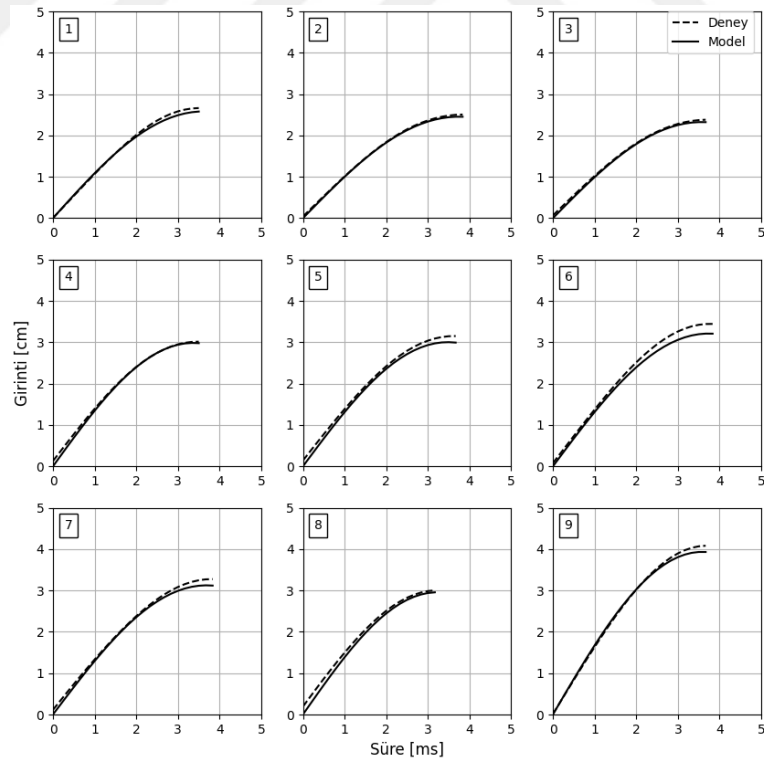
Şekil 4.13. Puma 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.



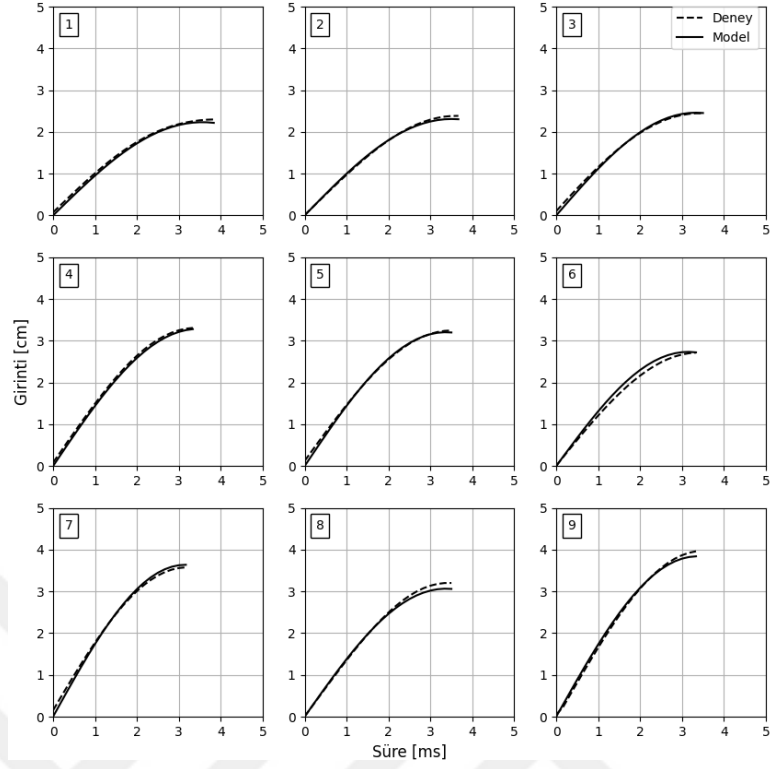
Şekil 4.14. Adidas 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.



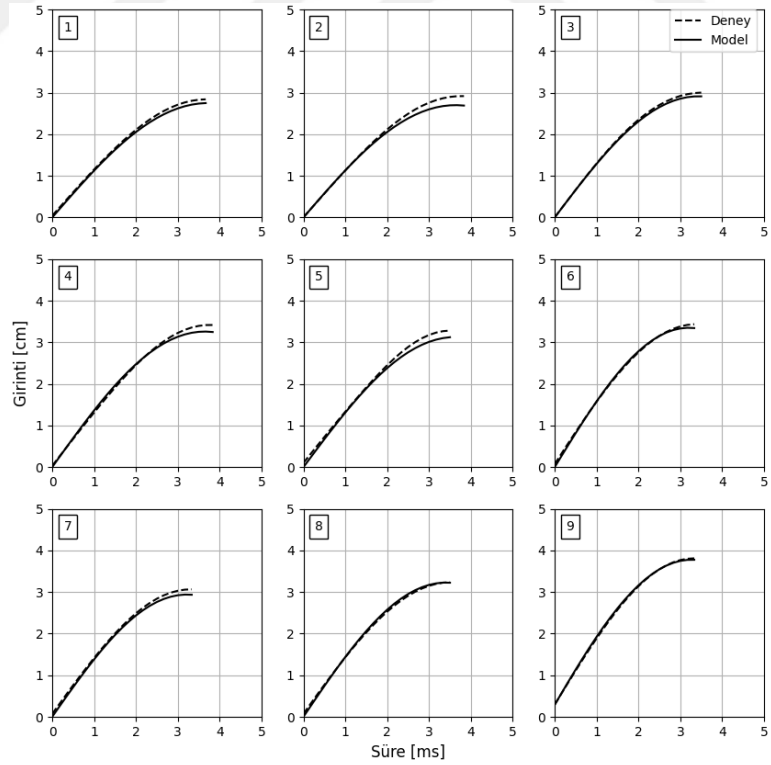
Şekil 4.15. Uhlspart 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.



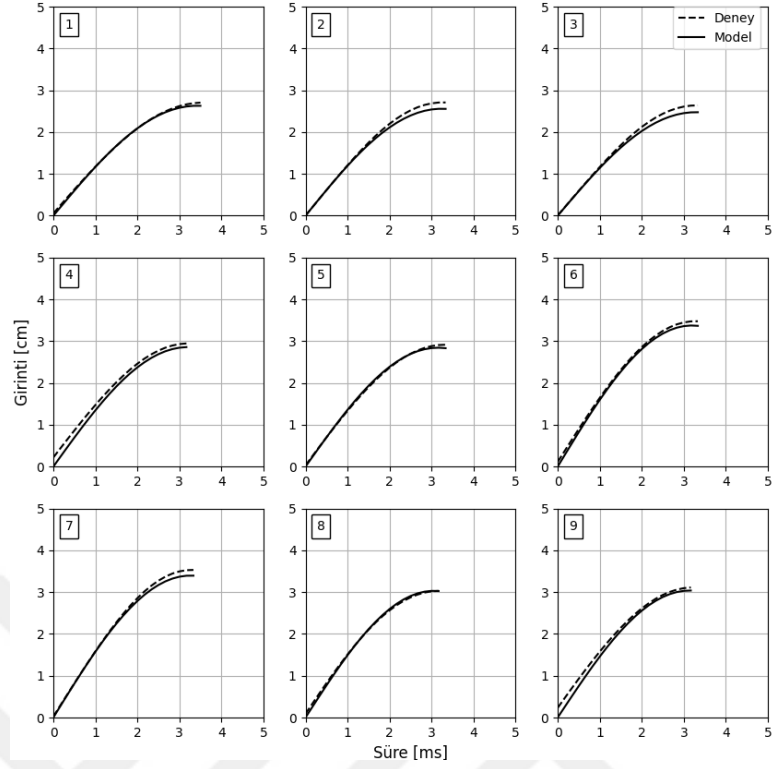
Şekil 4.16. Molten 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.



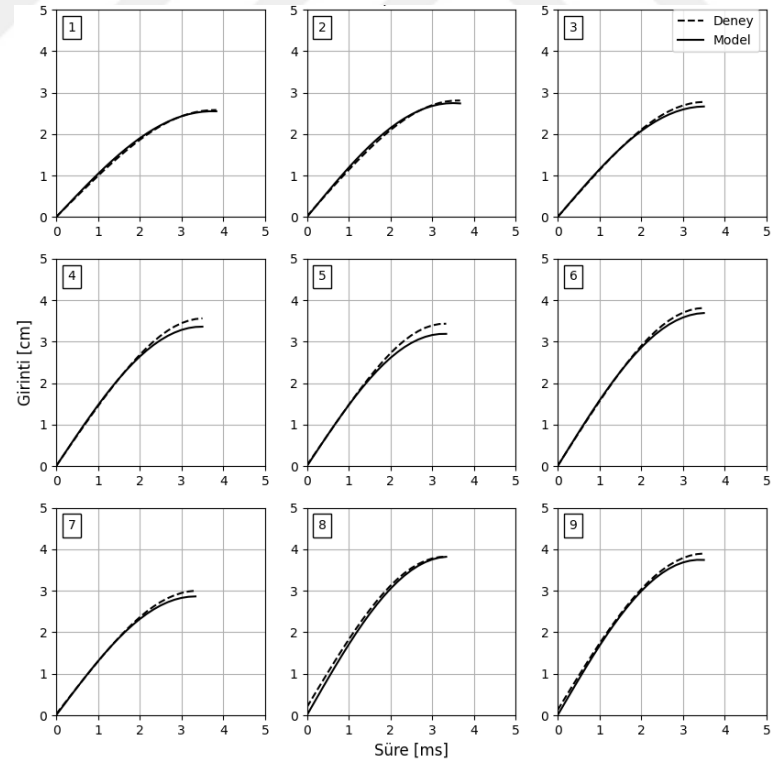
Şekil 4.17. Black 0.8 bar model ve deney girinti sonuçları.



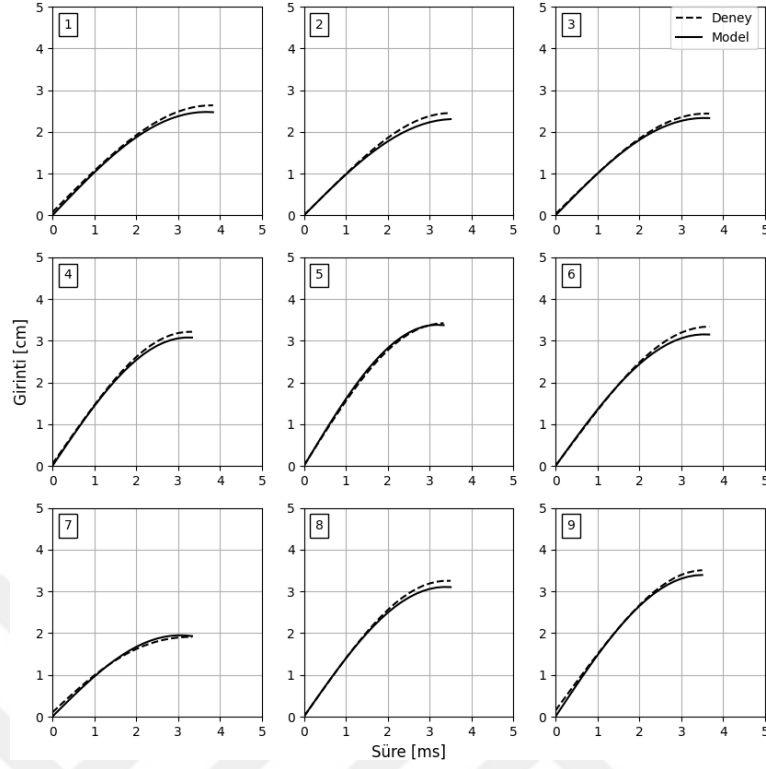
Şekil 4.18. Puma 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.



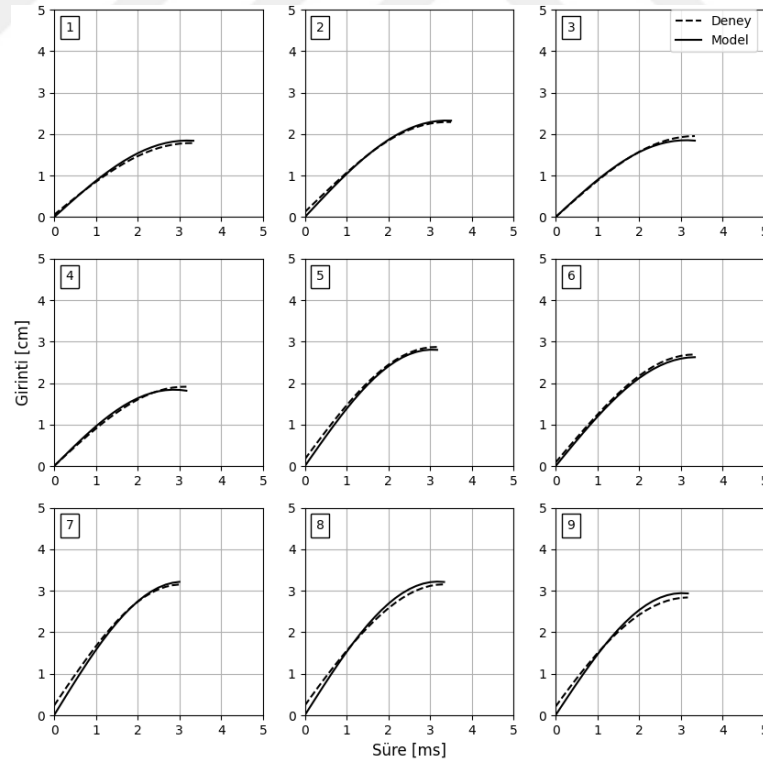
Şekil 4.19. Adidas 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.



Şekil 4.20. Uhlsport 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.



Şekil 4.21. Molten 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.

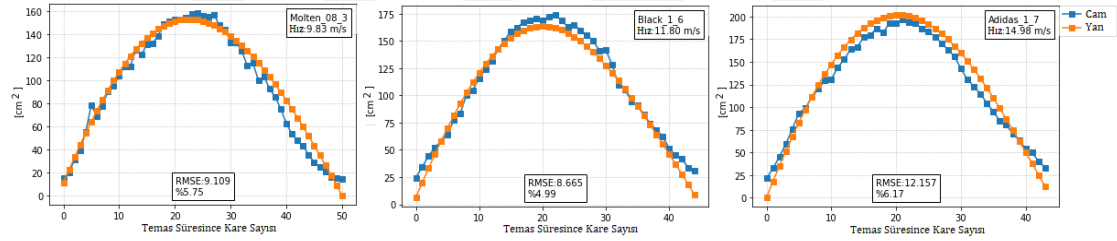


Şekil 4.22. Black 1.0 bar model ve deney girinti sonuçları.

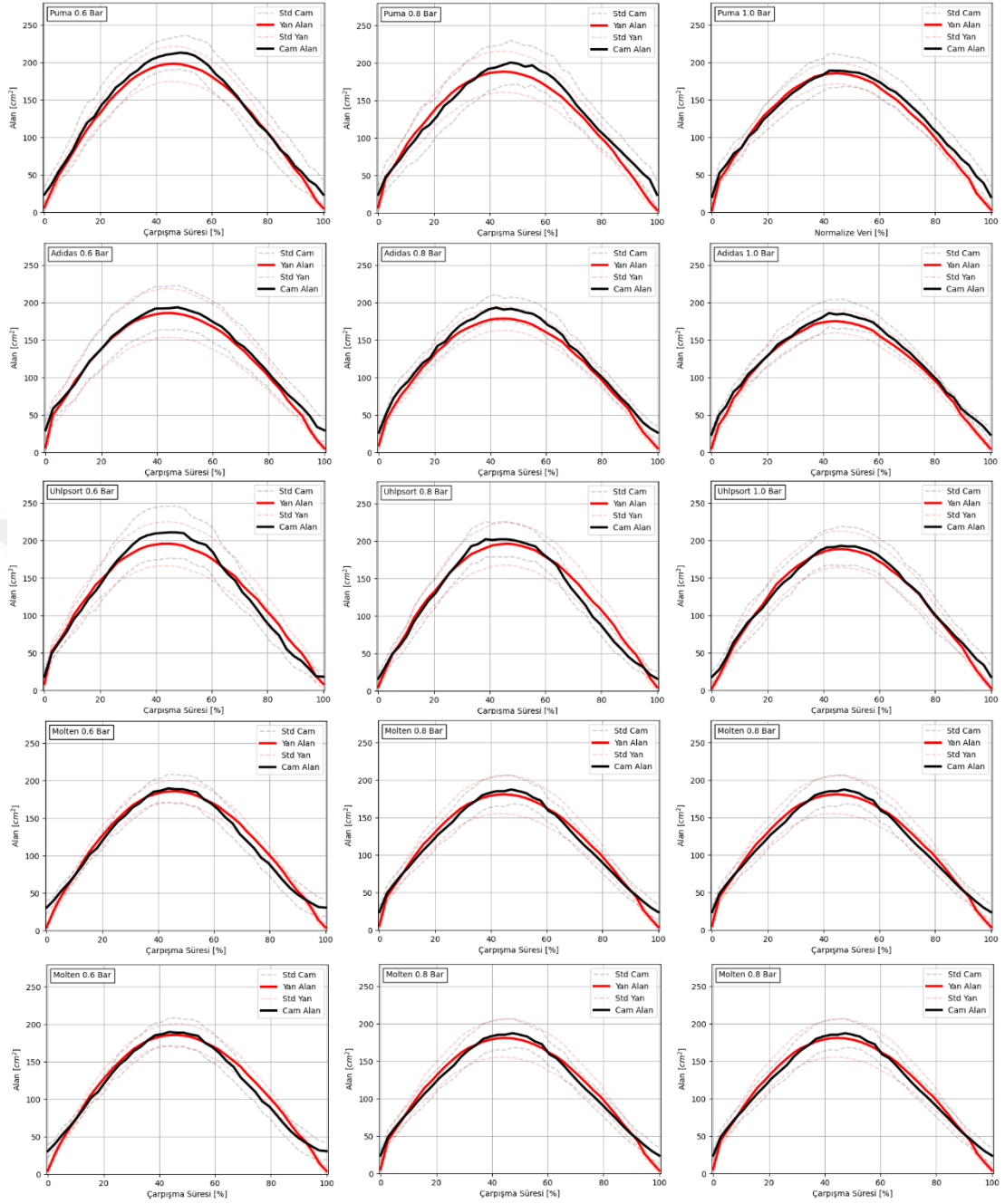
### 4.3. Temas Yüzey Alan Sonuçları ve Uyum Analizi Sonuçları

Araştırma kapsamında yan ve arka kameradan elde edilen görüntülerden hesaplanan temas yüzey alanı sonuçlarının 3 farklı top için örnek grafikleri Şekil 23.'te sunulmuştur. Ayrıca farklı iç basınç koşulları altında yapılan tüm atışlara ait çarpışma süresince ortalama temas yüzey alan davranışları Şekil 24.'te sunulmuştur. Her iki yöntem ile elde edilen temas yüzey alan sonuçlarının birbiri ile uyumunu belirlemek için yapılan RMSE ve korelasyon analizlerine ait veriler Tablo 4.4.'te sunulmuştur.

Yapılan istatistiksel analiz sonucunda her iki yöntemden elde edilen temas yüzey alan sonuçlarının 0.97 ve üzerinde yüksek ilişkiye sahip ( $p < 0.001$ ) olduğu belirlenirken, RMSE yüzde sonuçlarının %8'den daha küçük değerlere sahip olduğu belirlendi. İki yöntem ile ayrı ayrı hesaplanan sonuçların benzerliği yan kameradan elde edilen verilerin topun düz bir zemine çarptığında yüzey alanının hesaplanması için konik taban alan hesabının kullanılabileceğini ortaya koymuştur.



**Şekil 4.23.** Top temas yüzey alanında kullanılan iki farklı yöntemde elde edilen sonuçlar için 3 farklı top ve vuruşun grafiği.



**Şekil 4.24.** Her iç basınç koşulu için topların cama bıraktıkları iz ve yan kameradan hesaplanan elde edilen temas yüzey alan sonuçlarının ortalama ve standart sapma değerleri.

**Tablo 4.4.** İki farklı temas yüzey alanı hesaplamasının karşılaştırma sonuçları.

IB	Parametreler	Puma $\bar{x} \pm \sigma$	Adidas $\bar{x} \pm \sigma$	Uhlsport $\bar{x} \pm \sigma$	Molten $\bar{x} \pm \sigma$	Black $\bar{x} \pm \sigma$
0.6 Bar	RMSE (cm <sup>2</sup> )	17.32±6.75	13.46±3.35	14.97±2.34	13.70±3.04	16.96±2.61
	RMSE (%)	7.743±2.45	6.853±1.56	6.796±1.06	7.116±1.64	7.886±1.18
	r*	0.97±0.01	0.98±0.00	0.98±0.00	0.98±0.00	0.98±0.00
0.8 Bar	RMSE (cm <sup>2</sup> )	15.02±1.75	13.46±3.35	15.74±4.82	13.91±3.49	16.96±2.61
	RMSE (%)	7.83±2.26	6.85±1.56	7.83±2.26	7.17±1.27	7.88±1.18
	r*	0.97±0.01	0.98±0.01	0.98±0.00	0.98±0.01	0.97±0.01
1.0 Bar	RMSE (cm <sup>2</sup> )	12.69±5.28	13.22±2.90	13.34±1.60	14.14±4.06	14.72±2.99
	RMSE (%)	6.52±2.58	5.85±1.31	6.52±2.58	7.84±2.36	7.27±1.72
	r*	0.98±0.01	0.99±0.00	0.98±0.00	0.99±0.00	0.97±0.01

p<0.001, r\*, Ortalama ve standart p sonuçları her bir top ve iç basınç için 0.000±0.000'dan daha küçüktü. IB, iç basınç

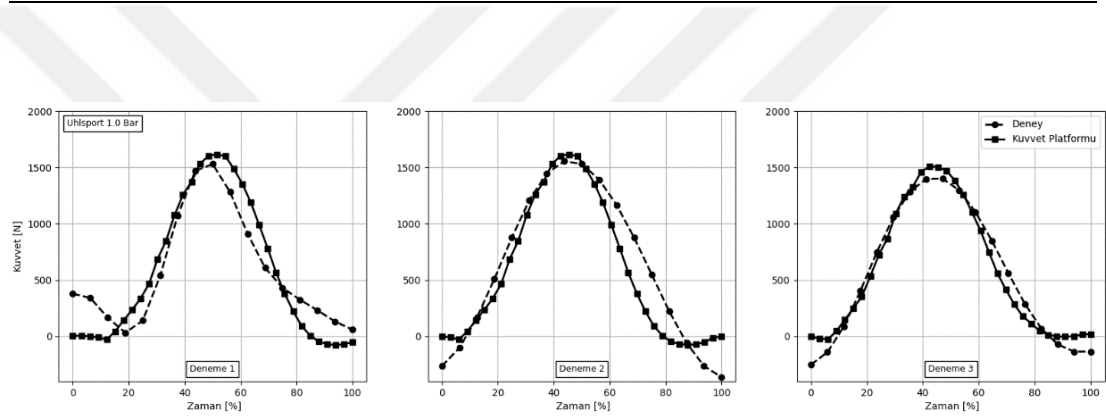
#### 4.4. Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Yöntemi Sonuçları

Bu araştırmanın ana amacı doğrultusunda ÇSED'yi belirlemek için çarpışma süresince gerçekleşen girinti miktarı, temas yüzey alanı sonuçlarıyla birlikte çarpışma süresince her anda ortaya çıkan tepki kuvvetlerinin bilinmesi gerekiyordu. Bu doğrultuda görüntü analizi kullanılarak kestirilen tepki kuvveti sonuçlarının doğruluğunu ortaya koymak için Bölüm 3.2.'de yer alan araştırma alanı tasarlanarak Bölüm 3.2.1.'den 3.2.4.'e kadar olan süreçteki işlemler yapıldı. Böylelikle görüntü analizinden kestirilen kuvvetler ve kuvvet platformundan doğrudan ölçülen kuvvet sonuçları karşılaştırılarak görüntü analizi yönteminin doğruluğu ortaya kondu.

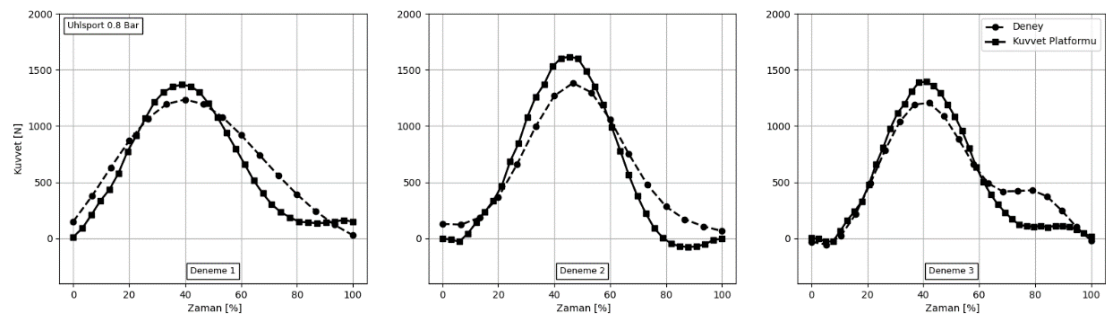
Kuvvet platformu ve görüntü analizinden elde edilen tepki kuvveti sonuçlarının ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4.5.'te, çarpışma süresince ortaya çıkan kuvvet davranışları şekil 4.25-4.30.'da sunulmuştur. Yapılan analiz sonucunda her iki yöntemle elde edilen tepki kuvvetleri arasında istatistiksel olarak anlamlı yüksek ilişki tespit edilmiştir (p<0.001). Ek olarak her iki yöntemle çarpışma süresince elde edilen tepki kuvveti davranışlarının grafikleri incelendiğinde kuvvet platformundan ölçülen ve deneysel çalışmada kestirilen sonuçların benzer davranışlar sergilediği gözlenmiştir.

**Tablo 4.5.** Kuvvet platformu (ölçülen) ve deneysel çalışma (kestirilen) sonuçlarının karşılaştırılması.

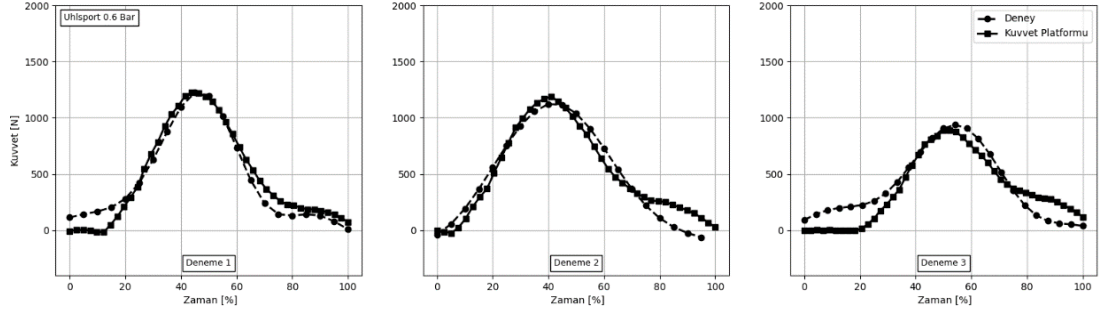
	İç Basınç (Bar)	Geliş Hızı (m/s) $\bar{x} \pm \sigma$	TK $\bar{x} \pm \sigma$	Ölçülen Maks	Kestirilen Maks	r $\bar{x} \pm \sigma$	p
				Kuvvet (N) $\bar{x} \pm \sigma$	Kuvvet (N) $\bar{x} \pm \sigma$		
Puma	0.6	6.01±0.12	0.859±0.023	1156.51±12.595	1162.75±111.99	0.960±0.023	p<0.001
	0.8	6.01±0.08	0.885±0.005	1377.55±140.75	1272.19±154.44	0.964±0.027	p<0.001
	1	6.14±0.10	0.877±0.008	1625.57±97.600	1609.15±129.65	0.961±0.014	p<0.001
Uhlisport	0.6	6.28±0.26	0.839±0.009	1102.29±185.31	1095.49±145.06	0.967±0.008	p<0.001
	0.8	6.26±0.33	0.885±0.005	1458.49±136.26	1396.38±87.989	0.963±0.030	p<0.001
	1	6.16±0.11	0.876±0.034	1580.30±60.424	1494.76±82.720	0.948±0.007	p<0.001



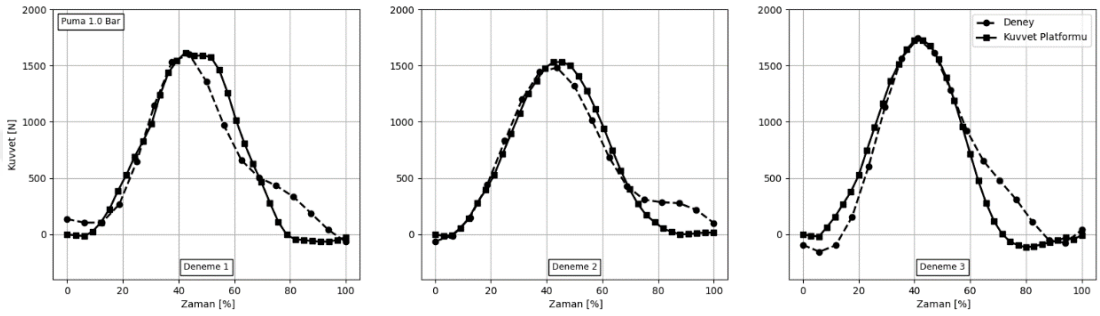
**Şekil 4.25.** Uhlisport 1.0 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.



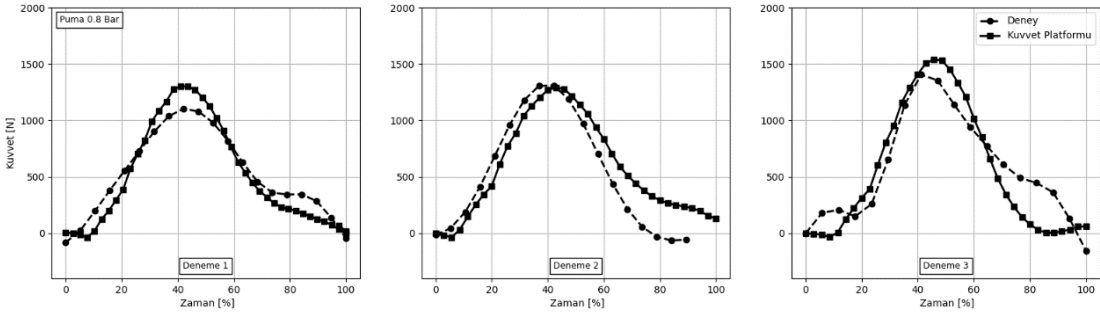
**Şekil 4.26.** Uhlisport 0.8 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.



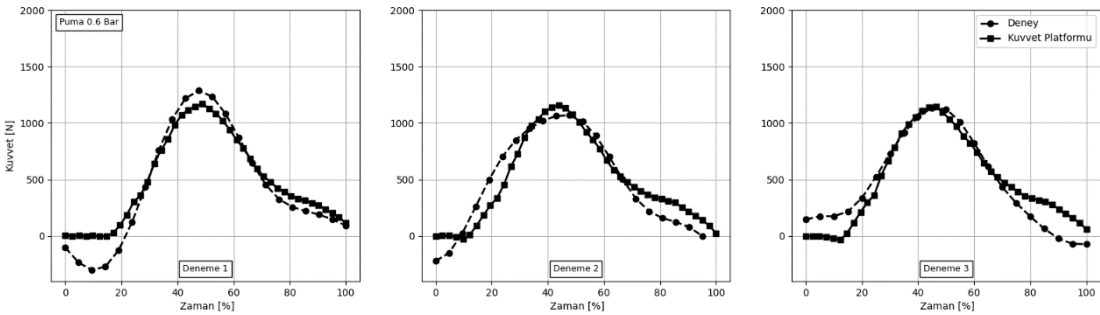
**Şekil 4.27.** Uhlisport 0.6 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.



**Şekil 4.28.** Puma 1.0 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.



**Şekil 4. 29.** Puma 0.8 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.



**Şekil 4.30.** Puma 0.6 bar iç basınç kuvvet platformu ve deneysel çalışmadan elde edilen kuvvet sonuçları.

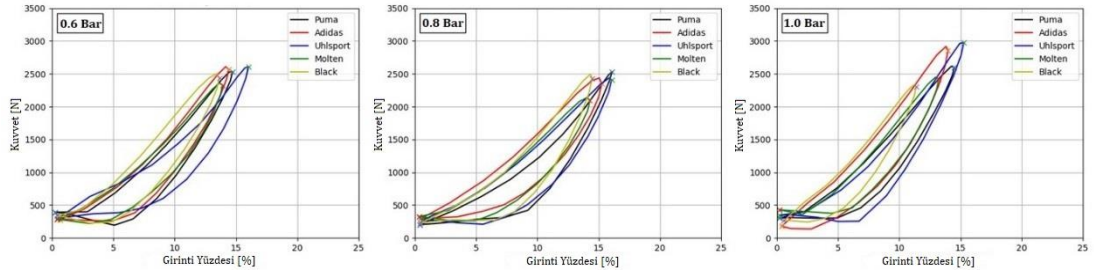
#### 4.5. Enerjetik TK Hesaplaması İçin Histerezis Döngü Alan Sonuçları

Bu araştırmanın ana amacı çarpışma dinamiklerini belirleyerek ÇSED'yi hesaplamaktı. Ancak literatürde daha önce böyle bir hesaplama yöntemi olmadığı için elde edilen sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için çarpışmada meydana gelen enerji kaybını belirleyecek bir formül kullanılması gerekiyordu. Bölüm 2.5.8.'de enerjetik TK çarpışmada spin ve kayma olduğu sürece doğru sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Ayrıca aynı bölümde çarpışmada spin ve kayma olmadığı sürece daha önce belirtilen 3 farklı hesaplama yönteminin aynı sonuçları vereceği belirtilmektedir. Bu doğrultuda bu çalışmada ÇSED sonuçlarının doğruluğunu test etmek için enerjetik TK yönteminin spin ve açılı çarpmalarda doğru sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir. Böylelikle ÇSED sonuçlarının doğruluğu test edilerek elde edilen sonuçların doğruluğu ortaya konulabilecektir. Böylelikle bu araştırmanın ana amacı doğrultusunda ÇSED sonuçlarını doğrulamak için enerjetik TK sonuçları hesaplanmıştır. Enerjetik TK hesaplayabilmek için elde edilen farklı yapısal özelliklere sahip topların çarpışma süresince bası ve toparlanma fazlarında yaptığı iş sonuçlarına ait ortalama ve standart sapma değerler Tablo 4.6.'da sunulmuştur. Buna ek olarak Stronge (7)'ye göre çarpışmada meydana gelen tepki kuvvetlerinin oluşturduğu histerezis döngü alanı topun enerji kaybını ifade eden özelliktir. Bu doğrultuda tüm markalara ait topların çarpışma sırasında etki ettiği kuvvet değerleri topun çapına oranına göre meydana gelen girinti miktarının oluşturduğu histerezis grafikleri Bölüm 4.1.3.'te Şekil 4.7.'de sunulmuştur. Belirtilen grafiklerden elde edilen ortalama histerezis alan sonuçları incelendiğinde Şekil 4.31.'de tüm topların her iç basınç koşulu altında yapılan atışların histerezis döngü alanlarının benzer davranış sergilediği görülmüştür. Ancak Black marka topun 1 bar iç basınçta 0.6 ve 0.8 bar iç basınca göre histerezis alanının azaldığı görülmektedir.

**Tablo 4.6.** Histerezis döngü hesaplama sonuçları.

İB	Parametreler	Puma $\bar{x} \pm \sigma$	Adidas $\bar{x} \pm \sigma$	Uhlsport $\bar{x} \pm \sigma$	Molten $\bar{x} \pm \sigma$	Black $\bar{x} \pm \sigma$
0.6 BAR	Geliş Hızı (m/s)	13.5±1.79	13.8±3.38	13.7±2.54	12.4±1.88	13.0±2.35
	Maks Girinti (cm)	3.52±0.51	3.28±0.72	3.47±0.63	3.12±0.31	3.19±0.52
	Girinti (%)	16.41±2.39	15.28±3.35	16.06±2.93	14.22±1.42	14.54±2.40
	Alan (Histerezis) (kJ)	10.18±4.28	9.75±6.01	10.29±5.39	7.29±2.58	8.41±3.32
	Maks Kuvvet (kN)	2.55±0.52	2.38±0.62	2.34±0.46	2.10±0.32	2.42±0.59
	Bası Fazı İş (kJ)	36.07±6.79	35.62±9.23	35.15±8.03	31.02±5.45	32.54±5.77
	Toparlanma Fazı İş (kJ)	25.89±3.40	25.86±3.83	24.86±2.80	23.73±3.00	24.12±2.79
0.8 BAR	Toplam İş (kJ)	61.97±9.86	61.49±1.27	60.01±10.76	54.76±8.42	56.67±8.43
	Geliş Hızı (m/s)	13.8±2.83	13.2±1.48	14.3±2.21	12.7±2.15	13.7±2.56
	Maks Girinti (cm)	3.44±0.56	3.13±0.31	3.54±0.58	3.10±0.53	3.09±0.53
	Girinti (%)	16.02±2.63	14.59±1.47	16.40±2.69	14.12±2.37	13.99±2.40
	Alan (Histerezis) (kJ)	9.68±5.98	8.04±2.45	10.54±4.84	7.61±4.46	7.53±3.81
	Maks Kuvvet (kN)	2.61±6.48	2.56±3.51	2.54±4.52	2.30±4.90	2.45±6.11
	Bası Fazı İş (kJ)	36.15±9.91	33.93±4.07	37.36±6.48	32.18±7.47	32.88±7.08
1.0 BAR	Toparlanma Fazı İş (kJ)	26.47±4.28	25.88±2.27	26.82±3.19	24.57±3.47	25.34±4.01
	Toplam İş (kJ)	62.63±1.40	59.81±6.13	64.18±9.00	56.75±1.07	58.23±1.08
	Geliş Hızı (m/s)	13.4±1.80	13.5±1.72	13.8±2.34	12.3±2.49	12.0±2.76
	Maks Girinti (cm)	3.22±0.30	3.00±0.32	3.29±0.51	2.90±0.56	2.51±0.54
	Girinti (%)	14.91±1.41	13.98±1.50	15.27±2.37	13.22±2.54	11.38±2.44
	Alan (Histerezis) (kJ)	8.69±3.20	7.98±3.09	10.02±3.75	7.72±4.49	5.66±1.37
	Maks Kuvvet (kN)	2.68±4.04	2.82±3.34	2.90±5.77	2.40±5.38	2.29±5.07
1.0 BAR	Bası Fazı İş (kJ)	36.01±5.33	35.33±4.45	36.95±7.16	32.43±7.73	29.01±6.09
	Toparlanma Fazı İş (kJ)	27.32±2.88	27.34±2.29	26.92±3.65	24.70±3.58	23.35±4.89
	Toplam İş (kJ)	63.34±7.94	62.67±6.37	63.88±1.07	57.14±1.11	52.37±1.09

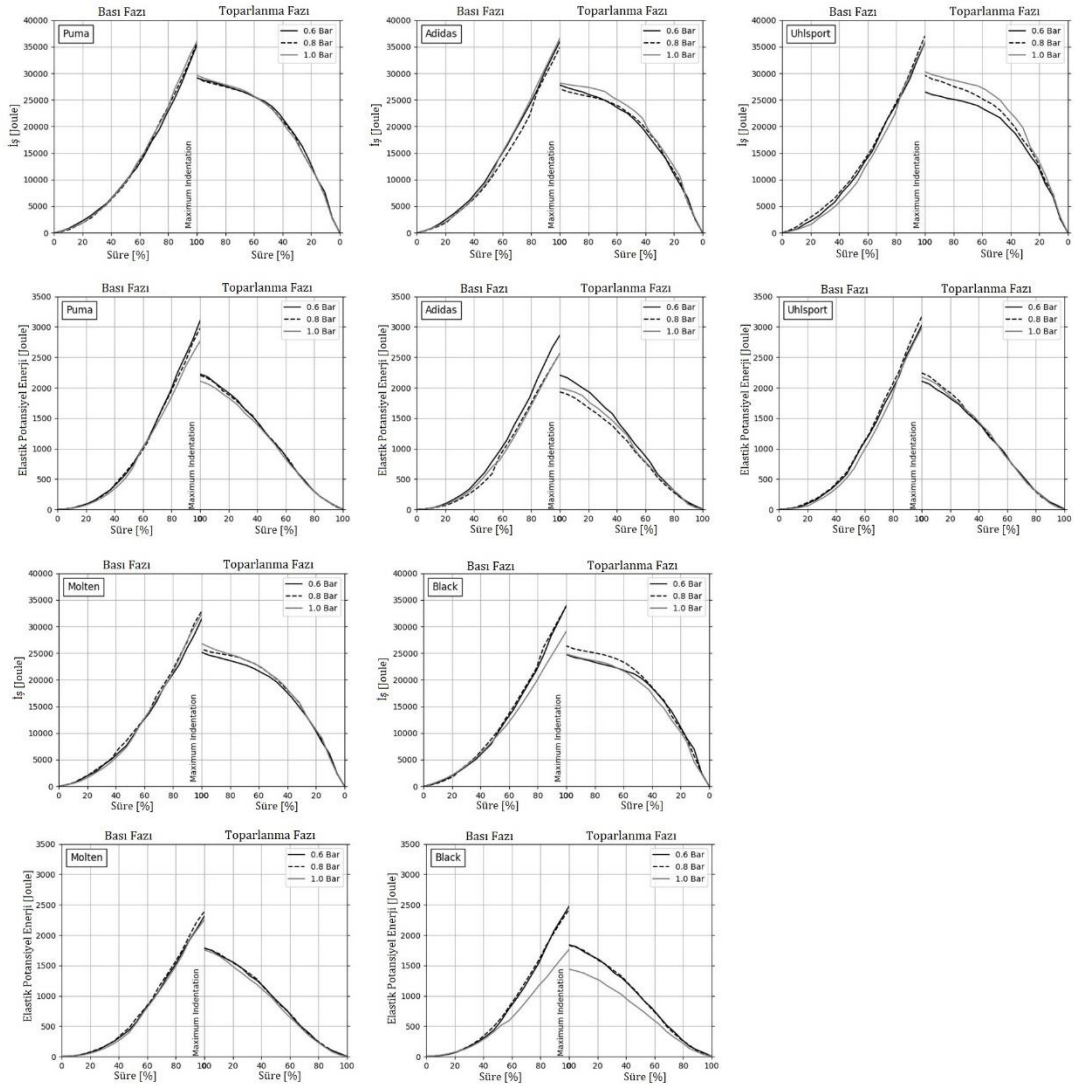
İB; iç basınç



**Şekil 4.31.** Girinti oranına göre histerezis alanlarının ortalama kuvvet grafiği.

#### 4.6. Çarpışma Süresince Topun Yaptığı İş ve Elastik Potansiyel Enerji

Topta tüm çarpışma süresince meydana gelen enerji dağılımının belirlenebilmesi için Bölüm 3.4.'te belirtilen Eşitlik 3.13-16. ile topun çarpışma süresince her anda yaptığı işin ve elastik potansiyel enerjisinin belirlenmesi gereklidir. Topta bası fazında meydana gelen deformasyon ve toparlanma fazında topun tekrardan eski haline dönmesi için geçen süreç bir yayın sıkışması ve gevşemesi gibi düşünüldüğünde her iki fazda topa biriken ortalama elastik potansiyel enerji ve topun bu süreçte yaptığı ortalama iş sonuçları Şekil 4.32.'de sunulmuştur. Tüm topların enerji davranışları 0.6 ve 0.8 bar iç basınçlarda birbirine benzer davranışlar sergilerken 1.0 bar iç basınçta Black marka topun diğer toplardan farklı davrandığı gözlenmiştir. Nitekim topların histerezis alan sonuçları da bu bulguyu desteklemektedir.



Şekil 4.32. Girinti oranına göre histerezis alanlarının ortalama grafiği.

#### 4.7. Çarpışma Süresince Enerji Dağılımı (ÇSED) Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü

TK literatürde topun çarpışmada kaybettiği enerjiyi tek bir değer ile belirleyen bir sayı olarak ortaya konmaktadır. Ancak literatürün aksine tüm çarpışma süresince enerji dağılımını belirleyen bu yeni yöntem ile elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek amacıyla BF ve TF her an için elde edilen ED değerlerini her bir iç basınç ve top için tek bir TK değerine çevirmek gerekliydi. Bunun için BF ve TF süresince elde edilen TK değerlerinin ortalaması alınarak tek bir TK değeri elde edildi (OTK). Elde edilen OTK değeri Stronge (7)'nin formülünden elde edilen TK sonuçları ile karşılaştırıldı. Sonuçlar Tablo 4.7.'de sunulmuştur. Yapılan istatistiksel analizde her

iki yöntemle elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir farklılık bulunmamıştır ( $p>0.05$ ). Elde edilen bu istatistiki bulgu bu araştırmada kullanılan yöntemle çarpışma süresince topta meydana gelen ED'yi ortaya koyan bu yöntemin çarpışma davranışının tanımlanmasında kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Literatürden farklı olarak tüm çarpışmadaki ED'yi ortaya koyan bu yöntem topların yapısal özelliklerinden kaynaklı farklılıkların anlaşılması için önemli sonuçlar ortaya koyacaktır.

**Tablo 4.7.** Hesaplanan OTK ve enerjetik TK değerlerinin Student T sonuçları.

TM		0.6 Bar			0.8 Bar			1.0 Bar		
		$\bar{x} \pm \sigma$	t	p	$\bar{x} \pm \sigma$	t	p	$\bar{x} \pm \sigma$	t	p
Puma	OTK	0.851±0.04	0.14	0.89	0.864±0.04	0.17	0.86	0.873±0.03	-0.5	0.95
	TK	0.850±0.03	$D^2=0.00$		0.863±0.04	$D^2=0.00$		0.873±0.02	$D^2=0.00$	
Adidas	OTK	0.861±0.04	-0.12	0.90	0.875±0.02	-0.62	0.55	0.882±0.03	-0.56	0.58
	TK	0.862±0.05	$D^2=0.00$		0.880±0.02	$D^2=0.02$		0.887±0.02	$D^2=0.01$	
Uhlsport	OTK	0.850±0.05	0.11	0.91	0.851±0.05	-0.18	0.85	0.858±0.03	-1.22	0.25
	TK	0.850±0.04	$D^2=0.00$		0.853±0.04	$D^2=0.00$		0.868±0.03	$D^2=0.08$	
Molten	OTK	0.877±0.02	0.08	0.93	0.880±0.04	-0.27	0.78	0.881±0.05	-1.49	0.17
	TK	0.877±0.02	$D^2=0.00$		0.882±0.03	$D^2=0.00$		0.892±0.03	$D^2=0.12$	
Black	OTK	0.865±0.03	-0.86	0.41	0.882±0.03	-0.14	0.88	0.897±0.01	-1.74	0.11
	TK	0.874±0.03	$D^2=0.04$		0.883±0.04	$D^2=0.00$		0.916±0.03	$D^2=0.15$	

\* $p<0.05$ , TK, Stronge formülüne göre toparlanma katsayısı, OTK, yeni yöntemle elde tüm çarpışma boyunca elde edilen TK değerleri ortalaması, M, marka.

#### 4.8. İç Basınca ve Markalara Göre OTK Sonuçlarının Karşılaştırılması

Farklı markalara ait topların OTK sonuçlarının ANOVA analizi Tablo 4.8.'de sunulmuştur. Yapılan analiz sonucunda 0.6 ve 0.8 bar iç basınçlarda markalara göre topların enerji kayıpları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmadı ( $p>0.05$ ). Ancak, 1.0 bar iç basınçta Puma ve Uhlsport marka toplar ile Black marka top arasında istatistiksel olarak orta düzey etki büyüklüğüne sahip anlamlı farklılık

bulundu ( $F=3.246$ ,  $p<0.05$ ,  $\eta^2=0.243$ ). Bölüm 3.2.1. Tablo 3.2.'de verilen topların üretim özellikleri dikkate alındığında Black ve Molten marka topların panel dikiş ve yapıştırma şekillerinin diğer toplara göre farklı olduğu belirtilmektedir. Bu bilgiye ek olarak topların üretiminde kullanılan yöntem ve malzemelerin topların kalitesini ve üretim maliyetlerini etkilediği belirtilmektedir (41). Dolayısıyla bu araştırmada elde edilen bulgulara göre daha düşük kalitede malzeme ile üretilen topların iç basınçları arttıkça çarpışmada daha düşük enerji kayıpları ortaya koyduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 4.8.** Farklı markalara ait topların TK sonuçlarının karşılaştırılması.

Marka	0.6 $\bar{x} \pm \sigma$	0.8 $\bar{x} \pm \sigma$	1.0 $\bar{x} \pm \sigma$
Puma <sup>a</sup>	0.851±0.04	0.864±0.04	0.873±0.03
Adidas <sup>b</sup>	0.861±0.04	0.875±0.02	0.882±0.03
Uhlsport <sup>c</sup>	0.850±0.05	0.851±0.05	0.858±0.03
Molten <sup>d</sup>	0.877±0.02	0.880±0.04	0.881±0.05
Black <sup>e</sup>	0.865±0.03	0.882±0.03	0.897±0.01
F	0.847	1.07	3.292
p	0.503	0.391	0.020*
$\eta^2$	0.078	0.097	0.247
Tukey	-	-	a  e, c  e

\* $p<0.05$

#### 4.9. İç Basınca Göre Girinti Miktarlarının Karşılaştırılması

Farklı markalara ait topların girinti sonuçlarının ANOVA analizi Tablo 4.9.'de sunulmuştur. 0.6 ve 0.8 bar iç basınçta markalara göre topların girinti oranları arasında farklılıklar bulunmadı ( $p>0.05$ ). 1.0 bar iç basınca sahip toplarda Puma ve Uhlsport marka toplar Black marka toptan istatistiksel olarak etki büyüklüğü orta düzeyde anlamlı farklı olduğu belirlenmiştir ( $F=4.838$ ,  $p<0.05$ ,  $\eta^2=0.326$ ). Bölüm 4.6. ve Bölüm 4.7.'de elde edilen bulgular dikkate alındığında topların üretimlerinde kullanılan malzeme ve yöntemler topun çarpışma sırasında enerji dağılımını etkilemekte ve bu etki topun kalitesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, bu bulgular çarpışma süresince iç basınç arttıkça top kalitesinin çarpışma dinamikleri üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca topun temas yüzey alanının

genişliği çarpışmada etki eden streslerin azalmasına neden olur. Bu anlamda duşuk girinti oranları sporcuların daha çok strese maruz kalmaları anlamına gelmektedir ve topun girinti miktarı i basınç arttıa topun kalitesinden etkilenmektedir.

**Tablo 4.9.** Farklı markalara ait topların i basına göre girinti oranlarının karşılaştırılması.

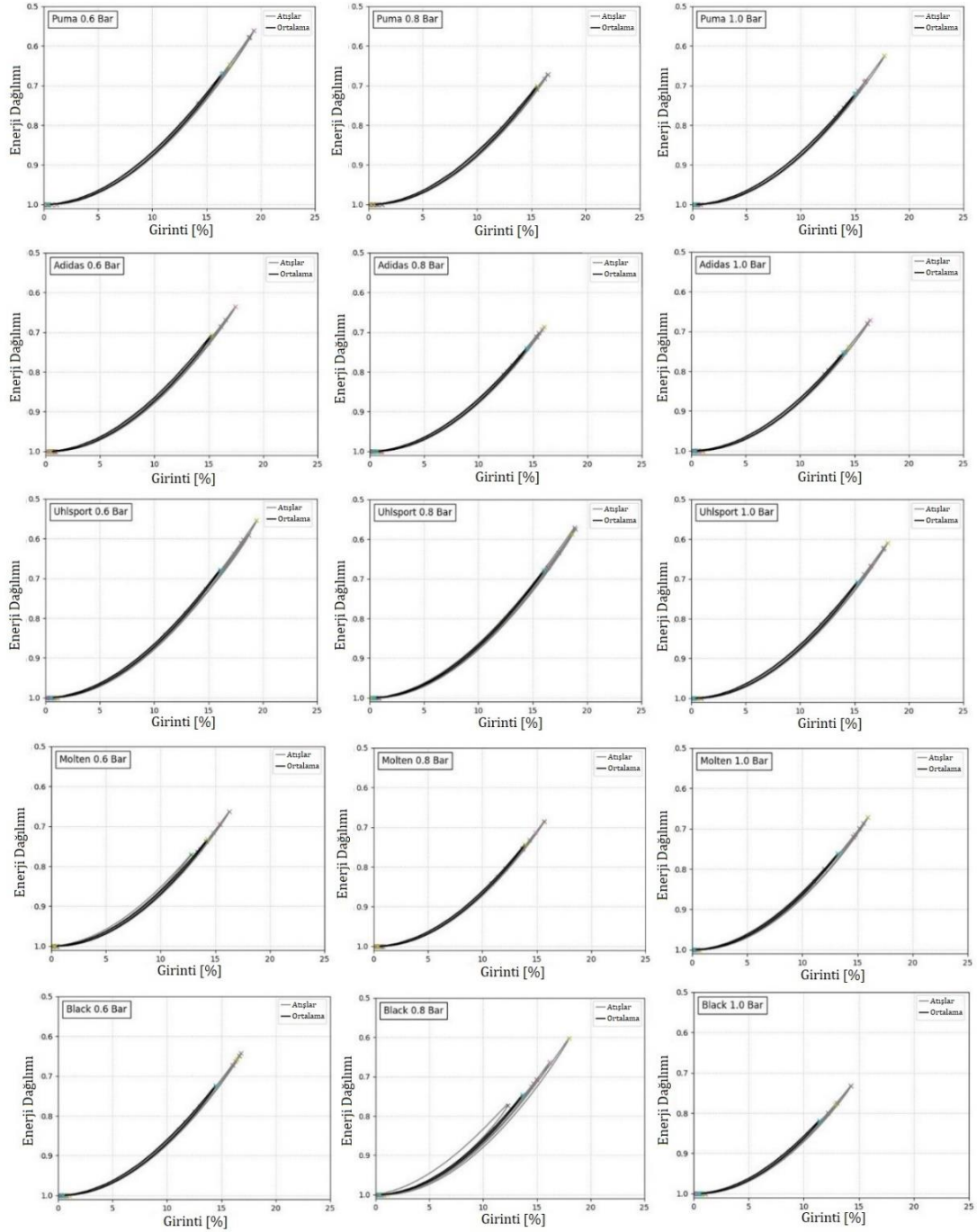
Marka	0.6 Bar $\bar{x} \pm \sigma$	0.8 Bar $\bar{x} \pm \sigma$	1.0 Bar $\bar{x} \pm \sigma$
Puma <sup>a</sup>	16.41±2.39	16.02±2.63	14.91±1.41
Adidas <sup>b</sup>	15.28±3.35	14.59±1.47	13.98±1.50
Uhlsport <sup>c</sup>	16.06±2.93	16.40±2.69	15.27±2.37
Molten <sup>d</sup>	14.22±1.42	14.12±2.37	13.22±2.54
Black <sup>e</sup>	14.54±2.40	13.99±2.40	11.38±2.44
F	1.194	2.105	4.838
p	0.328	0.098	0.002*
$\eta^2$	0.107	0.174	0.326
Tukey	-	-	a  e, c  e

\*p<0.05

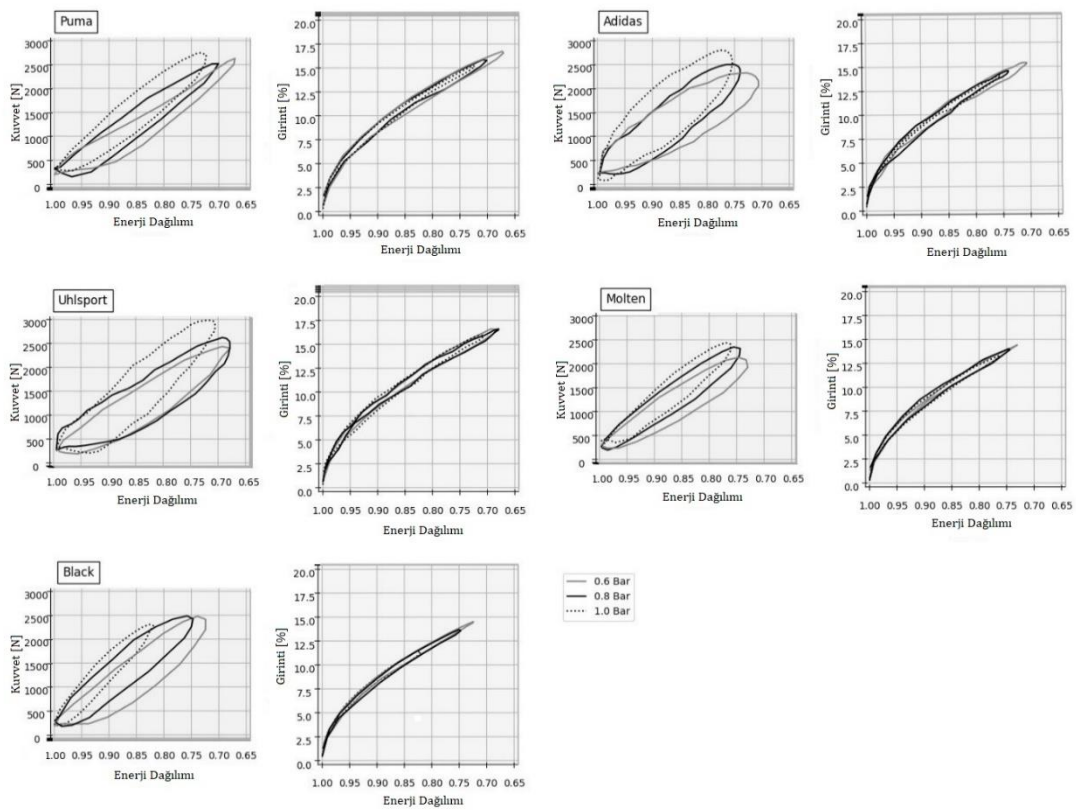
#### 4.10. Çarpışma Süresince Belirlenen Enerji Dağılımı Sonuçları

Tüm arpışma süresince farklı i basınç koşulları altında meydana gelen enerji dağılımlarına ait sonuçlar Şekil 4.33.'te sunulmuştur. Tüm toplara ait farklı i basınç koşulları altında yapılan atışlara ait ortalama enerji dağılımı grafikleri ise Şekil 4.34.'te sunulmuştur. Literatürde TK hesaplamaları tek bir değer ile ifade edilmesi aslında topun çarpışma süresince kaybettiği ortalama enerjiyi belirtmektedir. Ancak arpışmak tek bir anlık durumun aksine bir süreç boyunca devam eden bir durumdur. Dolayısıyla, bu araştırma literatürden farklı olarak çarpışma süresince topun enerji dağılımı davranışı ortaya koyan bir yöntem geliştirmiş ve tüm çarpışma boyunca meydana gelen enerji dağılımını belirlemiştir. Bu yöntem sonucunda elde edilen verilerin kullanılan topların çarpışma sırasında etki ettiği streslerin ve çarpışma davranışının anlaşılması açısından önemlidir. Nitekim tüm markalara ait topların grafikleri incelendiğinde enerji dağılımının literatürde belirtildiği gibi 0.80-0.90 aralığında değil, topun yapısal özelliklerine bağlı olarak 0.56'lara kadar düştüğü gözlenmektedir. Bası fazı sonundaki bu dşuşten sonra tepki kuvveti kaynaklı topun

hızındaki artışla birlikte enerji dağılımı toparlanma fazında daha düşük sonuçlar ortaya koymuş ve kaybettiği enerjinin bir kısmını geri kazanmıştır, bu bulgu da literatürdeki teorik bilgiyi destekleyen niteliktedir (5, 7, 64). Bu da topun çarpışma süresince enerji kaybını ya da dağılımı belirleyeme çalışan araştırmalar için öncü olacak bir bulgudur.



Şekil 4.33. Çarpışma süresinde toplarda meydana gelen enerji dağılımları.



**Şekil 4.34.** Çarpışma süresince iç basınçlara göre enerji dağılımı.

Şekil 4.34. dikkatlice incelendiğinde tüm iç basınç koşullarında topların ilk temas anında oluşan %5'lik girintiye kadar düşük ED değeri sergilediği, ancak daha sonra ED değerlerindeki artış ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca, topun iç basıncı arttıkça topta meydana gelen ED'nin azaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla topun yapısal özelliklerinden olan iç basıncın ED üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Nitekim TK sonuçlarının histerezis alanları dikkatlice incelendiğinde Black marka top hariç diğer topların alanlarının iç basınçtaki artışa rağmen birbirine benzer davranış sergilediği görülmektedir. Topun iç basıncındaki artış topu sertleştirirken elastikiyetini düşürmektedir. Bu doğrultuda da girinti miktarının azalması beklenir. Bu beklentiye karşılık nitelikte tüm topların girinti miktarları azalmıştır. Ancak daha düşük kalitedeki topların yapısal özelliğindeki değişikliğe rağmen ED davranışını koruyamadığı görülmüştür. Buda çarpışmada etki eden streslerin tesiri açısından istenen bir durum değildir ve top kalitesinin çarpışma süresince ED üzerindeki etkisinin önemli olduğu gözlenmiştir. Bölüm 4.1.3.'te yer alan Şekil 4.7. ve Bölüm 4.5.'te yer alan Şekil 4.31. incelendiğinde iç basınç arttıkça etki eden kuvvetlerin arttığı ve çarpışmada etki eden

streslerin topun yapısal özellikleri ve kalitesinden etkilendiği düşüncemizi desteklemektedir.



## 5. TARTIŞMA

Bu çalışma, futbol toplarının çarpışma dinamiklerini belirleyerek çarpışma süresince enerji dağılımını belirlemeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda bir araştırma alanı oluşturulmuş 3 farklı iç basınçta 5 farklı markaya ait topun toplam 135 video kaydı elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler işlenerek verilerin uyum-doğruluk kontrolleri yapılmış ve belirlenen çarpışma dinamiklerinin enerji davranışını belirlemek için kullanılmasına karar verilmiştir. Ek olarak çarpışma süresince enerji dağılımını belirlemek için yeni bir yöntem geliştirilmiş, bu yöntemin doğruluğunu test etmek için literatürde yer alan formül kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırmanın ana amacı ve alt amaçları doğrultusunda elde edilen tüm sonuçlar detaylı şekilde raporlanmış, tablo ve grafikler halinde sunulmuştur. Bu doğrulama yöntemleri ve geliştirilen yeni metot ile ilgili aşamalar;

1. Her iç basınç koşulu altında yapılan tüm atışların görüntü analizleri yapılmış yer değiştirme verileri elde edilmiş ve çarpışma dinamikleri hesaplanmıştır.
2. Topun temas yüzey alanı sonuçları her iki kameradan hesaplanmış, elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.
3. Top girinti miktarı hesaplanmış, hesaplanan girinti miktarı sonuçlarının doğruluğunu test etmek için kütle yay damper modeli geliştirilmiş, 4. Derecede Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Model ve deney sonuçları arasındaki uyum karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu belirlenmiştir.
4. Çarpışmadaki tepki kuvvetleri enerji dağılımı hesabı için önemli bir parametredir. Görüntü analizinden hesaplanan tepki kuvvetlerinin doğruluğunu test etmek için kuvvet platformu kullanılarak çarpışma analizi yapılmış, aynı zamanda görüntü analizi yapılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.
5. Çarpışmada topta meydana gelen enerji kaybı TK olarak ifade edilir. Literatürde tek bir değer ile ifade edilen TK değeri çarpışma boyunca sürekli var olan bir enerji dönüşümünü içerir. Bu sebeple çarpışma

boyunca bu enerji dağılımını belirlemek bu araştırmanın temel amacıydı. Dolayısıyla çarpışma boyunca belirlenen enerji dağılımı sonuçlarının doğruluğunu test etmek, bulunan sonuçların literatür ile karşılaştırılabilir olması için iki farklı hesaplama kullanılmıştır.

a) Literatürde yaygın olarak kullanılan Stronge (7) formülü kullanılarak topun bası ve toparlanma fazlarının oluşturduğu histerezis döngü kuvvet alanlarının oranlanması sonucu bulunan ve tek bir sayı ile ifade edilen enerjetik TK değeri elde edilmiştir.

b) Topun çarpışma süresince her andaki enerji dağılımı belirlenmiş, böylelikle çarpışma boyunca toptaki enerji dağılımı hakkında bilgi elde edilmiştir. Çarpışma boyunca belirlenen enerji dağılımı sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için bası ve toparlanma fazlarındaki tüm değerlerin ortalaması alınmış tek bir değer elde edilmiştir (OTK). Literatürde yer alan Stronge (7) formülü ile elde edilen OTK değeri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında farklılık bulunmamış ve bu araştırmada çarpışma süresince topun enerji dağılımını ortaya koyan yöntemin doğru olduğu belirlenmiştir.

6. Toplar arasındaki farklılıkları incelemek için OTK ve girinti oranları karşılaştırılmış ve sonuçlar raporlanmıştır.
7. Tüm çarpışma süresince topun yaptığı iş ve bası ve toparlanma fazlarında depolanan elastik potansiyel enerji sonuçları raporlanmış, tüm çarpışma boyunca toplarda meydana gelen enerji dağılımına ait davranışlar ortaya konmuştur.

### 5.1. Temas Yüzey Alanı Sonuçları

Çarpışan nesnelerin temas yüzey alanı çarpışma dinamiklerinin etkisi açısından önemlidir. Futbolda topun çarpışma sırasında etki edeceği stresleri belirleyen ana unsurlardan bir tanesi de temas yüzey alanıdır. Temas yüzey alanının büyüklüğü ya da küçüklüğüne göre aynı kuvvetlerde etki eden stresin büyüklüğü değişmektedir (92). Buna ek olarak topun temas yüzey alanı enerji dağılımını belirleyen önemli unsurdur. Temas yüzey alanı arttıkça topta meydana gelen enerji kaybı artar. Viskoelastik özelliğe sahip olan topta, çarpışma anında bası fazında oluşan deformasyon nedeniyle

meydana gelen sıkışmadan dolayı elastik potansiyel enerji depolanır. Ayrıca topun tekrardan eski şekline dönmeye başladığı toparlanma fazında toptaki gerilmeden dolayı da topta elastik potansiyel enerji depolanır. Top bir bütün olarak düşünüldüğünde çarpışma süresince topta meydana gelen deformasyonun oluşturduğu girintinin belirlenmesi yayın sıkıştırılması ya da gerilmesi olarak düşünülür. Bu sıkışmanın ya da gerilemenin ne kadarlık bir yüzey alanına temas ile gerçekleştiğinin belirlenmesi toptaki elastik gerinim katsayısının belirlenmesi için önemlidir.

Düz bir zemine çarpan top temas bölgesinden geometrik merkezine doğru bir konik oluşturacak şekilde değişikliğine uğrar. Bu değişiklik topun temas yüzey alanını oluşturur. Ancak literatürde sınırlı sayıda çalışma çarpışmada topların oluşturduğu tepki kuvvetlerini belirleyerek çarpışma sırasında etki eden stresleri belirlemeye çalışmış ve kuvvet platformları üzerine karbon kağıtlar koyarak temas yüzey alanını incelenmeye çalışmışlardır (51). Iga ve ark (13) basit trigonometrik hesapla koninin taban alanı hesabı yaklaşımıyla topun temas yüzey alanının hesaplanabileceğini ifade etmişler ancak çalışmalarında temas yüzey alanı ile ilgili bilgi vermemişlerdir. Teoride doğru bir yaklaşım olarak gözüke de topun temas yüzey alanı hesabı için bu yöntemin kullanılabilirliğinin test edilmesi gerekliydi. Bu yüzden, bu çalışmada top bir kırılmaz cama atılarak Bölüm 3.1.5.'te belirtilen yöntemle topun camda bıraktığı izin alanı belirlenerek, aynı atışa ait yan kameradan elde edilen temas yüzey alan sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan istatistiksel analiz sonucu her iki yöntemle elde edilen temas yüzey alanlarının RMSE sonuçları %7.89'dan küçük ve aralarındaki korelasyonun ise %93 ve üzerinde olduğu belirlenmiştir. Literatürde çarpışma sırasında topun bıraktığı izi inceleyen sınırlı sayıdaki çalışmada karbon kağıtlar kullanılarak temas yüzey alanları belirlenmeye çalışılmıştır (92). Bu çalışmada görüntü analizi ile topun yüzey alanının hesaplanmasını sağlayan önemli birkaç parametre vardır. (a) Yüksek hızlarda (saniyede 6000 görüntü) çarpışmanın incelenebilmesi, (b) Güçlü ışıklar ile topun hareketinin yüksek hızlarda yakalanabilmesi, (c) Temperli cam kullanılarak (cam filmi ile buzlu cam haline getirilmiş) topun bıraktığı iz görüntüsünün yakalanabilmesi, (d) Kullanılan algoritmalar ile topun bıraktığı izin alan hesabının yapılabilmesi olarak sıralanabilir. Dolayısıyla literatürden farklı olarak hesaplanabilen topun cama bıraktığı izin alan sonuçları, yan kameradan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak aralarındaki uyum

ortaya konabildi. Literatürde Iga ve ark (13) çalışmasında top temas yüzey alanının hesaplaması ile ilgili bilgi verilmiş olsa da temas yüzey alanı ile ilgili bilgi verilmemiş, bu da konik taban alan hesaplamasının kullanabilmek adına doğruluğunun kontrol edilmesini düşündürmüştür. Elde edilen sonuçlarla koniğin taban alan formülünün top temas yüzey alanı hesaplamasında kullanılabileceği sonucunu kanıtlarla ortaya koymuştur. Farklı bir araştırmada Dowel ve Krebs (92) topun hızı artıkça oluşan girinti miktarına paralel olarak deformasyonun dolayısıyla temas yüzey alanının arttığını belirtmişlerdir. Dowel ve Krebs (92) sonuçlarını destekleyen bulgular bu araştırmada da ortaya konmuştur. Topun geliş hızı arttıkça topta meydana gelen deformasyon ya da şekil değişikliğine paralel şekilde temas yüzey alanı da artmaktadır. Ayrıca topun iç basıncındaki artışın topun elastikiyetini azalttığı için temas yüzey alanının çarpışma öncesi hız koşulları değişmediği sürece iç basınca bağımlı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar temas yüzey alanı sonuçlarını karşılaştıracak literatürde sınırlı çalışma olsa da bu araştırma bulguları düz bir zemine çarpan topun temas yüzey alanı hesaplamasında kullanılan konik taban alan teorisinin uygulamadaki karşılığını ortaya koymuştur.

## 5.2. Model-Deney Girinti Sonuçları

Sportif topların çarpışma analizlerinde önemli unsurlardan bir tanesi topta meydana gelen enerji kaybıdır (5, 58, 93). Çarpışmadaki girinti miktarı toptaki deformasyonun belirleyicisi olmasının yanı sıra temas yüzey alanının, dolayısıyla da enerji kaybının ana unsurlarından birisidir. Topta oluşan girinti miktarını belirlemek için Iga ve ark (13) farklı yöntemleri karşılaştırmış, geometrik merkez belirleme yönteminin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini ve bu yöntemin diğer yöntemlere göre daha doğru sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Bu araştırmada görüntü işleme yönteminde topun geometrik merkezinin yer değiştirme verileri üzerinden hareket tanımlanmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Daha önce belirtildiği üzere temas yüzey alanı girinti miktarı ile ilişkilidir ve her iki kameradan elde edilen temas yüzey alanlarının uyumu temas yüzey alanının belirleyici olan girinti sonuçlarını destekleyen sonuçlar ortaya koymuştur. Buna ek olarak araştırmada kullanılan yöntemle elde edilen girinti sonuçlarının doğruluğunun kontrolü için dinamik model oluşturulmuş ve

4. Dereceden Runge-Kutta yöntemi ile çözülmüş, elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmış, aralarındaki uyum ortaya konmuştur.

Çarpışma sırasında yapısal özelliklerinden (iç basınç, dış katman vb.) dolayı top şekli değişir ve çarpışma sonlandığında (temas bittiğinde) eski şekline döner. Bu şekil değişimi topun yüzey alanına uygulanan kuvvetin yönüne doğru gerçekleşir ve deformasyon yaratırken, çarpışma sırasında topun hızı sönümlenir. Bu durum mekanik prensiplerdeki kütle-yay-damper sistemi ile açıklanır (83). Çarpışmadaki girinti miktarı basınç ve esneme özelliği ile ilişkiliyken, çarpışma sırasında top hızındaki azalmalar sönümleme katsayısı ile ilişkilidir (6). Bu nedenle, aynı özelliklere sahip topun davranışı, koşul değişmediği sürece sabit kalacaktır. Dolayısıyla topun yay ve ilk çarpışma anındaki hızı bilindiğinde çarpışmanın çözümlenmesi yapılabilmektedir. Nitekim Bölüm 4.2.'de sunulan sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yapılan dinamik çözümlerde model ve deney sonuçlarının istatistiksel olarak yüksek anlamlılık düzeyinde ilişkili olduğu belirlendi. Buna ek olarak model ve deney sonuçlarının RMSE analizde uyumun yüksek tahmin sınırları içerisinde olduğu belirlendi. Iga ve ark. (13) çarpışmada top girinti miktarının (sırasıyla:  $4,38 \pm 0,13$ ,  $5,05 \pm 0,27$  cm) hız arttıkça arttığını belirtmişlerdir. Farklı bir araştırmada ise Iga ve ark (18) 5 farklı hız koşullarında top girinti miktarını incelemişler ve bu araştırma bulgularıyla benzer şekilde top geliş hızındaki artışa bağlı olarak top girinti, miktarının arttığını belirtmişlerdir (94).

Sonuç olarak topun yapısal özellikleri (iç basınç) sabit kaldığında topta meydana gelen girinti miktarının topun hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu araştırma bulguları ve literatürdeki bilgilere göre topun iç basıncı arttığında topta meydana gelen girinti miktarının azaldığı görülmektedir (15, 20, 26, 58, 93). Ek olarak yapılan istatistiksel analiz sonuçları deneysel araştırmadan elde edilen bulguların oluşturulan modelden elde edilen sonuçların, dolayısıyla görüntü analizi ile elde edilen çarpışma süresince topta meydana gelen girinti sonuçların doğruluğunu ortaya koymuştur.

### 5.3. Görüntü Analizi Yöntemi Doğruluk Kontrolü

Spor bilimleri alanında çarpışma sırasında topta meydana gelen enerji kaybının belirlenmesi için genellikle kinematik hesaplama yöntemi kullanılır. Serbest düşme sırasında topun çarpışma öncesi ve sonrası hızındaki değişimi inceleyen bu yöntem çarpışma sırasında yanal yön değiştirme, kayma olmadığı sürece doğru sonuçlar verir (5, 7, 58, 71). Tek bir ekseninde (dikey) topun bırakma yüksekliği ile çarpışma sonrası yüksekliği ya da çarpışma öncesi hızı ile çarpışma sonrası hızların oranlaması ile belirlen bu yöntemin uygulanabilirliğinin basit olması nedeniyle sıklıkla tercih edilir. Buna ek olarak topun çarpışmadaki tepki kuvvetlerin belirlenmesi için kuvvet platformları kullanılır. Böylelikle çarpışma dinamikleri anlaşılmaya çalışılır. Bu doğrultuda bu araştırmada kullanılan görüntü işleme yönteminin doğruluğunu belirlemek amacıyla bölüm 3.2’de belirtilen araştırma alanı tasarlanarak topun çarpışma sırasındaki tepki kuvvetleri kuvvet platformu ve görüntü analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sunulan sonuçlarda (Bkz. Tablo 4.5. ve Bkz. Şekil 4.25.-30.) görüntü analizi ve kuvvet platformundan elde edilen tepki kuvvet sonuçları arasında 0.96 ve üzerinde istatistiksel olarak pozitif yönlü yüksek ilişki olduğu bulunmuştur.

Topun çarpışma sırasında girintisinin artması daha büyük bir temas yüzeyi alanına yol açar. Fakat topun çarpışma öncesi geliş hızı değişmedikçe girinti miktarının belirleyicisi topun iç basıncıdır ve yüksek iç basınçlarda koşullar değişmedikçe düşük girinti miktarı meydana gelir. Bu durumda topun etki ettiği kuvvetleri artırır (4) ve çarpma kuvvetinin topun iç basıncından ve vuruş hızından etkilendiği sonucu ortaya çıkar (4, 13, 15, 18, 94). Nitekim, bu araştırma bulgularında da iç basınç arttıkça tepki kuvvetlerinin arttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra 5 numara futbol topuyla (0.55 ile 1.10 bar iç basınç değerleri arasında) yapılan bir araştırmada çarpışma kuvvetlerinin 196 – 4667 N aralığında olduğu ve iç basınç arttıkça tepki kuvvetlerinin arttığı belirtilmiştir (4). Buna ek olarak bu çalışmanın bulguları, farklı özelliklerdeki topların çarpma sırasında oluşturduğu itme kuvvetinin incelendiği Koizumi ve ark. (15)’nin çalışmasının bulgularını desteklemektedir. Benzer şekilde, Jian-Bao (94), bu çalışmanın sonuçlarını destekler şekilde, artan geliş hızlarında (10.1 m/s ve 22.3 m/s) daha büyük darbe kuvvetlerinin (10.1 m/s’de 2157 N ve 22.3 m/s’de

4836 N) meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca topun iç basıncı arttıkça topta meydana gelen enerji kaybındaki artışın azaldığı ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra görüntü analizi ile hesaplanan TK sonuçlarının da Georglas ve Landry (58)'nin belirttiği 0 bar'dan 1 bara kadar olan top iç basınçlarındaki sonuçlarla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Nitekim bu araştırmada serbest düşme testinden elde edilen TK sonuçlarının Goerglas ve Landry (58) çalışmasındaki sonucu destekler şekilde olduğu belirlenmiştir. Bu bilgilere ek olarak, doğruluk analizi için yapılan ön çalışmada elde edilen kuvvet sonuçlarının birbiri ile benzer olduğu bulunmuştur. Georglas ve Laundry ((58) ve Hubbort ve Stronge (95) çalışmalarında serbest düşme sonuçları ile ilgili bilgilerin belirtilen sınırlar içerisinde olduğu belirtilmektedir.

Sonuç olarak kullanılan görüntü analizinin doğruluğunu test etmek için yapılan bu araştırmada elde edilen TK ve tepki kuvveti bulguları literatürü desteklemektedir (4, 13, 18, 94). Ek olarak kuvvet platformundan ölçülen ve görüntü analizinden kestirilen kuvvet sonuçlarının istatistiksel olarak yüksek ilişkili olması bu araştırmada kullanılan görüntü analizi yönteminin sonuçlarının doğru olduğunu ortaya koymuştur.

#### **5.4. Toparlanma Katsayısı ve Çarpışma Süresince Enerji Dağılımı Sonuçları**

Enerjetik TK hesaplaması materyal özelliklerini ve çarpışma dinamiklerini belirlemek için kinetik ve kinematik toparlanma katsayısına göre daha doğru bir yöntemdir (5, 7). Çünkü top çarpışma sırasında dikey, yatay veya derinlik yönlerinde hareket edebilir (5, 7, 10). Özellikle serbest düşüşü içeren kinematik yöntem çarpışmada açısal değişim ve kayma olmadığı sürece topta meydana gelen enerji dağılımını tanımlayan toparlanma katsayısı hakkında doğru sonuçlar verir (7, 16, 20, 30). Ancak oyun koşullarında çarpma veya çarpışma genellikle tek yönde değildir. Dolayısıyla topun yatay ya da açılı çarpışmalarında kinematik TK sonuçları gerçek sonuçları yansıtmayabilir (5, 7). Futbolda topun çarpışması genellikle yatay ve dikeyde hareket içerir. Bu doğrultuda gerçek oyun koşullarında farklı niteliklere sahip topların çarpışma dinamiklerini belirlemek ve geliştirilen yeni metot ile elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek için bu çalışmada enerji dağılımı enerjetik TK hesaplama yöntemi (5, 7) ile hesaplandı.

Enerjetik TK hesaplaması topun çarpışmada yaptığı iş üzerine odaklanır. Bu odaklanma çarpışmadaki enerji dağılımını çarpışma fazlarında yapılan iş üzerinden değerlendirir. Stronge (7) *Impact Dynamics* isimli kitabında TK hesaplamalarında kullanılan yöntemleri detaylı şekilde açıklarken, enerjetik TK hesabının bası fazında yapılan iş ile toplam iş arasındaki farkın bası fazında yapılan işe oranının karekökünün negatif ifadesi olarak tanımlamıştır. Yani histerezis döngü grafiğinde her iki fazda etki eden kuvvetlerin oluşturduğu alan olarak ifade edilmektedir (Bkz. Bölüm 3.3., Şekil 3.10.). Ancak topun enerji dağılımı ya da kaybı temas süresi boyunca topun ivmesindeki değişim ve oluşan temas nedeniyle tüm çarpışma süresince devam eder. Peek ve ark (96) futbol toplarının viskoelastik malzeme gibi davranması beklendiğini ifade etmişlerdir. Viskoelastik malzeme davranışında stres/gerilme ilişkisi malzeme özelliğini tanımlaya yarar (72) ve çarpışma süresince enerji dağılımının belirlenmesi malzemenin özelliği hakkında detay bilgi edinilmesine olanak tanıyabilir. Bölüm 3.4.'te daha önce ifade edildiği üzere topun çarpışma süresince bir yay davranışı sergileyerek (bası fazındaki sıkışma - toparlanma fazındaki çekme) üzerine etki eden kuvvetler sonucu stres/gerilme ilişkisi oluşur ve meydana gelen deformasyon sonucu elastik potansiyel enerji depolar. Depolanan bu enerjinin belirlenmesi her an için elastikiyet katsayısının belirlenebilmesine olanak tanır. Böylelikle çarpışma süresince her anda oluşan stresin ortaya çıkardığı gerilim belirlenerek toptaki enerji dağılımı hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar.

Yapılan bu araştırmada literatürden farklı olarak çarpışma süresince oluşan enerji dağılımı davranışını belirlenmiştir. Dolayısıyla bulunan bu sonuçların çarpışmada meydana gelen enerji dağılımını doğru olarak belirlediğinin kanıtlanması gerekiyordu. Ancak ÇSED değerleri çarpışma hakkında detay bilgi verirken bu sonuçların doğruluğunu karşılaştırabilmek için bası ve toparlanma fazlarındaki enerji dağılımlarının ortalaması alınmış ve tek bir OTK değeri elde edilmiştir. Böylelikle Stronge'nin (7) enerjetik TK formülü ile elde edilen enerji dağılımı-kayıbı değerleri ile karşılaştırılabilecek sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan istatistiksel analizde her iki hesaplama yöntemiyle bulunan TK sonuçlarının istatistiksel olarak birbirinden farksız oldukları belirlenmiştir. Dolayısıyla geliştirilen yeni yöntemle çarpışma süresince elde edilen enerji dağılımı değerlerinin topun enerji davranışını temsil eden değerler olarak kullanılabileceği doğrulanmıştır. Böylece çarpışmanın her anında elastik potansiyel

enerji davranışı ve enerji dağılımı sonuçlarının incelenmesine olanak sağlanmış ve farklı topların davranışlarının karşılaştırılmasına imkan sağlanmıştır. Ayrıca farklı bir doğrulama olarak hesaplanan OTK değerlerinin Georglas ve Landry'nin (58) araştırmasında futbol topunun 0.6 bar 1 bar iç basınçlardaki TK değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ayrıca OTK sonuçlarının top dinamikleri üzerine araştırmalar yapan birçok araştırmada yer alan sonuçlara benzer olduğu gözlenmiştir (5, 55, 58, 64, 67, 69, 71). Sonuç olarak elde edilen enerji dağılımı sonuçlarının çarpışmada kaybedilen enerjiyi çarpışmanın her anı için tanımlayabilen sonuçlar olduğu belirlenmiştir.

Hubbart ve Stronge (95) futbol topunun TK değerinin iç basınçtan ziyade topun yapısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Mevcut çalışmada kullanılan 3 farklı iç basınçta aynı marka toplar arasındaki küçük OTK farklılıkları Hubbart ve Stronge (95) ve Georglas ve Landry (58) çalışmalarını desteklemektedir. Ayrıca, farklı olarak TK'nın çarpışma süresince temsil ettiği enerji dağılımı davranışı bu araştırmada ortaya konmuştur. Bu bulgu, çarpışma boyunca enerji dağılımını anlamak için önemli bir göstergedir. Çünkü enerji dağılımı çarpışma boyunca devam etmektedir. Tek bir TK değeri ile topta meydana gelen enerji dağılımı ya da kaybı hakkında basit bir soruya cevap vermek yeterli olabilir, ancak çarpışma boyunca ortaya konan enerji dağılımı davranışı çarpışma dinamiği ve malzeme özelliklerinin etkisini anlamak için önemlidir. Sonuç olarak çarpışmada topta meydana gelen enerji dağılımını belirlemek için geliştirilen bu yeni metodolojik yaklaşımın doğruluğunu ortaya koymuştur. Böylece bu araştırma farklı malzeme ve yapısal özelliklere sahip topların çarpışma süresince enerji dağılımı davranışları inceleyerek toplar arası farklılıkların anlaşılmasına olanak sağlamıştır.

### **5.5. Toplar Arasındaki Farklılıkların Karşılaştırılması**

Top kalitesi; topun hızı, spini, yüksekliği ve topun uçuş özelliklerini etkiler ve oyuncular için önemli bir parametredir (48). Top kalitesi kadar topun sertliğini belirleyen iç basınç oyuncuların performansı üzerinde etkilidir. Çok düşük veya yüksek iç basınçlara sahip toplarla oynanan oyunda oyuncuların top kontrolü, şutu veya pas kalitesi etkilenir (17). Bu nedenle FIFA, oyun kuralları kitabında futbol topunun yapısal özelliklerinin sınırlarını belirlerken iç basıncın sınırlarını da

belirlemiştir. Nitekim Thompsett ve ark (17) futbol topunun fiziksel özellikleri ile oyuncuların algı düzeyleri arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmada oyuncuların futbol topunun kalitesini algılayabildiklerini belirtmişlerdir. Ancak, bazı futbol topları üretim kaliteleri nedeniyle aynı iç basınca sahip olmalarına rağmen, futbolcular için top kontrolü, şu veya pas atışlarında farklı his yaratır. Dolayısıyla topun kalitesi, çarpışma dinamiklerini etkilediği gibi oyuncuların performansını etkileyebilir. Aynı zamanda vücuda kontrolsüz çarpmalarda oyuncuların sağlığını da etkileyebilir. Çünkü topun kültesi ve çarpışma öncesi ya da sırasındaki ivmesinden kaynaklı tepki kuvveti oluşturur. Aynı kuvvet koşulu altında temas yüzey alanı azaldığında, çarpışmada etki eden stresler artar. Bu durum, özellikle kafa vuruşu sırasında ve vücuda kontrolsüz, beklenmedik çarpmalarda oyuncular için iyi değildir. Nitekim, Peek ve ark (96) farklı özelliklerdeki topların kafa vuruşunda etki ettiği çarpışma dinamiklerinin farklılaştığını belirtmişlerdir.

Bir futbol topunun dış katmanının malzeme kalitesi çarpışmada önemli bir rol oynar. Bu nedenle, topun çarpışma dinamiklerinin topun malzeme kalitesinden etkilenmesi beklenir (6). Bu çalışmada farklı markalara ait farklı kalitelere sahip topların malzeme özelliklerinin çarpışma dinamikleri üzerindeki farklılıklar ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu farklılığı ortaya koymak için çarpışma süresince topların enerji dağılımı hesaplamaları yapılmış farklı iç basınçlardaki girinti miktarları ile birlikte meydana gelen enerji yayılımları incelenmiştir. Topun çarpışma davranışının iç basınç koşulları değiştiğinde çok değişmemesi beklenir (58). Nitekim bu çalışmada kullanılan toplar incelendiğinde top kalitesinin bu durum üzerinde etkili olduğu gözlenmektedir. Çarpışma süresince topların enerji dağılım değerlerinin maksimum girinti anında topun iç basınca göre tüm atışların ortalama davranışları incelendiğinde 0,65'e kadar düştüğü belirlenmiştir (Bkz. Bölüm 4.10., Şekil 4.34.). Ayrıca iç basınç arttıkça OTK değerleri artmıştır. Yani topun etki ettiği kuvvetteki artışa paralel olarak topta meydana gelen enerji kaybı azalmıştır. Buna ek olarak tüm atışların sonuçları incelendiğinde ise çarpma öncesi geliş hızı ve iç basınca göre topta meydana gelen enerji dağılımının 0.56'ya kadar düştüğü gözlenmiş ve bu değerlerin düşük iç basınç koşulları altında top temas yüzey alanındaki artışla ilişkili olduğu düşünülmüştür. Bu doğrultuda topta meydana gelen enerji dağılımının topun yapısal özellikleri ve kalitesinden etkilendiği sonucunu ortaya koymuştur. Nitekim yapılan istatistiksel

analizde OTK değerlerinin 1.0 bar iç basınçta farklılaştığı belirlenmiştir. Bu sonucu destekler şekilde tüm çarpışma boyunca depolanan elastik potansiyel enerji davranışları da bu düşünceyi desteklemektedir. Dolayısıyla enerji dağılımı topun yapısal özelliklerinden etkilenir ve daha kaliteli malzemedan üretilmiş topların düşük kaliteli malzemedan üretilmiş toptan daha fazla enerji dağılımına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonucu karşılaştıracak literatürde çalışma olmasa da Price ve ark (6)'nın top kalitesi ile ilgili yaptığı araştırma sonuçları bu bulguları desteklemektedir. Buna ek olarak çarpışmada ortaya çıkan enerji kaybı girinti miktarı ile ilişkilidir. Topun iç basıncındaki değişimler girinti miktarını doğrudan etkiler ve topta oluşan deformasyon topun üretiminde kullanılan malzeme kalitesi de bu etkide önemlidir (6, 58). Bu bilgileri destekler şekilde bu araştırmada 1.0 bar iç basınçta top kalitesinin daha belirgin şekilde önemli hale geldiği belirlenmiştir. 0.6 ve 0.8 bar iç basınçlarda görece girinti miktarlarında farklılıklar olsa da bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar ortaya koymamıştır.

Bu araştırma bulgularında futbol topunun kalitesinin enerji dağılımı üzerinde iç basınç arttığında önemli olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Bu doğrultuda topların üretiminde kullanılan malzeme kalitesinin çarpışma dinamikleri açısından önemli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Futbol toplarının üretiminde kullanılan panellerin malzemeleri (poliüretan (PU), polivinilklorür, termoplastik poliüretan), panellerin birleştirme yöntemleri (termal yapıştırma, el dikişi, makine dikişi) ve iç mesanede kullanılan malzemeler (lateks), bütül, sentetik kauçuk) farklılık gösterir. Üretimde kullanılan malzeme ve yöntemle göre topun kalitesi değişmektedir (11, 41, 56, 97). Termal yapıştırma yöntemi kullanılarak üretilen toplar dayanıklılık, his, su emme ve hava koruması açısından yüksek kaliteli olarak ifade edilmektedir (11). PU malzemeler ise yüksek direnç kapasitesi ve esneklik özellikleri nedeniyle yüksek kaliteli topların panellerinde kullanılarak en yüksek kalitede toplar üretilirken (97), yumuşak, canlı ve esnek iç torbası nedeniyle seçilmiş bir lateks iç torbaya sahiptirler (41). Üreticiler, turnuvalar, maç, günlük antrenman için kullanım ve rekreatif faaliyetler gibi farklı seviyeler için farklı kalitede toplar üretmektedir. Üretim maliyetinin azaltılması daha düşük kalitede toplar üretilmesini sağlar. Mevcut araştırma sonuçlarına göre düşük kalitedeki topların iç basıncı arttığında oyuncular daha yüksek çarpışma etkilerine maruz kalabilirler. Dolayısıyla çarpışma etkilerini en

aza indirmek için antrenman ve maçlarda yüksek kaliteli topların kullanılması gerekmektedir.



## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, farklı iç basınçlara sahip topların çarpışma dinamiklerini çarpışma süresince enerji dağılımlarını belirleyerek araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla bir deney tasarımı yapılmış ve enerji dağılımını hesaplamak için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu öncü çalışma, tek bir TK değeri yerine topun çarpışma boyunca enerji dağılımını sundu. ÇSED sonuçlarına göre enerjinin çarpışma anında iç basınca ve gelen hıza bağlı olarak 0,56'ya kadar dağıldığı ortaya çıktı. Ancak Stronge (7) formülü kullanılarak hesaplanan geleneksel TK değerleri 0,84 ile 0,91 arasında değişmektedir. Bu nedenle çarpışma süresince belirlenen enerji dağılımı, çarpışma dinamiğini anlamak için detaylı bilgi veren bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Topların üretiminde kullanılan malzeme kalitesi topun yapısal özelliklerini etkilemektedir (6, 11, 41). Nitekim bu araştırma bulgularında ortaya konan ÇSED sonuçları bu etkiyi net şekilde ortaya koymaktadır. Çarpışmanın etkisi ve malzemenin etkisini belirlemek adına tüm ÇSED değerlerinin belirlenmesinin önemi ortaya konmuştur. Farklı kalitedeki topların çarpışma davranışlarının iç basınç artıka farklılaştığı, daha kaliteli topların daha kalitesiz toplara göre enerji dağılımlarının ve girinti miktarlarının fazla olduğu bulunmuş, sporcu sağlığı açısından kaliteli topların kullanımının önemi ortaya konmuştur. Ayrıca bu araştırma sonucunda resmi futbol maçlarında top iç basıncının 0.6 ile 1.0 bar arasında değişebileceği dikkate alındığında, yüksek iç basınç değerlerinde top kalitesinin çarpışma dinamikleri açısından kritik bir faktör haline geldiğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, artan iç basınç daha az enerji kaybına neden olur ancak daha yüksek darbe kuvvetleri ve gerilimlere neden olur. Bu nedenle oyuncuları sarsıntı etkisinden korumak için antrenman ve maçlarda kaliteli malzemelerden yapılmış topların kullanılması tavsiye edilir.

### 6.1. Sonuçlar

1. Topun çarpışma dinamiklerini belirlemek adına Python programlama dili OpenCv kütüphanesinde yer alan `HoughCircle`, `Canny`, `HoughLineP`, `Circle_fit` komutlarının yüksek doğrulukta görüntüleri işleyebildiği birden fazla doğrulama yöntemiyle ortaya kondu.

2. Teorik olarak futbol topunda çarpışmada oluşan temas yüzey alanının hesaplanmasında kullanılan konik taban alanı formülünün düz bir zeminle olan çarpışmada doğru sonuçlar verdiği kurulan araştırma tasarımı ile belirlendi.
3. Çarpışma süresince topta meydana gelen enerji dağılımının belirlenmesi için yeni bir metodoloji geliştirildi. Geliştirilen yeni hesaplama yöntemiyle topun tüm çarpışma süresince enerji dağılımı hesaplandı. Enerji dağılımı sonuçlarının doğruluğu literatürde yer alan Stronge formülü ile karşılaştırıldı, doğru sonuçlar verdiği ortaya kondu.
4. Topların iç basıncı arttıkça girinti miktarlarının azaldığı ortaya kondu. Topun kalitesine göre iç basınç arttıkça toplar arasında farklılıklar olduğu ortaya kondu. İç basınç arttıkça girinti miktarındaki azalmanın topun çarpışma süresince enerji dağılımında etkili olduğu ortaya kondu.
5. Toplarda meydana gelen enerji kaybı 0.6 ve 0.8 bar iç basınçlarda birbirinden farklılaşmazken, 1.0 bar iç basınçta top kalitesinin enerji dağılımında önemli olduğu bulundu.
6. Yüksek iç basınç değerlerinde top kalitesinin çarpışma dinamikleri açısından kritik bir faktör haline geldiğini ortaya kondu.

## 6.2. Öneriler

1. Daha büyük çarpışma açıları ve topun değişik spin koşullarında çarpışma süresince enerji davranışlarını incelemek adına topu belirli açılarda ve spinlerde atabilecek bir top atma makinesi tasarlanarak topun tüm çarpışma süresince enerji davranışı incelenebilir.
2. Aynı markaya ait ve aynı özellikler üretilmiş farklı boyutlardaki (3, 4, 5 numara) futbol toplarının çarpışma süresince davranışları incelenerek, kullanım amaçları doğrultusundaki tepki kuvvetleri ve enerji davranışları hakkında bilgi sahibi olunabilir.

3. Farklı markaların 3, 4 numara futbol toplarının iç basınç koşulları değiştiğindeki enerji davranışları incelenebilir.
3. Topun cama bıraktığı izlen belirlenmesinde topun bilindik çapının girilmeden elde edilebilmesi için topun alt kısmının daha da aydınlatılabilmesi için zemin içerisinde açılacak alan ile topun altına ışık verilmesi ve topun tüm bölgelerinin aydınlatılmasını sağlanabilir.
4. Topun çarpışma dinamikleri ve enerji dağılımı sonuçları insan dokusuna benzer viskoelastik malzeme ile incelenebilir.



## 7. KAYNAKLAR

1. Taha Z, Hassan, M.H., Hasanuddin, I. . Analytical modelling of soccer heading. *Sadhana*. 2015;40:1567-78.
2. Zhou Y, Lu G, Yang J. Finite element study of energy absorption foams for headgear in football (soccer) games. *Materials & Design*. 2015;88:162-9.
3. Li Y, Meng J, Li Q. Predicting soccer ball target through dynamic simulation. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2020;12(4):6-18.
4. Auger J, Markel J, Pecoski DD, Leiva-Molano N, Talavage TM, Leverenz L, et al. Factors affecting peak impact force during soccer headers and implications for the mitigation of head injuries. *PLoS one*. 2020;15(10):e0240162.
5. Ahmad M, Ismail KA, Mat F. Impact models and coefficient of restitution: A review. *ARPN J Eng Appl Sci*. 2016;11(10):6549-55.
6. Price D, Jones R, Harland A, Silberschmidt V. Viscoelasticity of multi-layer textile reinforced polymer composites used in soccer balls. *Journal of materials science*. 2008;43:2833-43.
7. Stronge WJ. Rigid Body Theory for Collinear Impact. *Impact Mechanics*. UK: Cambridge University Press; 2000. p. 26-8.
8. SHINKAI H, NUNOME H, ISOKAWA M, IKEGAMI Y. Ball Impact Dynamics of Instep Soccer Kicking. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2009;41(4):889-97.
9. Caccese JB, Buckley TA, Tierney RT, Arbogast KB, Rose WC, Glutting JJ, Kaminski TW. Head and neck size and neck strength predict linear and rotational acceleration during purposeful soccer heading. *Sports biomechanics*. 2018;17(4):462-76.
10. Cecchi NJ, Monroe DC, Moscoso WX, Hicks JW, Reinkensmeyer DJ. Effects of soccer ball inflation pressure and velocity on peak linear and rotational accelerations of ball-to-head impacts. *Sports Engineering*. 2020;23:1-6.
11. Victeamsport. Soccer ball: thermal bonded, hand stitched, or machine stitched? 2023 [Available from: <https://www.victeamsports.com/soccer-ball-thermal-bonded-hand-stitched-machine-stitched/>, .
12. Asai T, Carré M, Akatsuka T, Haake S. The curve kick of a football I: impact with the foot. *Sports Engineering*. 2002;5(4):183-92.
13. Iga T, Nunome H, Sano S, Sato N, Ikegami Y. Novel mathematical model to estimate ball impact force in soccer. *Sports biomechanics*. 2018;17(4):477-93.
14. Christenson AJ, Casa DJ, editors. Analysis on the Effect of Ball Pressure on Head Acceleration to Ensure Safety in Soccer. *Proceedings*; 2020: MDPI.
15. Koizumi A, Hong S, Sakamoto K, Sasaki R, Asai T. A study of impact force on modern soccer balls. *Procedia Engineering*. 2014;72:423-8.

16. Nunome H, Ball K, Shinkai H. Myth and fact of ball impact dynamics in football codes. *Footwear science*. 2014;6(2):105-18.
17. Thompsett B, Harland A, Roberts J. Investigating the relationship between physical properties of a football and player perceptions. *Procedia engineering*. 2016;147:519-25.
18. Iga T, Nunome, H., Inoue, K., Ikegami, Y. Basic mechanical analysis of soccer ball impact. Corpus ID: 106895446. 2013;1(5).
19. FIFA. FIFA quality programme for footballs (outdoor, futsal and beach soccer footballs). Testing Manuel 2022 [Available from: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://digitalhub.fifa.com/m/2cd75dccc94ad3ea/original/FIFA-Quality-Programme-for-Football-Testing-Manual-October-2022.pdf>] 2022.
20. Alam F, Chowdhury H, Stemmer M, Wang Z, Yang J. Effects of surface structure on soccer ball aerodynamics. *Procedia Engineering*. 2012;34:146-51.
21. Sakamoto Y, Hiratsuka M, Ito S. Effect of Soccer Ball Panels on Aerodynamic Characteristics and Flow in Drag Crisis. *Applied Sciences*. 2021;11(1):296.
22. Hong S, Asai T. Effect of panel shape of soccer ball on its flight characteristics. *Scientific Reports*. 2014;4(1):5068.
23. Ponce E, Ponce D, Andresen M. Modeling heading in adult soccer players. *IEEE Comput Graph Appl*. 2014;34(5):8-13.
24. Nathan AM. Dynamics of the baseball–bat collision. *American Journal of Physics*. 2000;68(11):979-90.
25. Svaldi DO, McCuen EC, Joshi C, Robinson ME, Nho Y, Hannemann R, et al. Cerebrovascular reactivity changes in asymptomatic female athletes attributable to high school soccer participation. *Brain Imaging Behav*. 2017;11(1):98-112.
26. Queen RM, Weinhold PS, Kirkendall DT, Yu B. Theoretical study of the effect of ball properties on impact force in soccer heading. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35(12):2069-76.
27. Babbs CF. Biomechanics of heading a soccer ball: implications for player safety. *ScientificWorldJournal*. 2001;1:281-322.
28. Weil E, Alegi, . Peter Christopher , Giulianotti, . Richard C. , Joy, . Bernard and Rollin, . Jack. football. *Encyclopedia Britannica*2024.
29. B. Aladanlı Ü, Çördük. Futbol tarihi ve sporda ilkler. İstanbul: Yeşil Elma Yayınevi; 2009.
30. Neilson P. *The Dynamic Testing of Soccer Balls* Loughborough University: Loughborough University; 2003.
31. Dunmore T, and Thomas J Dunmore. *Historical Dictionary of Soccer*. USA: Scarecrow Press; 2011. Available from: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/nku/detail.action?docID=741751>.
32. Taylor J. *The science of soccer : A bouncing ball and a banana kick*. New Mexico Press: University of New Mexico Press; 2014.

33. Smith G. History of the ball 2016 [Available from: <https://sites.duke.edu/wcwp/2016/04/17/history-of-the-ball/#:~:text=The%20history%20of%20the%20modern,several%20advantages%20over%20their%20predecessors.>
34. Shewchenko N, Withnall C, Keown M, Gittens R, Dvorak J. Heading in football. Part 3: effect of ball properties on head response. *Br J Sports Med.* 2005;39 Suppl 1(Suppl 1):i33-9.
35. Price DS, Jones R, Harland AR. Advanced finite-element modelling of a 32-panel soccer ball. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2007;221(11):1309-19.
36. Asai T, Ito S, Seo K, Koike S. Characteristics of modern soccer balls. *Procedia Engineering.* 2012;34:122-7.
37. Price DS, Neilson PJ, Harland AR, Jones R. Measurement of out of balance in hollow spheres using flotation dynamics: Soccer ball application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2005;219(2):159-67.
38. Dorminy M, Hoogeveen A, Tierney RT, Higgins M, McDevitt JK, Kretzschmar J. Effect of soccer heading ball speed on S100B, sideline concussion assessments and head impact kinematics. *Brain Inj.* 2015;29(10):1158-64.
39. Ling H MH, Neal J, Lees A, Hardy J, Hotlon J, Revesz T, Williams D. Chronic Traumatic Encephalopathy In Retired Footballers With Dementia. *Association of British Neurologists (ABN) Annual Meeting 3-5 May 2017; Liverpool 2017.*
40. Bretzin AC, Mansell JL, Tierney RT, McDevitt JK. Sex Differences in Anthropometrics and Heading Kinematics Among Division I Soccer Athletes. *Sports Health.* 2017;9(2):168-73.
41. Victeamspport. The Difference Between a Latex, Butyl and Synthetic Rubber (SR) Bladder 2023 [Available from: <https://www.victeamssports.com/the-difference-between-a-latex-butyl-and-synthetic-rubber-sr-bladder/>].
42. Flores P, Ambrósio J, Lankarani HM. Contact-impact events with friction in multibody dynamics: Back to basics. *Mechanism and Machine Theory.* 2023;184:105305.
43. Naunheim RS, Bayly PV, Standeven J, Neubauer JS, Lewis LM, Genin GM. Linear and angular head accelerations during heading of a soccer ball. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(8):1406-12.
44. Fernandes FA, Sousa RJAd. Head injury predictors in sports trauma – A state-of-the-art review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine.* 2015;229(8):592-608.
45. Harriss A, Johnson AM, Walton DM, Dickey JP. Head impact magnitudes that occur from purposeful soccer heading depend on the game scenario and head impact location. *Musculoskelet Sci Pract.* 2019;40:53-7.
46. Shewchenko N, Withnall C, Keown M, Gittens R, Dvorak J. Heading in football. Part 2: biomechanics of ball heading and head response. *Br J Sports Med.* 2005;39 Suppl 1(Suppl 1):i26-32.

47. Collins FC. Parametric impact characterisation of a solid sports ball, with a view to developing a standard core for the gaa sliotar Írlanda: Dublin Üniversitesi; 2011.
48. Karimi A, Razaghi R, Navidbakhsh M, Sera T, Kudo S. Measurement of the mechanical properties of soccer balls using digital image correlation method. *Sport Sciences for Health*. 2016;12(1):69-76.
49. Stronge WJ. Rigid Body Collisions with Friction. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*. 1990;431:169-81.
50. Leiva N. Characterization of soccer ball parameters for the manufacturing of protective headbands and frequency domain evaluation of hootball helmets. Hindistan: Perdue Üniversitesi; 2019.
51. Cordingley LP. Advanced modelling of surface impacts from hollow sports balls: Loughborough University.; 2002.
52. Knudson D. *Fundamentals of Biomechanics*. 2th Edition ed. USA: Springer; 2007.
53. Stronge WJ, Ashcroft ADC. Oblique impact of inflated balls at large deflections. *International Journal of Impact Engineering*. 2007;34(6):1003-19.
54. Lankarani HM, Nikravesh PE. A Contact Force Model With Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems. *Journal of Mechanical Design*. 1990;112(3):369-76.
55. Jackson RL, Green I, Marghitu DB. Predicting the coefficient of restitution of impacting elastic-perfectly plastic spheres. *Nonlinear Dynamics*. 2010;60(3):217-29.
56. Bridge NJ. The way balls bounce. *Physics Education*. 1998;33(3):174.
57. Taha Z, Hassan MHA. A reaction-force-validated soccer ball finite element model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2017;231(1):43-9.
58. Georgallas A, Landry G. The coefficient of restitution of pressurized balls: a mechanistic model. *Canadian Journal of Physics*. 2016;94(1):42-6.
59. Price DS, Jones R, Harland AR. Soccer ball anisotropy modelling. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;420(1):100-8.
60. Alam F, Chowdhury H, George S, Mustary I, Zimmer G. Aerodynamic Drag Measurements of FIFA-approved Footballs. *Procedia Engineering*. 2014;72:703-8.
61. Aritan S. Development and validation of a biomechanical model of the human upper arm. İngiltere: Manchester Metropolitan Üniversitesi; 1998.
62. Britannica. The Editors of Encyclopaedia. "Hooke's law". 2023. *Encyclopedia Britannica*. Available from: <https://www.britannica.com/science/Hookes-law>.
63. Jastrzebski D. *Nature and Properties of Engineering Materials* John Wiley & Sons, Inc; 1959.

64. Yigit AS, Christoforou AP, Majeed MA. A nonlinear visco-elastoplastic impact model and the coefficient of restitution. *Nonlinear Dynamics*. 2011;66(4):509-21.
65. Robertson DGE CG, Hamill J, Kamen G, Whittlesey S. *Research methods in biomechanics: Human kinetics*; 2013.
66. Flores P, Lankarani HM, editors. *An Overview of Several Formulations for Dry and Lubricated Revolute Joint Clearances in Planar Rigid-Multi-Body Mechanical Systems*. ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference; 2014. V006T10A021.
67. Ryu H-T, Yi B-J, Kwon YH. Analytical model of variable characteristic of coefficient of restitution and its application to ball trajectory planning. *Intelligent Service Robotics*. 2017;10(1):13-29.
68. Flores P. Contact mechanics for dynamical systems: a comprehensive review. *Multibody System Dynamics*. 2022;54(2):127-77.
69. Meyer N, Wagemann EL, Jackstadt A, Seifried R. Material and particle size sensitivity analysis on coefficient of restitution in low-velocity normal impacts. *Computational Particle Mechanics*. 2022;9(6):1293-308.
70. Rodrigues da Silva M, Marques F, Tavares da Silva M, Flores P. A compendium of contact force models inspired by Hunt and Crossley's cornerstone work. *Mechanism and Machine Theory*. 2022;167:104501.
71. Haron A, Ismail KA. Coefficient of restitution of sports balls: A normal drop test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2012;36(1):012038.
72. Ismail KA, Stronge WJ. Impact of Viscoplastic Bodies: Dissipation and Restitution. *Journal of Applied Mechanics*. 2008;75(6).
73. Jensen RK. Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method. *J Biomech*. 1978;11(8-9):349-58.
74. Tözeren A. *Human Body Dynamics: Classical Mechanics and Human Movement*. USA:New York: Springer.
75. Muybridge E. *Animal Locomotion: an electro-photographic investigation of consecutive phases of animal movements*1887.
76. Marey E. *De la mesure dans les differents acts de la locomotion*. *Comptes Rendues: de l'Academie des Sciences de Paris*; 1983.
77. Python. *Python programlama dili*. 2023.
78. modüller P. *Python Modüller 2023* [Available from: <https://docs.python.org/3/tutorial/modules.html>].
79. Numpy. *Numpy Kütüphanesi 2023* [Available from: <https://numpy.org/>].
80. Kütüphanesi G. *Matplotlib 2023* [Available from: <https://numpy.org/>].
81. Python. *Görüntü işleme OpenCv kütüphanesi 2023* [Available from: <https://opencv.org/about/>].

82. Lennart L TG. Modelling of Dynamic Systems. New Jersey: P T R Prentice Hall; 1994.
83. Nagurka M, Shuguang H, editors. A mass-spring-damper model of a bouncing ball. Proceedings of the 2004 American Control Conference; 2004 30 June-2 July 2004.
84. HoughCircle. HoughCircle Transform 2023 [Available from: [https://docs.opencv.org/4.x/d3/de5/tutorial\\_js\\_houghcircles.html](https://docs.opencv.org/4.x/d3/de5/tutorial_js_houghcircles.html)].
85. Yuen HK, Princen J, Illingworth J, Kittler J. Comparative study of Hough Transform methods for circle finding. Image Vis Comput. 1990;8:71-7.
86. Canny. Python canny algoritması 2023 [Available from: [https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial\\_py\\_canny.html](https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html)].
87. Green B. Canny Edge Detection Tutorial by Bill Green 2002 [Available from: <https://masters.donntu.ru/2010/fknt/chudovskaja/library/article5.htm>].
88. Python. Hough Line Detect with OpenCv 2023 [Available from: [https://docs.opencv.org/3.4/d9/db0/tutorial\\_hough\\_lines.html](https://docs.opencv.org/3.4/d9/db0/tutorial_hough_lines.html)].
89. Rangarajan PV, Kanatani K. Improved algebraic methods for circle fitting. Electronic Journal of Statistics. 2009;3:1075-82.
90. Qingkai K, Timmy S, Bayen AM. Python Programming Numerical Methods A Guide for Engineers and Scientists. 1 ed: Katey Birtcher; 2021.
91. Chai T, Draxler RR. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geosci Model Dev. 2014;7(3):1247-50.
92. Dowell LJ, Krebs G. A formula for comparison of selected sport ball compressibility. Br J Sports Med. 1991;25(1):34-7.
93. Schneider F, MacDonald K, Reimer D, Melnyk AD, Oxland TR. Analysis of mechanical properties of different volleyballs. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. 2019;233(2):292-300.
94. Jian-Bao J. Mechanical information of football collision during different speed launch. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013;50:347-51.
95. Hubbard M, Stronge WJ. Bounce of hollow balls on flat surfaces. Sports Engineering. 2001;4(2):49-61.
96. Peek K, McKay M, Fu A, Meyer T, Oxenham V, Esopenko C, et al. The effect of ball characteristics on head acceleration during purposeful heading in male and female youth football players. Science and Medicine in Football. 2021;5(3):195-203.
97. Victeamsport. What's the Difference Between a PU, TPU and PVC Football (Soccer)? 2023 [Available from: <https://www.victeamsports.com/whats-the-difference-between-a-pu-tpu-and-pvc-football-soccer/>].

## 8. EKLER

## Ek-1: Etik Kurul Onayı



TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
GİRİŞİMSEL OLMAYAN KLİNİK ARAŞTIRMALAR  
ETİK KURULU KARAR FORMU



BAŞVURU BİLGİLERİ	Araştırmanın Açık Adı	Futbolda Amaca Yönelik Kafa Vuruşlarının Modellemesi ve Farklı Tekniklerin Kinetik ve Kinematiklerinin Belirlenmesi		
	Koordinatör / Sorumlu Araştırmacı	Dr.Öğr.Üyesi Serdar ARITAN / Hacettepe Spor Bilimleri Fakültesi		
	Etik Kurul Toplantı Tarihi	27.08.2020		
	Araştırma Protokol Numarası	2020.192.08.01		
	Araştırmanın Türü	Prospektif <input checked="" type="checkbox"/>	Retrospektif <input type="checkbox"/>	Diger:
	Araştırmanın Destekleyicisi	TÜBİTAK <input type="checkbox"/>	TNKÜ BAP <input type="checkbox"/>	Araştırmacı <input checked="" type="checkbox"/> Diger:
	Araştırmanın Bütçesi	??? ₺		
	Araştırmanın Merkezi	Tek Merkezli <input checked="" type="checkbox"/>	Çok Merkezli <input type="checkbox"/>	
KARAR BİLGİLERİ	Yukarıda bilgileri verilen başvuru dosyası ile ilgili belgeler araştırmanın/çalışmanın gerekeçe, amaç, yaklaşım ve yöntemleri dikkate alınarak incelenmiş ve uygun bulunmuş olup, araştırmanın/çalışmanın başvuru dosyasında belirtilen merkezlerde gerçekleştirilmesinde etik bilimsel sakınca bulunmadığına, toplantıya katılan etik kurul üye tam sayısının oy birliği ile karar verilmiştir.			

## ETİK KURULUN ÇALIŞMA ESASI

İlaç ve Biyolojik Ürünlerin Klinik Araştırmaları Hakkında Yönetmelik, İyi Klinik Uygulamaları Kılavuzu

Ünvanı/Adı/Soyadı	Uzmanlık Alanı	Araştırma ile İlişkili		Katılım *		İmza
Prof. Dr. Ali Rıza KIZILER	Biyofizik	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Prof. Dr. M. Metin DONMA	Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Prof. Dr. Savaş GÜZEL	Tıbbi Biyokimya	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Doç. Dr. Yakup ALBAYRAK	Ruh Sağlığı ve Hastalıkları	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Aysin NALBANTOĞLU	Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Aliye ÇELİKKOL	Tıbbi Biyokimya	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Berna ERDAL	Tıbbi Biyokimya	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Birol TOPÇU	Biyoistatistik	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ümit ÇETİN	Ortopedi ve Travmatoloji	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Naile Esra SAKA	Adli Tıp	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Sonat Pınar KARA	İç Hastalıkları	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep KURTULUŞ TOSUN	İç Hastalıkları Hemşireliği	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Mahluga JAFAROVA DEMİRKAPU	Tıbbi Farmakoloji	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	
Dr. Öğr. Üyesi Ayhan ŞAHİN	Anesteziyoloji ve Reanimasyon	E <input type="checkbox"/>	H <input checked="" type="checkbox"/>	E <input checked="" type="checkbox"/>	H <input type="checkbox"/>	

\*: Toplantıda bulunma.

**Etik Kurul Başkanının**

Ünvanı/Adı/Soyadı: Prof. Dr. Ali Rıza KIZILER

İmza:

## Ek-2: Tez Çalışması İntihal (Orjinallik) Raporu

### FUTBOL TOPLARININ ÇARPIŞMA DİNAMİKLERİ

#### ORIGINALITY REPORT

<b>3%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>%</b>
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

#### PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	<a href="https://openaccess.hacettepe.edu.tr">openaccess.hacettepe.edu.tr</a> Internet Source	<b>1%</b>
<b>2</b>	<a href="https://acikbilim.yok.gov.tr">acikbilim.yok.gov.tr</a> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>3</b>	Kant, Yalkin. "Bir Robot Manipulatörün Bilgisayar Destekli Mühendislik Araçları İle Çalışma Uzayı Analizi", Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey), 2024 Publication	<b>&lt;1%</b>
<b>4</b>	<a href="https://pdffox.com">pdffox.com</a> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	<a href="https://nek.istanbul.edu.tr:4444">nek.istanbul.edu.tr:4444</a> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	Günaydın, Ahmet Can. "Eklemeli İmalat Prosesinde Yapı Oryantasyonunun Çok-Amaçlı Optimizasyonu", Bursa Uludag University (Turkey), 2023 Publication	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<a href="https://d-nb.info">d-nb.info</a> Internet Source	<b>&lt;1%</b>

8	<a href="http://dergipark.org.tr">dergipark.org.tr</a> Internet Source	<1 %
9	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Internet Source	<1 %
10	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Internet Source	<1 %
11	Alper Avcı, Ferit Kuşçu, Aslıhan Candevir Ulu, Serdar Onat. "An Overlooked Complication, Empyema Necessitatis: An Analysis of 766 Empyema Cases", Flora the Journal of Infectious Diseases and Clinical Microbiology, 2019 Publication	<1 %
12	Brodmann, M.. "An avoidance principle with an application to the asymptotic behaviour of graded local cohomology", Journal of Pure and Applied Algebra, 200709 Publication	<1 %
13	<a href="http://ichi.pro">ichi.pro</a> Internet Source	<1 %
14	<a href="http://www.akademi40.org">www.akademi40.org</a> Internet Source	<1 %
15	<a href="http://gelecegiyazanlar.turkcell.com.tr">gelecegiyazanlar.turkcell.com.tr</a> Internet Source	<1 %
16	<a href="http://www.megatonyazilim.com">www.megatonyazilim.com</a> Internet Source	<1 %

- |    |   |      |
|----|---|------|
| 17 | Kumraltekin, Emir Dogan. "Ikinci urun Susamda (Sesamum indicum L.) kisintili sulamanin Verim Ve Kalite ozellikleri uzerine Etkisi.", Bursa Uludag University, 2021<br>Publication   | <1 % |
| 18 | Lesnic, D.. "Decomposition methods for non-linear, non-characteristic Cauchy heat problems", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 200509<br>Publication  | <1 % |
| 19 | dspace.gazi.edu.tr<br>Internet Source   | <1 % |
| 20 | Değirmenci, Osman Çağatay. "Salmonella Bakterisi Teşhisinde Kullanılacak Tani Cihazının Geliştirilmesi", Marmara Universitesi (Turkey), 2022<br>Publication   | <1 % |
| 21 | 753831b930.cbaul-cdnwnd.com<br>Internet Source  | <1 % |
| 22 | Toktas, Ayse Gul. "Ametal Implantların Aerosol Kaplama Ve Elektrosprey Kaplama Yontemi Kullanılarak Gumus Katkili Hidroksiapatit Seramik Ile Kaplanmasi Ve Antibakteriyel ozellik Kazandirilmesi", Anadolu University (Turkey), 2021<br>Publication | <1 % |
| 23 | acikerisim.erbakan.edu.tr   |      |

Internet Source

<1%

24

[sporbilimleri.org.tr](http://sporbilimleri.org.tr)

Internet Source

<1%

25

Özdemir, Gamze. "Havacılık İngilizcesi Ders Kitaplarının Çeşitli Kriterlere Göre Karşılaştırılarak Değerlendirilmesi", Marmara Üniversitesi (Turkey), 2023

Publication

<1%

26

Ünalın, Yasemin. "Bireysel ve örgütsel açıdan Ortaokullarda yengeç Sepeti Sendromu: Bir Karma yöntem çalışması", Marmara Üniversitesi (Turkey), 2023

Publication

<1%

27

Dincer, Ünsal. "İki serbestlik dereceli prototip paralel mekanizmanın tasarımı ve İmalatı", İzmir Katip Celebi University (Turkey), 2024

Publication

<1%

Exclude quotes On

Exclude matches < 5 words

Exclude bibliography On

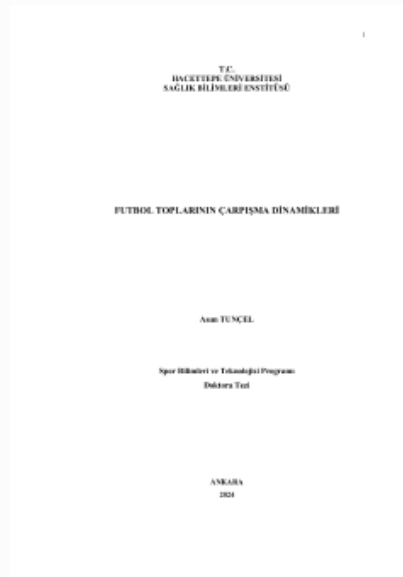
**Ek-3: Dijital Makbuz**

## Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: ASIM Tuncel  
Assignment title: FUTBOL TOPLARININ ÇARPIŞMA DİNAMİKLERİ  
Submission title: FUTBOL TOPLARININ ÇARPIŞMA DİNAMİKLERİ  
File name: ASIM\_TUN\_EL\_TEZ\_D\_ZELTME\_inceleme.docx  
File size: 11.51M  
Page count: 102  
Word count: 18,212  
Character count: 125,417  
Submission date: 19-Jun-2024 11:01AM (UTC+0300)  
Submission ID: 2405221974



**Ek-4: İstatistiksel Analiz Program Dosyaları**

Elde edilen verilerin normallik analizi, tek yönlü varyans analizi (ANOVA), korelasyon analizi, RMSE ve RMSE yüzde analizi ile ilgili .py uzantılı kodlar ve .txt uzantılı örnek dosyalar bağlantıda yer almaktadır.

[https://eunivsite.nku.edu.tr/testotomasyon/dosyalar/kullanici/3767/files/%C4%B0statistik\\_Tez.zip](https://eunivsite.nku.edu.tr/testotomasyon/dosyalar/kullanici/3767/files/%C4%B0statistik_Tez.zip)



### **Ek-5: Kuvvet Platformu ve Görüntü Analizi Çözümlenmeleri**

Görüntü analizi ile belirlenen tepki kuvvetlerinin doğruluğunu test etmek için kurulan araştırma alanından elde edilen aşağıda açıklaması verilen veriler ve görüntü işleme programları ilgili bağlantıda yer almaktadır.

- a) Kuvvet platformunda elde edilen tepki kuvvetleri .txt uzantılı datalar
- b) Görüntü analizinden elde edilen tepki kuvvetleri .txt uzantılı datalar
- c) Görüntü sayısallaştırma, metrik sisteme dönüşüm ve kuvvet hesaplaması programlarının .py uzantılı dosyaları

[https://eunivsite.nku.edu.tr/testotomasyon/dosyalar/kullanicilar/3767/files/2\\_G%C3%B6r%C3%BCnt%C3%BCn%C3%BCl%C3%BCz%C3%BCmlenmeleri%20Analizi%26Kuvvet%20Platformu.zip](https://eunivsite.nku.edu.tr/testotomasyon/dosyalar/kullanicilar/3767/files/2_G%C3%B6r%C3%BCnt%C3%BCn%C3%BCl%C3%BCz%C3%BCmlenmeleri%20Analizi%26Kuvvet%20Platformu.zip)



## Ek-6: Çarpışma Dinamikleri

Bu araştırmada kullanılan yöntemle temperli cama atılan topların aşağıda belirtilen çarpışma dinamikleri için yapılan işlemlere ait .py uzatılı kodlar ve .txt uzantılı örnek datalar ilgili bağlantıda yer almaktadır;

- a) Yan kameradan elde edilen görüntülerin sayısallaştırılması ve işlenmesi
- b) Arka kameradan elde edilen görüntülerin sayısallaştırılması, topun temas yüzey alanının belirlenmesi ve işlenmesi,
- c) Yan kameradan top girinti miktarının belirlenmesi
- d) Tüm çarpışma dinamiklerinin hesaplanması (tez\_sonuc\_raporlama.py)  
Hız,  
İvme,  
Tepki kuvveti,  
Yan kamera ve arka kamera temas yüzey alan hesaplaması ve karşılaştırılması,  
4. Derece Runge-Kutta dinamik çözümlemesi ve sonuçların karşılaştırılması,

<https://eunivsite.nku.edu.tr/testotomasyon/dosyalar/kullanicilar/3767/files/Ek5%20%C3%A7arp%C4%B1%C5%9Fma%20analizi.zip>

**Ek-7: Histerezis Döngü Alanları ve Çarpışma Süresince Enerji Dağılımı Hesabı**

Bu araştırma sonucunda geliştirilen yeni yöntem ile ortaya konan enerji dağılımlarının doğruluğunu belirlemek için hesaplanan ÇSED sonuçlarının ve çarpışma süresince enerji dağılımını belirleyen hesaplamaların yer aldığı .py uzantılı kod ve .txt uzantılı örnek datalar aşağıda yer alan linkte yer almaktadır.

<https://euniverte.nku.edu.tr/testotomasyon/dosyalar/kullanicilar/3767/files/Ek6%20Histerezis%20D%C3%B6ng%C3%BC%20Alanlar%C4%B1%20ve%20%C3%87arp%C4%B1%C5%9Fma%20S%C3%BCresince%20Enerji%20Da%C4%9F%C4%B1l%C4%B1m%C4%B1%20Hesab%C4%B1.zip>



**Ek-8: Tez ile İlişkili Yayın**

Bu araştırma sonucunda geliştirilen yeni metodolojik yaklaşım ile elde edilen çarpışma süresince enerji dağılımı sonuçları aşağıdaki künyede belirtilen Science Citation Index-Expanded indeksli dergide yayınlanmıştır.

Tunçel A, Özgören N, Aritan S. Comparison of collision dynamics of soccer balls with energy dissipation method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. 2024;0(0). doi: <https://doi.org/10.1177/17543371241237589>





Original Article

Institution of  
MECHANICAL  
ENGINEERS

# Comparison of collision dynamics of soccer balls with energy dissipation method

Proc IMechE Part P:  
J Sports Engineering and Technology  
1–13  
© IMechE 2024  
Article reuse guidelines:  
sagepub.com/journals-permissions  
DOI: 10.1177/17543371241237589  
journals.sagepub.com/home/jsp

Asım Tunçel<sup>1</sup>, Nihat Özgören<sup>2</sup> and Serdar Arıtan<sup>2</sup>

## Abstract

This study aimed to understand the collision characteristics of different soccer balls by determining energy dissipation (ED) during collisions. Soccer balls from five different brands were kicked towards a framed tempered glass. The kicks were performed with the balls inflated under three inner pressure conditions. The motion of each ball was recorded using two high-speed cameras at 6000 Hz. The contact surface area (CSA), ball indentation amount (IA), reaction forces (RF) and energetic coefficient of restitution (CoR) during contact were calculated via image processing methods. A new methodological approach was developed to determine the ED during the collision (EDDC). The accuracy of the estimated RF was validated using force plate data, and the CSA values validated the calculated IA. The EDDC were then reduced to a single value to compare with the CoR values obtained using the traditional formula. Differences between CoR and EDDC were statistically tested. One-way ANOVA tests were performed separately to compare the effect of the ball brand on the IA and EDDC for each inner pressure condition. The CoR and EDDC showed no significant difference, proving that the developed method is a valid measure of ED. At 1.0 bar inner pressure, IA and EDDC showed significant differences according to the brands. EDDC, depending on the ball quality, decreased at higher inner pressure values regardless of the brand. Consequently, the present study exhibited that ball quality becomes a critical factor in collision dynamics at high inner pressure values, considering that ball inner pressure may vary between 0.6 and 1.0 bar in official soccer matches.

## Keywords

Soccer, collision dynamics, impact, coefficient of restitution, ball quality, energy dissipation, football, ball inner pressure

Date received: 9 November 2023; accepted: 19 February 2024

## Introduction

In a soccer game, players often use both their feet and heads to redirect the ball, passing or shooting. Both approaches require kicking the ball, which includes sudden direct contact between the player's limb and the ball. The collision between the ball and limbs is affected by various parameters such as limb velocity and stiffness, ball velocity, inner pressure and stiffness.<sup>1–3</sup> Last but not least, the material and structural features of the ball are the factors that act on the impact characteristics.<sup>2,4</sup>

The material and structural features of the soccer ball have changed remarkably since the first day it was produced. After the introduction of the spherical leather ball cover in 1855, this feature was made mandatory by the English Football Association (FA) in 1872.<sup>5</sup> The International Football Federation Association (FIFA) determined ball circumference (68–70 cm), inner pressure (0.6–1.1 bar), structural features (leather or suitable coating material) and in-game rules

faithfully adhering to the shape set by the FA.<sup>5,6</sup> In recent years, researchers have been interested in understanding the collision impact and structural features of the ball and, thereby, determining collision characteristics, which was found to be beneficial for the prevention of injuries<sup>7,8</sup> and for increasing performance.<sup>9–12</sup> Most of these studies examined the collision dynamics caused by the changes in the characteristics of the ball in the kicks made with the foot and the head.<sup>6–8,10,13,14</sup> However, the interaction between the ball and the limb

<sup>1</sup>Faculty of Sport Sciences, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Turkey

<sup>2</sup>Faculty of Sport Sciences, Hacettepe University, Ankara, Turkey

## Corresponding author:

Asım Tunçel, Faculty of Sport Sciences, Tekirdağ Namık Kemal University, Namık Kemal Neighborhood Kampus Street No: 1, Tekirdağ 59030, Turkey.  
Email: atuncel@nku.edu.tr

## 9. ÖZGEÇMİŞ

