

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**SPORCU HAREKETLERİNİN FOTOGRAMETRİK HAREKET ANALİZ
YAZILIM TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ**

MUSTAFA CANIBERK

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAMSUN
2019**

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Mustafa CANIBERK tarafından hazırlanan ‘‘Sporcu Hareketlerinin Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılım Tasarımı ve Gerekleştirmisi’’ adlı tez çalışması 22/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Harita Mühendisliğı Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

Başkan Prof. Dr. Cem ÇETİN
Süleyman Demirel Üniversitesi
Spor Hekimliğı Anabilim Dalı

Üye Prof. Dr. Fevzi KARSLI
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Harita Mühendisliğı Anabilim Dalı

Üye Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Harita Mühendisliğı Anabilim Dalı

Üye Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ
Samsun Üniversitesi
Sivil Havacılık Yüksekokulu Pilotaj Bölümü

Üye Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali DERELİ
Giresun Üniversitesi
Harita Mühendisliğı Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım. / /2019

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

22/04/2019

Mustafa CANIBERK

ÖZET

Doktora Tezi

SPORCU HAREKETLERİNİN FOTOGRAMETRİK HAREKET ANALİZ YAZILIM TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

Mustafa CANIBERK

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ

Spora özgü hareketlerin bilimsel veri olarak kayıt altına alınarak değerlendirilmesi ve sporcu gelişiminde kullanılmak üzere geri dönüşlerin verilmesi spor bilimi için vazgeçilmez unsurlardandır. Bilindiği üzere sporcuların hareketleri çok kısa bir zaman içerisinde ve hızla gerçekleşmektedir. Bu hareketlerin kinematik olarak belirlenmesinde video kameralar ile alınan görüntülerin kullanılması günümüzde en çok tercih edilen yöntemlerdendir.

Sporcu sağlığı ve performansının gelişimine yönelik çalışmalarda sıklıkla 3B hareket analiz sistemleri kullanılmaktadır. Kinematik; insan hareketlerinin pozisyon sürelerini, vücut segmentlerinin yer değiştirmelerini, ivmelenmesini ve bu segmentlerinin hızlanmasını ele almaktadır. Bu bilgiler, insan vücudundaki antropometrik noktaların 3B koordinatları biliniyorsa kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Anlık hareketlerin 3B olarak yakalanabilmesi için fotogrametrik tekniklerin tercih edilmesi, fotogrametrinin diğer ölçme yöntemlerine göre en büyük avantajı olan “ölçmelerin cisimle temas kurmadan fotografik izdüşüm üzerinden yapılması” ilkesinin doğal bir sonucudur. Böylelikle hareketi meydana getiren unsurlarla (sporcu, ekipmanlar, spor alanı vb.) doğrudan temas kurulmadan hareketin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışma ile sporun farklı branşlarındaki hareketlerin analizine yenilikçi bir açılım getirme, sporda yetenek tespiti, sporcunun performansının değerlendirilmesi, teknik ve taktik beceri geliştirilmesine yönelik çözümler üretmek ve yeni açılımlar sağlamak hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında; 3B kinematik hareket analizini fotogrametrik yöntem ile gerçekleştirebilen, stereo görüşü sağlayabilecek sayıda kamera sistemini senkronlayabilen, kameraların kalibrasyonlarını otomatik olarak gerçekleştirebilen, hareketi tanımlayan noktaların konumlarını gerçek zamanlı olarak hesaplayabilen ve sonuçları görüntüleyebilen bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım hazırlık, ölçüm, analiz ve raporlama modüllerinden oluşmaktadır.

Geliştirilen bu yazılım Gazi Üniversitesi Atıcılık Takımının kadın ve erkek sporcuları ile test edilmiştir. Sporcu gelişiminin belirlenmesi için, tecrübeli ve tecrübesiz olacak şekilde atış tekniği ile sporcu seviyeleri arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Nisan 2019, 110 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Hareket Analizi, Dijital Fotogrametri, 3B Analiz, Biyomekanik.

ABSTRACT

Doctoral Dissertation

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PHOTOGRAMMETRIC MOVEMENT ANALYSIS SOFTWARE FOR ATHLETES MOVEMENTS

Mustafa CANIBERK

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Sciences
Department of Geomatic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ

Scientific recording of the sports specific movements and providing feedback for athletic development is indispensable for sports science. As known, movements of athletes' are happening in a very short time and rapidly. Nowadays, the usage of images taken by the video cameras in determining the kinematics of the movements is the most preferred method.

Three-dimensional motion analysis systems are frequently used in athletes health and athletic performance development. Kinematic; discusses the position durations of human movements, displacement and acceleration of body segments. This information can be easily calculated if the 3D coordinates of the anthropometric points on the human body are known. Preferring photogrammetric techniques to capture instantaneous movements in three dimensions, is the natural result of the principle of "making the measurements over the photographic projection without contacting the object" which is the biggest advantage over other measurement methods. Thus, it is possible to determine the movement without direct contact with the elements that cause the movements (athletes, equipment, sports field etc.). With this study, it is aimed to provide innovative approaches to the analysis of movements in different branches of sports, to determine talent, to evaluate its performance, to develop solutions for technical and tactical skills and to provide new expansions in sports.

In this study; a software developed which three dimensional kinematic motion analysis can be performed by photogrammetric method, synchronize and calibrate automatically the sufficient number of camera systems that can provide stereo vision, calculate the position of the points that define the movement in real time and showing the results. This software consists of Preparation, Measurement, Analysis and Reporting Modules.

This software has been tested with the male and female athletes of Gazi University Shooting Team. In order to determination of athletes development, experienced and inexperienced, the relationship between the shot technique and the athlete's levels were examined.

April 2019, 110 Pages

Key Words: Motion Analysis, Digital Photogrammetry, 3D Analysis, Biomechanics.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora eğitimimde ve tez çalışmasında tecrübe ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ, Prof. Dr. Fevzi KARSLI ve Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma jürisinde bulunmalarında onur duyduğum, tez çalışmasına önemli katkılar sağlayan Prof. Dr. Cem ÇETİN ve Dr. Öğr. Üyesi Memet Ali DERELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen Cerrahi Navigasyon Projesinin (TÜBİTAK 1003, Proje No:113S094) tamamlanmasına katkı sağlayan bu tez çalışmasına sağladığı desteklerden dolayı TÜBİTAK, Çankaya Üniversitesi, Atılım Üniversitesi ve Gazi Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

Çankaya Üniversitesi Konumsal/Medikal Modelleme ve Simülasyon Laboratuvarında bulunan kamera sistemlerini ve yardımcı ekipmanları kullanmamda desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Hadi Hakan MARAŞ'a teşekkür ederim.

Mesleki gelişimin en önemli unsurlarından birisi olan, 2004 yılından itibaren görev aldığım Millî Savunma Bakanlığı, Harita Genel Müdürlüğüne ve çalışmalarında desteğini esirgemeyen mesai arkadaşım Dr. Müh. Ali Coşkun KİRACI'ya teşekkür ederim.

Uygulama aşamasının gerçekleştirilmesinde Gazi Üniversitesi Atıcılık Takımına, atış ve ölçüm çalışmalarımıza katılan sporcular Cihat VEYSEL, Görkem Neşet AKÇAM, Gözdem Yersu KAYA ile Seval AYDIN'a ve ölçümler sırasında önemli katkılar sağlayan Serhat AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve destekleyen sevgili annem Güler CANIBERK, bana verimli ve huzurlu bir çalışma ortamı sunan hoşgörü ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Mine Mehtap CANIBERK, güleryüzleri ile hep yanımda olan sevgili kızlarım Elif ve Aslı'ya sonsuz teşekkürler.

Beni her zaman daha iyisini yapabileceğime inandıran, doktora eğitimimin başladığını gören, bittiğini de gördüğüne inandığım sevgili babam Murat Ali CANIBERK, mekânın cennet olsun. Sevgi ve özlemlerle...

Nisan 2019, Samsun

Mustafa CANIBERK

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI.....	1
2. FOTOGRAFETRİ.....	5
2.1. Tanım.....	5
2.2. Fotogrametrinin Matematik Temeli.....	5
2.2.1. Doğrusallık (Kolinearite) koşulu.....	7
2.2.2. Eşdüzlemsellik (Koplanarite) koşulu.....	8
2.2.3. Kolinearite eşitliklerinin doğrusallaştırılması.....	9
2.3. Dijital Fotogrametri.....	12
2.4. Görüntü Distorsiyonları.....	13
2.5. Kamera Kalibrasyonu.....	16
2.5.1. Direkt lineer transformasyon (Direct linear transform).....	18
2.5.2. Işın demetleri dengelemesi.....	18
2.5.3. Zhang kalibrasyon algoritması.....	19
2.6. Matematik Modelin Yersel Fotogrametriye Uygulanması.....	21
3. FARKLI YÖNTEMLERLE GERÇEKLEŞTİRİLEN BİYOMEKANİK ANALİZLER.....	25
3.1. Spor Biyomekaniği.....	25
3.2. Spor Biyomekaniğinin Hedefleri.....	26
3.3. Ticari Hareket Analiz Yazılımları.....	26
3.4. Sporcu Hareket Analizi Konusundaki Araştırmalar.....	27
3.5. Fotogrametrik Yöntemlerin Kullanıldığı Hareket Analizi Çalışmaları.....	29
4. VIDEO GÖRÜNTÜLERDEN OTOMATİK OBJE YAKALAMA.....	32
4.1. OpenCV Bilgisayarlı Görme Kütüphanesi.....	32
4.2. Dairesel Hough Dönüşümü.....	33
5. SİSTEM TASARIMI VE ÖN HAZIRLIKLAR.....	37
5.1. Donanım Gereksinimleri.....	37
5.2. Donanımın Faydalı Kullanım Alanının Belirlenmesi.....	40
5.3. Yazılım Gereksinimleri.....	42
5.4. Sistem Mimarisinin ve İş Akışının Tasarlanması.....	45
6. UYGULAMA.....	48
6.1. Yazılımın Kullanıcı Arayüzünün Tasarımı.....	48
6.2. FHAY Kalibrasyon Modülünün Tasarımı.....	51
6.3. Atış Kartlarını Değerlendirme Modülünün Tasarımı.....	53
6.3.1. Konvolüsyon operatörü.....	54
6.3.2. Görüntü iyileştirme (median filtreleme) aşaması.....	54
6.3.3. Görüntülerden kenar belirleme (canny algoritması).....	55
6.3.4. Görüntüdeki dairesele şekillerin belirlenmesi.....	56
6.3.5. Hedef kartlarından puanların belirlenmesi.....	57
6.4. Uygulama için Branş ve Sporcu Seçimi.....	58
6.5. Seçilen Sporcuların Atış Esnasında Hareketlerinin Belirlenmesi.....	59
7. BULGULAR.....	62

7.1. Kalibrasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	62
7.2. Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	67
7.3. Uygulama Sonuçlarının Grafik İncelemesi.....	68
7.3.1. Psiform bone (Bilek alt) noktası hareketinin analizi.....	69
7.3.2. Capitulum (Dirsek) noktası hareketinin analizi	73
7.3.3. Tecrübeli erkek sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi.....	77
7.3.4. Tecrübesiz erkek sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi	79
7.3.5. Tecrübeli kadın sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi.....	82
7.3.6. Tecrübesiz kadın sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi	84
7.4. Atış Kartlarının Değerlendirilmesi	86
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	90
KAYNAKLAR	94
EKLER.....	101
EK 1 k1, k2 İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI.....	101
EK 2 k1, k2, k3 İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI.....	103
EK 3 k1, k2, p1, p2 İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI	105
EK 4 k1, k2, k3, p1, p2 İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI.....	107
EK 5 k1, k2, k3, k4, k5, k6, p1, p2 İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

$a_{11}, a_{21}, \dots, a_{33}$	Açısal dönüklük elemanları
c	Kamera sabiti
c_x, c_y	Asal nokta koordinatları
f_x, f_y	Odak uzaklığı
G	Görüntü matrisi
g_{ij}	Sayısal görüntü elemanları
k_1, k_2, k_3, \dots	Radyal distorsiyon katsayıları
m	Ölçek faktörü
P	Obje noktası
P'	Görüntü noktası
p_1, p_2	Teğetsel distorsiyon katsayıları
s_1, s_2	Mercek bozulma katsayıları
$\omega, \varphi, \kappa : R$	Dönme matrisinin üç dönme açısı
x, y	Görüntü koordinatları
x_0, y_0	Asal noktanın görüntü koordinatları
$\Delta x, \Delta y$	Lens distorsiyonları
X_0, Y_0, Z_0	İzdüşüm merkezinin görüntü koordinatları

KISALTMALAR

2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
BSD	Barkley Software Distribution
CV	Computer Vison
°C	Celsius Degree
DLT	Direkt Lineer Transformasyon
FHAY	Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı
Fps	Frames Per Second
GUI	Graphic User Interface
Hz	Hertz
G/Ç	Giriş/Çıkış (Input/Output)
IR	Infrared
ISPRS	International Society for Photogrametry and Remote Sensing
ISSF	International Shooting Sport Federation
LED	Light Emitting Diode
MLL	Machine Learning Library
Nm	Nanometre
SDK	Software Developer Kit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Görüntü ve arazi koordinatları arasındaki ilişki.....	6
Şekil 2.2. Koplanarite koşulunda vektörlerin gösterimi	8
Şekil 2.3. Dijital görüntü matrisi.....	12
Şekil 2.4. Piksel (x' , y') ve görüntü koordinat (x , y) sistemleri	13
Şekil 2.5. Çapsal (Radyal) distorsiyon.....	14
Şekil 2.6. Teğetsel distorsiyon	14
Şekil 2.7. Radyal distorsiyon etkisi.....	14
Şekil 3.1. Cirit atıcısı atış hareket analizi (Bulgan, 2005)	29
Şekil 3.2. Buz hokeyinde slap-shot hareketi analizi (Göktepe vd., 2009)	30
Şekil 3.3. Barfikste ters ve düz devir hareketi analizi (Özgören, 2014)	30
Şekil 3.4. Futbolda penaltı atışı analizi (Göktepe vd., 2009).....	31
Şekil 4.1. OpenCV bileşenleri.....	32
Şekil 4.2. Dairesel Hough dönüşümü.....	35
Şekil 4.3. Parametre uzayında oluşan koni görünümü.....	36
Şekil 5.1. V120 Trio kameranın genel görünümü.....	37
Şekil 5.2. Yansıtıcı işaretçi örnekleri	38
Şekil 5.3. Uygulamada kullanılan 14 mm ve 9 mm yansıtıcı işaretçiler	38
Şekil 5.4. Yansıtıcı işaretçilerin yakalanması	39
Şekil 5.5. Optitrack OptiHub cihazının görünümü	40
Şekil 5.6. Faydalı çalışma alanının üstten görünüşü.....	41
Şekil 5.7. Faydalı çalışma alanının yandan görünüşü.....	41
Şekil 5.8. Optitrack V120 kamera bağlantısı kod örneği.....	42
Şekil 5.9. Optitrack V120 kamera stereo görüntüsü	43
Şekil 5.10. Optitrack OptiHub cihazı kamera bağlantısı kod örneği	43

Şekil 5.11. Piksel koordinatlarının eşzamanlı olarak alan kullanılan kod örneği	44
Şekil 5.12. Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı (FHAY) iş akışı.....	46
Şekil 6.1. Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı (FHAY) kullanıcı arayüzü	49
Şekil 6.2. Örnek olarak oluşturulan işaretçilerin yakalanması.....	49
Şekil 6.3. FHAY 3B gösterim arayüzü	50
Şekil 6.4. FHAY grafik analiz ekranı.....	51
Şekil 6.5. FHAY kalibrasyon levhası.....	51
Şekil 6.6. FHAY kalibrasyon levhasındaki köşelerin otomatik yakalanması.....	52
Şekil 6.7. FHAY atış kartı değerlendirme modülü iş akışı	53
Şekil 6.8. Hedef çizgileri ve vuruş şekillerinin belirlenmesi	57
Şekil 6.9. Sporcu üzerine işaretçilerin yerleştirilmesi.....	60
Şekil 6.10. Gerçekleştirilen çalışmadan örnek görüntüler	60
Şekil 6.11. Ölçüm anında kullanılan koordinat sistemi ve eksenler	61
Şekil 7.1. Erkek sporcuların psiform bone noktası X-ekseni değişimleri.....	69
Şekil 7.2. Erkek sporcuların psiform bone noktası Y-ekseni değişimleri.....	70
Şekil 7.3. Erkek sporcuların psiform bone noktası Z-ekseni değişimleri	70
Şekil 7.4. Kadın sporcuların psiform bone noktası X-ekseni değişimleri.....	71
Şekil 7.5. Kadın sporcuların psiform bone noktası Y-ekseni değişimleri.....	72
Şekil 7.6. Kadın sporcuların psiform bone noktası Z-ekseni değişimleri	72
Şekil 7.7. Erkek sporcuların capitulum noktası X-ekseni değişimleri	73
Şekil 7.8. Erkek sporcuların capitulum noktası Y-ekseni değişimleri	74
Şekil 7.9. Erkek sporcuların capitulum noktası Z-ekseni değişimleri	74
Şekil 7.10. Kadın sporcuların capitulum noktası X-ekseni değişimleri.....	75
Şekil 7.11. Kadın sporcuların capitulum noktası Y-ekseni değişimleri.....	76
Şekil 7.12. Kadın sporcuların capitulum noktası Z-ekseni değişimleri	76

Şekil 7.13. ES-1'in en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri	77
Şekil 7.14. ES-1'in en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri	77
Şekil 7.15. ES-1'in en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri.....	78
Şekil 7.16. ES-1'in en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri.....	78
Şekil 7.17. ES-1'in en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri.....	79
Şekil 7.18. ES-1'in en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri	79
Şekil 7.19. ES-2'nin en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri	80
Şekil 7.20. ES-2'nin en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri	80
Şekil 7.21 ES-2'nin en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri.....	80
Şekil 7.22. ES-2'nin en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri.....	81
Şekil 7.23. ES-2'nin en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri.....	81
Şekil 7.24. ES-2'nin en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri	81
Şekil 7.25. KS-1'in en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri.....	82
Şekil 7.26. KS-1'in en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri.....	82
Şekil 7.27. KS-1'in en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri	82
Şekil 7.28. KS-1'in en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri	83
Şekil 7.29. KS-1'in en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri	83
Şekil 7.30. KS-1'in en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri.....	83
Şekil 7.31. KS-2'nin en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri.....	84
Şekil 7.32. KS-2'nin en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri.....	84
Şekil 7.33. KS-2'nin en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri	85
Şekil 7.34. KS-2'nin en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri	85
Şekil 7.35. KS-2'nin en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri	85
Şekil 7.36. KS-2'nin en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri.....	86
Şekil 7.37. Standart ISSF 10 metre atış kartı	86

Şekil 7.38. Hedef puanlama uygulaması arayüzü 87

Şekil 7.39. Tüm hedef kartları ve sonuçları 88



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Önerilen çözüm yöntemleri (Karslı ve Ayhan 2005; Linder, 2009).....	21
Çizelge 5.1. V120 Trio kameranın teknik özellikleri.....	37
Çizelge 5.2. Farklı objelerin yayma değerleri	39
Çizelge 5.3. Gerçek zamanlı olarak elde edilen piksel koordinatları.....	45
Çizelge 6.1. Kalibrasyon sonucunda elde edilecek değerler.....	52
Çizelge 6.2. Çalışmaya katılan sporcular.....	58
Çizelge 6.3. Atış kayıtlarından örnek koordinatlar ve nokta açıklamaları.....	61
Çizelge 7.1. Çerçeve boyutu ve bir pikselin fiziksel boyutu	62
Çizelge 7.2. Kalibrasyon için ölçülen noktaların piksel ve görüntü koordinatları.....	63
Çizelge 7.3. Farklı parametrelerin elde edildiği kalibrasyon sonuçları	64
Çizelge 7.4. T-testi eşleştirilmiş örnek istatistikleri.....	65
Çizelge 7.5. Bağımlı örnekler için T-testi sonuçları	67
Çizelge 7.6. Atış süreleri ve puanları	68
Çizelge 7.7. Atış süreleri ve ölçülen nokta sayıları.....	68
Çizelge 7.8. Atış puanlarının karşılaştırılması	89

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Yaşam boyunca kazanılan yürüme, koşma, zıplama, atlama ve bunun gibi birçok temel beceri çok küçük yaşlardan itibaren edinilir. Bu beceriler bireylerin fizyolojik yapıları ile paralellik gösterse de sağlıklı bireylerin tamamında bu hareketlerin öğrenilmesi ve geliştirilmesi yaşam boyu süren bir süreç olarak kabul edilebilir. Bu hareketler her ne kadar günlük yaşamın bir parçası olsa da spor branşlarının birçoğunda kullanılır ve olabildiğince sade şekilde öğrenilip tekrar edilerek spor dalına özgü bir şekilde gelişirler. Gündelik yaşamda olduğu gibi sportif etkinliklerde de yanlış yönde gelişerek refleksişen bir hareketin düzeltilmesi çok güçtür. Spor alanında başarılı olmak ve profesyonelleşebilmek için doğru hareketin doğru zamanda yapılması gerekmektedir.

Spor etkinliğine göre vücudun belirli hareket sistemlerinin (kemik, eklem ve kas) kullanıldığı bilinmektedir. Hareket ve becerilerin öğrenilmesi, antrenman ve öğretim süreci içinde göz önünde bulundurulması gereken birçok boyutu içerir. İnsanoğlunun yaptığı hareketlerin büyük çoğunluğu bilinçli olarak öğrenildikten sonra bu bilgilerin beyinde otomatikleştiği bilinen bir gerçektir. Bununla birlikte bir sporcu grubu içerisinde bütün sporcular aynı hareketi gerçekleştirirken sadece biri başarılı sayılmakta ve başarılı sporcunun yapmış olduğu hareketler diğer sporcuların hareketlerine göre önem taşımaktadır.

Sporcuların yanlış yönde evrilmiş hareketlerinin düzeltilmesi yaralanma ve sakatlıkların da önüne geçilmesini sağlayacaktır. Eğer sporcunun hangi hareketinin yanlış olduğu belirlenebilirse, bu yanlışlığın giderilmesi yönünde bir antrenman planlaması yapılabilen ve sporcu gelişimine katkı sağlanabilmektedir.

Spor bilimi literatüründe, sporcuların yaptıkları farklı hareketleri ortaya koymak için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde; eklem ve kasların biyomekanik (Smith, 1973; Laubach, 1976; Buff vd., 1988; Bell vd., 1990; Markolf vd., 1995) ve anatomik (Hida, 1994; Bendjaballah vd., 1997) analizlerinin gerçekleştirildiği görülmektedir.

Dijital fotogrametrik yöntemlerle görüntü analizlerinin 3B olarak gerçekleştirilmesi, vücut hareketinin değerlendirilmesine yeni bir boyut kazandırmıştır

(Ambrosio vd., 2001; Awan vd., 2002; Pers vd., 2002; Cerveri vd., 2003; Krosshaug ve Bahr, 2005; Tsuruoka vd., 2005; Ceseracciu vd., 2014; Monnet vd., 2014).

Farklı spor dallarında sporcu hareketlerinin tamamının veya belirli bir bölümünün kayıt altına alınarak fotogrametrik yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar günümüzde sıklıkla görülmektedir. Bu çalışmalarda fotogrametrinin kullanılmasının en önemli sebebi “ölçmelerin cisimle temas kurmadan fotografik izdüşüm üzerinden yapılmasıdır” (Kraus, 2007). Böylelikle hareketlerin çok kısa bir sürede gerçekleştiği spor dallarında bile hareketi oluşturan unsurlar (sporcu, ekipmanlar, spor alanı vb.) ile fiziksel temas kurmadan hareketlerinin yakalanması ve modellenmesi gerçekleştirilebilmektedir.

Antrenman teknikleri ve sporcu gelişimi üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, sporcuların karşılaşılabilecekleri birçok patolojik yatkınlık (predispoze) faktörlerin teşhis ve/veya tedavi edilmesinde fotogrametrik yöntemlerin geçerliliği farklı zamanlarda gerçekleştirilen birçok çalışma ile doğrulanmaktadır. (Ramsey ve Wretenberg, 1999; Kaptein vd., 2004; Wong vd., 2005; Siegler vd., 2014).

Kinematik değişkenlerin gözlenebilmesi, hareket takibine dayanır. Günümüzde farklı görüntüleme ve ölçüm araçları ile gerçekleştirilen hareket izleme/analiz süreci sonunda, cisimlerin hareketleri ile ilgili nitel bilgilere (hız, mesafe, yükseklik vb.) ulaşılmış olur. Aynı zamanda cisimlerin ne kadar uzağa, ne kadar hızla gittiği bilgisi de elde edilmektedir. Günümüzde bu bilgilerin elde edilmesi için görüntü yakalama sistemleri sıklıkla kullanılan yöntemler arasındadır.

Günümüzde birbirinden farklı birçok alanda (tasarım, modelleme, sinema/görsel sanatlar vb.) kullanılan hareket analizinin en çok yararlandığı alanlardan birisi sporcu performansın artırılması ve sakatlıkların önlenmesidir. Profesyonel sporcular tarafından uygulanan birçok hareket anatomik ve fizyolojik sınırları zorlamaktadır. Bunun yanında, sporun her dalında sporcu limitlerinin zorlandığı hareketler en doğru şekilde uygulansa bile çoğu zaman sakatlanma riskleri varlığını korumaktadır. İşte tam da bu noktada hareket analizi, spor ve sağlık alanları arasında bir köprü vazifesini üstlenmiştir. Hareket analizi, hangi seviyede spor yaparsa yapsın sporcu hakkında birçok bilgiyi ve gerçekleştirdiği hareketin yorumlanması noktasında araştırmacılara çok çeşitli bilgiler sunmaktadır. Hareket ile ilgili elde edilen bilgilerle hareketin olması gerektiği şekli arasındaki farklar, gerçekleştirilen hareketin doğruya ne kadar

yaklaştığı hakkında araştırmacılara bilgi verir. Bu yakınlık değeri ya da daha sade şekliyle hata; teknik, kuvvet eksikliği, denge eksikliği, yanlış ekipman gibi birçok doğrudan veya dolaylı nedenden ötürü oluşabilir. Hangi neden olursa olsun, ortaya çıkan bu durumun istenmeyen sonuç vermesi ve sporcu başarısına etki etmesi kaçınılmazdır. Atletik performans açısından bakıldığında, hata miktarı fazla olan sporcu için iki olasılık söz konusudur. Bunlardan ilki, sporcunun istenen performans düzeyine ulaşamayacak olmasıdır. İkincisi ise; eğer yapılan hata anatomik açıdan bir uygunsuzluk nedeniyle ortaya çıkıyorsa, büyük ihtimalle sporcunun kısa ya da uzun vadede bir sakatlık veya travma yaşamasının muhtemel olmasıdır.

Bu tez çalışması ile sporcu hareketlerinin analizine olanak sağlayan, fotogrametrik ölçme ve değerlendirme tekniğini kullanan bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılım; akademisyenlerin ve kas-iskelet sistemlerini analiz etmek isteyen biyomekanikçilerin, mühendislerin, spor hekimlerinin, fizyoterapistlerin ve spor bilimcilerin analizlerinde kullanılabilecektir. Aynı zamanda geliştirilen bu yazılım sporcuların tekniklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi kapsamında antrenörler tarafından da kullanılabilecektir.

Geliştirilen uygulamanın gerçek bir sporcu grubu üzerinde test edilebilmesi için Gazi Üniversitesi Spor Kulübü Atıcılık Takımından 2 erkek 2 kadın havalı tabanca atıcısı belirlenmiştir. Sporcu grubu oluşturulurken tecrübeli/başarılı ve tecrübesiz olacak şekilde seçim yapılmıştır. Sporcuların 20 metre mesafeden havalı tabanca ile atış kartlarına 5 atış yapması planlanmış ve atışlarının tamamında vücutlarına yerleştirilen işaretçilerin 3B koordinatları gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Bu uygulama ile yüksek puanlı olarak gerçekleştirilen atış esnasındaki vücut pozisyonlarının düşük puanlı olarak gerçekleştirilen atış esnasındaki vücut pozisyonlarına göre farklılıklarının ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Seçilen sporcularda cinsiyet ve tecrübe grupları oluşturularak bu grupların sonuç üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Sporcular atışlarına başlamadan önce özellikle değişimin inceleneceği vücut noktalarına işaretçiler yerleştirilmiştir. 9 ve 14 mm boyutlarındaki işaretçiler sporcuların atış pozisyonlarındaki doğal hallerini bozmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylelikle en rahat pozisyonda atış yapmaları ve işaretçilere bağımlı kalmadan pozisyonlarını belirlemelerine olanak sağlanmıştır.

Sporcuların atışları kayıt altına almadan önce FHAY-Hazırlık modülü ile kalibrasyon ölçüleri yapılarak her bir kamera için oluşturulan kalibrasyon dosyaları oturuma kaydedilmiştir. Ardından kamera sistemi sabitlenerek FHAY-Ölçüm modülü ile referans ölçüleri yapılarak dış yöneltme parametreleri belirlenmiş ve oturuma kaydedilmiştir. Bu işlemlerin ardından artık FHAY sistemi sporcuların kayıtlarının alınmasına hazır hale gelmiştir.

Sporcuların tamamı için Kürek Kemiği, Bilek Üst, Bilek Alt, Köprücük Kemiği, El, Omuz, Dirsek ve Bel noktalarına işaretçiler yerleştirilmiştir. Bu işaretçilerin 3B koordinatları saniyede 10 tekrar olmak üzere atış süresince kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda atış esnasında bu noktaların grafik gösterimi de gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde özellikle tecrübesiz sporcuların atışlarında sürenin artmasıyla birlikte bilek ve dirsek noktalarının aşağı yönde hareket etmeye başladığı aynı zamanda bu noktaların tetik düşürme esnasında atış yönüne göre sağa doğru hareket ettiği görülmektedir. Bu durumun sporcunun denge ve kas egzersizlerinin eksikliğinden kaynaklandığı öngörülerek bu eksikliklerinin giderilmesi yönünde antrenman planlaması yapılarak sporcu gelişimine katkı sağlanabilecektir.

Gerçekleştirilen çalışmanın özgünlüğü, yazılımda tamamen BSD (Barkley Software Distribution) lisanslı ve açık kaynak kodlu bilgisayarlı görme kütüphanelerinin kullanılmış olmasıdır. Böylelikle yazılımın kodlarında gerekli değişiklikler yapılarak kullanıcı ihtiyaçlarına göre geliştirme yapılabilecektir. Aynı zamanda yazılımın gerçek zamanlı olarak ve çok az kullanıcı müdahalesi ile çalışabilecek bir yapıda geliştirilmiş olması literatürde bir yenilik olarak görülmektedir. Antropometrik noktaların 3 boyutlu koordinatları ve noktaların grafik gösterimi gerçek zamanlı olarak ekranda gösterilebileceği için hareketin hazırlık ve gerçekleştirme zamanlarında bile bir karar verilmesi mümkün olacaktır. Yazılımın özgün olması çalışmanın ilerleyen zamanlarında şekillenecek durumlara göre kullanıcıya esneklik ve adaptasyon yeteneği sağlayacaktır.

2. FOTOGRAMETRİ

2.1. Tanım

“Fotogrametri, cisimlere temas etmeksizin onların yeniden oluşturulmasını ve bazı cisim özelliklerinin belirlenmesini sağlamaktır” (Kraus, 2007).

En genel ifade biçimiyle fotogrametri ISPRS’in (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) tanımına göre; “görüntülerin ve elektromanyetik enerjinin kayıt, ölçme ve yorumlanması sonucu fiziksel cisimler ve bunların çevresine ilişkin bilgileri oluşturan ve bu bilgilerin analizini yapan bir bilim dalıdır” (Anonymous, 2018a).

2.2. Fotogrametrinin Matematik Temeli

Matematik model kavramı, fiziksel olarak tanımlanan olayları açıklayabilen teorik bir sistem veya soyut bir kavram, başka bir deyişle gerçek bir fiziksel olayı matematik yollarla tanımlayan yöntemlerdir (Tutak ve Güder, 2014). Fotogrametri için matematik model, farklı sistemlerde bulunan fiziksel büyüklükler arasındaki ilişkilerin matematiksel yöntemlerle oluşturulmasıdır. Yani; görüntü-uzay, görüntü-model veya model-uzay koordinat sistemlerinde bulunan ve birbirlerine karşılık gelen fiziksel büyüklükler arasında ilişkilerin matematiksel tanımıdır.

Fotogrametrinin matematiksel modeli merkezi izdüşüm tekniği esas alınarak ortaya çıkarılmaktadır. Merkezi izdüşüm, uzaydaki noktaların izdüşüm merkezi adı verilen bir noktadan geçen doğrularla, bir düzlem üzerine veya başka bir uzay bölümüne izdüşürülmesidir (Gürbüz, 2006).

x, y, z koordinatlarına sahip bir P noktasının üst X, Y, Z koordinat sistemine uzaysal dönmesi koordinat eksenlerinin arasındaki açılarının kosinüs değerleri ile çarpılması ile 2.1 ve 2.2 eşitlikleri ile elde edilir (Kraus, 2007). Üç boyutlu afin dönüşümü ise 2.3 ile gösterilen eşitliklerle gerçekleştirilir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) & \cos(zX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) & \cos(zY) \\ \cos(xZ) & \cos(yZ) & \cos(zZ) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

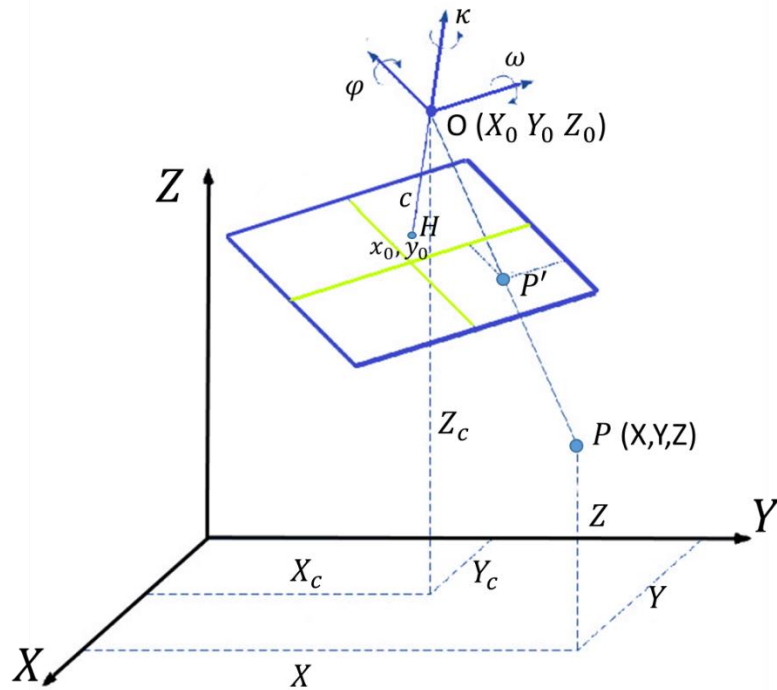
$$X = R x R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{32} & r_{31} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{32} & a_{31} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad X = a_0 + A_x \quad (2.3)$$

Burada; a_{10}, a_{20}, a_{30} üç öteleme (xyz sisteminin başlangıcının XYZ koordinatları) $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{33}$ ortogonallık şartını sağlayan ve açısal dönüklük elemanlarını barındıran 9 unsuru tanımlar. 12 adet a_{ik} parametresinin belirlenmesi için her iki koordinat sisteminde üç veya dört özdeş noktaya ihtiyaç duyulur (Kraus, 2007). Uzaysal benzerlik dönüşümü 2.4 ile verilen eşitliklerdeki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{32} & r_{31} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad X = a_0 + mR_x \quad (2.4)$$

Bu eşitlikler ortogonal olmayan A matrisine ortogonal R matrisinin ve ölçek faktörünün dâhil edilmesi ile elde edilir. a_{10}, a_{20}, a_{30} üç öteleme, m ölçek faktörü ve $\omega, \varphi, \kappa : R$ dönme matrisinin üç dönme açısıdır. Uzaysal benzerlik dönüşümünün 7 parametresini bulmak için üç özdeş noktadan yedi denklemin elde edilmesi gerekir (Kraus, 2007). Uzaysal benzerlik dönüşümünün grafik gösterimi Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Görüntü ve arazi koordinatları arasındaki ilişki

Doğrusallık denklemi 2.5 ve 2.6'da sunulan eşitliklerle ifade edilir. Bu formüllerde; x, y iki boyutlu görüntü koordinatları x, y, z üç boyutlu model koordinatları ve X, Y, Z üç boyutlu kartezyen koordinat sistemindeki koordinatlardır.

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) + r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \quad (2.5)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \quad (2.6)$$

x_0, y_0 asal nokta H'nin görüntü koordinatları, c kamera sabiti, X_0, Y_0, Z_0 izdüşüm merkezinin görüntü koordinatları, $\omega, \varphi, \kappa : R$ dönme matrisinin üç dönme açısıdır. İç yöneltme (x_0, y_0, c) ve dış yöneltme $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ elemanları merkezi izdüşürülmüş görüntüyü tanımlarlar (Kraus, 2007).

2.2.1. Doğrusallık (Kolinearite) koşulu

Fotogrametrik modelin elemanları arasındaki karşılıklı ilişkiyi belirten bu koşul Şekil 2.1'de ifade edildiği gibidir. Buna göre P obje noktasının izdüşüm merkezi ve P' görüntü noktasının distorsiyon ve atmosferik etkiler yok sayıldığında aynı doğru üzerinde bulunması gerekmektedir.

Benzer ilişki görüntülenen her cisim noktası ve bu noktanın görüntülediği her görüntü için geçerlidir. Bu koşul matematik olarak oluşturulmak istenirse, Şekil 2.1'deki P' noktasının görüntü koordinat sistemindeki konumunun vektörel ifadesi 2.7 eşitliğinde verildiği gibidir (Kraus, 2007).

$$\begin{bmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

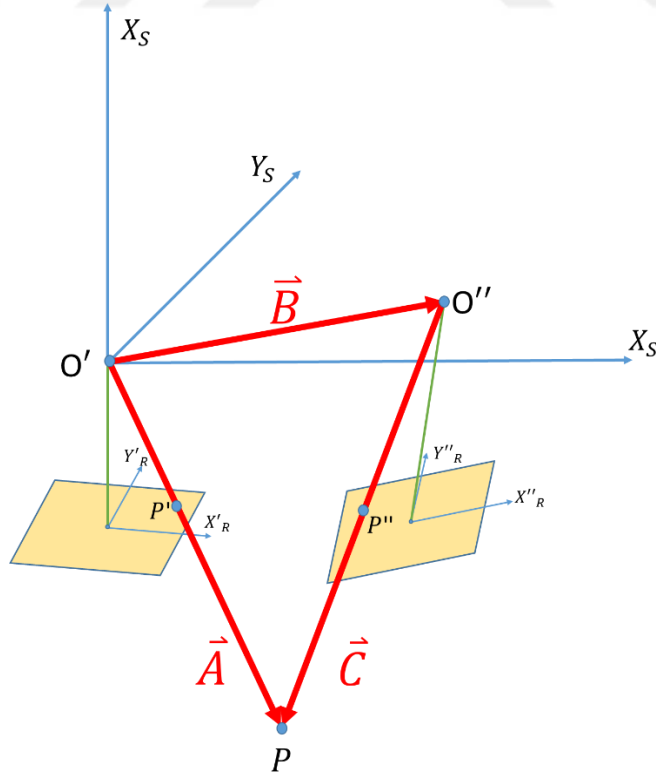
Benzer biçimde P cisim noktasının uzay koordinat sistemindeki vektörel gösterimi eşitlik 2.8 ile ifade edilmiştir. Buradaki X_0, Y_0, Z_0 izdüşüm merkezinin uzay koordinatlarını ifade etmektedir. Görüntünün dış yöneltmesi doğru yapıldığında eşitlik 2.7 ve eşitlik 2.8 ile ifade edilen vektörlerin doğrusal olması gereklidir. Vektörlerin birbirlerine göre uzaysal dönme açılarının $(\omega, \varphi, \kappa)$ fonksiyonu olan ortogonal dönme

matrisi göz önüne alındığında 2.5 ve 2.6 ile ifade edilen kolinearite eşitlikleri yazılmış olur. Bu eşitliklerde P cisim noktası, cisim noktasının görüntüsü ve O izdüşüm merkezi teorik olarak aynı doğru üzerinde olacaktır. Ancak; mercek distorsiyonları ve atmosferik etkiler fiziksel olarak bu durumun oluşmasını etkiler. Eğer bu düzenli hataların etkisi biliniyorsa, verilere yani görüntü koordinatlarına gerekli düzeltmeler uygulanabilir ve doğrusallık koşulu sağlanabilir (Kraus, 2007).

2.2.2. Eşdüzlemsellik (Koplanarite) koşulu

Fotogrametrinin stereoskopik temelinde görüntü çiftlerinden hareket edilerek çözüm yapılmaktadır. Bunun için aynı cisim noktası P'yi gören iki görüntü arasındaki \vec{B} bazı ve bu görüntülerin çekim noktasından p görüntü noktasına giden doğrular (vektörler) \vec{A} ve \vec{C} olsun. Bir görüntü çiftinde herhangi bir cisim noktasının iki görüntüdeki vektörü \vec{A} ve \vec{C} ile her iki görüntünün \vec{B} baz vektörünün aynı düzlemde olması gereklidir. Bu koşul her üç vektörden oluşan şeklin hacminin (V) sıfır olması durumu 2.9 eşitliğindeki gibi ifade edilmektedir (Kraus, 2007; Gürbüz, 2006).

$$V = \vec{B} \cdot (\vec{A} \times \vec{C}) \quad (2.9)$$



Şekil 2.2. Koplanarite koşulunda vektörlerin gösterimi

Bu üç vektörün bileşenleri $\vec{A} = (X', Y', Z')$, $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$ ve $\vec{C} = (X'', Y'', Z'')$ olduğuna ve oluşturdukları şeklin hacmi sıfır olma koşuluna göre 2.10 eşitliği yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} B_x, B_y, B_z \\ X', Y', Z' \\ X'', Y'', Z'' \end{bmatrix} = 0 \quad (2.10)$$

Bu durumda bilinmeyenler iki görüntü üzerindeki X'_R, Y'_R ve X''_R, Y''_R koordinatlarıdır. Eğer model koordinat sisteminin eksenleri birinci görüntünün eksenlerine paralel seçilecek olursa 2.11'de ifade edilen eşitlik yazılmaktadır (Kraus, 2007; Gürbüz, 2006).

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & B_z \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_R \\ Y'_R \\ Z'_R \end{bmatrix} = \bar{D} \begin{bmatrix} X''_R \\ Y''_R \\ Z''_R \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

\bar{D} dönüşüm matrisi ortogonal olduğundan elemanları arasında 6 ortogonalite koşulu vardır. Bu nedenle bilinmeyen sayısı 3'e inmekte olup bunlar da koordinat eksenleri etrafındaki ω, φ, κ dönüklükleridir. Koplanairete koşulunda $X' = X'_R, Y' = Y'_R$ ve $Z' = Z'_R$ yazıldığında elde edilen lineer olmayan denklem B_x, B_y, B_z ve ω, φ, κ değerlerine göre kısmi türevleri alınarak Taylor serisine açıldığında 2.12 eşitlikleri elde edilir (Karşlı, 2004).

$$\left(\frac{\partial F}{\partial B_y}\right)_0 \partial B_y + \left(\frac{\partial F}{\partial B_z}\right)_0 \partial B_z + \left(\frac{\partial F}{\partial B_\omega}\right)_0 \partial B_\omega + \left(\frac{\partial F}{\partial B_\varphi}\right)_0 \partial B_\varphi + \left(\frac{\partial F}{\partial B_\kappa}\right)_0 \partial B_\kappa + (F)_0 = V \quad (2.12)$$

Düzeltilme denklemi olarak adlandırılan bu denklemde $(F)_0$, fonksiyonun yaklaşık değerlerinin fonksiyonda yerine konulması ile elde edilen değerdir. Beşten fazla nokta alınması durumunda en küçük kareler yöntemine göre dengeleme yapılabilir. Eşdüzlemsellik koşulunun en önemli özelliği cisim uzay koordinatlarını içermediği için çözümün doğrudan görüntü koordinatlarına dayanmasıdır (Kraus, 2007; Gürbüz, 2006).

2.2.3. Kolinearite eşitliklerinin doğrusallaştırılması

Bu bölümde verilen eşitliklerde izdüşüm denklemleri, bilinmeyenlere göre birinci dereceden Taylor serisine açılarak doğrusallaştırılmıştır. Bu denklemler katsayılar matrisinde kullanılmaktadır.

$$q = (X_A - X_L)m_{(3,1)} + (Y_A - Y_L)m_{(3,2)} - (Z_A - Z_L)m_{(3,3)} \quad (2.13)$$

$$r = (X_A - X_L)m_{(1,1)} + (Y_A - Y_L)m_{(1,2)} - (Z_A - Z_L)m_{(1,3)} \quad (2.14)$$

$$s = (X_A - X_L)m_{(2,1)} + (Y_A - Y_L)m_{(2,2)} - (Z_A - Z_L)m_{(2,3)} \quad (2.15)$$

$$X_A - X_L = \Delta X \quad Y_A - Y_L = \Delta Y \quad Z_A - Z_L = \Delta Z \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \omega} = \frac{c}{q^2} [(r(-m_{(3,3)}\Delta Y + m_{(3,2)}\Delta Z) - q(-m_{(1,3)}\Delta Y + m_{(1,2)}\Delta Z)] \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} = \frac{c}{q^2} [(r(\cos\varphi \Delta X + \sin\omega \sin\varphi \Delta Y - \cos\omega \sin\varphi \Delta Z) - q(-\sin\varphi \cos\kappa \Delta X + \sin\omega \cos\varphi \cos\kappa \Delta Y - \cos\omega \cos\varphi \cos\kappa \Delta Z)] \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial \kappa} = -\frac{c}{q^2} (r_{(2,1)} \Delta X + r_{(2,2)} \Delta Y + r_{(2,3)} \Delta Z) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial X_L} = -\frac{c}{q^2} (r m_{(3,1)} - q m_{(1,1)}) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial Y_L} = -\frac{c}{q} (r m_{(3,2)} - q m_{(1,2)}) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial Z_L} = -\frac{c}{q^2} (r m_{(3,3)} - q m_{(1,3)}) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial X_A} = \frac{c}{q^2} (r m_{(3,1)} - q m_{(1,1)}) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial Y_A} = \frac{c}{q^2} (r m_{(3,2)} - q m_{(1,2)}) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial Z_A} = \frac{c}{q^2} (r m_{(3,3)} - q m_{(1,3)}) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial \omega} = \frac{c}{q^2} [(s (-m_{(3,3)} \Delta Y + m_{(3,2)} \Delta Z) - q (-m_{(2,3)} \Delta Y + m_{(2,2)} \Delta Z))] \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Fy}{\partial \varphi} = \frac{c}{q^2} [(s (\cos\varphi \Delta X + \sin\omega \sin\varphi \Delta Y - \cos\omega \sin\varphi \Delta Z) \\ - q (-\sin\varphi \cos\kappa \Delta X + \sin\omega \cos\varphi \cos\kappa \Delta Y - \cos\omega \cos\varphi \cos\kappa \Delta Z) \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial \kappa} = -\frac{c}{q} (m_{(1,1)} \Delta X + m_{(1,2)} \Delta Y + m_{(1,3)} \Delta Z) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial X_L} = -\frac{c}{q^2} (s m_{(3,1)} - q m_{(2,1)}) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial Y_L} = -\frac{c}{q^2} (s m_{(3,2)} - q m_{(2,2)}) \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial Z_L} = -\frac{c}{q^2} (r m_{(3,3)} - q m_{(2,3)}) \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial X_A} = \frac{c}{q^2} (s m_{(3,1)} - q m_{(2,1)}) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial Y_A} = \frac{c}{q^2} (s m_{(3,2)} - q m_{(2,2)}) \quad (2.33)$$

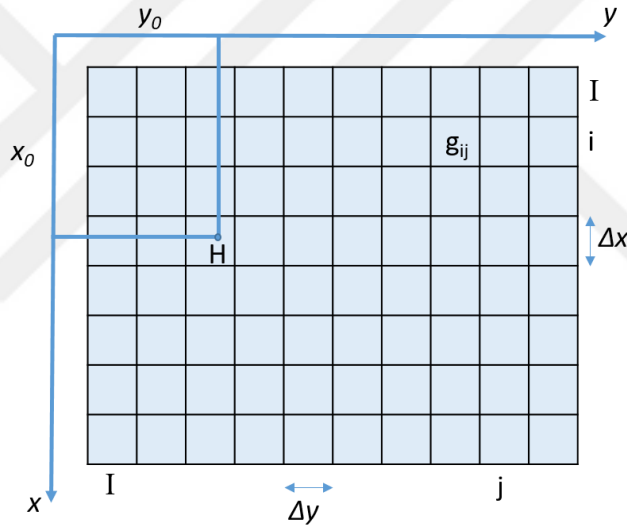
$$\frac{\partial Fy}{\partial Z_A} = \frac{c}{q^2} (s m_{(3,3)} - q m_{(2,3)}) \quad (2.34)$$

Bu bölümde verilen 2.13 ile 2.34 arasındaki eşitlikler kullanılarak her bir görüntüye ait dış yönelme parametreleri ve kontrol noktalarının koordinatları ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözüme yeteri kadar kontrol noktası dâhil edilirse iç yönelme parametreleri de yeniden hesaplanarak iyileştirilmesi sağlanabilmektedir.

2.3. Dijital Fotogrametri

Dijital Fotogrametri, dijital görüntülerin kullanıldığı fotogrametri alanıdır. Dijital fotogrametride de Bölüm 2.2’de açıklanan fotogrametrinin matematik modeli aynen kullanılmaktadır. Ancak sayısal görüntülerle işlem yaparken birtakım ek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Sayısal görüntü g_{ij} elemanları ile (iki boyutlu) bir G matrisinden oluşur. Şekil 2.3’te satır indeksi i birer aralıklarla I den I ya gider, yani $i = I(I) I$. sütun için ise karşılık gelen indeksleme ise $j = I(I) J$ ’dir. Bir görüntü elemanın büyüklüğü $\Delta x, \Delta y$ dır. Bir sayısal görüntüde piksel konumu ile x, y koordinat sistemi arasındaki bağıntı gereklidir. Şekil 2.3’te bir görüntü koordinat sistemi yerleştirilmiştir (Kraus, 2007; Linder, 2009).



Şekil 2.3. Dijital görüntü matrisi

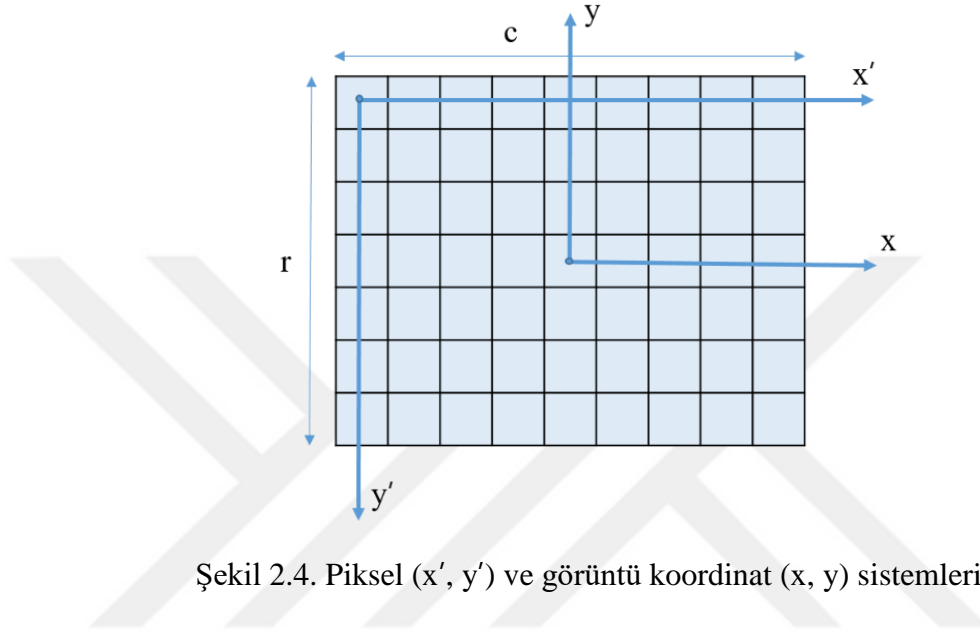
Günümüzde sayısal görüntü sağlayan kameraların gelişmesi ve yaygınlaşması, yüksek çözünürlük ve düşük distorsiyonlu görüntülere erişimin önünü açmış ve kullanılabilirliğini artırmıştır. Bu noktada sayısal fotogrametri, raster görüntülerin yüksek çözünürlükte elde edilebilmesi sayesinde, artan bir hızda gelişim göstermektedir. Bunların yanı sıra bilgisayar sistemlerindeki bellek ve işlemci performanslarının artması ve kolay ulaşılabilir olması sayısal fotogrametriye olan ilgiyi gün geçtikçe artırmaktadır (Gürbüz, 2006).

Piksellerle ifade edilen piksel koordinat sisteminden 2.35 eşitlikleri ile görüntü koordinatlarına dönüşüm gerçekleştirilir (Linder, 2009).

$$x = \left(x' - \frac{c}{2} \right) d_x \quad (2.35.a)$$

$$y = \left(\frac{r}{2} - y' \right) d_y \quad (2.35.b)$$

Burada d_x ve d_y bir pikselin fiziksel boyutlarını, c ve r ise çerçeve boyutlarını ifade etmektedir. Şekil 2.4'te piksel ve görüntü koordinat sistemleri arasındaki ilişki görülmektedir.

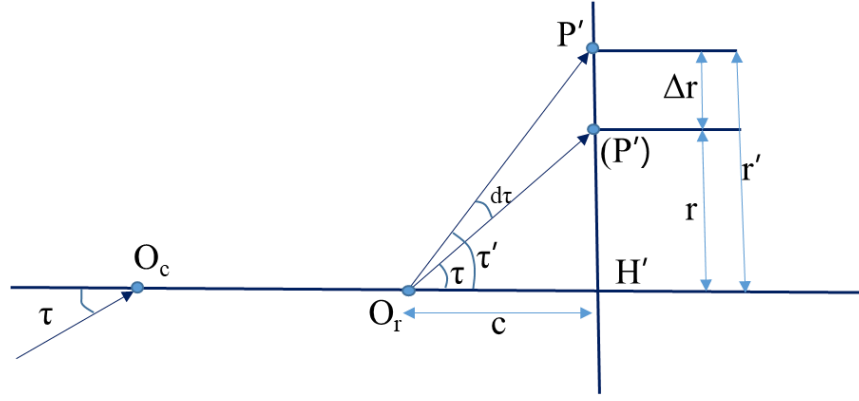


Şekil 2.4. Piksel (x' , y') ve görüntü koordinat (x , y) sistemleri

2.4. Görüntü Distorsiyonları

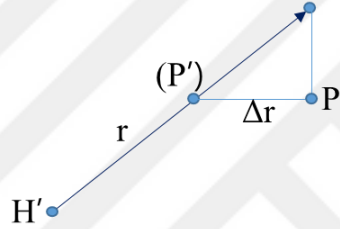
Kameralarda kullanılan mercek sistemleri tek bir mercek yerine çok sayıda merceğin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Mercek sistemindeki hatalar nedeni ile obje üzerindeki bir P noktasının görüntü üzerindeki izdüşümü olması gereken yerden farklı bir yerde oluşmaktadır. Bu P noktasından gelen ışın, kamera eksenine τ açısı yaparken objektif sisteminin sahip olduğu kusurlardan dolayı görüntü uzayında τ' açısı yaparak çıkacaktır. Sonuç olarak P noktasının görüntüsü (P') noktası yerine olması gerekenden Δr kadar farklı bir konumda P' noktasında oluşacaktır. Bu farka kamera distorsiyon hatası denir.

Kamera kalibrasyonu ile distorsiyonun görüntü üzerinde yapılan ölçülere etkisi belirlenir. Kamera kalibrasyonu ile belirlenen distorsiyon değerleri kullanılarak görüntü koordinatları düzeltilir. (P') ve P noktasını birleştiren Δr doğrusu vektörel hatadır (Şekil 2.5) (Luhmann vd., 2014).



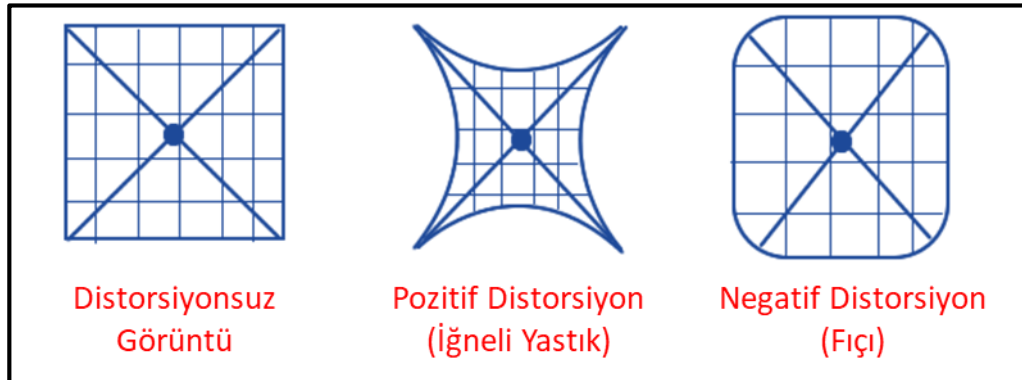
Şekil 2.5. Çapsal (Radyal) distorsiyon

Oluşan bu hata çap ve teğet yönünde iki bileşene ayrılabilir. Çap yönünde yani r yönünde olan bileşenine çapsal (radyal) distorsiyon, diğerine de teğetsel distorsiyon denir (Şekil 2.6) (Luhmann vd., 2014).



Şekil 2.6. Teğetsel distorsiyon

Çapsal (radyal) distorsiyon, mercekten kaynaklı açısal büyütme sonucu merceğe farklı açılarla gelen ışınların, izdüşüm düzlemi önünde veya arkasında odaklanmasıyla meydana gelen görüntü kaymasıdır. Dijital görüntülerin kullanıldığı uygulamalarda radyal distorsiyonun sonuçlara etkisi göz ardı edilemeyecek büyüklükte olduğu için yüksek doğrulukla modellenmesi gerekir. Radyal distorsiyonun görüntü üzerindeki etkisi Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Radyal distorsiyon etkisi

Bir nesnenin görüntüsü asal noktadan çapsal olarak uzak ya da yakın olacak şekilde yer değiştirmişse, görüntü radyal olarak distorsiyona uğramıştır. Asal noktadan uzak veya yakın radyal olarak distorsiyona uğramış dörtgen şekil pozitif (iğneli yastık) veya negatif (fıçı) distorsiyon olarak adlandırılır (Sanz-Ablanedo vd., 2012).

Radyal bozulma eşitliğinde k_1, k_2, k_3, \dots ile ifade edilen katsayılar radyal distorsiyon katsayıları olarak isimlendirilmektedir. Bu katsayıların etkileri 2.36 eşitliğinde gösterildiği gibi asal noktaya olan mesafenin kuvvetleri ile orantılıdır. Burada r çapsal uzaklığı, K ise çapsal distorsiyon katsayılarını ifade etmektedir.

$$\delta r = k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \quad (2.36)$$

Eşitlikteki mesafenin başlangıç noktası asal noktadır. Asal noktadan görüntü çevresine doğru mesafe ile doğru orantılı olarak distorsiyon etkisi devam eder. Asal noktaya olan uzaklık 2.37 eşitliği ile hesaplanır. Buradaki r çapsal uzaklığı, x, y görüntü koordinatlarını ve x_p, y_p ise asal nokta koordinatlarını ifade eder (Luhmann vd., 2014).

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \quad (2.37)$$

Kameralardaki mercekler aynı doğru üzerinde yerleştirilmiş şekilde üretilmesi gerekirken bu durum uygulamada gerçekleşmemektedir. Merceklerin olması gereken doğrultudan sapmaları nedeniyle teğetsel (tanjant) distorsiyon olarak tanımlanan geometrik yer değiştirme meydana gelmektedir. Teğetsel distorsiyon 2.38, 2.39 ve 2.40 eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir. Burada Δx_s ve Δy_s görüntü noktasının x ve y bileşenlerine ait teğetsel distorsiyon elemanlarını, p_1 ve p_2 teğetsel distorsiyon katsayılarını, r radyal uzunluğu, q ise $\left(1 - \frac{c}{S}\right)$ olarak ifade edilir. c kamera sabiti ve S ise objenin merceğe olan uzaklığıdır (Sanz-Ablanedo vd., 2012).

$$\Delta x_s = q \left[p_1 \left(r^2 + 2(x_d - x_p)^2 \right) + 2p_2 (x_d - x_p)(y_d - y_p) \right] \quad (2.38)$$

$$\Delta y_s = q \left[p_2 \left(r^2 + 2(y_d - y_p)^2 \right) + 2p_1 (x_d - x_p)(y_d - y_p) \right] \quad (2.39)$$

$$r = \sqrt{(x_d - x_p)^2 + (y_d - y_p)^2} \quad \text{ve} \quad q = \left(1 + p_3 r^2\right) \quad (2.40)$$

Düzeltilmiş görüntü koordinatları yani, radyal bozulma, teğetsel bozulma ve mercek bozulmalarının etkilerinin giderildiği görüntü koordinatları 2.41 ve 2.42

eşitlikleri ile bulunur. Eşitliklerdeki $r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ ifadesi ile bulunmaktadır (Sanz-Ablanedo vd., 2012).

$$x'' = x' \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6} + 2p_1x'y' + p_2(r^2 + 2x'^2) + s_1r^2 + s_2r^4 \quad (2.41)$$

$$y'' = y' \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6} + p_1(r^2 + 2y'^2) + 2p_2x'y' + s_1r^2 + s_2r^4 \quad (2.42)$$

2.5. Kamera Kalibrasyonu

Günümüzde sıklıkla kullanılan dijital kameraların büyük çoğunluğunda, kısmen veya tamamen iç yöneltme elemanlarının bilinmemesi ve tamamında görüntü üzerinde çerçeve işaretlerinin olmaması nedeniyle fotogrametrik açıdan metrik olmayan kameralar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu kameralarda; mercek distorsiyonu, sensör deformasyonu ve elektronik transfer hataları gibi sonuç görüntünün kalitesini etkileyen sistematik bozulmalar ile sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu kameralarla çalışma yapılacaksa bahse konu hataların belirlenmesi ve düzeltilmesi gereklidir. Dijital kamera ile ölçü doğruluğunun tespiti için distorsiyon ve diğer parametrelerin modellenerek hesaplanması ve uygulamada dikkate alınması gerekir. Bu dezavantajlarına rağmen görüntülerin doğrudan bilgisayar ortamına aktarılabilmesi, veri depolama, transfer ve taşıma kolaylığı dijital kameraların yaygın olarak tercih edilme sebebi olarak görülmektedir (Karşlı ve Ayhan 2005; Yıldız vd., 2005).

Kamera kalibrasyonu, kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin tespit edilmesi olarak ifade edilir. Bu parametreler bilindiği üzere odak uzaklığı (c), görüntü koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ile distorsiyon parametreleridir. Farklı bir bakış açısı ile kamera kalibrasyonu, fotogrametrik nokta belirleme işlemlerinin tersi olarak da tanımlanabilir. Fotogrametrik nokta belirlemede iç yöneltme elemanları bilinir ve cisim noktalarının koordinatları istenir. Kalibrasyonda ise cisim noktalarının koordinatları bilinir ve iç yöneltme elemanları aranır.

Kalibrasyon yöntemleri iki grup altında toplanabilir. Bunlardan birincisi yaklaşık teknikler olarak da adlandırılabilen direkt lineer dönüşümdür. Bu teknik genellikle fazla hassasiyet beklenmeyen işlerde kullanılır ve nispeten hızlı sonuç alınan bir yöntemdir. Özellikle iteratif işlemler için gerekli değerlerin hesaplanmasında da bu yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. İkinci yöntem ise nokta

tabanlı yöntemler olarak adlandırılır. Bu yöntem, aynı doğru üzerinde bulunma (collinearity) veya aynı düzlem üzerinde bulunmayı (coplanarity) kullanmaktadır (Khalil, 2002).

Metrik olmayan amatör kameralar kullanıldığında, iç yöneltme elemanları olarak adlandırılan, kameranın odak uzaklığı, asal noktanın koordinatları ve mercek distorsiyonları bilinmemektedir. Görüntüler yardımıyla üç boyutlu model oluşturabilmek için kameranın dış yöneltme elemanları olarak bilinen kameranın konumunun da belirlenmesi gerekmektedir. İç ve dış yöneltme elemanları ayrı ayrı belirlenebileceği gibi, aynı zamanda da (demet dengelemesi) belirlendiği çok sayıda teknik vardır (Khalil, 2002). En etkin yöntemlerden biri olan demet dengelemesi 1950'li yıllarda geliştirilmiş ve 1970'li yıllarda self-kalibrasyon olarak genişletilmiştir (Beyer, 1991). Geometrik kamera kalibrasyonunun amacı, kameranın iç yöneltme elemanlarını belirlemek ve perspektif geometriden, sistematik sapmaları modellemektir (Dörstel vd., 2003).

İç yöneltme elemanlarının belirlenmesinde görüntü çiftleri kullanılabildiği gibi tek bir görüntü kullanılarak da bu elemanlar belirlenebilir. Heuvel (1999) gerçekleştirdiği çalışmada; tek bir görüntüden iç yöneltme elemanlarının belirlenebileceğini, bunun için görüntüdeki doğruların paralellik ve diklik şartlarından yararlanılabileceğini ortaya koymuştur.

Kameralardaki hataları gidermek için geliştirilen matematiksel modeller ile kameranın odak uzaklığı, asal nokta koordinatları, kamera distorsiyon (radyal ve teğetsel) parametreleri ve kamera yöneltme parametreleri gibi kameranın iç ve dış yöneltme parametrelerinin tamamı hesaplanabilmektedir. Bu parametrelere en genel tanım ile kalibrasyon parametreleri denilmektedir (Yang, 2011). Bu kapsamda ele alındığında iç yöneltme parametreleri olarak kalibre edilmiş odak uzaklığı (c), görüntü asal noktasının koordinatları $H(x_0, y_0)$ ve distorsiyon parametreleri belirlenmektedir. Buradaki distorsiyon parametreleri radyal ve teğetsel distorsiyon değerlerini belirlemek/modellemek için kullanılan katsayıları ifade etmektedir.

Kamera iç geometrisinin odaklanılan mesafeye göre değişimini inceleyen farklı çalışmalar bulunmaktadır (Sanz-Ablanedo vd., 2012). Odak uzaklığı (c) değerindeki değişikliğin hesaplanan koordinatlara etkisi 2.45 eşitliklerinde verilen kolinearite denklemlerinde açıkça görülmektedir. Bu sebeple lensin her bir odaklanmasında

meydana gelen (c) değerindeki değişimin yüksek hassasiyetle hesaplanması çok önemlidir.

2.5.1. Direkt lineer transformasyon (Direct linear transform)

Direkt lineer transformasyon (Direct Linear Transformation – DLT) metrik olmayan kameraların kullanıldığı çalışmalara oldukça uygun bir yöntemdir. Bunun en önemli sebebi dönüşüm parametrelerinin yaklaşık değerlerinin bilinmediği durumlarda bu yöntem ile çözüm yapılıyor olmasıdır. Direkt lineer transformasyonun matematiksel modeli, kolinearite eşitliklerinden elde edilen, görüntü ve nesne koordinatları arasındaki direk lineer ilişkidir. Bu model 2.43 denklemleri ile ifade edilen kolinearite eşitliklerinden oluşur.

$$x - \delta x = \frac{(L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4)}{(L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1)} \quad (2.43.a)$$

$$y - \delta y = \frac{(L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8)}{(L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1)} \quad (2.43.b)$$

Burada x ve y görüntü koordinatları, X, Y, Z nesne koordinatları δx ve δy sistematik hatalardır (lens distorsiyonları). Denklemlerde bilinmeyen 11 parametre (L_i), en az 6 kontrol noktasıyla iteratif olarak çözülebilir (Khalil, 2002). δx ve δy parametrelerinin de hesaplanması durumunda ek 5 parametre (lens distorsiyonları) daha eklenerek bilinmeyen sayısı 16 ya yükselecektir. Bu durumda da çözüm için aynı düzlem üzerinde olmayan en az 8 kontrol noktası gerekmektedir.

2.5.2. Işın demetleri dengelemesi

Işın demet dengelemesi çok yönlü, yüksek doğruluklu ve esnek bir çözüm tekniğidir. Bu teknik temel olarak ışın demetlerinin ortak noktalarda kesiştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemin en büyük özelliği, matematik modelinin genişletilebilir olmasıdır. Bu olanak sayesinde, denklemlere bazı ek parametreler ve yardımcı ölçüler katılabilir. Bu modelinde matematiksel modeli direkt lineer transformasyonda olduğu gibi kolinearite eşitlikleri ile ifade edilir. Kolinearite şartı; bir görüntü noktasının, izdüşüm merkezinin ve görüntü noktasının nesne uzayındaki karşılığının aynı ışın demeti üzerinde olması gerektiğinin matematiksel ifadesinden ibarettir. Kolinearite şartı ideal görüntüleme geometrisini tanımlar ancak kameraların sahip olduğu

sistemik hatalardan dolayı uygulamada gerçekleşmesi imkânsızdır. Kolinearite eşitlikleri aşağıdaki 2.44 denklemleri ile verilmiştir (Kraus, 2007). Denklemlerdeki; x_o, y_o asal noktanın koordinatlarını, c odak uzaklığını, X_o, Y_o, Z_o izdüşüm merkezinin uzay koordinatlarını, X, Y, Z üç boyutlu kartezyen koordinat sistemindeki koordinatları ve r_{ij} dönme matrisinin elemanlarını ifade etmektedir.

$$x = x_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} = \frac{Z_x}{N} \quad (2.44.a)$$

$$y = y_o - c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} = \frac{Z_y}{N} \quad (2.44.b)$$

İdeal görüntüleme geometrisinden fiziksel sapmalar, kolinearite eşitliklerinde sistemik hatalara neden olurlar. Bunlar (lens distorsiyonları) kolinearite eşitliklerine eklenerek hesaplanabilirler. Genişletilmiş kolinearite eşitlikleri 2.45 denklemleri ile ifade edilmiştir. Burada Δx ve Δy ek parametrelerin (lens distorsiyonları) fonksiyonlarıdır. Algılayıcı geometrisinin fiziksel gerçekliğini arttırmak için görüntü koordinatlarına getirilecek düzeltmeler olarak da düşünülebilir (Beyer, 1991).

$$f_x = (x - X_o) = -c \frac{Z_x}{N} + \Delta x \quad (2.45.a)$$

$$f_y = (y - Y_o) = -c \frac{Z_y}{N} + \Delta y \quad (2.45.b)$$

Bu denklemlerdeki bilinmeyen en küçük kareler yöntemine göre çözülebilmektedir. Işın demetleri dengelemesi, uygulamada oldukça başarılı sonuçlar verebilen ve matematiksel modeli geliştirilebilen bir hesaplama tekniğidir. Bu yöntemin doğruluğu, kontrol noktalarının doğruluğu, dağılımı ve sayısı ile korelasyonludur. Kontrol noktası ve görüntü sayılarının artırılması gerçekleştirilecek dengelemenin serbestlik derecesini artırarak dengeleme sonuçlarının iyileşmesine katkı sağlanır. Fakat bu durumda işlem yükü ve hesaplama zamanının artacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

2.5.3. Zhang kalibrasyon algoritması

“A Flexible New Technique for Camera Calibration” adlı çalışma ile literatüre girmiş, Zhengyou Zhang tarafından 2000 yılında geliştirilen ve kendi adıyla anılan bu kalibrasyon yöntemi, hızlı ve esnek yapısı ile günümüzde farklı versiyonlar şeklinde hala kullanılmaktadır.

Sporcu hareketlerinin analizinin yapılacağı FHAY sisteminde her ölçüm öncesinde kamera kalibrasyonunun yapılacak olması, esnek bir kalibrasyon levhasına ihtiyaç olması ve hızlı sonuç alınabilmesi nedeni ile FHAY kalibrasyon modülünde Zhang kalibrasyon algoritması kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu kalibrasyon yönteminde, 3 boyutlu uzay noktaları bir perspektiften yansıtılarak görüntü düzlemine düşürülür. Bu yöntem 2.46'da sunulan eşitlikle ifade edilmektedir (Zhang, 2000).

$$s m' = A [R|t] M' \quad (2.46.a)$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.46.b)$$

Burada; (X, Y, Z) objenin uzay koordinatlarını, (u, v) izdüşüm noktasının piksel cinsinden koordinatlarını, c_x, c_y asal noktanın koordinatlarını ve f_x, f_y piksel biriminden odak uzaklığını ifade eder. İç yöneltme matrisi, görüntülenen sahneye bağlı değildir. Bu yüzden, bir kez belirlenirse, odak uzaklığı sabitlendiğinde (sabit zoom seviyesinde) yeniden kullanılabilir.

Eksen dönüklüklerinin tanımlandığı $[R|t]$ matrisine dönüklük matrisi denir. Hareketsiz bir sahnenin etrafında kamera hareketini veya bir kameranın önünde bir nesnenin hareketini tanımlamak için kullanılır. Yani, $[R|t]$ (X, Y, Z) değerine sahip bir noktanın koordinatlarını, kameraya göre sabitlenmiş bir koordinat sistemine çevirir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad (2.47.a)$$

$$x' = x/z \quad (2.47.b)$$

$$y' = y/z \quad (2.47.c)$$

$$u = f_x x' + c_x \quad (2.47.d)$$

$$v = f_y y' + c_y \quad (2.47.e)$$

Kamera merceği genellikle çapsal distorsiyon ve teğetsel distorsiyon gibi bazı distorsiyonlara sahiptir. Bu sebeple, 2.47 ile ifade edilen model 2.48 şeklinde genişletilmiştir. Bu eşitliklerdeki $r^2 = x'^2 + y'^2$ olarak ifade edilir.

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 ve k_6 çapsal distorsiyon, p_1 ve p_2 teğetsel distorsiyon ve s_1 ve s_2 mercek bozulma katsayılarıdır. Birçok uygulamada mercek bozulma katsayıları ve yüksek dereceden katsayılar dikkate alınmaz (Zhang, 2000).

$$x'' = x' \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6} + 2p_1x'y' + p_2(r^2 + 2x'^2) + s_1r^2 + s_2r^4 \quad (2.48.a)$$

$$y'' = y' \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6} + p_1(r^2 + 2y'^2) + 2p_2x'y' + s_1r^2 + s_2r^4 \quad (2.48.a)$$

2.6. Matematik Modelin Yersel Fotogrametriye Uygulanması

Objeler noktaları ile ona karşılık gelen görüntü noktaları arasındaki temel ilişki görüntüleme olayının geometrisi kullanılarak kurulmaktadır. Çözümüne esas olan parametreler doğrudan gözlemlerle elde edileceği gibi bazı durumlarda dolaylı yoldan hesaplamalarla elde edilebilir. Karşılıklı ilişkiyi matematiksel olarak tanımlayan eşitlikler bilinen ve bilinmeyenlerin durumuna göre kurulmalıdır (Karlı ve Ayhan 2005; Linder, 2009). Çizelge 2.1'de görüleceği gibi çözüm için gerekli modeli bilinenler ve bilinmeyenler belirlemektedir.

Çizelge 2.1. Önerilen çözüm yöntemleri (Karlı ve Ayhan 2005; Linder, 2009)

Problem	Parametreler			Önerilen Çözüm Yöntemi
	Ölçüler	Bilinenler	Bilinmeyenler	
Uzay Geriden Kestirme	x, y	x_0, y_0, c X_p, Y_p, Z_p	X_0, Y_0, Z_0 ω, φ, κ	Doğrusallık Denklemleri
Uzay Geriden Kestirme	x, y	x_0, y_0, c X_p, Y_p, Z_p X_0, Y_0, Z_0	ω, φ, κ	Doğrusallık Denklemleri
Uzay İleriden Kestirme	x_1, y_1 x_2, y_2	x_0, y_0, c X_0^0, Y_0^0, Z_0^0 X_0'', Y_0'', Z_0'' ve yöneltme açıları	X_p, Y_p, Z_p	Eşdüzlemsellik

Doğrusallık eşitlikleri yardımı ile altı parametrenin belirlenebilmesi için en az üç kontrol noktasının X, Y, Z uzay koordinatlarına ihtiyaç vardır. Bilinmeyenlere yaklaşık değerler verilerek sonuca gidildiğinden iteratif bir çözüm söz konusudur. Bu çözüm yolu hem yersel hem de hava fotogrametrisinde kullanılan bir yöntemdir.

En az iki görüntüde bulunan bir noktanın uzay koordinatları, uzay ileriden kestirme ile hesaplanmaktadır. Burada bilinmeyenler P noktasının X_p, Y_p, Z_p koordinatları iken bilinen büyüklükler tüm iç ve dış yöneltme elemanlarıdır. Ölçülen değerler ise noktanın her iki görüntüdeki görüntü koordinatlarıdır. Dış yöneltme ve iç yöneltme elemanları daha önceki bölümlerde açıklanan yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bunun için herhangi bir sınırlama bulunmamakla birlikte uygulamanın özelliğine ve var olan olanaklara göre tercih yapılmalıdır.

Kolinearite ve Koplolarite denklemlerinin amacı ölçüm değeri olan cisimlere ait görüntü koordinatları ve cisim koordinatları arasındaki bağıntıyı ortaya koymaktır. Bu işlemlerin temeli görüntü koordinatları ile başlayan matematik modellerle değerlendirmeye dayanmaktadır. Klasik olarak görüntü koordinatlarının ölçülmesini iç yöneltme elemanlarının belirlenmesi ve buna bağlı dönüşümler izler. Bundan sonra iki temel yaklaşım söz konusudur. Birinci yaklaşım dış yöneltme elemanlarının birlikte hesabına dayanmaktadır. İkinci yaklaşım ise stereo model oluşturulmasını ve model koordinatlarının hesaplanmasını hedeflemektedir. Her iki yaklaşımda da sonuç olarak cisim noktasının üç boyutlu koordinatları elde edilmektedir.

Bir ışın demetinin uzaydaki konumunun belirlenmesi üç dönme ve ötelenme değerlerinin bilinmesi ile mümkün olur. Bu değerler izdüşüm merkezinin X_0, Y_0, Z_0 koordinatları ile ışın demetinin üç dönme açısı ω, φ, κ ' dır. Bu altı parametreye dış yöneltme elemanları denir.

$$i^T j = j^T k = k^T j = 0 \quad (2.49.a)$$

$$i^T i = j^T j = k^T k = 1 \quad (2.49.b)$$

2.49 eşitlikleri ile 3 ortogonalite ve 3 normlandırma koşulu olmak üzere toplam 6 adet ortogonalite koşulu sağlanacaktır. R dönme matrisinin 9 elemanı 6 ortogonalite koşulu için yeterli olduğundan ($9-6=3$) uzayda dönme bağımsız 3 parametre ile bellidir. Bunlar ω, φ ve κ açılarıdır. Sonuç olarak ortogonal R matrisi 2.50 denklemindeki gibi ifade edilir. Dönüşümün 7 adet parametresini (3 öteleme, 1 ölçek ve R matrisinin 3 dönme açısı ω, φ, κ) belirlemek için en az 7 denkleme ihtiyaç vardır.

$$R_{\omega \varphi \kappa} = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\kappa & -\cos\varphi \sin\kappa & \sin\omega \\ \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\varphi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\varphi \sin\kappa & -\sin\omega \cos\varphi \\ \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\varphi \cos\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\varphi \sin\kappa & \cos\omega \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.50.a)$$

$$X = a_0 + mRx \quad (2.50.b)$$

Eşitlik 2.50 matrisinin oluşturulması için öncelikle her kameranın uzay koordinat sistemindeki öteleme ve dönüklük parametrelerinin (dış yöneltme parametrelerinin) hesaplanması gerekmektedir. Bu işlem sadece başlangıçta kamera platformu ve referans yüzey sabitlendikten sonra tek sefere mahsus yapılır. Elde edilen sonuçlar kamera sistemi sabit kaldığı sürece geçerlidir.

Dış yöneltme parametrelerinin dengeleme yapılarak belirlenebilmesi için uzay koordinat sistemindeki 3B koordinatları (X, Y, Z) hassas olarak bilinen en az dört adet sabit referans noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu düzlem yani referans levhası üzerindeki bir numaralı işaretçi $(0,0,0)$ noktasını oluşturacak tanımlama yapılarak uzay koordinat sistemi bu düzlem yardımı ile tanımlanmaktadır.

Ölçüler olarak referans yüzey üzerindeki işaretçilerin her iki çerçeve (frame) üzerindeki görüntü koordinatları (x, y) bilinenler olarak referans yüzey üzerindeki işaretçilerin uzay koordinatları (X, Y, Z) ve bilinmeyenler olarak da her iki görüntü düzlemine ait izdüşüm merkezlerinin uzay koordinatları $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$ kullanılarak üç eksendeki dönüklükleri $(\omega_1, \varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$ belirlenmektedir.

Kamera platformu ve referans yüzey sabitlenirken kamera alım ekseni mümkün oldukça referans yüzeye dik ve her iki kamera izdüşüm merkezinden geçen doğru, $P_{c1} - P_{c2}$ doğrusuna paralel olmalıdır. Kamera alım ekseni mümkün oldukça referans yüzeye dik ve her iki kamera izdüşüm merkezinden geçen doğru, $P_{c1} - P_{c2}$ doğrusuna paralel olması durumunda dengeleme işlemine $\omega_0 = \varphi_0 = \kappa_0 = 0$ ve izdüşüm merkezi koordinatlarının yaklaşık değerleri X_0^0, Y_0^0, Z_0^0 2.51 eşitliklerinde belirtildiği şekilde hesaplanarak başlanabilir.

$$X_0^0 = X_{pc1} - (Z_{pc1} - Z_0^0) \frac{x_{pc1}}{-c} \quad (2.51.a)$$

$$X_0^0 = X_{pc2} - (Z_{pc2} - Z_0^0) \frac{x_{pc2}}{-c} \quad (2.51.b)$$

Sağ veya sol görüntü tek başına ele alındığında; yaklaşık bir dik görüntü çekimi söz konusu olduğu için, tam dik görüntü çekimi için olan bağıntılardan, koordinatları bilinen P_{C1} ve P_{C2} kontrol noktaları kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

2.51.a eşitliği P_{C1} noktası ile 2.51.b eşitliği P_{C2} noktası ile ifade edilmiştir. Denklemler birbirine eşitlenerek ve Z_0^0 ifadesi elde edilmek istendiğinde 2.52 eşitliği oluşmaktadır. Z_0^0 ifadesi hesaplandıktan sonra sırasıyla X_0^0 ve Y_0^0 2.53 ve 2.54 eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$Z_0^0 = \frac{(c(x_{pc2} - x_{pc1}) + x_{pc2}Z_{pc2} - x_{pc1}Z_{pc1})}{(x_{pc2} - x_{pc1})} \quad (2.52)$$

$$X_0^0 = X_{pc1} - x_{pc1} \frac{Z_0^0 - Z_{pc1}}{c} \quad (2.53)$$

$$Y_0^0 = Y_{pc1} - y_{pc1} \frac{Z_0^0 - Z_{pc1}}{c} \quad (2.54)$$

3. FARKLI YÖNTEMLERLE GERÇEKLEŞTİRİLEN BİYOMEKANİK ANALİZLER

Spor dallarındaki bireysel veya takım başarılarının ardında bir dizi mühendislik çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçların katkısı bulunmaktadır. Sportif faaliyetlerin nitel ve nicel olarak incelenmesi ve analizlerinin yapılması profesyonel sporcu gelişiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Spor biyomekaniği; hareket kalıpları, hareketin niteliksel incelemesi, hareketin geometrisinin tanımlanması, hareketin sayısal olarak ölçülmesi, harekete etki eden kuvvetler, insan vücudunun anatomisi ve bunun gibi birçok konuda araştırmaları içermektedir (Bartlett, 2007).

Nitel analizler genellikle video kayıtları ve gözlemlerden oluşmaktadır ve daha çok hareket modeline odaklanmaktadır. Nicel analizlerde ise hareketin modellenmesi ve simülasyonu ile sporcuların yapacakları hareketin farklı pozisyonlardaki performansının bilgisayar ile belirlenmesi üzerinde durulmaktadır (Bartlett, 2007).

3.1. Spor Biyomekaniği

Fizik biliminin alt dallarından birisi olan mekanik, herhangi bir cisim üstündeki kuvvetler, hareket ve şekil değiştirmeleri ile ilgilenmektedir. Mekanik ile ilgili araştırmalar çok eski dönemlere kadar dayanmakta olup, Arşimet (MÖ 287-212) zamanına kadar geriye gitmektedir. Galileo (1564-1642) ve Newton (1642-1727) bu alanda en belirgin katkıları yapmış bilim insanlarıdır. Galileo bu alandaki ilk deneysel çalışmaları yaparken Newton bu alanın temel kanunları sayılan hareket kanunlarını ve yerçekimini formüle etmiştir (Halliday ve Resnick, 1991).

Biyomekanik, 'bio' (canlı) ve 'mechane' (araç) kelimelerinin birleşmesinden türetilmiş bir kelimedir (Özbek, 2002) ve insan vücudu üzerine etki eden iç ve dış kuvvetler ve bu kuvvetlerin yarattığı etkileri inceleyen bir bilim dalıdır (Açıkada ve Demirel, 1993).

Spor biyomekaniği, spor aktivitelerinin iç içe geçtiği zaman vücudun harekette hangi yolları izlediğini inceleyen bir bilim dalıdır (Yeadon ve Challis, 1992). Spor biyomekaniği; insan hareketinin mekanik şartlarını ve sportif hareketlerini araştırmakta, hareketin özellikleri ve hareket halindeki vücutsal oluşumlar, değişimler ölçülmektedir (Çetin, 1997).

Spor biyomekaniği, insan vücudunun kas-iskelet sisteminde veya ilişkide olduğu diğer yapılar üzerinde (partner, rakip, top, raket, zemin vb.) açığa çıkan kuvvetleri ve birbirleriyle etkileşimini inceleyen bilimdir (İnal, 2004). Biyomekanik, yaşam sistemlerini etkileyen güç ve onların etkisi üzerine çalışmaktadır (McGinnis, 1999).

3.2. Spor Biyomekaniğinin Hedefleri

Biyomekanik, insan hareketi ile ilgilenen birçok farklı bilim dallarının ilgi alanına girebilmektedir. Biyomekanik ilgi alanına göre farklı amaçlarla kullanılabilir (Açıkada ve Demirel, 1993). En önemli amacı spor sakatlıklarını önlemek ve rehabilitasyonunu sağlamaktır. Diğer bir amacı ise sportif performansın geliştirilmesidir (Muratlı vd., 2000).

Yürüme, sıçrama, atma ve atlama gibi aktivitelerde hareketleri tanımlamak için kullanılan terimler ve yöntemler hareket analizinde önemli yer tutar (Muratlı vd., 2000).

3.3. Ticari Hareket Analiz Yazılımları

İnsan doğada var olan mükemmel sistemlerin başında gelmektedir. Bu mükemmeliyet insanın hareketine de yansımıştır. İnsan hareketi tarihin en eski dönemlerinden beri araştırmacıların ilgisini çekmiştir. 1830'larda Weber kardeşlerin öncülüğünde modern anlamda yürüyüş analizi çalışmaları başlamıştır (Yavuzer, 2007). Günümüzün araştırmalarına Winter (1990) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar öncülük etmektedir.

1970'li yıllardan beri yakın görüntü fotogrametrisi (close-range photogrammetry) biyomekanik hareket analizlerinin temelini oluşturmaktadır. Braüne ve Fischer (1987) gibi biyomekaniğin öncüleri insan hareketi araştırmaları için yüksek çerçeve hızına sahip kameraların kullanıldığı fotogrametrik yöntemleri önermiştir. Bu çalışmaların öncülüğünde ve gelişen teknolojik imkânların katkılarıyla insan hareketlerinin incelenmesi ve modellenmesinde yeni ufuklar açılmıştır.

Günümüzde bilgisayar sistemlerinin ve yazılım teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak insan hareketlerinin izlenmesi ve kaydedilmesi, elde edilen görüntülerin hızlı biçimde işlenebilmesi, anlamlı sonuçların üretilmesi ve değerlendirilmesi ile insan hareketlerinin biyomekanik olarak analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

Biyomekanik, sporcu sağlığı ve sportif çalışmalar için geliştirilmiş yazılımlara TASS (TNO Automotive Safety Solitiouns), LifeMOD, The AnyBody Modelling System, OpenSim ve CATIA rnek olarak gösterilebilir (Lee, 2006). Ayrıca araştırmacıların kullanımına sunulmuş çok sayıda ticari hareket analizi sistemi de mevcuttur. Bunların en çok bilinenleri; APAS (Ariel Dynamics, Inc.), CODA (Charnwood Dynamics Ltd.), ELITE (Bioengineering Technology and Systems), OPTOTRACK (Northern Digital, Inc.), PEAK (Peak Performance Technologies, Inc.), QUALISYS (Qualisys Medical AB) ve VICON (Vicon Motion Systems Ltd.) tarafından geliştirilen sistemlerdir (Civelek, 2006).

Nispeten karmaşık olmayan insan hareketlerinin modellenmesinde kullanılan bir diğer uygulama da SimMechanics yazılımıdır. SimMechanics, Simulink ve MATLAB (The MathWorks) araçlarından da faydalanarak fiziksel sistemlerin blok diyagramları şeklinde modellendiği, katı cisimlerin ve bu cisimlere ait hareketlerin Newton dinamiği yasalarına göre zmlendiği bir yazılımdır. Bu yazılımla, uygun araçlar seçilerek mekanik sistemlerin fiziksel ve kütlesel özellikleri belirlenebilir, bu özelliklere uygun hareketler tanımlanabilir ve cisimlerin hareketi dinamik olarak incelenebilir. SimMechanics, mekanik sistemler için geliştirilmiş bir yazılım olmasına rağmen, insan hareketinin incelenmesinde de kullanılmaktadır (Mehmood vd., 2008; Daumas vd., 2005; Hernandez vd., 2011; Hajny ve Farkasova, 2010; Amca vd., 2010; Jamshidi vd., 2009; Hang ve Zhaoli, 2011)

Hacettepe niversitesi biyomekanik araştırma grubu tarafından tasarlanan üç Boyutlu Hareket Analizi Yazılımı (HUBAG) lkemizde geliştirilen bir yazılımdır. Bu yazılımda aynı SimMechanics gibi MATLAB zerine geliştirilmiş eklentilerden oluşmaktadır. Bu eklentiler ile hareket analizi işlemleri birbirinden bağımsız modeller şeklinde basamaklandırılmakta ve grafik arayüzler ile kullanıcılara sunulmaktadır. Ayrıca MATLAB ortamının sunduğu güçlü grafik altyapısı ile analiz sonuçlarını raporlayabilmektedir (Arıtan vd.,2010).

3.4. Sporcu Hareket Analizi Konusundaki Araştırmalar

Malone vd., (2002) gerçekleştirdikleri çalışmada; tekerlekli sandalye ile basketbol sporu yapan sporcuların atışlarını ve sonuçlarını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yüksek noktadan yapılan atışlarda düşük noktadan yapılan atışlara göre daha az güç harcanarak başarılı sonuç elde edildiğini ortaya çıkarmışlardır.

O'Donoghue ve Ingram (2001); tenis sporunda erkek ve kadınların servis atışlarını incelemiştir. Servis atışı sonrası toparlanma süreçlerinin erkek tenisçilerde kadın tenisçilere oranla daha hızlı gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Bu çalışmada yüzeyin toparlanmaya olan etkisi de araştırılmıştır. Servis atışlarında erkek ve kadın sporcuların tamamında fileye dik olarak gerçekleştirilen atışların daha başarılı sonuçlandığı belirlenmiştir.

Elliott (1995); tenis sporundaki servis atışının sağ veya sol el kullanımına göre farklılığını incelediği çalışmada, sağ el kullanan bir sporcunun hafif sola meyilli bir atış yaptığında başarılı sonuçlar aldığını belirlemiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarının kesme atışında da geçerli olduğu görülmektedir.

Coleman (1993); voleybolda çivileme olarak tanımlanan vuruşun tek ayak ve çift ayakla yapılmasındaki farkları incelemiştir. Bu çalışmada tek ayakla yapılan vuruşun çift ayakla yapılan vuruşa göre daha büyük vücut açısı gerektirdiğini ortaya çıkarmıştır. Tek ayakla yapılan vuruş sonunda topun karşı alanda daha fazla ilerlediğini belirlemiştir.

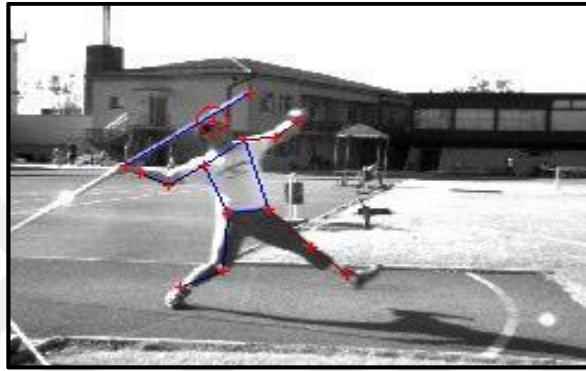
Harbili ve Arıtan (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; elit haltercilerin koparma teknikleri APAS (Ariel Performans Analiz Sistemi, Ariel Dynamics, San Diego, CA) hareket analizi yazılım programı ile biyomekanik olarak incelenmiştir. Halterci üzerinde 18 antropometrik nokta ve bar üzerinde 2 nokta işaretlenerek iki adet S-VHS (Panasonic NV-MS2b) marka kamera ile 25 fps kayıt alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda koparma kaldırışında vücut pozisyonu, barın maksimum yüksekliği, bara uygulanan kuvvet, yapılan iş ve güç gibi kinematik ve kinetik faktörlerin teknik farklılıkları belirleyen etmenlerden olduğu sonucuna varılmasına rağmen, koparma kaldırışında teknik farklılıkların uygulanan kuvvetin vücut üye uzunlukları ile ilişkilendirilerek dinamik bir yaklaşımla değerlendirilmesinin daha uygun olacağı ifade edilmiştir.

Yukarıda özetlenen literatürdeki analizler video görüntüler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Video görüntülerinin farklı ticari yazılımlarla incelenmesi ve/veya analiz edilmesi ile çalışma sonuçlarına ulaşıldığı görülmüştür. Bu kapsamda değerlendirildiğinde gerçek zamanlı analizden söz etmek mümkün değildir. Gerçekleştirilen tüm çalışmalarda ticari yazılımlar kullanılmıştır. Çalışmaların büyük kısmında ise analizler büroda gerçekleştirilmiştir.

3.5. Fotogrametrik Yöntemlerin Kullanıldığı Hareket Analizi Çalışmaları

Bulgan (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; elit ve alt elit seviyedeki cirit atıcılarının, cirit atma teknikleri biyomekanik analizler yapılarak incelenmiştir. Araştırmada, 5 elit ve 5 alt elit olmak üzere toplam 10 sporcunun cirit atma teknikleri ile taşıma ve atış evreleri ayrı ayrı incelenmiştir.

Atış kayıtları için 100 Hz hızında birbirleri ile senkronize çalışan üç kamera kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler Simi Motion 6.2 programı ile analiz edilmiştir. Çalışmadan bir görüntü Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Cirit atıcısı atış hareket analizi (Bulgan, 2005)

Sonuç olarak en uygun bir atış mesafesi için yatay düzlemde rotasyondan ziyade, sagittal (vücudu sol, sağ şeklinde ortadan ayıran) düzlemde kolun hiperekstansiyona (aşırı germe) getirilip atış hareketinin gerçekleştirilmesinin daha avantaj sağladığı görülmüştür. Ayrıca taşıma evresinde gövdenin, rotasyonla atış yönünden çok fazla uzaklaştırılmasının atış hızını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Göktepe ve arkadaşları (2009) gerçekleştirdiği çalışmada, buz hokeyinde kullanılan “slap-shot” vuruşunda dirsek ve diz eklemlerinin açısal kinematiği fotogrametrik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında diz ve dirsek kinematiği tanımının elde edilebilmesi için dört sporcunun hareketleri değerlendirilmiştir. Çalışmada 2 adet DragonFly Express™ dijital video kamera kullanılmış ve Pictran 2.9 fotogrametrik değerlendirme yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, dirsek eklemi kinematiği için genel bir tanım yapılabilirken, diz eklem kinematiği için genel bir tanım yapılamamıştır. Şekil 3.2’de yapılan çalışmalardan bir görünüm sunulmuştur.



Şekil 3.2. Buz hokeyinde slap-shot hareketi analizi (Göktepe vd., 2009)

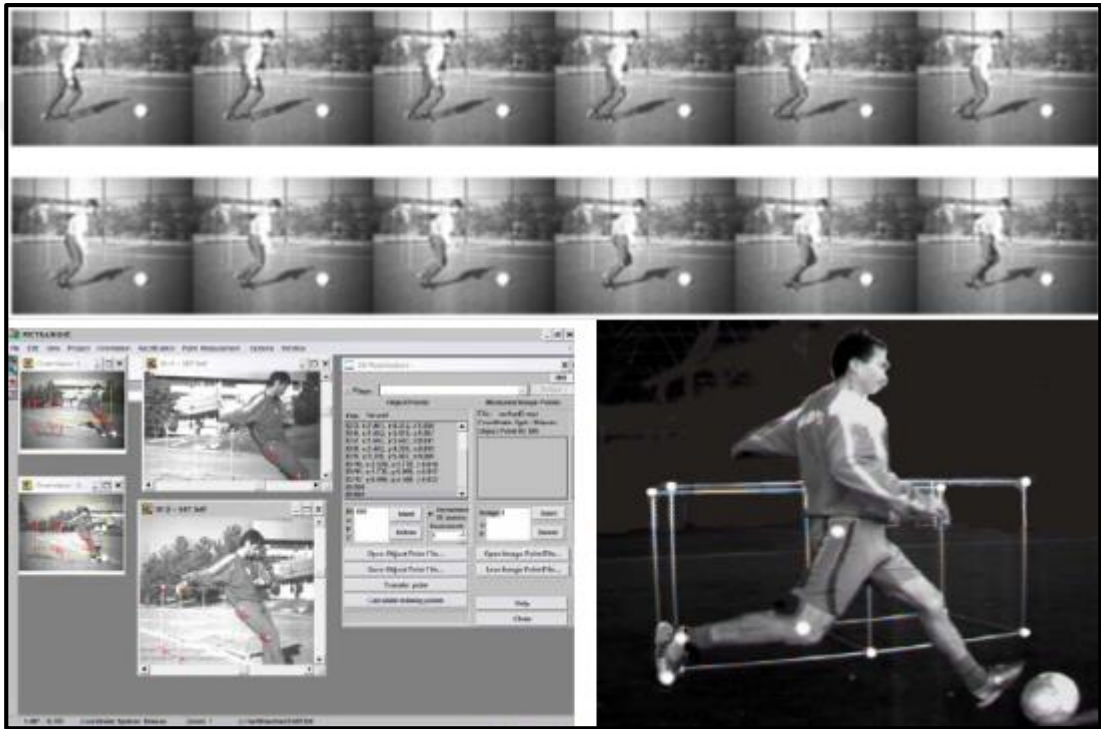
Özgören (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın amacı, barfıkste düz ve ters devir hareketlerinin kinematik ve kinetik özelliklerini benzeşim modeli oluşturarak incelemektir. Sporcu hareketleri 500 fps görüntü kaydedebilen bir kamera ile kaydedilmiştir. Anatomik noktaların görüntü üzerinde işaretlenebilmesi için eklemlere yansıtıcı işaretler yerleştirilmiştir. Görüntü kalibrasyonu için kullanılan 8 işaretçi yerleştirilmiş kalibrasyon düzlemi de her görüntüde görünebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Kaydedilen görüntülerde yansıtıcı işaretler sayısallaştırılarak noktaların konum verileri elde edilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Barfıkste ters ve düz devir hareketi analizi (Özgören, 2014)

Çalışma sonucunda cimnastikçilerin düz devir hareketini, ters devir hareketine göre daha hızlı tamamladıkları ortaya çıkmıştır. Cimnastikçilerin devir hareketleri sırasında vücut uzuvlarının ve eklem noktalarının davranışlarının benzer olduğu belirlenmiştir. Jimnastikçilerin ters devirde alt salınma gelirken daha çok kuvvet harcadıkları, üst salınmada ise düz devirdekine göre daha az bir kuvvet uygulayarak amut pozisyonuna ulaştıkları görülmüştür.

Göktepe ve arkadaşları (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, futbol sporunda penaltı atış hareketinin, digital video kameralarla çekimi gerçekleştirilerek hareket adımlarının analizleri fotogrametrik yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Sporcu atışı esnasında fotogrametrik görüntü analizinde kullanılmak üzere iki adet dijital video kamera ile görüntü alımı gerçekleştirilmiştir. Ancak çalışmada kullanılan kameraların senkronlanmasında sıkıntılar olduğu, gelen görüntülerin çok fazla olmasından dolayı büro çalışmalarının önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Yazarlar tarafından otomatik koordinat belirleyen bir yazılım kullanılması önerilmiştir. Şekil 3.4'te yapılan çalışmalardan bir görünüm sunulmuştur.



Şekil 3.4. Futbolda penaltı atışı analizi (Göktepe vd., 2009)

Bu bölümde ele alınan çalışmalarda, sporcu hareket analizlerinin yapılması konusu birçok araştırmacının ilgisinin yoğunlaştığı bir alan olarak görülmektedir. Özellikle ülkemizde bu tarz analizlerin yapıldığı çalışmalarda ticari hareket analiz yazılımları veya ticari fotogrametrik değerlendirme yazılımlarının kullanıldığı görülmektedir. Çalışmalar kapsamında özellikle fotogrametrik değerlendirme yazılımlarının kullanıldığı uygulamalarda büro işlemlerinin uzun zamanlar aldığı ifade edilmiştir.

4. VIDEO GÖRÜNTÜLERDEN OTOMATİK OBJE YAKALAMA

Bilişim teknolojilerinin son yıllarda ivmelenen gelişimi ile ortaya çıkan obje yakalama temelli hareket tanıma sistemleri; kullanıcıların elektronik cihazlarla fiziksel kontrol aygıtı olmadan iletişim kurmasına olanak sağlamaktadır. Gün geçtikçe kullanım alanı artan bu sistemler, geleceğin teknolojisi olma yolunda ilerlemektedir.

Akıllı televizyonlar, medikal operasyonlar, sinema ve oyun sektörleri ve askeri uygulamalar gibi geniş bir kullanım alanı bulunan hareket tanıma sistemleri üzerine sayısız ticari ve bilimsel çalışma yapılmış, farklı yöntem ve teknikler gerçekleştirilmiştir.

Gerçek zamanlı hareket analiz yazılımları, video görüntülerden obje yakalama algoritmaları ile kullanıcılarına analizleri için gerekli girdileri veya doğrudan analiz sonuçlarını sunmaktadır. Bu kapsamda 3B obje konumları fotogrametrik olarak farklı (DDD, Işın Demetleri, Uzay İleriden Kestirme, Epipolar Geometri vb.) hesaplama teknikleri ile belirlenebilmektedir. Hangi hesaplama yöntemi kullanılırsa kullanılsın görüntü çiftlerinden elde edilen görüntü koordinatlarının eşzamanlı ve otomatik olarak belirlenmesi uygulamanın gerçek zamanlı olabilmesinin en önemli gereksinimidir. Sonrasında ise hesaplamaların ve sonuçların otomatikleştirilmesi ile gerçek zamanlı çalışabilen bir sistemden söz edilebilir.

4.1. OpenCV Bilgisayarlı Görme Kütüphanesi

OpenCV, bir görüntü ya da video içindeki anlamlı bilgileri çıkarıp işleyebilmek için INTEL tarafından C ve C++ dilleri kullanılarak geliştirilmiş, açık kaynak kodlu bir “Bilgisayarla Görme” kütüphanesidir. OpenCV kütüphanesi temel bileşenleri Şekil 4.1’de görülmektedir (Bradski ve Kaehler, 2008).



Şekil 4.1. OpenCV bileşenleri

Computer Vision (Bilgisayarla Görü/Görme) kelimesinin baş harfleri kullanılarak isimlendirilen CV bileşeni; temel görüntü işleme fonksiyonları ve bilgisayarla görü/görme için kullanılan yüksek seviyeli algoritmaları bünyesinde barındıran bir kütüphanedir. Machine Learning Library kelimesinin baş harfleri kullanılarak isimlendirilen MLL bileşeni; adından da anlaşılacağı üzere makina öğrenmesi dalı için gerekli istatistiksel verilere ulaşmak, mevcut verileri sınıflandırmak için kullanılan fonksiyonları/araçları içeren diğer bir kütüphanedir. HighGUI bileşeni; slider, form gibi OpenCV kütüphanesi içerisinde tanımlanmış pek çok nesneyi yaratabilmemizi sağlayan bir grafik arabirimi olmakla beraber, görüntü ve videoları kaydetmek, yüklemek, hafızadan silmek için gerekli giriş/çıkış (I/O) fonksiyonlarını da içerir (Bradski ve Kaehler, 2008).

OpenCV kütüphanesi, BSD lisansı ile lisanslanmıştır. Açık kaynak kodlu yazılım ve kütüphanelerin sıklıkla kullandığı BSD lisansı “Özgür Lisans” olarak da tanımlanabilmektedir. Bunun en önemli sebebi koda sahip olan kişilerin bu kodları dilediği şekilde (ticari, eğitim vb) kullanabilmesidir. Akademik ve ticari kullanımı ücretsiz olan bu kütüphane Windows, Linux, MacOS gibi farklı platformlarda çalışabilmektedir. OpenCV kütüphanesi özellikle gerek zammalı uygulamaları hedef olarak geliştirilmiştir.

4.2. Dairesel Hough Dönüşümü

Dijital görüntü veya video görüntülerden geometrik şekil tespiti özellikle görüntü işleme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. İris bulma, plaka tanıma, saha üzerinde top bulma ve benzeri uygulamalar bu çalışmalara örnek olarak verilebilir.

Bir kamera veya benzeri bir algılayıcı ile elde edilen görüntülerde şekillerin her zaman eksiksiz yer alması mümkün olmamaktadır. Bu durum şekillerin otomatik olarak tespit edilmesinde zorlukları beraberinde getirmektedir. Şekillerin yakalanabilmesi için renk veya geometri tespiti olmak üzere iki yaklaşım mevcuttur. Ancak renk değerleri ile objelerin yakalanması ve takibi uygulamaları her zaman doğru sonuçlar vermezler. Çok karışık sahnelerde renklerin ve şekillerin iç içe girmesi sonuçları olumsuz etkilemektedir.

Bu noktada Hough dönüşümü ile görüntünün tamamının görülebilir olmadığı durumlarda da olası şekiller tespit edilebilmektedir. Hough dönüşümü ilk defa Paul

Hough (1962) tarafından doğruların belirlenmesi amacı ile ortaya çıkmıştır. Daha sonra bu dönüşüm dairelerin, elipslerin ve rastgele şekillerin belirlenmesinde kullanılmıştır (Seifozakerini vd. 2018). Dairesel Hough dönüşümü; göz bebeği sınırlarının belirlenmesi (Rahmani ve Khalilzadeh, 2016.), daire şeklindeki madeni paraların tespiti (Jain ve Jain, 2012) ve parmak ucu tespiti (Tong vd. 2006) gibi birçok uygulamada kullanılmıştır.

Görüntülerde oluşan gürültülerden etkilenmeden şekillerin yakalanabilmesine imkân sağlaması, Hough dönüşümünün en önemli avantajıdır. Hough dönüşümü içerdiği parametreler sayesinde görüntüdeki nesnelerin sınırlarını belirleyen noktaların aranması sırasında geçen zamanı azaltmaktadır. Bu avantajlarına rağmen Hough dönüşümünün bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Büyük boyutlu görüntülerdeki veri yoğunluğu fazla olduğundan dolayı görüntüdeki nesnelerin tespiti uzun zaman alabilmektedir (Jain ve Jain, 2012).

Hough dönüşümü, görüntü kenarlarının olası geometrik şekilleri (dairesel dönüşümde daireleri) oylaması mantığı ile çalışmaktadır. Hough dönüşümü kullanılarak şekil tespiti genel olarak aşağıdaki adımlar ile özetlenebilir:

- Kaynak görüntü üzerinde kenarların belirlenmesi.
- Görüntü eşikleme (thresholding) yöntemi kullanılarak işlenecek görüntülerin siyah-beyaz (binary) hale dönüştürülmesi.
- Her bir kenar pikseli için olası geometrik şekillerin kutupsal koordinattaki değerleri kullanılan bir akümülatör matrisi üzerinde birer artırılarak kenar piksellerin şekilleri oylaması sağlanır.
- Akümülatör değeri en yüksek olan şekiller en çok oy alan şekillerdir. Başka bir ifade ile bu şekillerin görüntüde bulunması olasılığı çok yüksektir.
- Oylama sonucu bulunan şekiller kullanıcı isteğine göre görüntü üzerine yazdırılabilir.

Kaynak görüntüler üzerinde dairesel şekillerin arandığı çalışmalarda kullanılan akümülatör matrisi, dairenin merkezi olan $[a, b]$ noktaları ve yarıçap değeri $[r]$ olmak üzere üç boyuttan oluşmaktadır. Belirlenen aralıktaki yarıçap değerleri için belirlenen daire merkezleri, daire denkleminde faydalanılarak bulunabilir.

Bir daire; eşitlik 4.1’de ifade edildiği gibi tanımlanır. Burada a ve b sırasıyla dairenin merkezinin x ve y yönündeki koordinatlarını göstermektedir. Daireler, doğrulara oranla parametre uzayında daha basit bir şekilde ifade edilebilir. Çünkü dairenin parametreleri doğrudan parametre uzayına transfer edilebilmektedir. Bir dairenin parametrik temsili ise 4.1 denklemdeki gibidir (Duda ve Hart, 1972; Ioannou vd., 1999; Seifozzakerini vd. 2018).

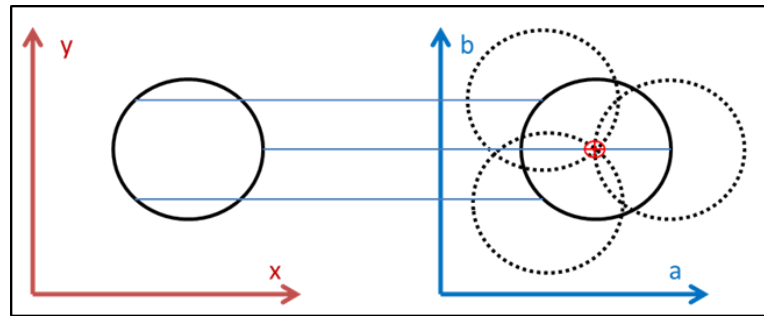
$$r^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 \quad (4.1)$$

4.2 numaralı denklemlerde görüldüğü gibi bir daire üç (a, b ve r) parametre ile tanımlanmaktadır. Buradaki r daire yarıçapını ifade etmektedir. Hough uzayı Z -ekseninin daire yarıçapını temsil ettiği üç boyutlu bir uzaydır. Hough dönüşümü görüntü üzerindeki olası dairelerin yarıçaplarının görüntü üzerinde aranması ile gerçekleştirilir. Görüntüdeki en küçük ve en büyük dairenin yarıçapları arasında yarıçapa sahip olan bütün daireler sırasıyla taranır ve tüm daireler tespit edilir (Duda ve Hart, 1972; Ioannou vd., 1999; Seifozzakerini vd. 2018).

$$x = a + r \sin(\theta) \quad (4.2.a)$$

$$y = b + r \cos(\theta) \quad (4.2.b)$$

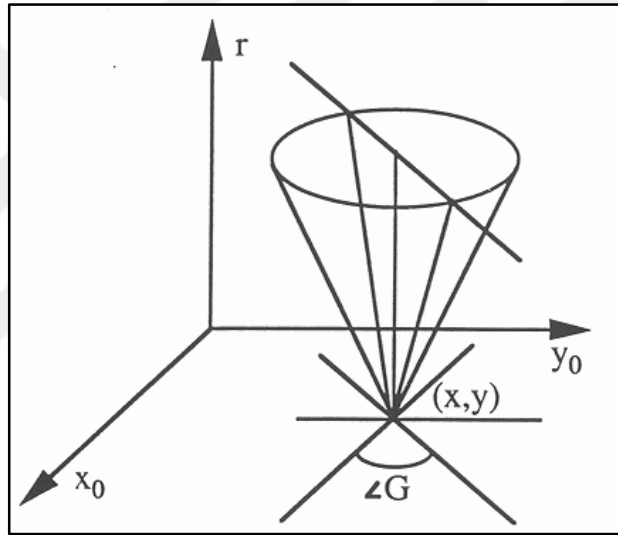
Dairesel Hough dönüşümünde, Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, iki boyutlu görüntüdeki dairesel bir şekil kenarı üzerinde bulunan her bir piksel, parametre uzayında merkez noktası a ve b olan bir daireye karşılık gelmektedir. Parametre uzayında r yarıçapı sabit tutularak iki boyutlu uzaydaki kenar piksellerin parametre uzayında a ve b koordinatlarından geçen olası daireleri bir akümülatör matrisi üzerinde toplanır. Bu akümülatör matrisi farklı a ve b değerleri için kesişim sonrası birer artırılır ve her bir kenar pikselinin olası oylaması sağlanır. Akümülatör değeri en yüksek olan kutupsal koordinata sahip şekillerin tespitine çalışılır (Duda ve Hart, 1972).



Şekil 4.2. Dairesel Hough dönüşümü

Aynı yarıçapa sahip birden çok daire aynı teknikle bulunabilir. Merkez noktalar, parametre alanı çiziminde kırmızı hücreler olarak temsil edilir. Dairelerin üst üste gelmesi, mavi hücrede olduğu gibi sahte merkezlerin de bulunmasına neden olabilir. Sahte daireler, orijinal görüntüde dairelerle eşleştirilerek kaldırılabilir.

Eğer yarıçap bilinmiyorsa, parametre alanındaki noktaların yerleri bir koninin yüzeyine düşecektir. Bir dairenin çevresindeki her nokta (x, y) parametre alanında bir koni yüzeyi üretecektir. Üçlü a, b, r en fazla sayıdaki koni yüzeyinin kesiştiği birikim hücresine karşılık gelecektir. Şekil 4.3'te bir x, y noktası için parametre alanındaki konik bir yüzeyin oluşumunu göstermektedir. Her bir seviyede farklı yarıçaplı bir daire oluşturulacaktır. Yarıçapı bilinmeyen çevrelerin araştırılması, üç boyutlu birikim matrisi kullanılarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.3. Parametre uzayında oluşan koni görünümü

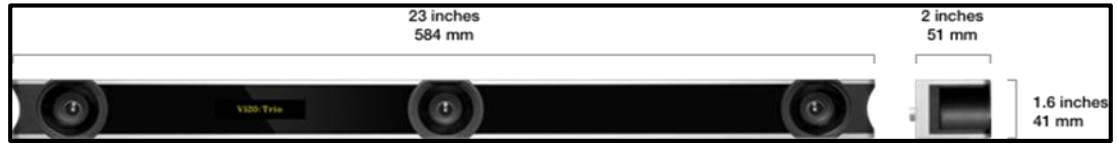
5. SİSTEM TASARIMI VE ÖN HAZIRLIKLAR

Bu tez çalışmasında sporcu hareketlerinin üç boyutlu olarak analizinin yapıldığı, spor branşlarındaki atış, vuruş, zıplama vb. hareketlerinin analizlerinin ve karşılaştırmalarının yapılabileceği, sporcu eğitimini/gelişimini gerçek zamanlı ve etkileşimli olarak gerçekleştirebilecek bir sistem tasarlanmıştır.

Bu kapsamda sistemin donanım ve yazılım altyapısı kurulmuş, özellikle yazılım konusunda özgün bir arayüz tasarlanarak kodlanmış ve sistemin tutarlılığı gerçek verilerle test edilmiştir.

5.1. Donanım Gereksinimleri

Tez çalışması kapsamında tasarlanan sistemin görüntüleme donanımı, Optitrack firmasının V120 Trio model stereo kamerasıdır. Bu kamera, 800 nm IR (infrared) filtresi, farklı görüntüleme modları ile küçük alanlarda takip ve izleme yeteneğine sahiptir. Kameranın genel görünümü Şekil 5.1'de, teknik özellikleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

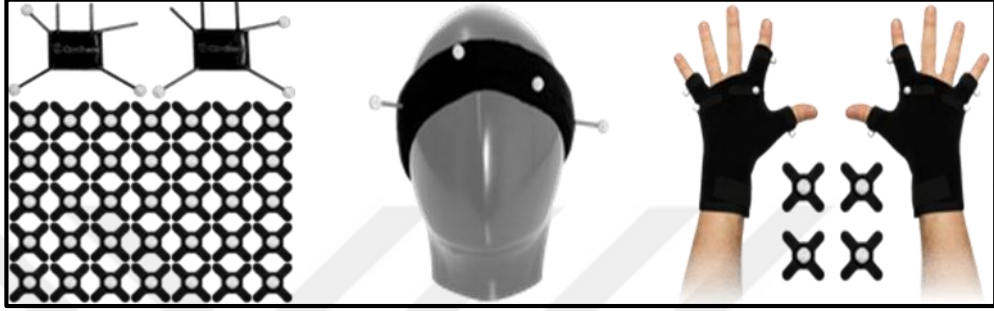


Şekil 5.1. V120 Trio kameranın genel görünümü

Çizelge 5.1. V120 Trio kameranın teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
Çözünürlük	640 x 480 piksel
Çerçeve Hızı (Frame Rate)	30, 60, 120 fps
Görüntüleme Modları	Object Segment Precision Grayscale MJPEG RAW
Odak Uzaklığı	3,5 mm
Piksel Boyutu	6 mikron
Filtre	800 nm IR filtre
Led Ring	26 adet 850 nm IR (infrared)

Kameranın dâhili IR (infrared) filtresi ve her bir kameranın önünde konumlanmış IR (infrared) ledler ile görüntü alınmaktadır. Bu özellik uygulamada kullanılacak yansıtıcı işaretçilerin görüntüde çok parlak biçimde belirmesine olanak sağlayacaktır. Şekil 5.2’de uygulamada kullanılacak farklı tip yansıtıcılar görülmektedir. Yansıtıcı işaretçiler sert veya yarı sert plastik malzemeden üretilen, yüzeyinde gümüş toz zerrecikleri bulunan 6 mm ile 20 mm arasında farklı boyutlarda ve vücuda yapıştırılabilen ya da referans yüzeylere yerleştirilebilen yapıdadır.



Şekil 5.2. Yansıtıcı işaretçi örnekleri

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında bu yansıtıcı işaretçilerden vücuda yapıştırılarak kullanılan 14 mm çapında işaretçi seti kullanılmıştır. Özellikle dirsek, omuz gibi eklem noktalarında bu işaretçilerin kullanımı tercih edilmiştir. Ancak parmak eklemleri gibi daha küçük noktalarda kullanılmak üzere 9 mm çapındaki el işaretçileri de kullanılmıştır. Şekil 5.3’te farklı boyutlardaki işaretçilerin vücuda yapıştırılması görülmektedir. Özellikle el ve bilek bölgesinde sporcunun doğal hareketini bozmayacak ve rahatsız etmeyecek şekilde işaretçiler yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Uygulamada kullanılan 14 mm ve 9 mm yansıtıcı işaretçiler

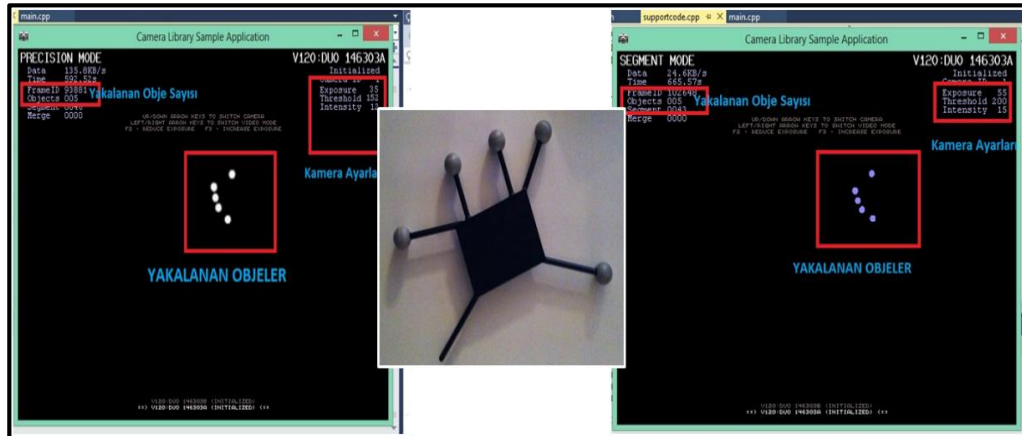
Doğadaki bütün cisimler kızılötesi enerji yayarlar ve bu kızılötesi ışıma farklı sıcaklıktaki cisimler arasındaki ısı transferi anlamına gelmektedir. Cisimler sahip oldukları ısı enerjisi, kızılötesi dalga boyunda iletmektedir. Bütün nesnelere, hatta oda sıcaklığında ve donmuş nesnelere bile, kızılötesi bölgede az da olsa ışınım enerjisi yayarlar. Yani sıcaklığı mutlak sıfırın (0 Kelvin veya -273 °C) üzerindeki tüm cisimler kızılötesi enerji yayarlar (Anonymous, 2018b).

Elektromanyetik tayfın kızılötesi spektrumunda objelerin ısı yayım katsayısına yayımlılık (emissivity) denir. Her objenin emissivity değeri kendisine özgüdür. Bu değer 0.0 iletimsiz, 1.0 iletimli arasında değişmektedir. Doğal siyah bir nesnenin emissivity değeri 1.0'dır. Bunun dışında diğer tüm nesnelere için ise emissivity değeri 1.0'ın altındadır. Farklı maddelerin yayma oranları Çizelge 5.2'de görülmektedir (Anonymous, 2018b).

Çizelge 5.2. Farklı objelerin yayma değerleri

Malzeme	Yayma Oranı (Birimsiz)
Alüminyum ve parlatılmış malzemeler	0.05
Taş, Tuğla vb..	0.85
Beton	0.54
Cam	0.92
Su	0.98

IR filtre kullanımında özellikle parlatılmış yüzeyler (gümüş vb. toplar) iletimsiz olduklarından çok parlak bir görüntü vermektedir. Böylelikle çok karışık sahnelerde ve hızlı hareket eden cisimlerin tespiti kolaylıkla yapılabilmektedir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Yansıtıcı işaretçilerin yakalanması

Sistemin test çalışmalarında ikiden fazla kamera kullanılması gerektiği durumlar için de tüm kameraları senkronlayıp ölçü yapma olanağı sağlayan OptiHub cihazı kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Şekil 5.5'te sunulan OptiHub cihazı ve V100 model kamera ile test çalışması gerçekleştirilmiştir.

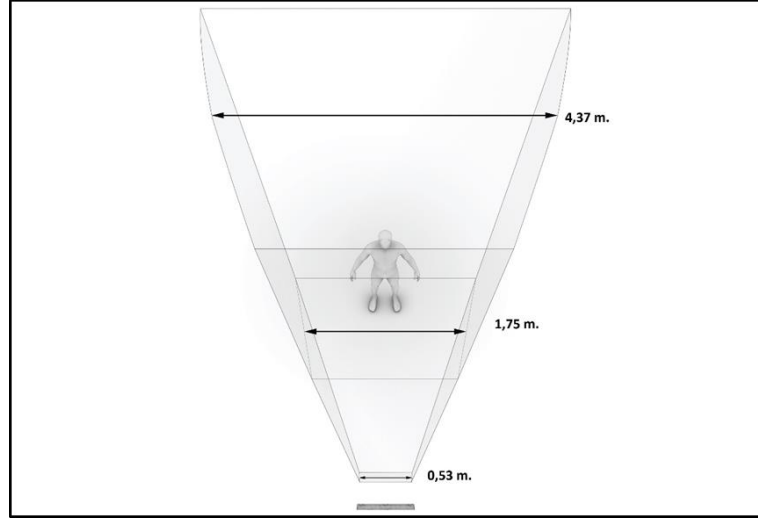


Şekil 5.5. Optitrack OptiHub cihazının görünümü

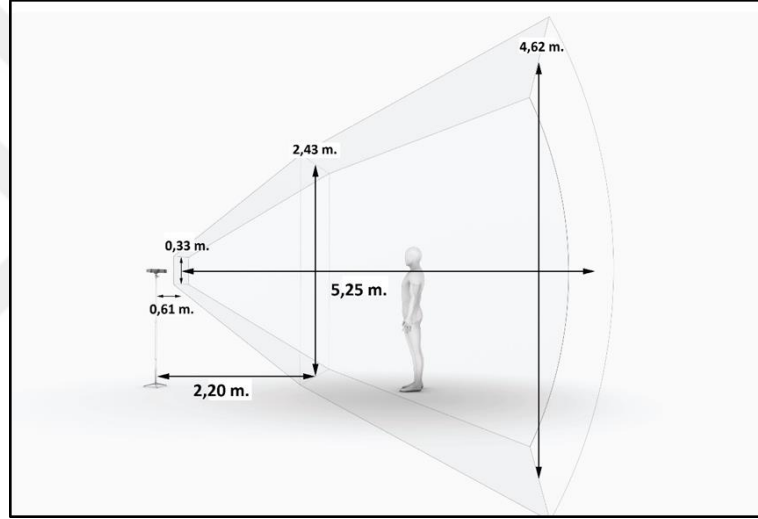
OptiHub ile 6 adet kamera aynı anda senkronlu olarak kullanılabilir. Altından fazla kamera kullanılması gereken durumlarda, OptiHub cihazları birbirlerine paralel olarak bağlanabilir ve böylelikle çok daha fazla kamera senkronlu olarak kullanılabilir. OptiHub cihazı standart olarak bir donanım kilidi ile çalışmaktadır. Optitrack kamera SDK kütüphanesi kullanılarak geliştirilen bir program ile OptiHub cihazı donanım kilidi olmadan her bilgisayarda kullanılabilir.

5.2. Donanımın Faydalı Kullanım Alanının Belirlenmesi

Çalışmada kullanılacak V120 Trio kamera ve 0.5-1.2 mm boyutlarındaki işaretçilerin algılandığı en iyi çalışma alanı için test ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda otomatik algılamanın yapılabileceği en uygun mesafe aralıkları belirlenmiştir. Şekil 5.6 ve 5.7'de uygun çalışma alanları gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Faydalı çalışma alanının üstten görünüşü



Şekil 5.7. Faydalı çalışma alanının yandan görünüşü

V120 Trio kamera ile yaklaşık 4 m genişlikte, 4 m yükseklikte ve 3 m derinlikte bir alanda sağlıklı ölçüler yapılabilmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde bu kamera ile kurulacak sistem ile futbolda penaltı atışı-serbest vuruş, voleybolda smaç, basketbolda serbest atış, voleybolda smaç, teniste servis atışı, atıcılık sporları, golf sporu vuruş teknikleri vb. hareketlerin analizi yapılabilecektir.

Ayrıca; sistem 2 den fazla kamera ile çalışabilecek bir yapıda tasarlanacağı için gerekli durumlarda daha büyük alanların kapatılarak ölçüme müsait hale getirilmesi sağlanacaktır. Bu özelliği ile sistem hem esnek bir yapıya bürünecek hem de benzerlerinden farklılık gösterecektir.

5.3. Yazılım Gereksinimleri

Ülkemizde sporcu hareketlerinin fotogrametrik yöntemlerle analiz edildiği çalışmalar incelendiğinde, görüntülerin alınması (ölçülerin yapılması) ve analizlerin yapılması süreçlerinin birbirinden farklı zamanlarda gerçekleştirildiği görülmektedir. Yani fotogrametrik çalışmalar büroda gerçekleştirilmektedir. Bu durum sporcu eğitimi için uygun bir ortam oluşturmamaktadır.

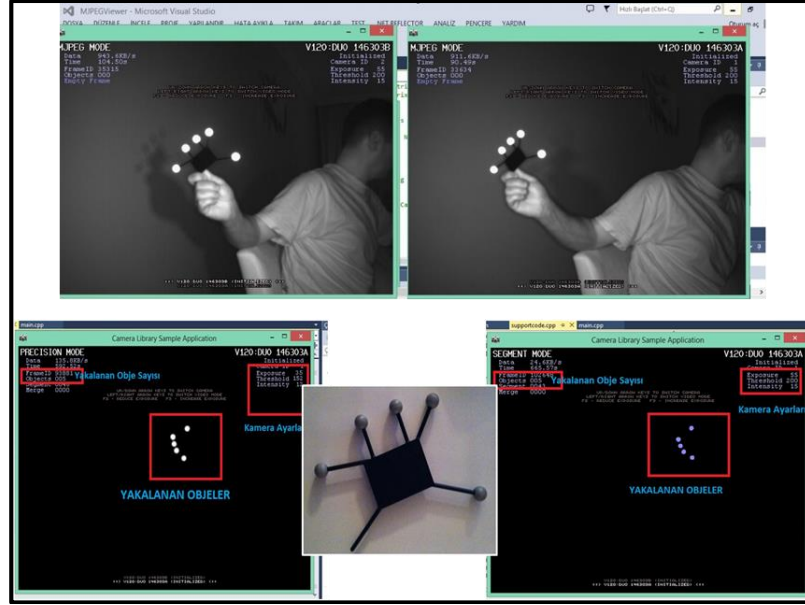
Bu açıdan bakıldığında sistemin gerçek zamanlı olarak tasarlanması önem arz etmektedir. Sporcu hareketini tamamladığı anda sistemin sonuçları ortaya çıkarması ile sporcunun hareketindeki eksiklikler/yanlışlıklar ortaya çıkarılacak ve eğitim verimliliği artacaktır.

Kamera ile birlikte gelen SDK kütüphaneleri incelenmiş ve bu kütüphaneler kullanılarak stereo görüntü alabilen uygulama geliştirilmiştir. Böylelikle Optitrack V120 kamera donanım kilidi olmaksızın her bilgisayarda kullanılabilir. Şekil 5.8'de V120 kameradan görüntü alınması ile ilgili gerçekleştirilen çalışmanın kod örneği sunulmuştur. Aynı zamanda OpenCV kütüphanesi de incelenerek kullanıcı arayüzü ve görselleştirme modüllerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

```
#include "supportcode.h"
#include "cameralibrary.h"
...
Camera *camera = CameraManager::X().GetCamera();
    int cameraWidth = camera->Width();
    int cameraHeight = camera->Height();
...
Frame *frame = camera->GetFrame();
...
```

Şekil 5.8. Optitrack V120 kamera bağlantısı kod örneği

Bu uygulamada kameranın “Precision” ve “Segment” olarak adlandırılan farklı iki görüntüleme modunda kamera bağlantısı ve veri akışı sağlanmıştır. Böylelikle görüntü üzerindeki işaretçiler otomatik olarak belirlenebilmiştir. Çalışma kapsamında test amaçlı 5 adet işaretçi takılı bir obje kullanılmıştır. “Precision” ve “Segment” modlarında 5 işaretçi de yakalanmıştır. Çalışma ile ilgili görüntüler Şekil 5.9’da sunulmuştur.



Şekil 5.9. Optitrack V120 kamera stereo görüntüsü

Sistemin Optitrack V120 model kameranın faydalı alanından daha büyük alanlarda kullanılması durumunda da yazılım altyapısı buna imkân sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda Optitrack V100 model kamera ve OptiHub cihazı ile ikiden fazla kameranın eşzamanlı çalışmasına olanak sağlayacak şekilde program geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kod örneği Şekil 5.10'da sunulmuştur.

```

#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <tchar.h>
#include "cameralibrary.h"
...
CameraManager::X().WaitForInitialization();
...
class CLAPI HubList
{
public:
    HubList();
    ~HubList() {};

    CameraEntry& operator[](int index);
    int Count() { return mCameraCount; }
    void Refresh();

protected:
    friend class CameraManager;
    void SetCount(int Value) { mCameraCount = Value; }

private:
    int mCameraCount;
    CameraEntry mCameraEntry[kMaxCameras];
};
...

```

Şekil 5.10. Optitrack OptiHub cihazı kamera bağlantısı kod örneği

Bu cihaz ile 6 adet kamera aynı anda kullanılabilir. OptiHub ile birden fazla kamera sisteme bağlanabilir ve eşzamanlı olarak görüntü aktarılabilir. SDK kütüphaneleri kullanılarak geliştirilen program ile OptiHub donanım kilidi olmadan her bilgisayarda kullanılabilir.

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında öncelikle kameralardan gelen her çerçeve eşzamanlanır, sonrasında eşzamanlaması hatasız olarak yapılan her çerçeve çiftinde yakalanan işaretçi merkezinin piksel koordinatları yazdırılır. Kullanılan kameradan saniyede 1-120 arasında çerçeve alınabilir. Gerçekleştirilen uygulamada her 100 çerçeveden birisi alınarak eşzamanlama yapılmıştır. Uygulama kod örneği Şekil 5.11'de sunulmuştur.

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <tchar.h>
#include "cameralibrary.h"
...
//Frame gruplari olusturulup senkronlaniyor...
while(!_kbhit())
{
    FrameGroup *frameGroup = sync->GetFrameGroup();
    if(frameGroup)
    {
        static int FrameBлогу = 0;
        static int frameCount = 0;
        FrameBлогу = (FrameBлогу+1)%1; //her 100 frame grubu
        senkronlaniyor...
        ...
        fprintf(dosya, "\n KameraNO   %d   ...   %d   Adet   Obje
Yakaladi\n", i, frame->ObjectCount());
        for (int j = 0; j < frame->ObjectCount(); j++)
        {
            cObject *obj = frame->Object(j);
            float x = obj->X();
            float y = obj->Y();
            printf("\n ObjeNO: %i   x: %.2f , y: %.2f\n", j, x,
y);
            fprintf(dosya, "\n ObjeNO: %i   x: %.2f , y:
%.2f\n", j, x, y);
        }
        frame->Release();
        ...
    }
}
```

Şekil 5.11. Piksel koordinatlarının eşzamanlı olarak alan kullanılan kod örneği

Örnek takip algoritması ile işaretçilerin belirlenmesi gerçekleştirilmiş ve alınan sonuçlar bir dosyaya yazdırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan 8 işaretçiden oluşan bir referans levhasına ait işaretçilerin piksel koordinatları iki kamera için de ayrı ayrı yakalanmıştır. Çizelge 5.3'te gerçek zamanlı olarak elde edilen iki çerçeve grubuna ait piksel koordinatları görülmektedir.

Çizelge 5.3. Gerçek zamanlı olarak elde edilen piksel koordinatları

Çerçeve Grubu: #1 (2 çerçeve içerir)...Senkronlandı	
KameraNO #0 ... 8 Adet Obje	KameraNO #1 ... 8 Adet Obje
ObjeNo: 0 x: 285.34 ; y: 78.98	ObjeNo: 0 x: 296.80 ; y: 84.58
ObjeNo: 1 x: 304.29 ; y: 99.96	ObjeNo: 1 x: 315.38 ; y: 104.53
ObjeNo: 2 x: 287.85 ; y: 120.22	ObjeNo: 2 x: 299.81 ; y: 125.25
ObjeNo: 3 x: 282.74 ; y: 142.95	ObjeNo: 3 x: 295.17 ; y: 147.89
ObjeNo: 4 x: 226.07 ; y: 147.22	ObjeNo: 4 x: 260.94 ; y: 153.24
ObjeNo: 5 x: 208.48 ; y: 155.76	ObjeNo: 5 x: 243.78 ; y: 162.05
ObjeNo: 6 x: 240.05 ; y: 158.70	ObjeNo: 6 x: 274.69 ; y: 164.18
ObjeNo: 7 x: 224.67 ; y: 173.13	ObjeNo: 7 x: 259.55 ; y: 178.60

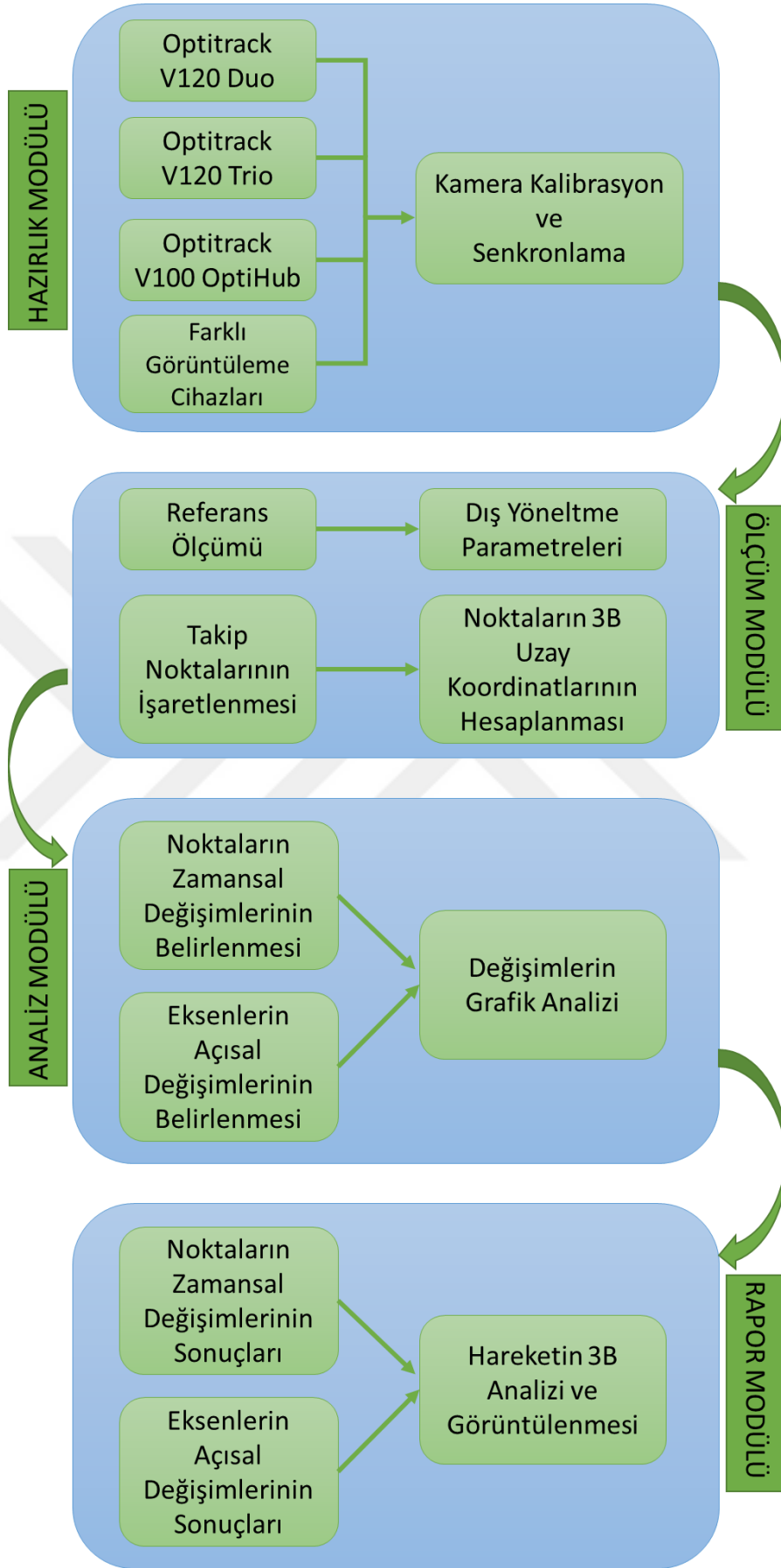
Çerçeve Grubu: #2 (2 Çerçeve içerir)...Senkronlandı	
KameraNO #0 ... 8 Adet Obje	KameraNO #1 ... 8 Adet Obje
ObjeNo: 0 x: 285.84 ; y: 76.53	ObjeNo: 0 x: 297.49 ; y: 82.12
ObjeNo: 1 x: 304.71 ; y: 97.44	ObjeNo: 1 x: 315.98 ; y: 102.02
ObjeNo: 2 x: 288.19 ; y: 117.68	ObjeNo: 2 x: 300.33 ; y: 122.70
ObjeNo: 3 x: 283.03 ; y: 140.28	ObjeNo: 3 x: 295.68 ; y: 145.24
ObjeNo: 4 x: 226.07 ; y: 147.23	ObjeNo: 4 x: 260.94 ; y: 153.25
ObjeNo: 5 x: 208.48 ; y: 155.75	ObjeNo: 5 x: 243.78 ; y: 162.05
ObjeNo: 6 x: 240.05 ; y: 158.69	ObjeNo: 6 x: 274.69 ; y: 164.18
ObjeNo: 7 x: 224.66 ; y: 173.12	ObjeNo: 7 x: 259.55 ; y: 178.60

5.4. Sistem Mimarisinin ve İş Akışının Tasarlanması

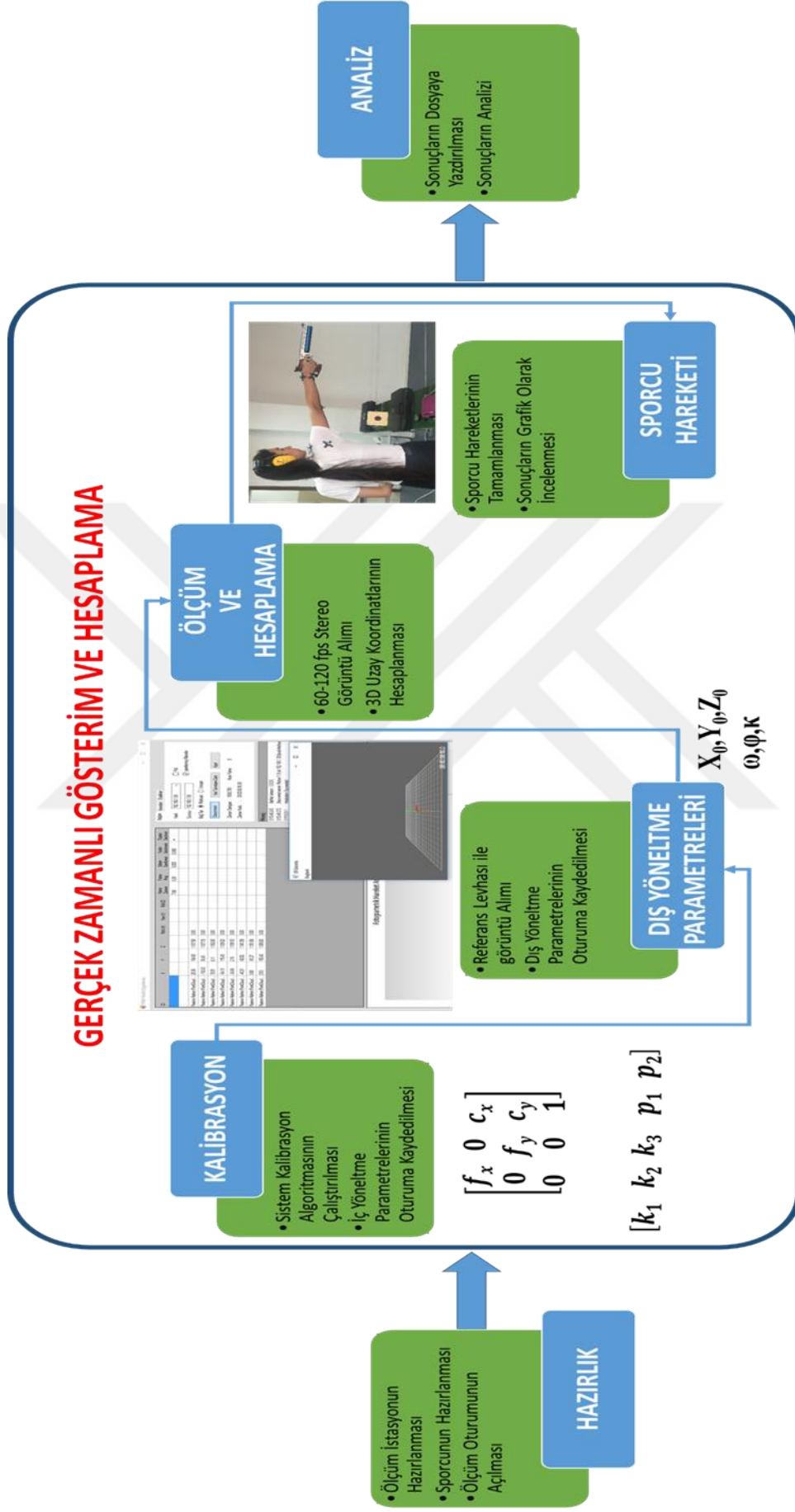
Bu tez çalışması ile elde edilecek sistemin sporcu eğitiminde kullanılması planlanmaktadır. Bu açıdan bakılırsa geliştirilen uygulama; farklı spor dallarındaki sporcuların vuruş, atış, zıplama, sıçrama vb. hareketlerinin kayıt altına alarak sporcu gelişiminde ve/veya antrenman programı hazırlanmasında altlık olabilecek sonuçları üretecektir.

Eğitilecek sporcuların hareketleri gerçek zamanlı olarak belirlenerek sporcu hareketini tamamladığı anda sonuçları görebilecektir. Böylelikle hareketin tamamlanmasının ardından yapılan hatalar veya eksiklikler anlık olarak ortaya koyulabilecektir.

Geliştirilen Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı'nın (FHAY) iş akışı Şekil 5.12'de, yazılım tasarımı ise Şekil 5.13'te sunulmuştur.



Şekil 5.12. Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı (FHAY) iş akışı



Şekil 5.13. Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı (FHAY) tasarımı

6. UYGULAMA

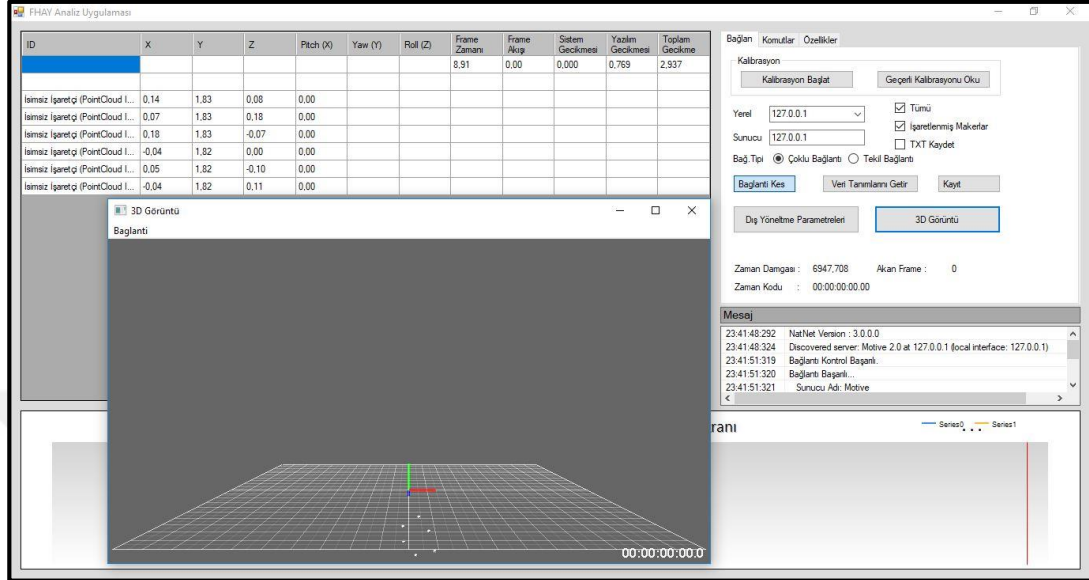
Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında fotogrametrik yöntemle sporcu hareketlerinin analiz edildiği, sporcu üzerine yerleştirilen işaretçilerin üç boyutlu koordinatlarının gerçek zamanlı olarak belirlendiği bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımın uygulanabilirliği havalı tabanca atışı yapan sporcular üzerinde test edilerek ortaya çıkarılmıştır.

6.1. Yazılımın Kullanıcı Arayüzünün Tasarımı

Hareket yakalama sistemleri kameralar ve özel seçilmiş işaretçi (marker) noktalar kullanılarak yapılabilir. Bu süreç ilk bakışta karmaşıktır ancak temel olarak altı aşamada ele alınabilirler.

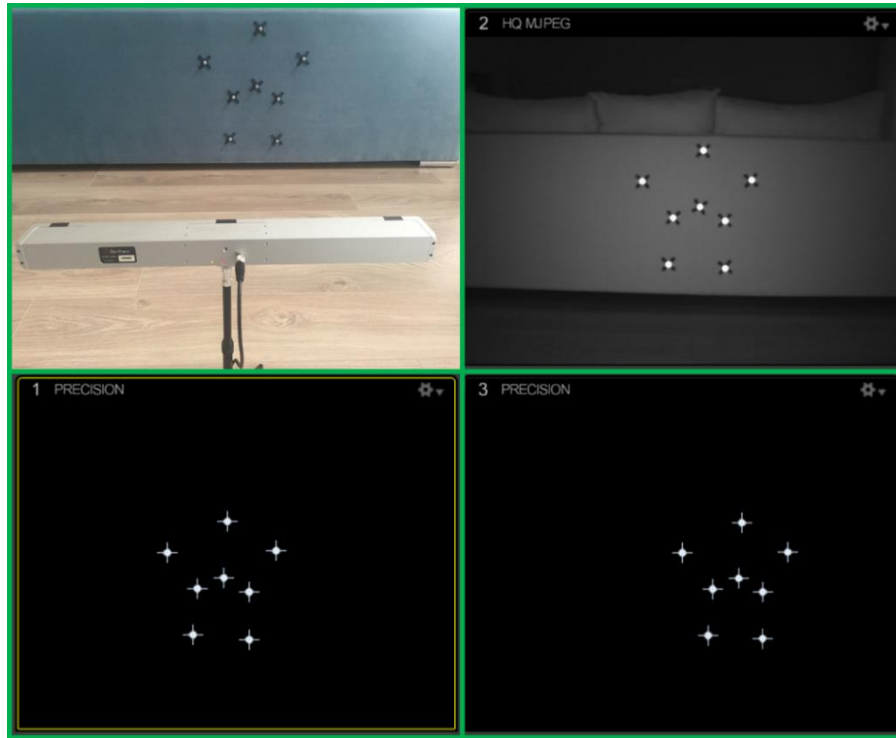
- Birinci aşama, sistemin ölçüye hazır hale getirilmesidir. Bu aşama düzenli olarak sadece sürecin başlangıcında yapılır. Kamera sisteminin ölçüye hazır hale getirilmesi, işaretçilerin yerleştirilmesi ve ilk görüntü alımı aşamalarından oluşur.
- İkinci aşama, iç yöneltme elemanlarının belirlendiği kalibrasyon aşamasıdır. Bu aşamada asal nokta koordinatları ve kamera odak uzaklığı belirlenerek sisteme kaydedilir. Ayrıca çapsal ve teğetsel distorsiyon değerleri de belirlenerek görüntü koordinatlarına düzeltme getirmek üzere kayıt altına alınır.
- Üçüncü aşama, her iki kamera için dış yöneltme parametrelerinin yani izdüşüm merkezlerinin koordinatları ve kameraların dönüklüklerinin belirlendiği aşamadır.
- Dördüncü aşama, hareketin izlenmesi olarak adlandırılır, yani vücuda yerleştirilen belirli noktaların konumu belirli bir süre boyunca izlenir.
- Beşinci aşamada, izlenen noktalarla üç boyutlu modelin oluşturulması ve görüntülenmesi gerçekleştirilir.
- Altıncı ve son aşama ise izleme sonuçlarının alınması ve bazı özel formatta veri çıktısının alınmasıdır.

Bu amaçlar doğrultusunda ölçme ve modelleme yapmak, kullanıcı etkisini en az seviyede tutmak, görsel ve doküman anlamında sonuçlar çıkarmak için Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı “FHAY” tasarlanmıştır. Sistemin kullanıcı arayüzü Şekil 6-1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı (FHAY) kullanıcı arayüzü

Şekil 6.2’de ölçüm anının gösterimi, IR filtre ile işaretçilerin görünümü ve iki kameradan senkronlu olarak otomatik yakalanan işaretçiler görülmektedir.

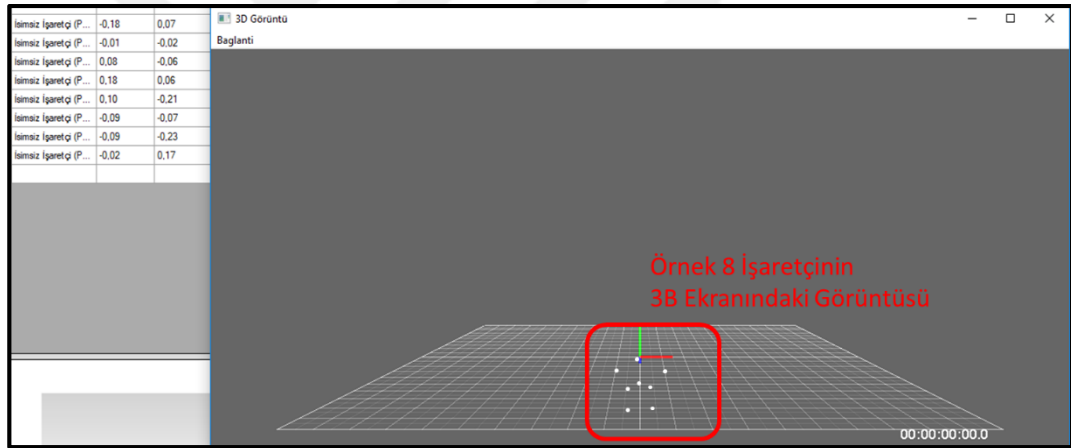


Şekil 6.2. Örnek olarak oluşturulan işaretçilerin yakalanması

FHAY; OpenCV bilgisayar görme kütüphanesi ve DirektShow görme kütüphanesi kullanılarak C++ dilinde geliştirilmiştir. Bu arayüz kullanılarak kamera çiftlerinden gelen görüntüler işlenmekte ve üç boyutlu koordinatlar görüntülenebilmektedir.

Bu arayüz Optitrack kamera SDK kütüphanesini kullanarak Optitrack kameralardan gelen bilgilere erişmekte ve üç boyutlu görüntüleme yapabilmektedir. Aynı zamanda spesifik olarak yerleştirilen işaretçilerdeki değişim gözlenebilmektedir. İki'den çok kamera kullanılacaksa veya birden fazla hareket yakalanacaksa bu sistemin kullanılması uygun olacaktır.

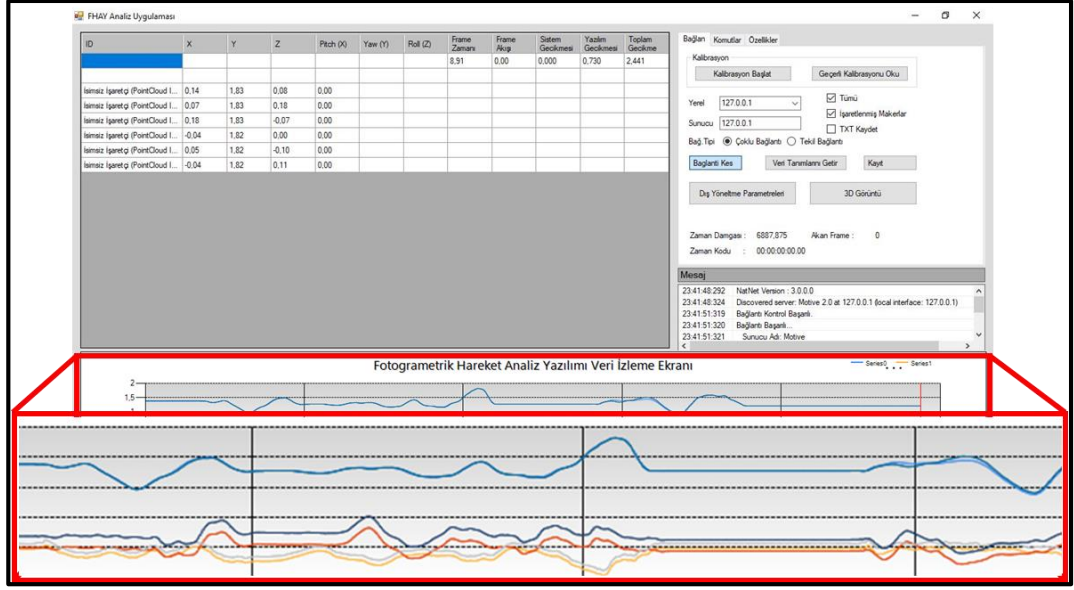
FHAY, işaretçilerin sadece koordinat değerlerini göstermekle kalmayıp bu noktaların uzaydaki dağılımını grafik olarak gösteren 3D Görüntüleme arayüzüne sahiptir. Şekil 6.3'te 3B görüntüleme arayüzü ve örnek olarak yakalanan 8 adet işaretçinin gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 6.3. FHAY 3B gösterim arayüzü

FHAY ile yakalana tüm işaretçilerin 3B koordinatları ekranda anlık olarak yazdırılır. Kordinatlardaki tüm değişimler gerçek zamanlı olarak ekranda kullanıcıya gösterilir. Aynı zamanda bu koordinatlardan istenilenler seçilebilir ve sadece ilgi alanına giren noktaların kaydedilmesi veya ekranda gösterilmesi sağlanabilir.

FHAY kullanıcı arayüzünde tasarlanan “Grafik Analiz Ekranı” ile seçilen koordinat değerlerinin ya da seçilen eksen değerlerinin karşılaştırması grafik ve gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır. Şekil 6.4'te grafik analiz ekranı görülmektedir. Bu ekran ile sporcu vücudundaki seçilen noktalardaki değişimler grafik olarak görüntülenmektedir.

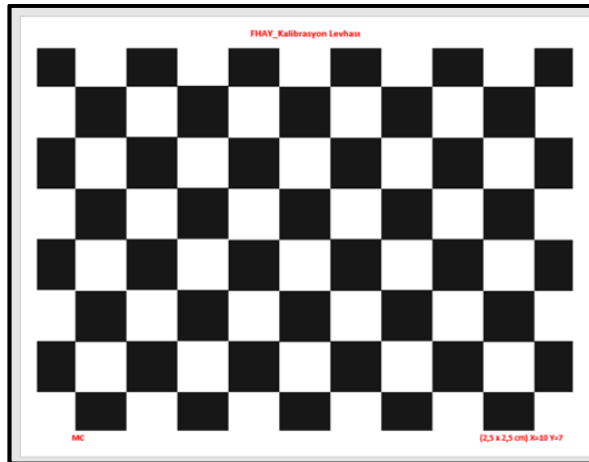


Şekil 6.4. FHAY grafik analiz ekranı

6.2. FHAY Kalibrasyon Modülünün Tasarımı

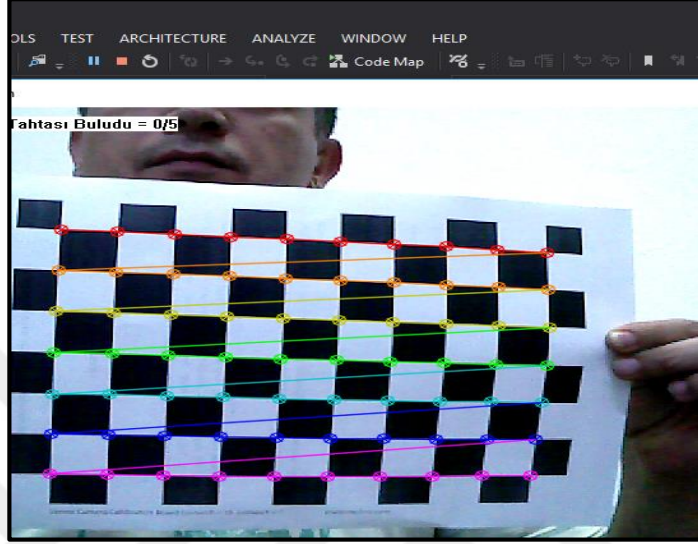
İkinci bölümde açıklanan kalibrasyon algoritmalarından “Zhang Kalibrasyon Algoritması” kullanılarak FHAY kalibrasyon modülü oluşturulmuştur. Kalibrasyon algoritması için OpenCV kütüphaneleri kullanılarak C++ dilinde bir arayüz hazırlanmıştır. Bu uygulama ile her bir kamera ayrı ayrı kalibre edilerek her kamera için kalibrasyon raporu oluşturulabilmektedir.

Kalibrasyon algoritması 2,5 cm’lik karelerden oluşan 9x6 hücre boyutlarında (10x7=70 nokta) bir satranç tahtasının ekranda yakalanması ile ölçüme başlamaktadır. Şekil 6.5’te tasarımı yapılan kalibrasyon levhası görülmektedir.



Şekil 6.5. FHAY kalibrasyon levhası

Kalibrasyon levhasını kameranın görüntüleme alanında farklı açılarla ve farklı mesafelerden tutulması ve 20 defa tekrarlı ölçü yapılması suretiyle, hesaplama algoritmasının girdi verileri elde edilir. Şekil 6.6’da tasarımı yapılan kalibrasyon levhası ile gerçekleştirilen ölçüler görülmektedir. Bu ölçüler sırasında levhadaki karelerin köşeleri otomatik olarak yakalanmaktadır.



Şekil 6.6. FHAY kalibrasyon levhasındaki köşelerin otomatik yakalanması

Kalibrasyon sonucunda iç yöneltme elemanları için; f_x, f_y piksel birimlerinde ifade edilen odak uzunlukları ile c_x, c_y asal nokta koordinatları elde edilir. Ayrıca distorsiyon matrisi ile $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ çapsal distorsiyon ve p_1, p_2 teğetsel distorsiyon değerleri elde edilir.

Elde edilen sonuçlar xml formatında bir dosyaya yazdırılmaktadır. Sonuç dosyası ve matris dizilişi Şekil 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Kalibrasyon sonucunda elde edilecek değerler

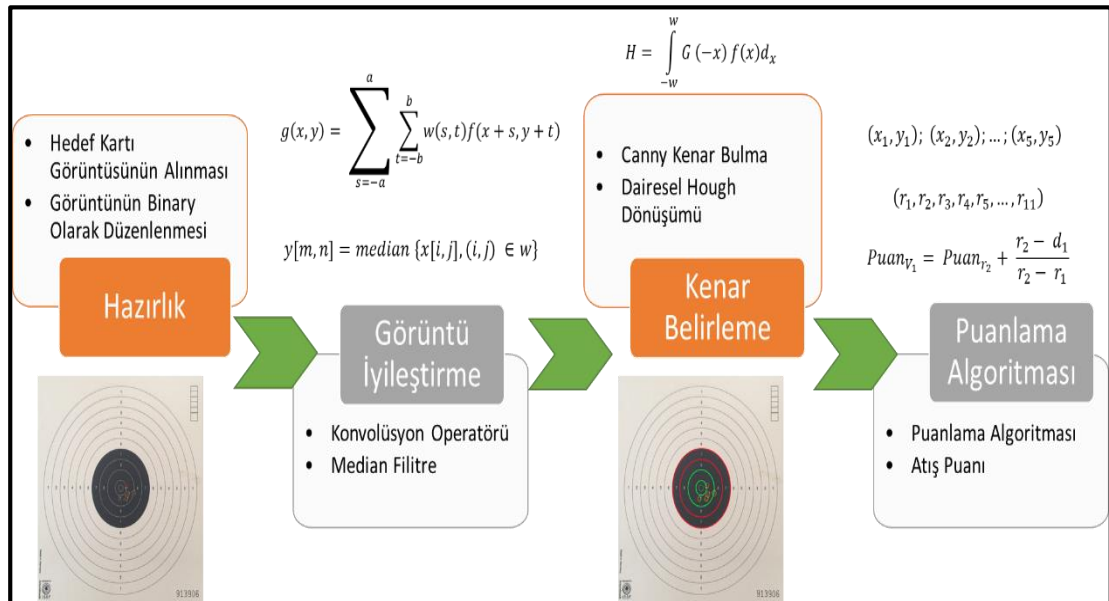
İç Yöneltme Matrisi- 3x3	Distorsiyon Matrisi - 8x1
$\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2$

6.3. Atış Kartlarını Değerlendirme Modülünün Tasarımı

Atış kartlarının değerlendirilmesinde objektiflik ve standartlığın sağlanabilmesi için kartların insan kontrolünde olmadan görüntü işleme yazılımları ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için standart görüntü işleme yazılımlarının fonksiyonları kullanılabilir gibi, OpenCV gibi açık kaynak kodlu görüntü işleme kütüphaneleri de kullanılabilir.

Atış kartlarındaki puanlama çizgilerinin ve vuruş noktalarının tanımlanması için görüntü içerisindeki sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için sıklıkla kenar bulma algoritmaları kullanılmaktadır. Bir görüntü içindeki belirgin geçişler nesne kenarlarını gösterdiğinden, kenar bulma algoritmaları bu geçişleri bulmayı amaçlamaktadır. Prewitt (1970), Sobel (1970), Canny (1986) ve Hildreth (1985) literatürdeki temel kenar bulma algoritmaları olarak kabul edilmektedir. Gri seviyeli görüntüler üzerinde bu algoritmalar kullanılarak yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır (Basu, 2002).

Hedef okuma işlemlerinin pratik ve en doğru şekilde yapılabilmesi, antrenman etkinliğini artıracak bir unsurdur. FHAY sisteminin ana unsurlarından biri de antrenman verimliliğini arttırmak olduğu için otomatik hedef puanlama yazılımı geliştirilerek FHAY sisteminin değerlendirme modülüne entegre edilmiştir. Bu modül Şekil. 6.7'deki iş akışına göre tasarlanmıştır.



Şekil 6.7. FHAY atış kartı değerlendirme modülü iş akışı

6.3.1. Konvolüsyon operatörü

Konvolüsyon (convolution), görüntü işlemede oldukça çok kullanılan bir kavramdır. Konvolüsyon, bir pikselin komşuluğundaki piksellerin ağırlıklı toplamı olarak tanımlanabilir. Ağırlıklar konvolüsyon maskesi ya da konvolüsyon kerneli olarak adlandırılan bir matris ile belirlenmektedir. Matrisin boyutları genellikle tektir ve görüntüdeki her bir piksele bu maske uygulanarak her bir pikselin yeni değeri komşu piksellerin değerleriyle onlara karşılık gelen ağırlıklarının çarpılması sonucu elde edilir (Crane, 1997).

Bir görüntünün boyutları $M \times N$ ile ifade edilirse, boyutları $m \times n$ olan bir konvolüsyon matrisi $w(s, t)$ ile işleme sokulmasından sonra oluşacak her pikselin değeri 6.1'de ifade edilen eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (6.1)$$

Bu denklemde görünen $a = (m - 1)/2$ ve $b = (n - 1)/2$ olarak ifade edilmektedir.

6.3.2. Görüntü iyileştirme (median filtreleme) aşaması

Görüntüde yer alan farklı detaylar arasındaki ayrımı ortaya çıkarma ve bir görüntünün görsel açıdan yorumlanmasını kolaylaştırılma işlemi görüntü iyileştirme olarak adlandırılmaktadır. Bunu gerçekleştirmek için ise çeşitli sayısal filtreleme matrisleri kullanılır. Görüntüdeki farkların vurgulanması, kenar çizgilerinin vurgulanması ya da giderilmesi işlemleri için farklı sayı matrisleri kullanılır (Çölkesen ve Sesli, 2007).

Median filtre; görüntü ve sinyal işleme konularında, gürültü temizlemek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Amaç, belirli bir pencere aralığındaki sayıların ortancasını (median) alarak aşırı büyük atlamaları kaldırmaktır. Yani filtre uygulandıktan sonra görüntüde bulunan ve komşularından belirgin şekilde ayrılan pikseller tespit edilerek temizlenmektedir (Qidwai ve Chen, 2010).

Median filtresinin ağırlıklı ortalama filtrelerinden farkı; ağırlıklı ortalama filtrelerinde, komşuların ağırlıklı ortalaması alınmakta, hesaplanan bu değer orijinal piksel ile yeniden ortalanarak sonuç bulunmaktadır. Ortanca filtresinde ise komşuluk değerleri dizisi şeklinde sıralandıktan sonra dizinin ortasındaki değer alınmakta ve bu

değer doğrudan sonuç olarak kabul edilmektedir. Ortanca değeri net elde edebilmek için genellikle tek sayıda komşu seçilir. Eğer hesaplamada çift sayıda komşu kullanılırsa, bu durumda ortada kalan iki pikselin aritmetik ortalaması kullanılır. 6.2 denklemini ile her bir piksele medyan filtresinin nasıl uygulanacağı görülmektedir. Burada $w [m, n]$ noktasının etrafındaki komşuları temsil eder.

$$y[m, n] = \text{median} \{x[i, j], (i, j) \in w\} \quad (6.2)$$

Median filtre; uzaysal çözünürlüğü bozmadan, kopuk (bağımsız) nokta veya çizgi gürültülerini temizlemek için kullanışlıdır. Bu nedenle ikili (binary) gürültülerde başarılı olmasına rağmen, Gauss gürültüsünde kullanışlı değildir. Gürültü piksellerinin sayısı komşu piksellerin yarısına eşit veya daha fazla ise bu filtre pek başarılı çalışmaz (Song vd.,2005).

$$\begin{bmatrix} 25 & 28 & 34 \\ 45 & 41 & 56 \\ 38 & 46 & 29 \end{bmatrix} \Rightarrow \{25, 28, 29, 34, 38, 41, 45, 46, 56\} \quad (6.3)$$

6.3'te görüldüğü üzere medyan filtresi, bir pikselin komşuluğundaki piksellerin gri ton değerlerinin küçükten büyüğe sıralanmasıyla oluşan listenin ortasındaki eleman, yani dizinin medyanı çıktı değeri olarak alınmaktadır. 3x3 büyüklüğünde bir komşuluk için medyan değeri listenin beşinci elemanıdır.

6.3.3. Görüntülerden kenar belirleme (canny algoritması)

Dijital görüntülerdeki kenar kavramı, iki farklı bölgenin birbirinden ayrıldığı sınır olarak tanımlanmaktadır. Görüntüyü oluşturan piksellerin histogram değerlerindeki lokal değişiklikler tespit edildiğinde görüntü üzerinde bir kenarın olduğu yorumlanmaktadır (Acharya ve Ray, 2005).

Kenar belirlemede amaç, görüntünün içerdiği bilgiyi değerlendirip gereksiz ve tanıma işlemlerinde zaman kaybettiren bilgileri eleyerek yeterli düzeye indirmektir. Görüntüdeki bir nesnenin kenarı, nesnenin yüzey yoğunluğundaki yani histogramındaki değişimi ile ilgilidir. Pikseller arasındaki kısa mesafede, parlaklıkta önemli oranda değişiklik oluyorsa burada bir kenar olduğu kabul edilmektedir. Kenar belirleme algoritmalarında sıklıkla kullanılan Canny kenar belirleme algoritması ile kenarlar bulunurken görüntüdeki koyuluk ve açıklık oranlarına bakılmaktadır.

Canny algoritması öncelikle 6.4 ile ifade edilen f konvolüsyon filtresi uygulanmaktadır. Bu işlem kenarların tespitini kolaylaştırmak için gerçekleştirilmektedir. Eşitlikde G kenar bilgisi için uygulanan f konvolüsyon filtresinin sonucu görülmektedir. Burada filtre $(-W, W)$ bölgesinin dışında kalan bölümleri sıfır olarak alınmaktadır (Acharya ve Ray, 2005).

$$H = \int_{-W}^W G(-x) f(x) dx \quad (6.4)$$

Canny algoritması kenar noktalarını öne çıkaran özellik f filtresini bulmaya çalışmasıdır. Bunu gerçekleştirmek için Gauss fonksiyonunun türevleri belirlenmektedir. Gauss fonksiyonu $G(x)$ 6.5 eşitliğindeki gibi ifade edilmektedir. Bu fonksiyonun x 'e göre türevi alındığında 6.6 eşitliği elde edilmektedir (Acharya ve Ray, 2005).

$$G(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6.5)$$

$$G'(x) = \left(-\frac{x}{\sigma^2}\right) e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6.6)$$

İki boyutlu bir görüntüde Gauss fonksiyonu 6.7 denkleminde ifade edildiği gibidir. Denklemlerdeki σ standart sapmayı ifade etmektedir.

$$G(x, y) = \sigma^2 e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6.7)$$

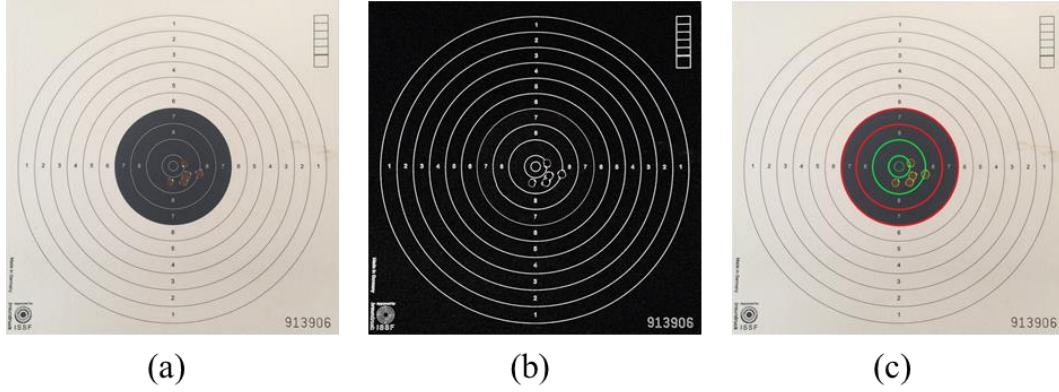
Canny kenar bulma algoritması görüntüdeki yerel maksimum tepe noktalarını takip ederek bu noktalar dışındaki tüm pikselleri sıfır olarak ayarlamaktadır. Bu işlem maksimum olmayan bölgelerin bastırılması (non-maksimum suppression) şeklinde ifade edilmektedir (Parker, 2011)

6.3.4. Görüntüdeki dairesel şekillerin belirlenmesi

Görüntüdeki dairesel şekillerin yakalanması için Bölüm 4.2'de açıklanan Dairesel Hough Dönüşümü algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ile görüntüdeki dairesel şekiller (hedef kartındaki puan çizgileri ve vuruş noktalarının oluşturduğu şekiller) tespit edilmektedir.

Bu aşamada öncelikle belirlenen dairesel şekillerin yarıçapları hesaplanarak bir diziye eklenerek sıralanmaktadır. Bu işlemin yapılmasıyla en küçük 5 yarıçap değerine

sahip daire belirlenmekte ve Şekil 6.8 (c)'de görülen sarı işaretli vuruş noktalarının şekilleri hedef kartındaki diğer şekillerden ayrılmaktadır.



Şekil 6.8. Hedef çizgileri ve vuruş şekillerinin belirlenmesi

6.3.5. Hedef kartlarından puanların belirlenmesi

Hedef puan çizgilerini ifade eden dairelerden yarıçapı en küçük olan dairenin merkezinin piksel koordinatları x, y belirlenerek hedef kartının orta noktası tespit edilmiş olmaktadır. Belirlenen bu nokta sonraki tüm hesaplamaların temelini oluşturmaktadır.

Daha önce belirlenen beş vuruş noktasının merkezinin piksel koordinatları $(x_1, y_1); (x_2, y_2); (x_3, y_3); (x_4, y_4); (x_5, y_5)$ olacak şekilde belirlenerek vuruş noktalarının merkeze olan mesafeleri $(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5)$ hesaplanmaktadır. Böylelikle vuruş noktalarının merkeze olan mesafeleri belirlenebilecektir.

Her bir vuruş noktasının merkeze olan uzaklığı, hedef puan çizgilerinin ifade ettiği dairelerin yarıçapları $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, \dots, r_{11})$ ile karşılaştırılarak hangi iki yarıçap değeri arasında kaldığı belirlenmektedir. Böylelikle vuruş noktasının puanı hesaplanmaktadır. Örneğin; r_1, r_2 arasında bir vuruş yapıldığı tespit edildiğinde, vuruşun puanı 6.8 veya 6.9 eşitliğindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$Puan_{V_1} = Puan_{r_2} + \frac{r_2 - d_1}{r_2 - r_1} \quad (6.8)$$

$$Puan_{V_1} = Puan_{r_1} - \frac{d_1 - r_1}{r_2 - r_1} \quad (6.9)$$

6.4. Uygulama için Branş ve Sporcu Seçimi

Bu tez çalışmasında FHAY uygulamasının sporcu grubu üzerinde test edilmesi için havalı tabanca atışı branşı belirlenmiştir. Bu branşın belirlenmesindeki en önemli neden, uygulamada kullanılacak donanım ile yapılan testlerde belirlenen faydalı kullanım alanı içerisinde havalı tabanca atışının gerçekleştirilebilecek olmasıdır. Aynı zamanda sporcunun hareketinin kısıtlı bir alanda gerçekleşiyor olması ve uygulama sonuçlarının objektif olarak belirlenebilmesi yani atış sonuçlarının puan değerlerinin olması da tercih aşamasında etkili olmuştur.

Atış; bir mermiyi, hedef olarak belirlenen noktaya, fırlatma eylemi olarak tanımlanabilir. Havalı tabanca atıcılığı, şekli ve boyutu önceden belirlenen hedeflere ateş etmek suretiyle gerçekleştirilmektedir. Belirlenen hedefe, isabet düzeyi yüksek atışlar yapabilmek için iyi bir atıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Atıcının atış esnasındaki pozisyonu ve dengesi atış sonuçlarını doğrudan etkileyen faktörlerdendir. (Dunning vd., 2004; Aydın, 2018).

Atıcılık sporu toplamda 15 kategoriden oluşan, olimpiik bir spordur. Olimpiyatlarda yarışması yapılan atıcılık branşları kadınlar ve erkekler için ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir.

Uygulamanın test edilebilmesi için Gazi Üniversitesi Spor Kulübü Atıcılık Takımından 2 erkek 2 kadın (Çizelge 6.2) havalı tabanca atıcısı ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Sporcu grubu oluşturulurken tecrübeli/başarılı ve tecrübesiz olacak şekilde seçim yapılmıştır. Sonraki bölümlerde erkek sporcular “ES” ve kadın sporcularda “KS” şeklindeki kısaltmalar ile tanımlanmıştır.

Çizelge 6.2. Çalışmaya katılan sporcular

Sporcu	Cinsiyet	Tecrübe	Başarı	Kısaltma
Cihat Veysel	Erkek	7 Yıl	Türkiye Şampiyonu	ES-1
Görkem Neşet Akçam	Erkek	1 Yıl	-	ES-2
Gözdem Yersu Kaya	Kadın	4 Yıl	Ankara Bölge Birincisi	KS-1
Seval Aydın	Kadın	1 Yıl	-	KS-2

Atıcının atış sırasında silahını sabit bir konumda tutuyor olması gerekmektedir. Tecrübeli sporcular, silahları tamamen hareketsiz bir konumdayken atış yapma

olanağına sahiptirler. Yeni sporcular için en önemli noktalardan biri, silahını mümkün olduğunca sabit tutmak ve silahını her zaman mükemmel bir nişanlama pozisyonuna getirmektir. Bu yeteneği geliştirmek için atıcıların yoğun egzersizler yapması gerekmektedir (Erdoğan vd., 2016).

Atış sırasında atıcının duruşu da diğer unsurlar gibi büyük bir öneme sahiptir. Atış sırasında atıcının ayakları omuz genişliğinde ayrılmış olmalıdır. Bacaklar düz olmalı, dizler eklem yerlerinde bükülmek zorunda olmasa da, büküldüğü takdirde daha sağlıklı bir atış pozisyonu sağlanmış olacaktır. Sırt düz, kafa dik ve silaha dönmüş olmalıdır (Aydın, 2018).

6.5. Seçilen Sporcuların Atış Esnasında Hareketlerinin Belirlenmesi

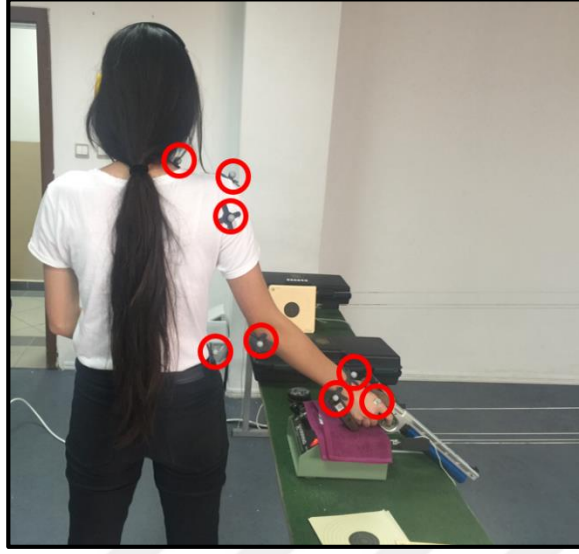
Gazi Üniversitesi Atıcılık Takımı sporcularının atış esnasında izlenmesi gerekli antropometrik noktalarının belirlenmesi ve bu noktalara işaretçilerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda atıcılık takımının antrenörü çalışmalara eşlik ederek nokta seçiminde rol almıştır.

İyi bir atış gerçekleştirebilmek için atıcının vücut dengesi çok önemlidir. Bu denge tecrübe ve iyi bir antrenman programı ile sağlanır ve geliştirilebilir. Aydın (2018) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında denge antrenmanlarının atıcıların başarılarına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada denge antrenmanlarının hem kadın, hem de erkeklerde dinamik ve statik denge performanslarını olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

“Atıcının silahı sabit tutabilmesi için öncelikli olarak kolunu düz, kaslarını sıkı ve dirseğini kilitli konuma getirmiş olması gerekmektedir. Bilek de aynı şekilde sabit konuma getirmelidir ki böylelikle ellerin istemsiz hareketinin önüne geçilmelidir. Ellerdeki ve kollardaki istemsiz oynamaların önüne geçebilmek için kol ve omuz kasları da devreye sokulmalıdır” (Aydın, 2018).

Her bir sporcuya bu bilgiler ışığında atış yapılan el, bilek, kol ve omuz bölgesine toplam 7 işaretçi, gövdenin hareket edip etmediğini görebilmek adına bel hizasına da bir işaretçi olmak üzere toplam 8 işaretçi yerleştirilmiştir. Şekil 6.9’da bir atıcının vücuduna yerleştirilen işaretçiler görülmektedir. Bu kapsamda; clavicle (köprücük kemiği), scapula (kürek kemiği), acromion (omuz çıkıntısı), capitulum (dirsek noktası), trapezium bone (bilek üstü), psiform bone (bilek alt), işaret parmağı

metakarpo falangeal eklemi (tetik parmağı) ve greater trochanter (bel) noktalarına işaretçiler yerleştirilmiştir.



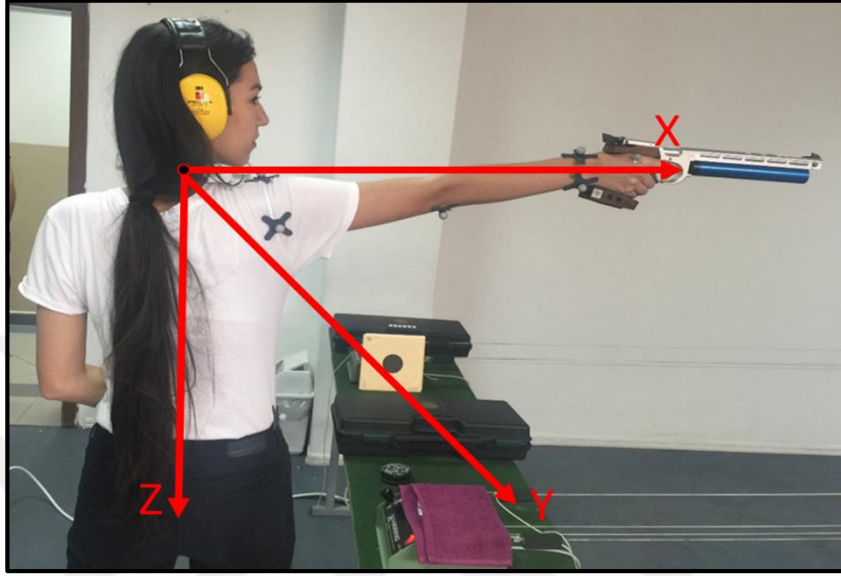
Şekil 6.9. Sporcu üzerine işaretçilerin yerleştirilmesi

Uygulamada tüm sporcular kendilerine ait ekipmanları ile tek oturumda 5 atış gerçekleştirmişler ve bu atışların tamamına ait koordinatlar kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen tüm atışlar aynı yolda yapılarak atış esnasındaki şartların eşit olması sağlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalardan örnekler Şekil 6.10'da sunulmuştur.



Şekil 6.10. Gerçekleştirilen çalışmadan örnek görüntüler

Birinci sporcunun ilk atışında 8 vücut noktası toplam 83 tekrar olarak ölçülmüş ve 664 üç boyutlu nokta kayıt altına alınmıştır. Atış anı ve koordinat eksenleri Şekil.6.11’de sunulmuştur. Uygulama sonucunda alınan kayıtların bir örneği 2 tekrar olacak şekilde Çizelge 6.3’te sunulmuştur.



Şekil 6.11. Ölçüm anında kullanılan koordinat sistemi ve eksenler

Çizelge 6.3. Atış kayıtlarından örnek koordinatlar ve nokta açıklamaları

Ölçü Grubu	Antropometrik Nokta	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	Scapula (Kürek kemiği)	-0,0872	1,6528	0,3150
	Trapezium Bone (Bilek Üst)	-0,6097	1,7724	0,4511
	Psiform Bone (Bilek Alt)	-0,5316	1,7692	0,3943
	Clavicle (Köprücük kemiği)	0,0385	1,6737	0,3935
	Metakarpo Falangeal (El)	-0,5266	1,7896	0,4553
	Acromion (Omuz Çıkıntısı)	-0,0475	1,6959	0,3996
	Capitulum (Dirsek Noktası)	-0,3185	1,7718	0,3384
	Greater Trochanter (Bel)	-0,0706	1,7031	-0,0572
2	Scapula (Kürek kemiği)	-0,0872	1,6532	0,3147
	Trapezium Bone (Bilek Üst)	-0,6094	1,7719	0,4514
	Psiform Bone (Bilek Alt)	-0,5318	1,7694	0,3944
	Clavicle (Köprücük kemiği)	0,0387	1,6733	0,3931
	Metakarpo Falangeal (El)	-0,5262	1,7887	0,4556
	Acromion (Omuz Çıkıntısı)	-0,0474	1,6963	0,3991
	Capitulum (Dirsek Noktası)	-0,3181	1,7724	0,3379
	Greater Trochanter (Bel)	-0,0709	1,7029	-0,0570

7. BULGULAR

Bu tez çalışmasının uygulamasında; havalı tabanca atıcılarının vücutlarına yerleştirilen işaretçilerin gerçek zamanlı koordinatlarının belirlenmesi ile atıcıların hareketlerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle donanım ve yazılım altyapısı oluşturulan FHAY yazılımının gerçek sporcu grubunda kullanılabilirliği ve tutarlılığı incelenmiştir. Yazılımın esnek yapısı ve farklı spor branşlarına uygulanabilir olması gerçekleştirilen uygulamada da ortaya çıkmıştır.

7.1. Kalibrasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Tezin 6.2 bölümünde açıklanan kalibrasyon algoritması ile 6 parametreden oluşan çapsal distorsiyon ve 2 parametreden oluşan teğetsel distorsiyon değerleri hesaplanabilecektir. Ancak uygulamada hangi parametrelerin kullanılmasının anlamlı olacağını belirlemek için parametre anlamlılık testi gerçekleştirilmiştir. Bu teste girdi olacak şekilde farklı kalibrasyon değerlerinin kombinasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu uygulamanın gerçekleştirilmesi için tasarlanan kalibrasyon levhasındaki 70 köşe noktasının koordinatları piksel değeri biçiminde otomatik olarak tespit edilmiştir. Piksel koordinatlarından görüntü koordinatlarına dönüşüm yapılması konusu tezin 2.3 bölümünde teorik olarak ele alınmıştır. Bu bölümdeki bilgiler ışığında dönüşümde kullanılacak kameraya ait piksel fiziksel boyutu ve çerçeve boyutu bilgileri Çizelge 7.1’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. Çerçeve boyutu ve bir pikselin fiziksel boyutu

Piksel Fiziksel Boyutu (mm)	Çerçeve Fiziksel Boyutu 640x480 piksel	
	dx (mm)	dy (mm)
0,006	3,84	2,88

Çizelge 7.2’de 70 noktaya ait otomatik olarak belirlenen piksel koordinatları ve bunlardan elde edilen görüntü koordinatları sunulmuştur.

Çizelge 7.2. Kalibrasyon için ölçülen noktaların piksel ve görüntü koordinatları

Nokta No	Piksel Koordinatları (piksel)		Görüntü Koordinatları (m)		Nokta No	Piksel Koordinatları (piksel)		Görüntü Koordinatları (m)	
	x'	y'	x	y		x'	y'	x	y
1	82,3350	71,9386	-0,912634	0,484017	36	179,6675	284,8430	-0,538877	-0,129148
2	80,2794	124,2286	-0,920527	0,333422	37	177,8075	336,7368	-0,546019	-0,278602
3	78,3110	176,1157	-0,928086	0,183987	38	337,8525	188,7533	0,068554	0,147590
4	76,1844	228,6047	-0,936252	0,032818	39	388,8355	141,0555	0,264328	0,284960
5	74,6355	281,1536	-0,942200	-0,118522	40	387,3694	191,0961	0,258698	0,140843
6	336,1086	239,8031	0,061857	0,000567	41	340,9323	88,6610	0,080380	0,435856
7	334,1480	290,8282	0,054328	-0,146385	42	330,2972	392,6445	0,039541	-0,439616
8	332,2752	341,9743	0,047137	-0,293686	43	390,3566	91,9956	0,270169	0,426253
9	290,7515	85,0895	-0,112314	0,446142	44	525,3280	395,7823	0,788460	-0,448653
10	130,9898	178,7068	-0,725799	0,176524	45	72,0283	333,9989	-0,952211	-0,270717
11	128,8854	230,8036	-0,733880	0,026486	46	70,0273	386,6898	-0,959895	-0,422467
12	126,9422	282,9368	-0,741342	-0,123658	47	384,1715	292,3053	0,246419	-0,150639
13	124,9175	335,1252	-0,749117	-0,273961	48	433,6953	294,2225	0,436590	-0,156161
14	123,1939	387,2896	-0,755735	-0,424194	49	532,6054	150,7773	0,816405	0,256961
15	188,3484	78,4019	-0,505542	0,465403	50	279,2682	391,2218	-0,156410	-0,435519
16	185,8890	129,8948	-0,514986	0,317103	51	477,8648	394,7833	0,606201	-0,445776
17	183,7207	180,9307	-0,523313	0,170120	52	339,3327	138,2859	0,074238	0,292937
18	229,6189	338,4489	-0,347063	-0,283533	53	438,0082	144,6800	0,453151	0,274522
19	227,9577	390,1328	-0,353442	-0,432382	54	436,7339	194,0353	0,448258	0,132378
20	237,7379	132,6686	-0,315886	0,309114	55	133,6813	126,9051	-0,715464	0,325713
21	176,1410	388,5955	-0,552419	-0,427955	56	438,9223	95,3004	0,456662	0,416735
22	239,8461	81,9366	-0,307791	0,455223	57	486,8215	98,9810	0,640595	0,406135
23	481,9088	295,9014	0,621730	-0,160996	58	485,7458	147,9057	0,636464	0,265232
24	235,2071	183,4342	-0,325605	0,162910	59	484,6629	196,7932	0,632306	0,124436
25	233,0618	235,0877	-0,333843	0,014147	60	483,2109	246,2263	0,626730	-0,017932
26	231,2799	286,4896	-0,340685	-0,133890	61	429,1811	394,1095	0,419255	-0,443835
27	284,8667	237,6660	-0,134912	0,006722	62	480,0446	345,2666	0,614571	-0,303168
28	282,9058	289,0224	-0,142442	-0,141185	63	528,8549	297,2319	0,802003	-0,164828
29	386,0299	241,9545	0,253555	-0,005629	64	526,7079	346,3743	0,793758	-0,306358
30	288,7434	135,5826	-0,120025	0,300722	65	530,3108	248,1799	0,807593	-0,023558
31	286,7089	186,1502	-0,127838	0,155087	66	135,9886	75,1058	-0,706604	0,474895
32	382,1016	342,9383	0,238470	-0,296462	67	435,0737	244,0086	0,441883	-0,011545
33	380,2872	393,2126	0,231503	-0,441252	68	431,1845	344,1667	0,426948	-0,300000
34	281,0809	340,2996	-0,149449	-0,288863	69	533,7739	102,3645	0,820892	0,396390
35	181,3388	232,4879	-0,532459	0,021635	70	531,1847	199,1725	0,810949	0,117583

70 noktadan oluşan kalibrasyon levhasından her kalibrasyon denemesinde 20 tekrar olacak şekilde kalibrasyon ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Distorsiyon parametreleri 5 farklı kombinasyonda hesaplanarak elde edilen değerlere göre görüntü koordinatlarına düzeltmeler getirilmiştir. Bu uygulamanın amacı kalibrasyon parametrelerinin anlamlılığının test edilmesidir. Parametre anlamlılık testinin girdi verisi olarak kullanılacak kalibrasyon sonuçları çizelge 7.3'te sunulmuştur.

Çizelge 7.3. Farklı parametrelerin elde edildiği kalibrasyon sonuçları

İç Yönelme Matrisi- 3x3	Distrsiyon Matrisi Elemanları	Distorsiyon Değerleri
$\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
$\begin{bmatrix} 912,2482 & 0 & 331,8517 \\ 0 & 911,3274 & 270,3432 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[k_1, k_2]$	$[-0,2844 \ 1,5322]$
$\begin{bmatrix} 912,3260 & 0 & 331,8679 \\ 0 & 911,4060 & 270,3418 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[k_1, k_2, k_3]$	$[-0,2888 \ 1,6204 \ -0,4927]$
$\begin{bmatrix} 910,9329 & 0 & 329,4100 \\ 0 & 910,0891 & 267,5060 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[k_1, k_2, p_1, p_2]$	$[-0,2904 \ 1,5873 \ -0,0019 \ -0,0010]$
$\begin{bmatrix} 910,9229 & 0 & 329,4043 \\ 0 & 910,0789 & 267,5062 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]$	$[-0,2898 \ 1,5754 \ 0,0676 \ -0,0019 \ -0,0010]$
$\begin{bmatrix} 910,9227 & 0 & 329,4018 \\ 0 & 910,0776 & 267,5061 \\ & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2]$	$[-0,2835 \ 1,5723 \ 0,5761 \ 0,0004 \ 0,0002 \ 0,0001 \\ -0,0017 \ -0,0013]$

Bu çizelgedeki değerlere göre elde edilen düzeltilmiş görüntü koordinatları ise Ekler bölümünde EK 1 – EK 5'de sunulmuştur.

Kalibrasyon algoritması kullanılarak elde edilen çapsal ve teğetsel distorsiyon değerleri kullanılarak elde edilen düzeltilmiş görüntü koordinatları, önceki bölümde sunulmuştur. Çekim alanına homojen dağılmış 70 adet noktanın her birine uygulanan düzeltmeler neticesinde distorsiyonsuz görüntü koordinatları elde edilmiştir.

Her bir noktanın x, y düzeltilmiş koordinatları ve ham koordinatları kullanılarak $\Delta x, \Delta y$ değerleri belirlenmiş, bu değerler kullanılarak doğrusal düzeltme değerleri (d) hesaplanmıştır.

T-testi istatistiki hipotez testler arasında en yaygın olarak kullanılan testtir. İki grup verinin ortalamaları arasında belirgin bir farklılık olup olmadığını istatistiksel olarak belirlemeye çalışan bir yaklaşım olarak tanımlanabilir. T-testi'nin bir diğer adı student testidir. Küçük örnekler sınama tekniği olarak da bilinir. Bağımsız iki grup arasında anlamlı bir farklılık bulunup bulunmadığının belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. Çizelge 7.4'da T-testinde kullanılacak eşleştirilmiş örnek istatistikleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. T-testi eşleştirilmiş örnek istatistikleri

	Örneklem		Standart Sapma	
	Ortalama	Sayısı	Standart Sapma	Ortalama Hatası
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	$\bar{x} = 0,98649433$	$n=70$	$s_1 = 0,546041557$	0,065264449
Kalibrasyon_2 [k_1, k_2, k_3]	$\bar{y} = 0,98646045$	$m=70$	$s_2 = 0,546952717$	0,065373354
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	$\bar{x} = 0,98649433$	$n=70$	$s_1 = 0,546041557$	0,065264449
Kalibrasyon_3 [k_1, k_2, p_1, p_2]	$\bar{y} = 0,96267167$	$m=70$	$s_2 = 0,564050811$	0,067416967
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	$\bar{x} = 0,98649433$	$n=70$	$s_1 = 0,546041557$	0,065264449
Kalibrasyon_4 [k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]	$\bar{y} = 0,96268781$	$m=70$	$s_2 = 0,563990600$	0,067409770
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	$\bar{x} = 0,98649433$	$n=70$	$s_1 = 0,546041557$	0,065264449
Kalibrasyon_5 [$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2$]	$\bar{y} = 0,96270999$	$m=70$	$s_2 = 0,563982360$	0,067408785

İlişkili (bağımlı) t-testi ilişkili iki örneklemden elde edilen 2 ortalama arasındaki farkın anlamlılığını test etmek üzere kullanılmaktadır. Bu yöntem örneklem varyanslarının homojen ve örneklemin normal dağılımda olduğu zamanlarda kullanılmaktadır. Birbirinden farklı zamanlarda ya da farklı yöntemlerle elde edilmiş iki veri setinin arasında anlamlı bir fark olup olmadığı araştırıldığı için bu yöntem tercih edilmiştir.

$H_0 : \mu_D = 0$ ve $H_1 : \mu_D \neq 0$ hipotezleri kurularak iki veri seti arasındaki anlamlı fark olup olmadığı irdelenmiştir. Oluşturulan hipotezlerin t kritik değerleri 7.1 ve 7.2 eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Burada μ örneklem ortalamalarını n ve m örneklem sayılarını, s örneklemelerin standart sapmasını \bar{x} ve \bar{y} örneklem ortalamalarını ifade etmektedir.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (7.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}{n+m-2}} \quad (7.2)$$

Hangi distorsiyon parametrelerinin ve hangi distorsiyon değerlerinin kullanımının anlamlı bir fayda sağlamayacağını belirlemek için uygulanan T-testinin sonuçları Çizelge 7.5'deki gibidir. Bu test "SPSS Statistic" yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.5. Bağımlı örnekler için T-testi sonuçları

	Ortalama	Standart Sapma S	Standart Sapma Ortalama Hatası	95% Güven Aralığında Farkın Alt Sınır	95% Güven Aralığında Farkın Üst Sınır	t	Sig. (2-tailed)
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	0,00003388	0,01120210	0,00133890	-0,00263716	0,00270493	0,025	0,9800
Kalibrasyon_2 [k_1, k_2, k_3]							
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	0,02382266	0,12234746	0,01462331	-0,00535005	0,05299531	1,629	0,0108
Kalibrasyon_3 [k_1, k_2, p_1, p_2]							
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	0,02380652	0,12232951	0,01462117	-0,00536192	0,05297496	1,628	0,0108
Kalibrasyon_4 [k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]							
Kalibrasyon_1 [k_1, k_2]	0,02378434	0,12231495	0,01461943	-0,00538063	0,05294931	1,627	0,0108
Kalibrasyon_5 [$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2$]							

Çizelge 7.5’de sunulan T-testi sonuçları incelendiğinde $t = 1,629$ ve anlamlılık düzeyi $p = 0,0108$ olduğu görülmektedir. Burada $p=0,0108 < 0,05$ olduğu için %95 güven aralığında [k_1, k_2, p_1, p_2] distorsiyon değerleri ile yapılan düzeltmelerin anlamlı olduğu, [k_3, k_4, k_5, k_6] değerlerinin kullanılmasının anlamlı olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

7.2. Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dört atıcının tek oturumda ve süre sınırlaması olmadan gerçekleştirdiği uygulamanın özeti Çizelge 7.6’da, atış esnasında otomatik olarak toplanan nokta sayıları Çizelge 7.7’de sunulmuştur. Sporcuların atışları esnasında vücutlarında bulunan 8 işaretçi saniyede 10 tekrar olacak şekilde, atış boyunca kesintisiz ve otomatik olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.6. Atış süreleri ve puanları

	1. Atış		2. Atış		3. Atış		4. Atış		5. Atış		Ortalama	
	Puan	Süre (sn)	Puan	Süre (sn)	Puan	Süre (sn)	Puan	Süre (sn)	Puan	Süre (sn)	Puan	Süre (sn)
ES-1	9,8	8,3	9,6	11,6	10,3	12,1	9,1	10,6	9,8	9,7	9,7	10,5
ES-2	9,3	7,9	9,3	11,1	9,1	10,6	9,2	11,6	8,0	12,3	9,0	10,7
KS-1	9,1	24,7	10,6	9,9	8,9	11,1	9,1	21,8	9,6	22,2	9,5	17,9
KS-2	9,0	7,4	9,9	12,6	9,5	11,2	9,1	13,3	8,2	10,3	9,1	11,0

Çizelge 7.7. Atış süreleri ve ölçülen nokta sayıları

	1. Atış		2. Atış		3. Atış		4. Atış		5. Atış	
	Süre (sn)	Ölçülen Nokta Sayısı	Süre (sn)	Ölçülen Nokta Sayısı	Süre (sn)	Ölçülen Nokta Sayısı	Süre (sn)	Ölçülen Nokta Sayısı	Süre (sn)	Ölçülen Nokta Sayısı
ES-1	8,3	664	11,6	928	12,1	968	10,6	848	9,7	776
ES-2	7,9	632	11,1	888	10,6	848	11,6	928	12,3	984
KS-1	24,7	1976	9,9	792	11,1	888	21,8	1744	22,2	1776
KS-2	7,4	592	12,6	1008	11,2	896	13,3	1064	10,3	824

7.3. Uygulama Sonuçlarının Grafik İncelemesi

Gerçekleştirilen çalışmanın daha sağlıklı yorumlanması ve elde edilen verilerin görsel olarak desteklenmesi için sonuçlar grafik olarak ele alınmıştır. Grafikler, sayısal verileri görselleştirerek bunlar arasında karşılaştırmalar yapılabilmesine imkân tanımaktadır. Böylece sayısal verilerin anlaşılması ve yorumlanması mümkün olur. Tablo değerlerinin grafiklere dönüştürülmesi suretiyle verilerdeki artış ve azalışların tespit edilmesi, değerlendirmeye tâbi tutulması ve karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

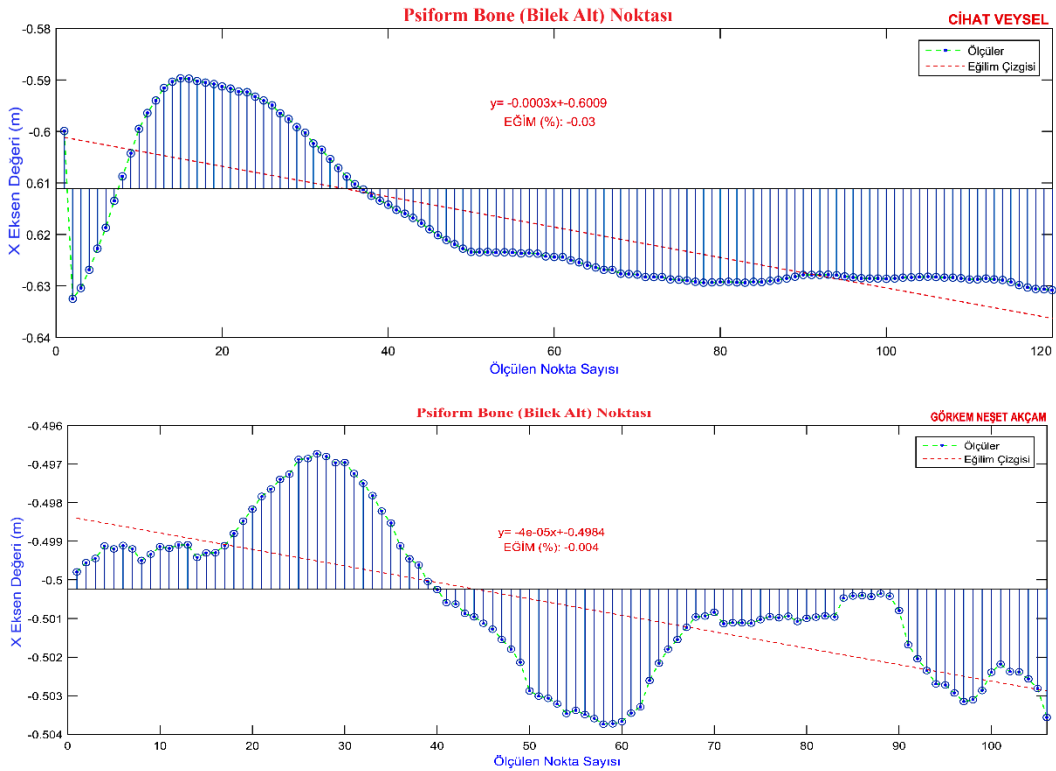
Doğrusal denklem, terimlerinin her biri ya birinci dereceden değişken ya da bir sabit olan denklemlerdir. Böyle denklemlere "doğrusal" denmesinin nedeni içerdikleri terim ve değişkenlerin sayısına bağlı olarak (n) düzlemde ya da uzayda bir doğru belirtmesindedir. Doğrusal denklemlerin en yaygını bir x ve y değişkeni içeren formdur. Grafiklerde tanımlanan $y = mx + b$ doğrusal denkleminde m değeri doğrunun eğimini b değeri ise doğrunun y eksenlerini keseceği noktayı ifade etmektedir.

7.3.1. Psiform bone (Bilek alt) noktası hareketinin analizi

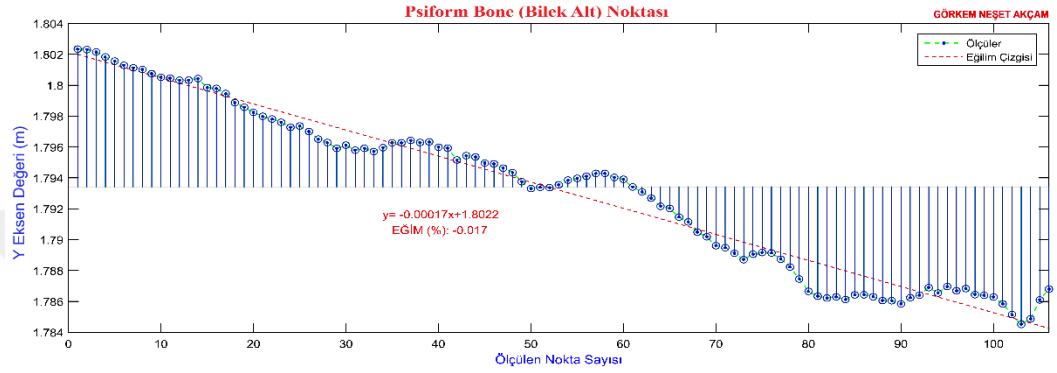
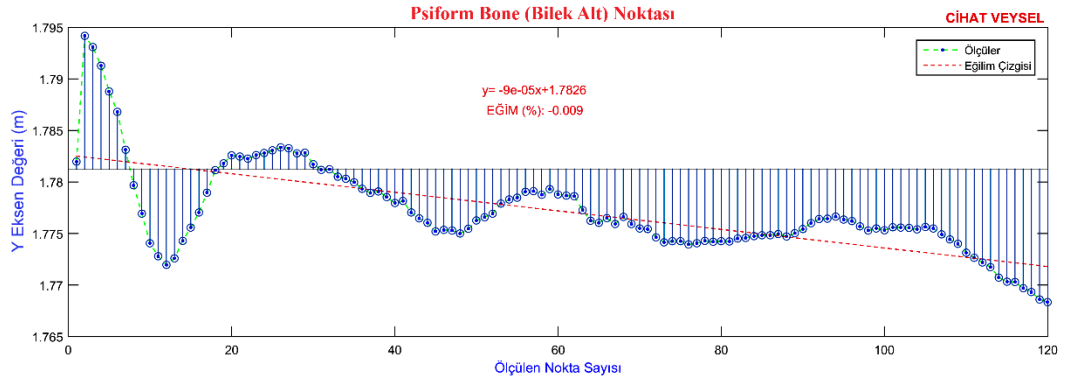
Bu bölümde erkek ve kadın sporcuların psiform bone noktasına yerleştirilen işaretçinin atış süresince kaydedilen koordinatları X, Y ve Z eksenlerinde ayrı ayrı ele alınarak incelenmiştir. Sonuçların sunulduğu grafiklerde sporcu vücudundaki ölçülen her bir noktanın incelenen eksenine ait koordinatları ele alınmıştır. Grafikler, belirlenen bir vücut noktasının atış boyunca kaydedilen koordinatlarından bir eksen değeri ve kaydedilen nokta sayısı ile oluşturulmuştur. Aynı zamanda oluşan grafik doğrusal bir denklem ile temsil edilmiştir.

Sporcuların gerçekleştirdiği en iyi atışlar, psiform bone noktasına yerleştirilen işaretçinin koordinat değişimleri yönünden incelenmiştir. Bu kapsamda bilek alt noktasının üç eksendeki hareketleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Atış esnasında tabancanın tutulduğu elin tabanca ağırlığında en çok etkileneceği noktalardan birisi bilek noktasıdır. Bu nokta atış süresince ne kadar hareketsiz kalırsa o kadar istikrarlı bir atış gerçekleştirilebilir.

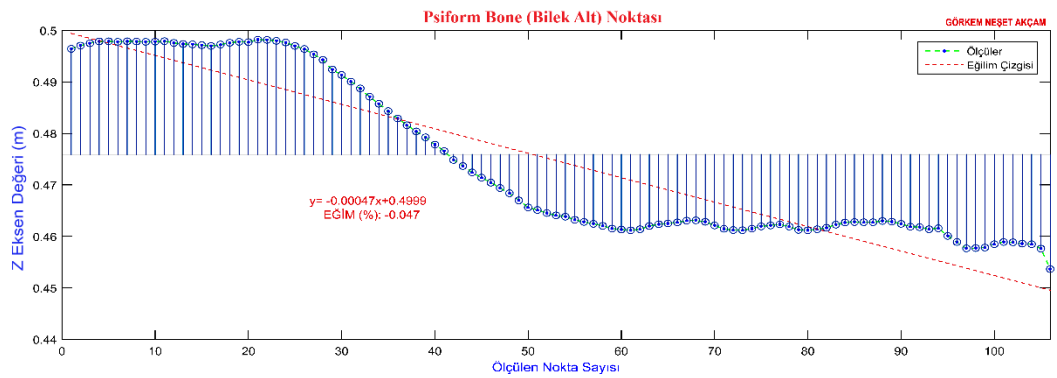
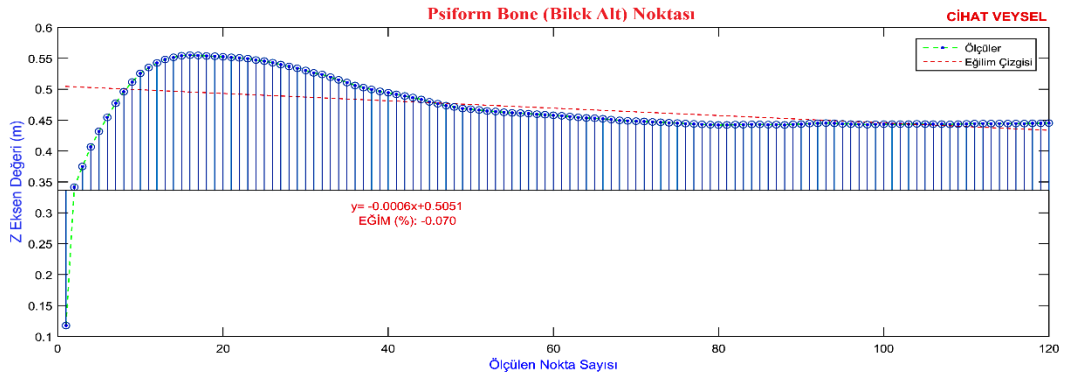
ES-1 ve ES-2'nin en yüksek puanı aldıkları atışında psiform bone noktasının koordinat eksenlerine göre hareketleri Şekil 7.1 – 7.3'te sunulmuştur.



Şekil 7.1. Erkek sporcuların psiform bone noktası X-ekseni değişimleri



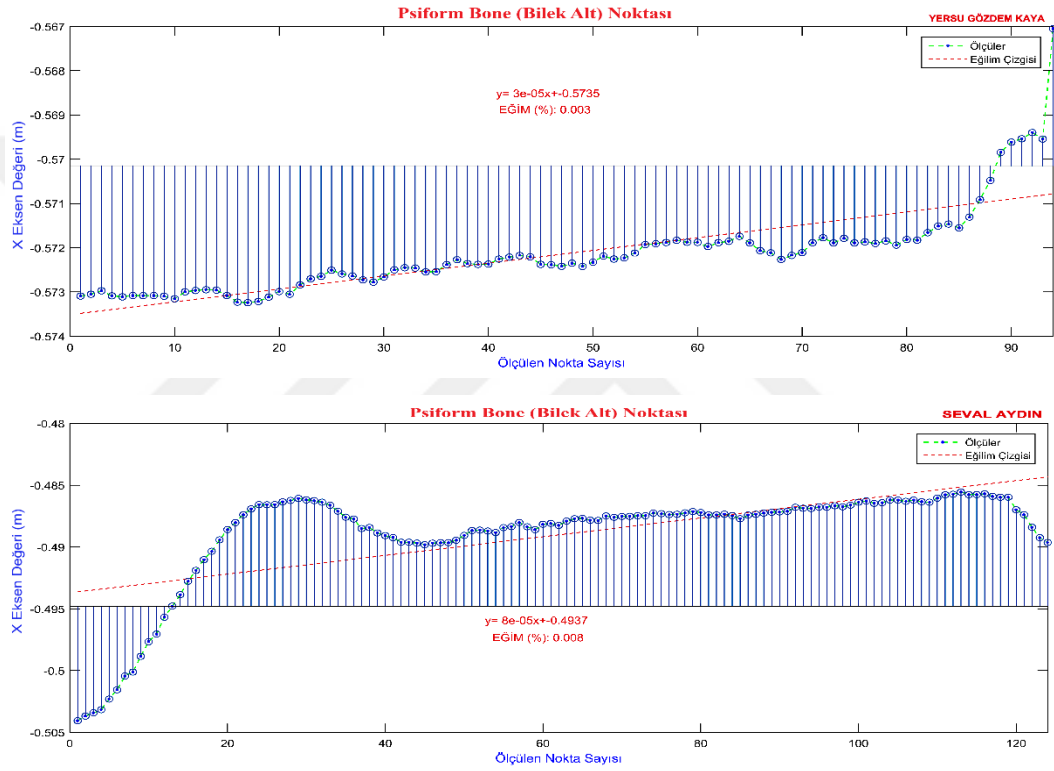
Şekil 7.2. Erkek sporcuların psiform bone noktası Y-ekseni değişimleri



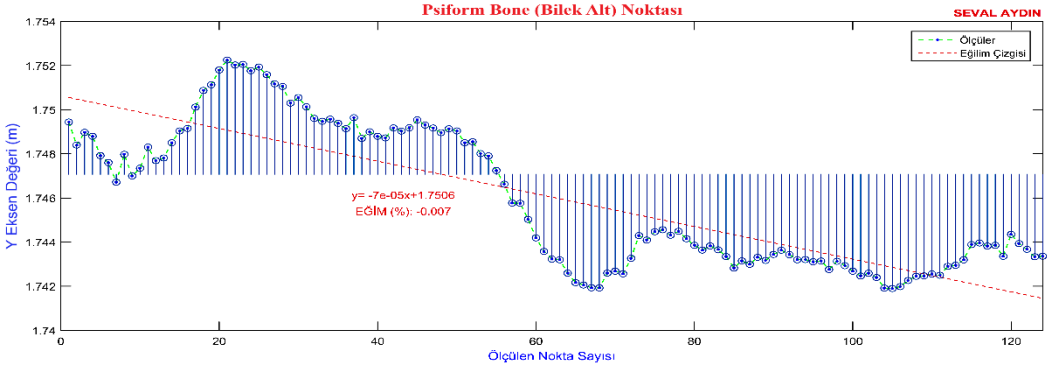
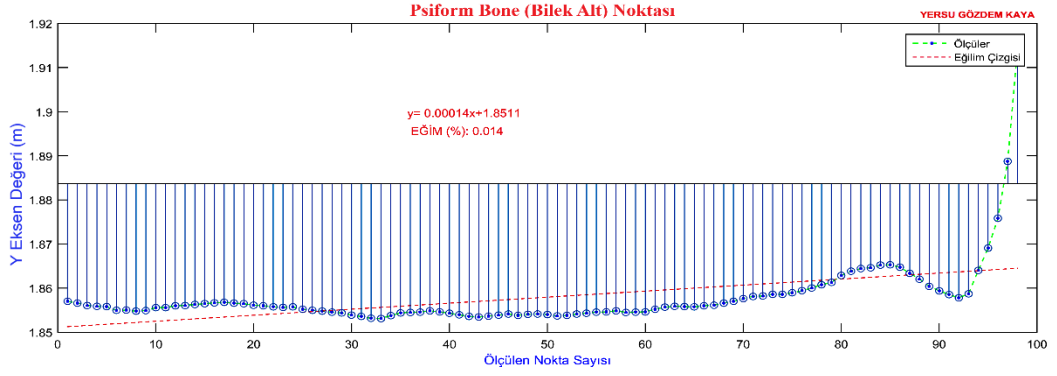
Şekil 7.3. Erkek sporcuların psiform bone noktası Z-ekseni değişimleri

Şekil 7.1 – 7.3'teki grafikler incelendiğinde tecrübeli atıcının Z-ekseni yönünde çok stabil bir atış gerçekleştirdiği buna karşın tecrübesiz sporcunun bu eksendeki hareketi ile silahını atışın 4'üncü saniyesinden (40'ıncı noktadan) sonra aşağıya doğru kaydıracağı görülmektedir. Aynı şekilde tecrübesiz sporcu Y-ekseni yönünde atış yönüne göre sağa meyilli bir hareket gerçekleştirmiştir. Atış yönündeki X-ekseninde ise iki sporcuda anlamlı değişim görülmemiştir.

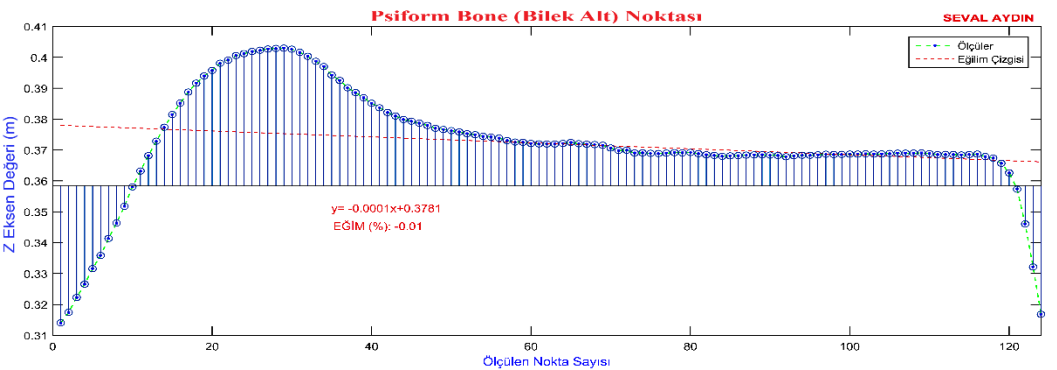
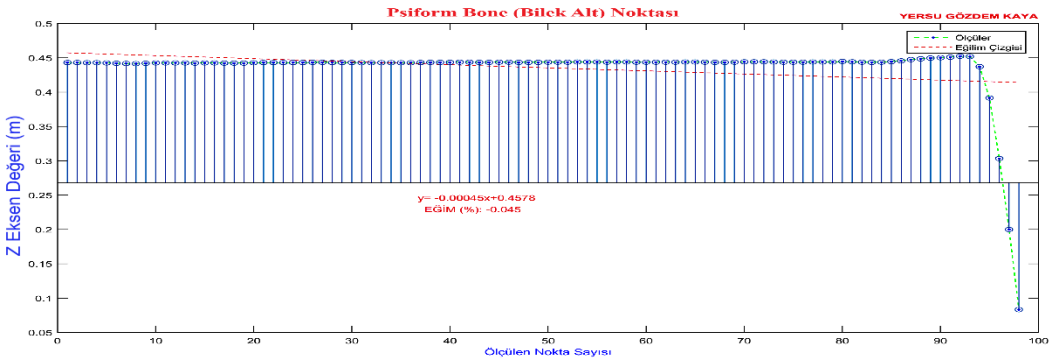
KS-1 ve KS-2'nin en yüksek puanı aldıkları atışında psiform bone noktasının koordinat eksenlerine göre hareketleri Şekil 7.4 – 7.6'da sunulmuştur.



Şekil 7.4. Kadın sporcuların psiform bone noktası X-ekseni değişimleri



Şekil 7.5. Kadın sporcuların psiform bone noktası Y-ekseni değişimleri



Şekil 7.6. Kadın sporcuların psiform bone noktası Z-ekseni değişimleri

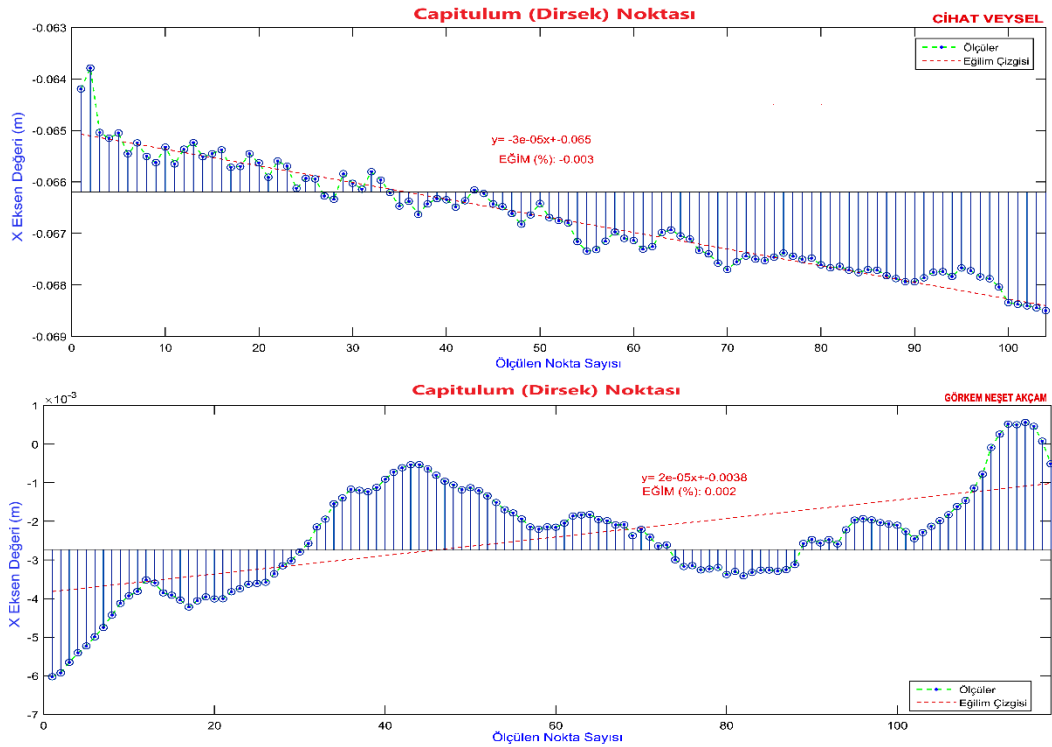
Şekil 7.4 – 7.6'deki grafikler incelendiğinde, tecrübeli sporcunun Z-ekseni yönünde çok stabil bir atış gerçekleştirdiği ve tabancasını neredeyse atış yönüne göre

yukarı/aşağı hiç hareket ettirmedığı görülmektedir. Bunun neticesinde sporcu grubunun tamamının atışları içerisindeki en yüksek puanlı atışı gerçekleştirmiştir. Buna karşın tecrübesiz sporcunun Z eksenindeki hareketi ile silahını atışın 3'üncü saniyesinden (30'uncu noktadan) sonra aşağıya doğru kaydıracağı görülmektedir. Benzer şekilde tecrübesiz sporcu Y-ekseni yönünde atış yönüne göre sağa meyilli bir hareket gerçekleştirmiştir. Atış yönünde, yani X-eksenindeki hareketler incelendiğinde ise iki sporcuda anlamlı değişim görülmemiştir.

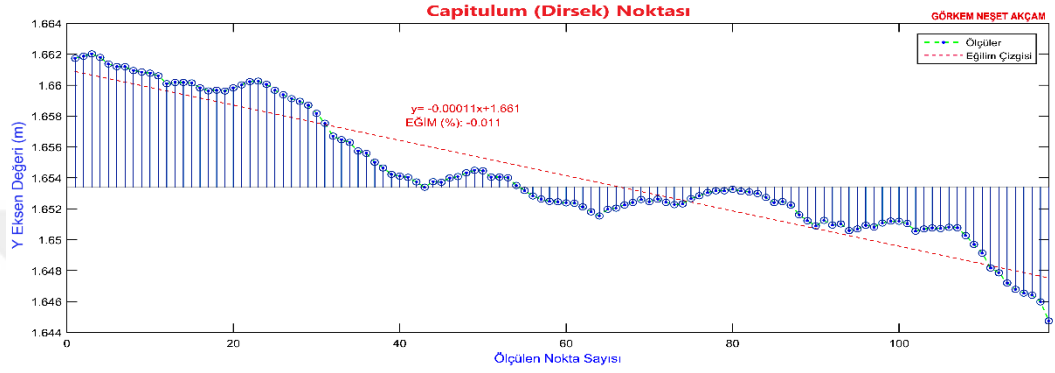
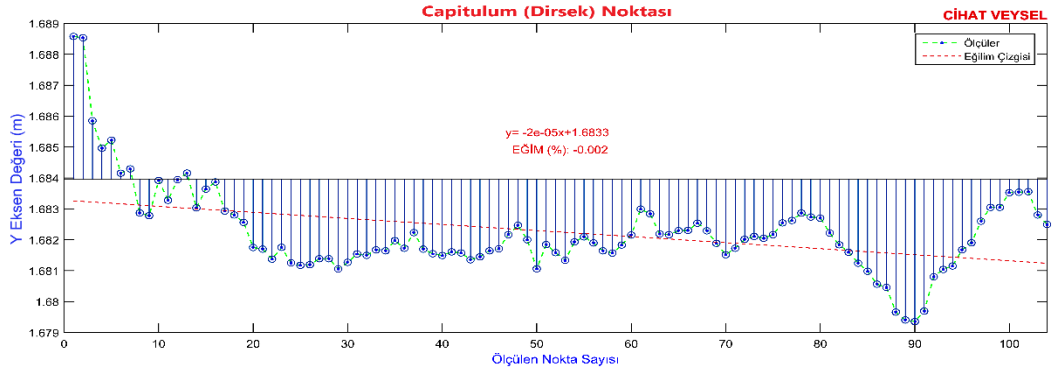
7.3.2. Capitulum (Dirsek) noktası hareketinin analizi

Sporcuların gerçekleştirdiği en kötü atışlar, capitulum noktasına yerleştirilen işaretçinin koordinat değişimleri yönünden incelenmiştir. Bu kapsamda Capitulum noktasının üç eksenindeki hareketleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Atış esnasında tabancanın tutulduğu elin tabanca ağırlığında en çok etkileneceği noktalardan birisi de capitulum noktasıdır. Capitulum noktasının kilitlenerek hareketsiz kalması ve atış süresince bu pozisyonunu koruması doğru bir atış anlamına gelmektedir.

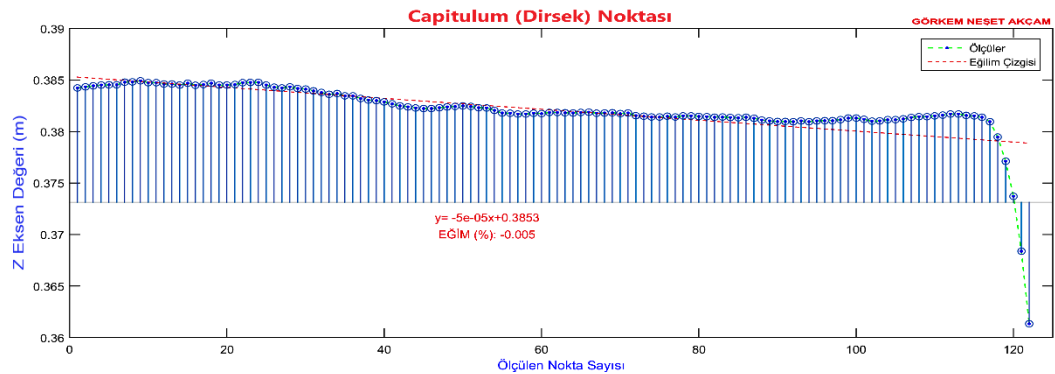
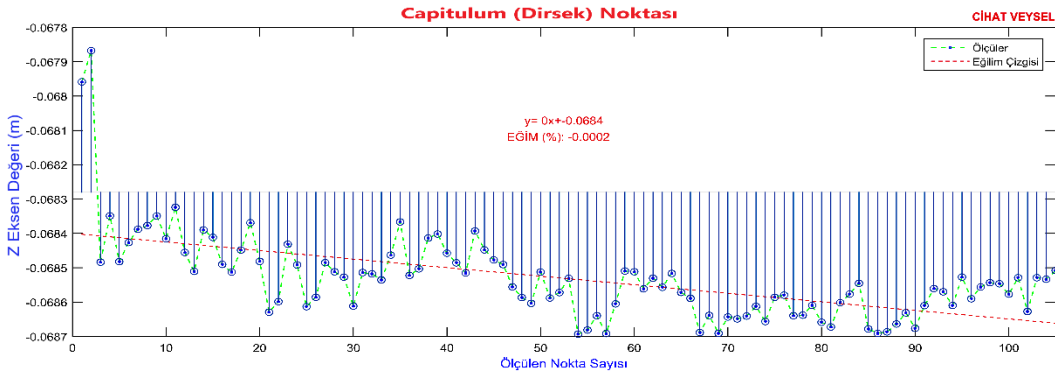
ES-1 ve ES-2'nin en düşük puanı aldıkları atışında capitulum noktasının koordinat eksenlerine göre hareketleri Şekil 7.7 – 7.9'da sunulmuştur.



Şekil 7.7. Erkek sporcuların capitulum noktası X-ekseni değişimleri



Şekil 7.8. Erkek sporcuların capitulum noktası Y-ekseni değişimleri



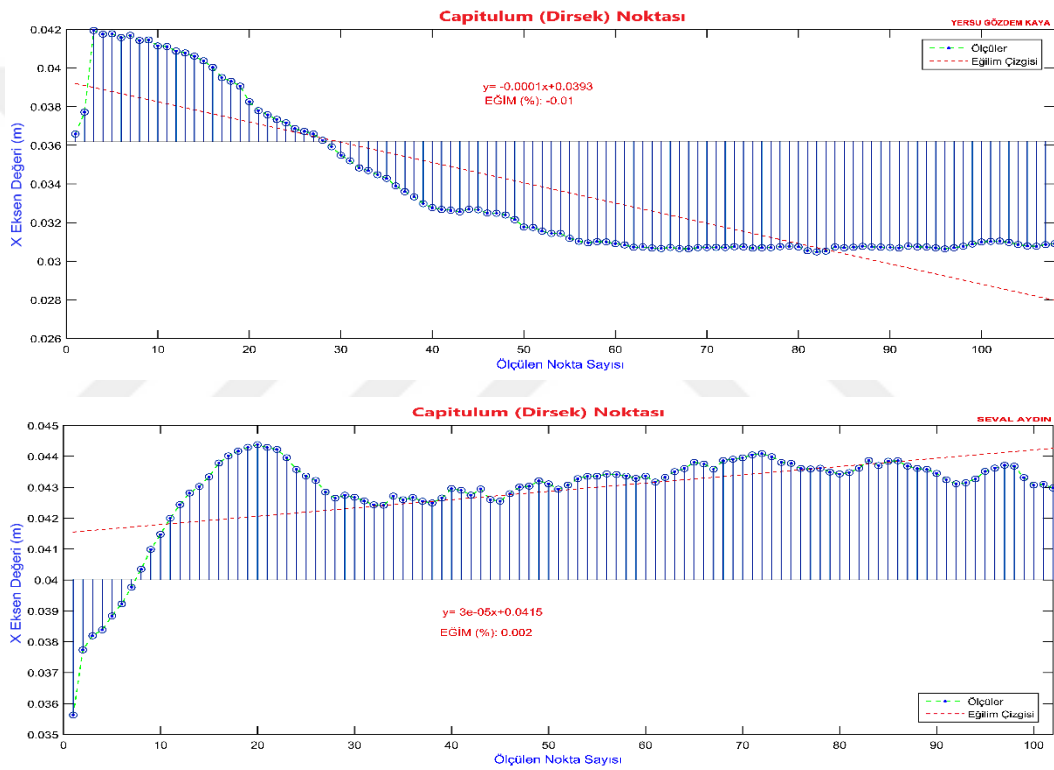
Şekil 7.9. Erkek sporcuların capitulum noktası Z-ekseni değişimleri

Şekil 7.6 – 7.8’deki grafikler incelendiğinde tecrübeli sporcunun Y-ekseni yönündeki hareketleri bu atışının diğer atışlarına göre düşük puanlı olmasına neden

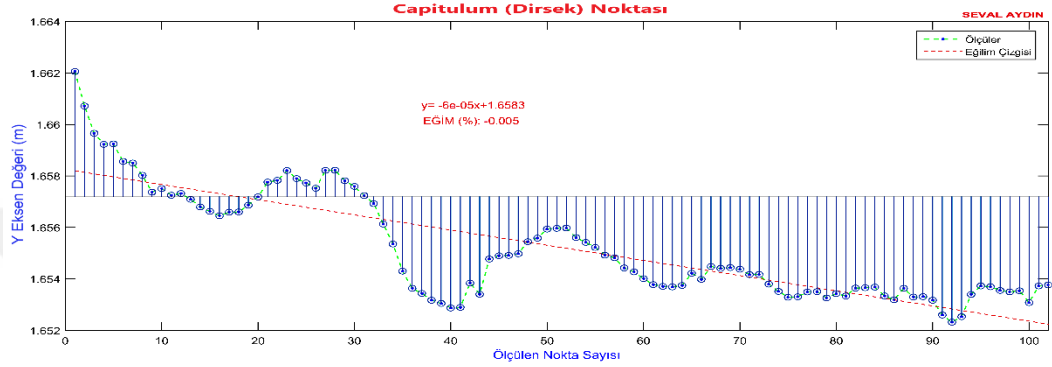
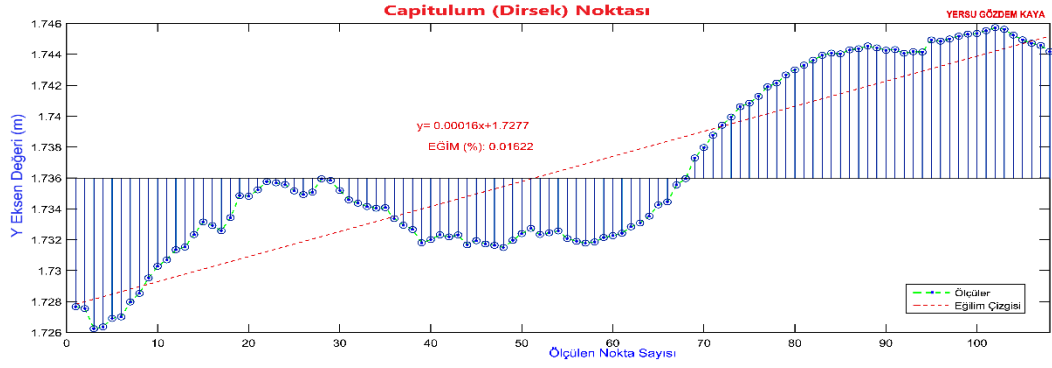
olmuştur. Tecrübeli sporcunun atışının 2 ile 9'uncu saniyeleri (20 ila 90'ıncı noktalar) arasında dirseğinde atış eksenine göre sağ yönde hareketler olduğu açıkça görülmektedir. Tecrübeli sporcunun bu atışında Z-ekseni yönünde de aşağı yönde hareketler görülmektedir.

Tecrübesiz sporcu da kendi atışları içerisindeki en düşük puanlı atışını gerçekleştirdiği için benzer durum söz konusudur. Tecrübesiz sporcu atışının tamamında sağ yönde dirseğini kaydırarak kötü sonuç almıştır.

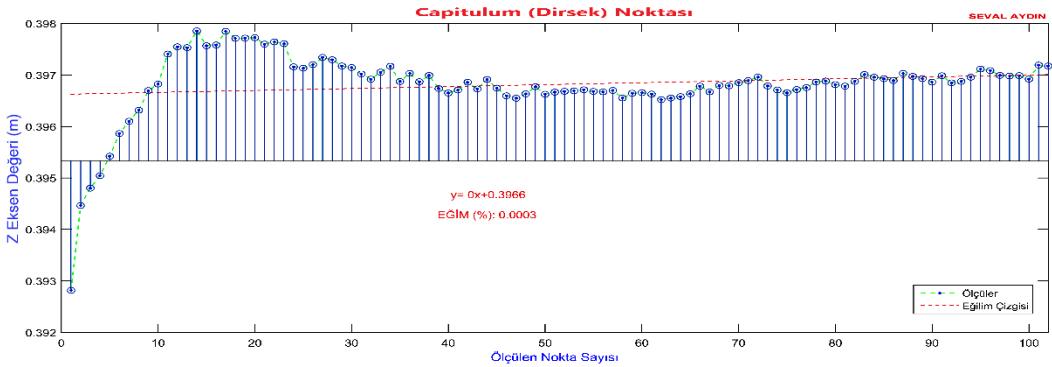
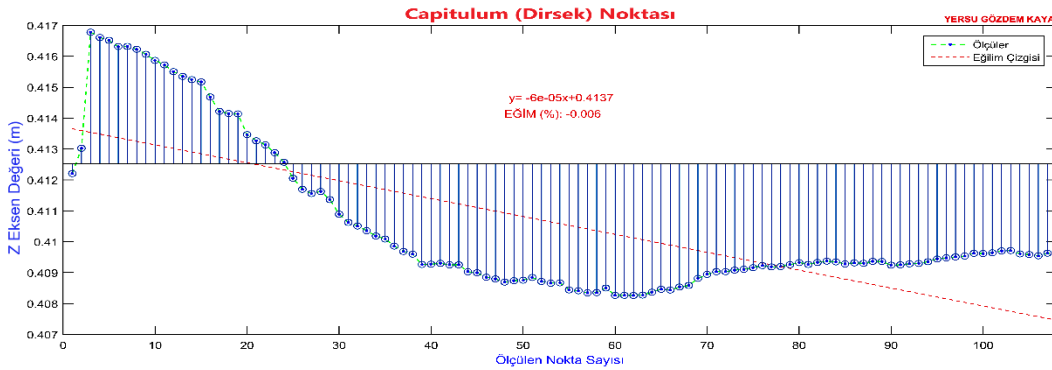
KS-1 ve KS-2'nin en düşük puanı aldıkları atışında capitulum noktasının koordinat eksenlerine göre hareketleri Şekil 7.10 – 7.12'de sunulmuştur.



Şekil 7.10. Kadın sporcuların capitulum noktası X-ekseni değişimleri



Şekil 7.11. Kadın sporcuların capitulum noktası Y-ekseni değişimleri



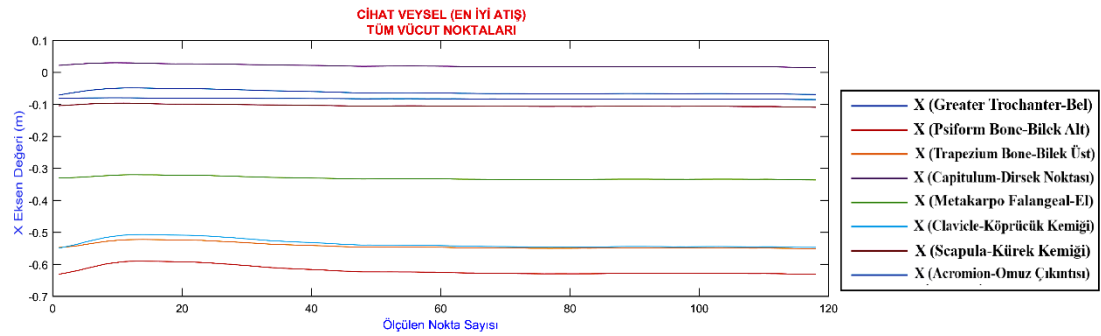
Şekil 7.12. Kadın sporcuların capitulum noktası Z-ekseni değişimleri

Şekil 7.10 – 7.12’deki grafikler incelendiğinde tecrübesiz sporcunun Z-ekseni yönünde çok stabil bir atış gerçekleştirdiği ve tabancasını neredeyse atış yönüne göre

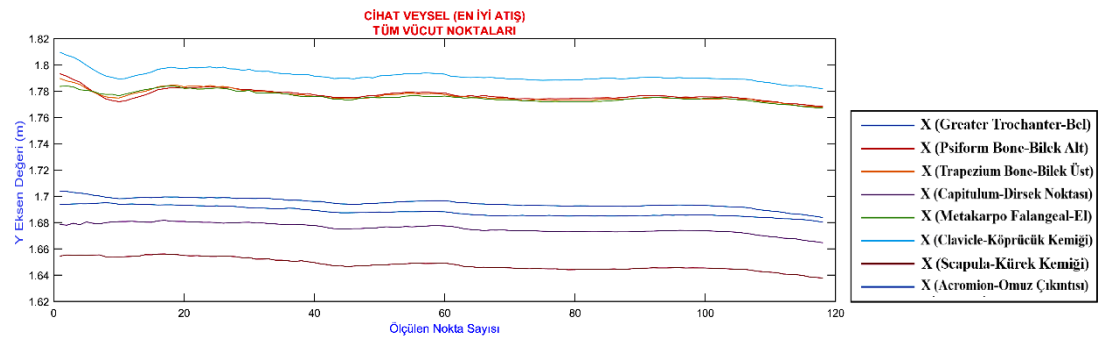
yukarı/aşağı hiç hareket ettirmedığı görülmektedir. Ancak Y-ekseni yönünde sağa meyilli bir hareket gerçekleştirmesi, atışının düşük puan ile sonuçlanmasına neden olmuştur. Bu durum sağ el ile atış yapan sporcularda tetik düşürme esnasında sıklıkla görülmektedir. Bunun sonucunda hedefin sağında toplanan vuruşlar görülmektedir. Tecrübeli sporcu ise atışın 3'üncü saniyesinden (30'uncu noktadan) itibaren dirseğini aşağı yönde hareket ettirmiş ve bu hareketi yaptığı esnada Y-ekseni yönünde sola meyilli bir hareket gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu durumun sporcunun düşük puanlı vuruş yapmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

7.3.3. Tecrübeli erkek sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi

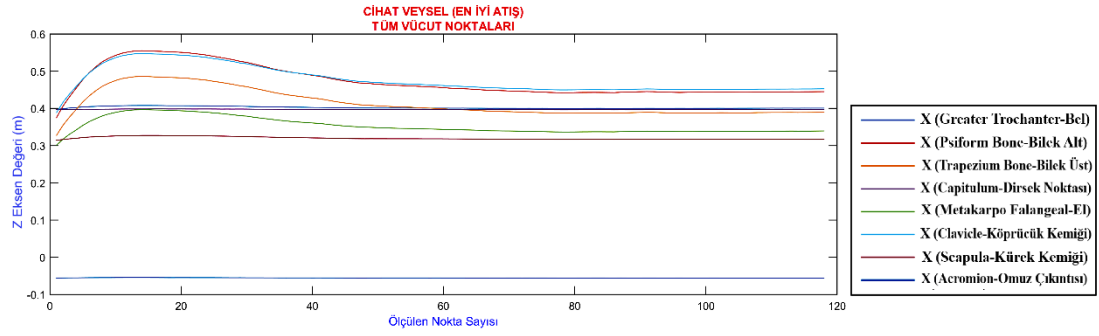
Tecrübeli erkek sporcunun gerçekleştirdiği en iyi puanlı vuruşlarındaki tüm vücut noktaları tek bir grafikte görüntülenmiştir. Böylelikle vücuduna yerleştirilen tüm işaretçilerin yani antropometrik noktalarının atış süresince konumları 3 eksende de görüntülenerek yorumlanabilecektir. Bu kapsamda Şekil 7.13 – 7.15'te ES-1'in en iyi vuruş puanını aldığı atışlarının grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.13. ES-1'in en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri



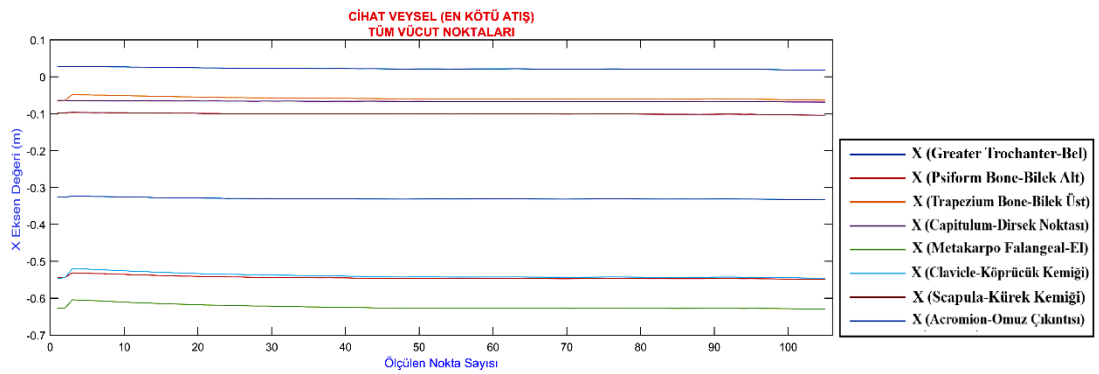
Şekil 7.14. ES-1'in en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri



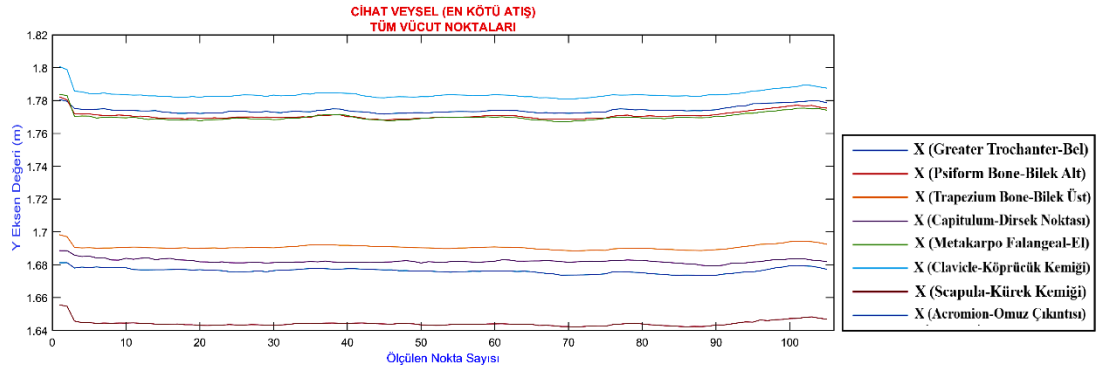
Şekil 7.15. ES-1'in en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

ES-1, sporcu grubunda tecrübeli erkek sporcu olarak tanımlanmıştır. Atış sonuçlarının tecrübesiz erkek sporcuya göre daha iyi çıkması beklenen bir sonuçtur. Gerçekleştirilen çalışmada da bu durum açıkça görülmektedir. En yüksek puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X ve Z eksenlerinde yani atış yönünde ve atış hattına dik yönde çok dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Atış yönüne göre sağa ve sola yönde hareketlerin izlenebildiği Y-ekseninde el ve bilek noktalarında 1-2 saniye (10-20 nokta) sağa meyilli bir hareket olduğu görülmektedir. Ancak atışını tamamlayana kadar bu noktalar dâhil diğer noktalarda da Y-ekseninde anlamlı hareket görülmemiştir. Bu durum sporcunun dengeli atışını ve yüksek puanlı vuruşunu açıklamaktadır.

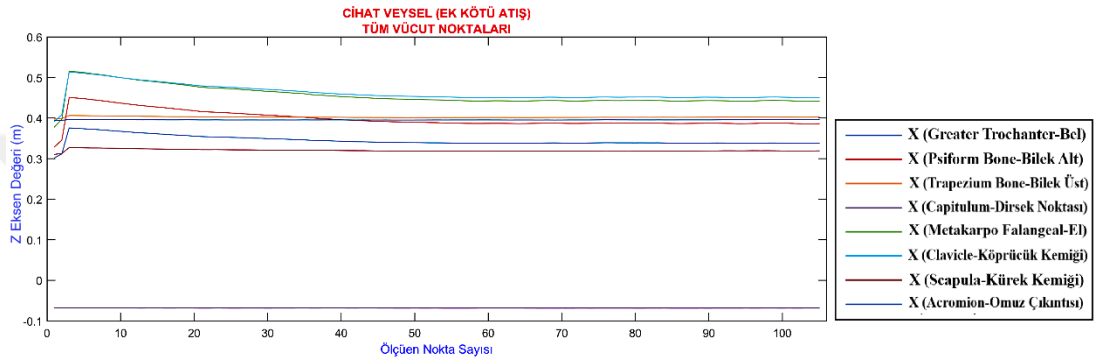
Şekil 7.16 – 7.18'de ES-1'in en düşük puan aldığı atışında tüm vücut noktalarının üç eksendeki hareketlerinin grafiği sunulmuştur.



Şekil 7.16. ES-1'in en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri



Şekil 7.17. ES-1'in en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri

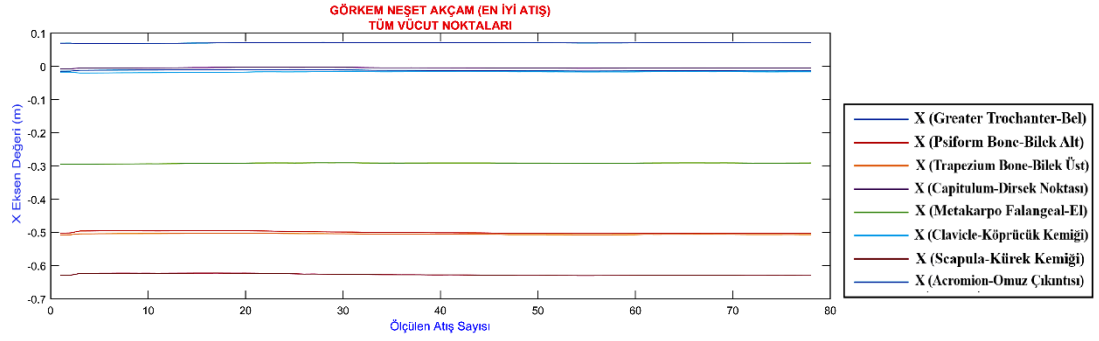


Şekil 7.18. ES-1'in en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

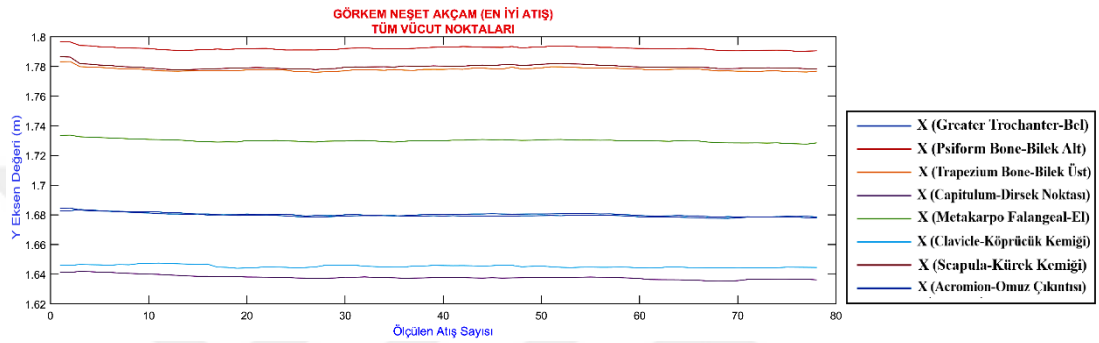
Sporcunun, en düşük puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X-ekseninde yani atış yönünde çok dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Atış yönüne göre sağa ve sola yönde hareketlerin izlenebildiği Y-ekseninde el ve bilek noktalarında çok az sağa meyilli bir hareket olduğu görülmektedir. Ancak atışını tamamlayana kadar bu noktalar dâhil diğer noktalarda da Y-ekseninde anlamlı hareket görülmemiştir. Bu durumda sporcunun düşük puanlı vuruş gerçekleştirmesi vücut dengesi ile açıklanamamakta, düşük puanın olası nedeninin nişan hatası olabileceği değerlendirilmektedir.

7.3.4. Tecrübesiz erkek sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi

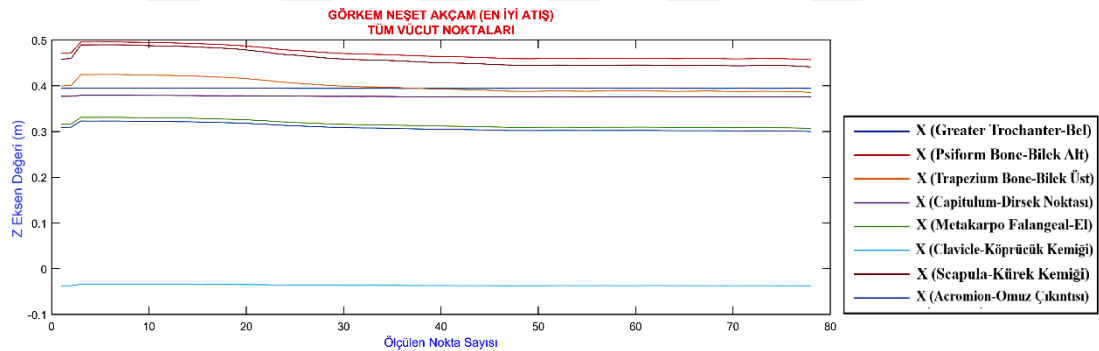
Tecrübesiz erkek sporcunun gerçekleştirdiği en iyi puanlı vuruşlarındaki tüm vücut noktaları tek bir grafikte görüntülenmiştir. Böylelikle vücuduna yerleştirilen tüm işaretçilerin yani antropometrik noktalarının atış süresince konumları 3 eksen de görüntülenerek yorumlanabilecektir. Bu kapsamda Şekil 7.19 – 7.21'de ES-2'nin en iyi vuruş puanını aldığı atışlarının grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.19. ES-2'nin en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri



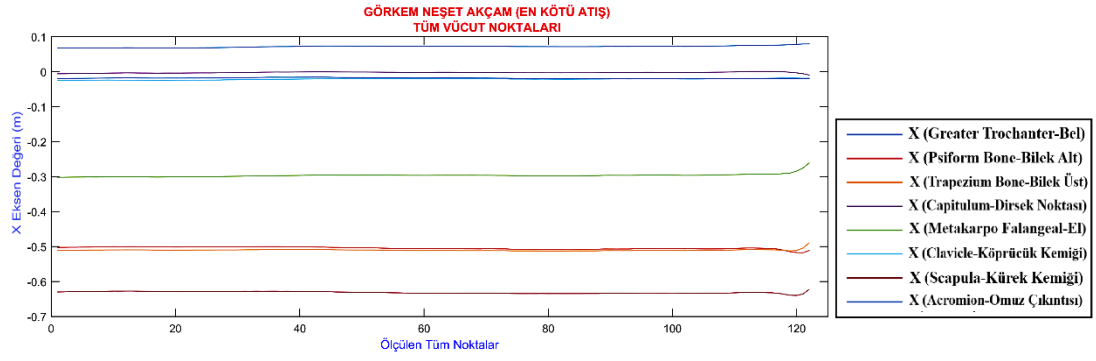
Şekil 7.20. ES-2'nin en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri



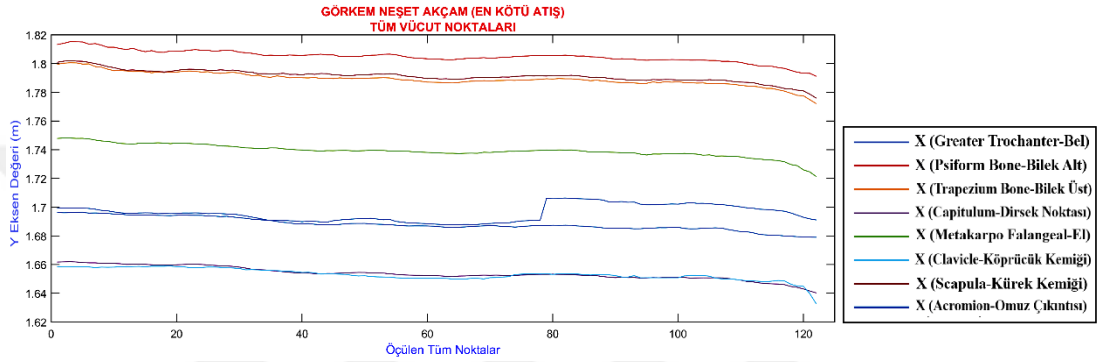
Şekil 7.21 ES-2'nin en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

ES-2, sporcu grubunda tecrübesiz erkek sporcu olarak tanımlanmıştır. En yüksek puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X,Y ve Z eksenlerinde dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Atış yönüne göre yukarı veya aşağı yönde hareketlerin izlenebildiği Z-ekseninde özellikle atışın 4'üncü saniyesinden (40'ıncı noktadan) sonra el, bilek ve dirsek noktalarında aşağı yönde oluşan hareketin atış puanını etkilediği değerlendirilmektedir.

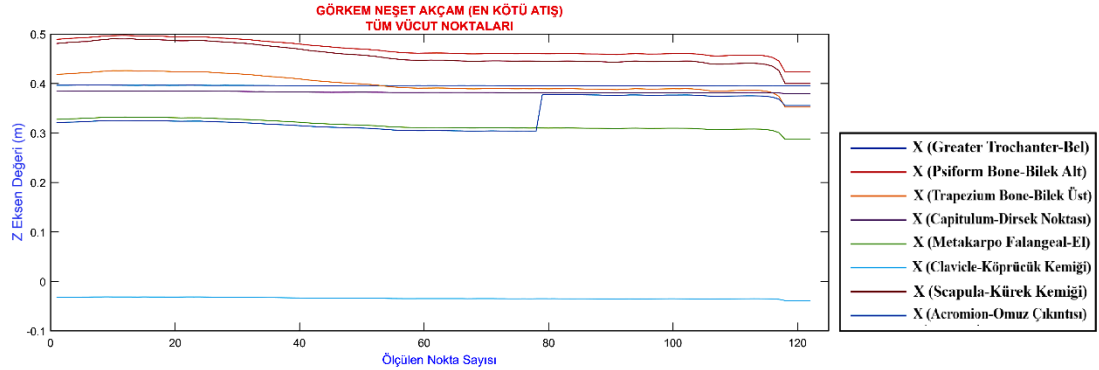
Şekil 7.22 – 7.24'te ES-2'nin en düşük puan aldığı atışında tüm vücut noktalarının üç eksenindeki hareketlerinin grafiği sunulmuştur.



Şekil 7.22. ES-2'nin en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri



Şekil 7.23. ES-2'nin en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri

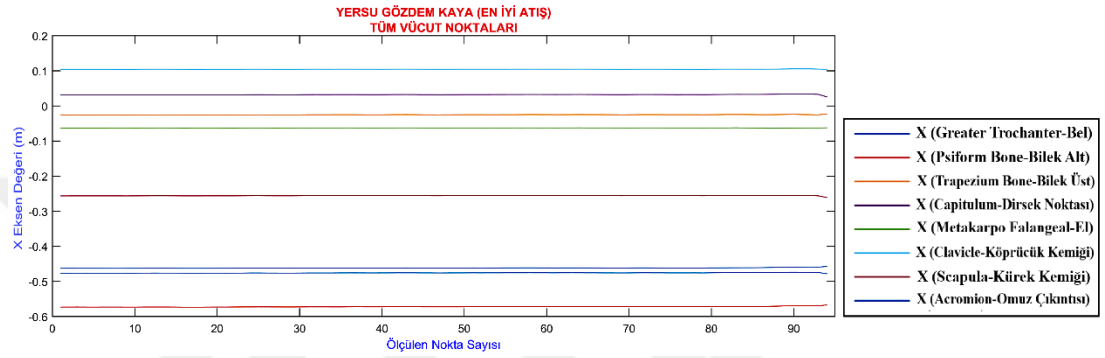


Şekil 7.24. ES-2'nin en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

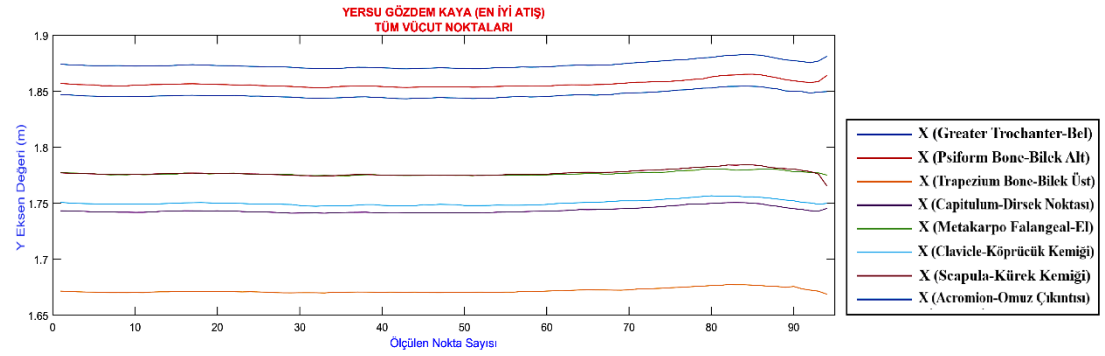
Sporcunun, en düşük puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X-ekseninde yani atış yönünde dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Ancak Y ve Z eksenlerinin grafikleri incelendiğinde omuz noktasının atışın 8'inci saniyesinde (80'inci noktada) sağa ve yukarı doğru hareket ettiği görülmektedir. Sporcunun aldığı düşük puanın bu hareketten kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir.

7.3.5. Tecrübeli kadın sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi

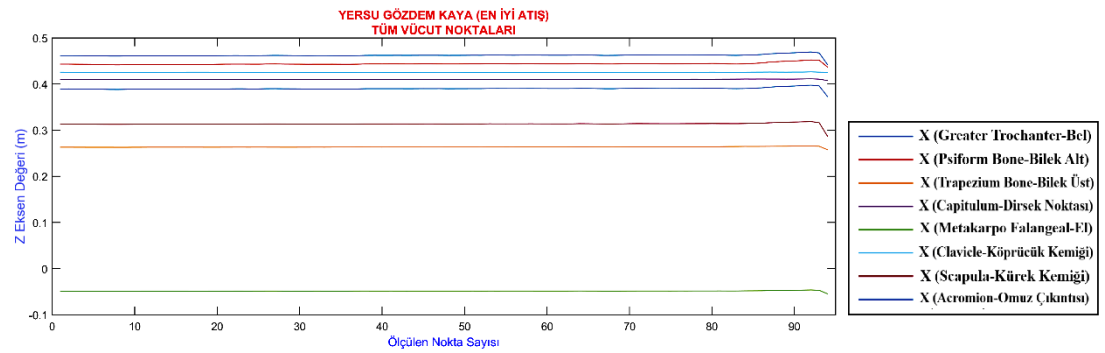
Tecrübeli kadın sporcunun gerçekleştirdiği en iyi puanlı vuruşlarındaki tüm vücut noktaları tek bir grafikte görüntülenmiştir. Böylelikle vücuduna yerleştirilen tüm işaretçilerin yani antropometrik noktalarının atış süresince konumları, 3 eksende de görüntülenerek yorumlanabilecektir. Bu kapsamda Şekil 7.25 – 7.27’de KS-1’in en iyi vuruş puanını aldığı atışlarının grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.25. KS-1'in en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri



Şekil 7.26. KS-1'in en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri



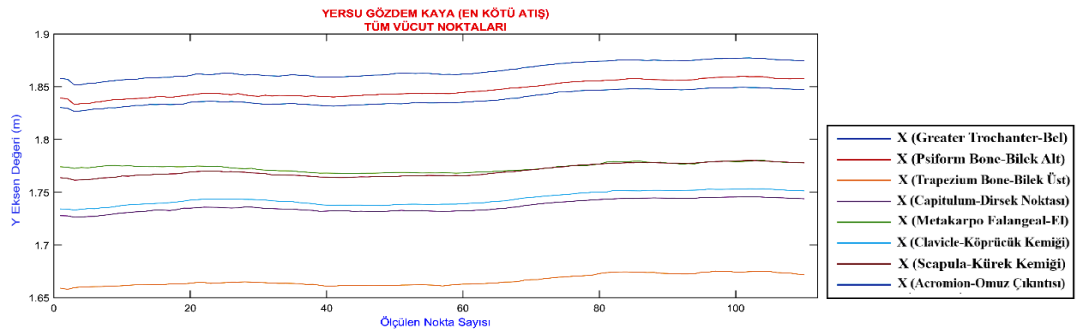
Şekil 7.27. KS-1'in en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

KS-1, sporcu grubunda tecrübeli kadın sporcu olarak tanımlanmıştır. Atış sonuçlarının tecrübesiz kadın sporcuya göre daha iyi çıkması beklenen bir sonuçtur. Gerçekleştirilen çalışmada da bu durum açıkça görülmektedir. En yüksek puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta X, Y ve Z eksenlerinde çok dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Bu durum sporcunun dengeli atışını ve yüksek puanlı vuruşunu açıklamaktadır. Sporcunun bu atışında aldığı puan, tüm sporcu grubunun aldığı puanlar içerisinde en yüksek değere sahiptir.

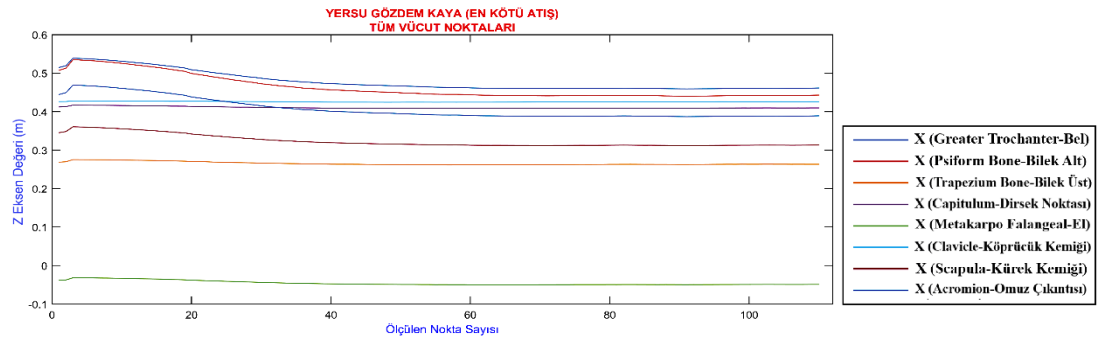
Şekil 7.28 – 7.30’da KS-1’in en düşük puan aldığı atışında tüm vücut noktalarının üç eksendeki hareketlerinin grafiği sunulmuştur.



Şekil 7.28. KS-1'in en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri



Şekil 7.29. KS-1'in en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri

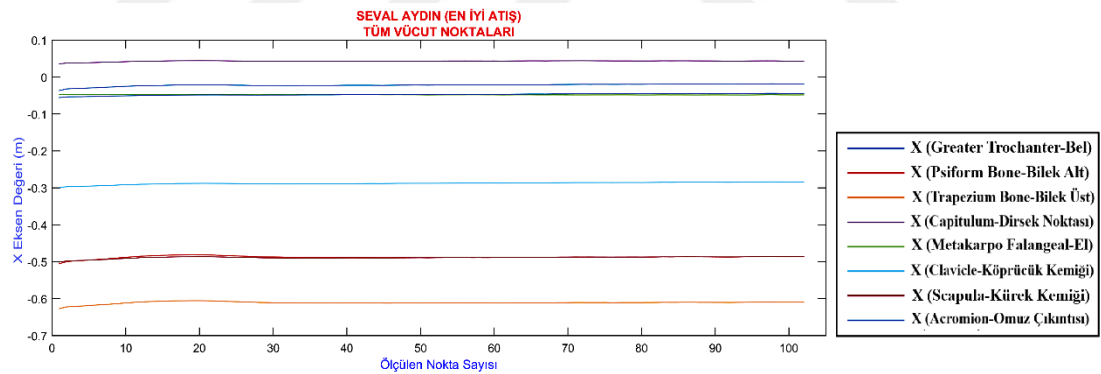


Şekil 7.30. KS-1'in en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

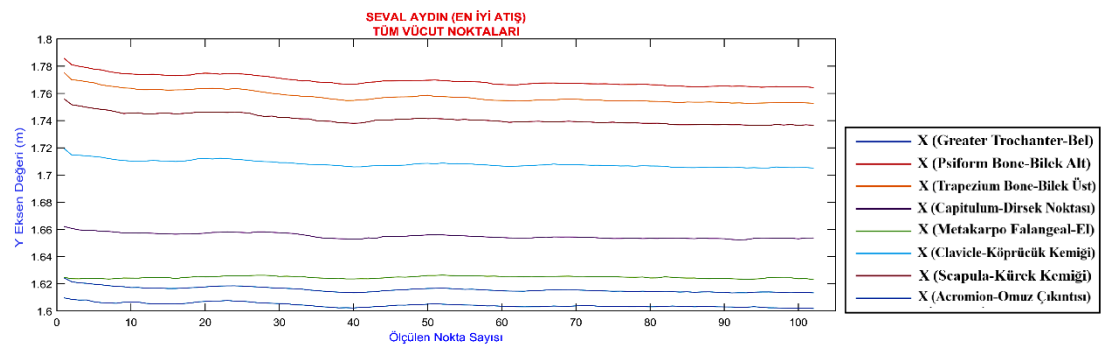
Sporcunun, en düşük puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X-ekseninde yani atış yönünde dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Atış yönüne göre sağa ve sola yönde hareketlerin izlenebildiği Y-ekseninde el, bilek ve dirsek noktalarında çok az sağa meyilli bir hareket olduğu görülmektedir. Z-ekseninde ise atışın 2'inci saniyesinde (20'nci noktasında) aşağı yönde bir hareket ve sonrasında dengeli bir atış gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu durumda sporcunun düşük puanlı vuruş gerçekleştirmesi, Y-eksenindeki hareket ve olası nişan hatasının neden olabileceği değerlendirilmektedir.

7.3.6. Tecrübesiz kadın sporcunun en iyi ve en kötü puanı aldığı atışlarından tüm vücut noktalarının incelenmesi

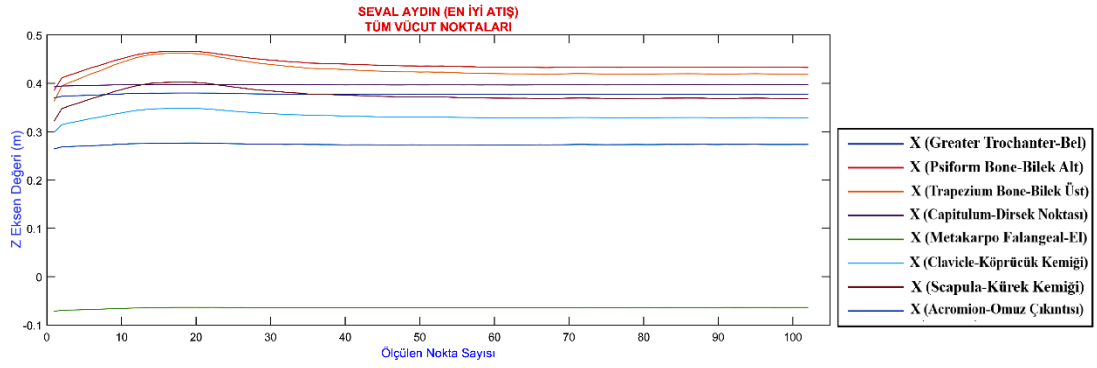
Tecrübesiz kadın sporcunun gerçekleştirdiği en iyi ve en kötü puanlı vuruşlarındaki tüm vücut noktaları tek bir grafikte görüntülenmiştir. Böylelikle vücuduna yerleştirilen tüm işaretçilerin yani antropometrik noktalarının atış süresince konumları 3 eksen de görüntülenerek yorumlanabilecektir. Bu kapsamda Şekil 7.31 – 7.33'te KS-2'nin en iyi vuruş puanını aldığı atışlarının grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.31. KS-2'nin en yüksek puanlı atışında X-ekseni değişimleri



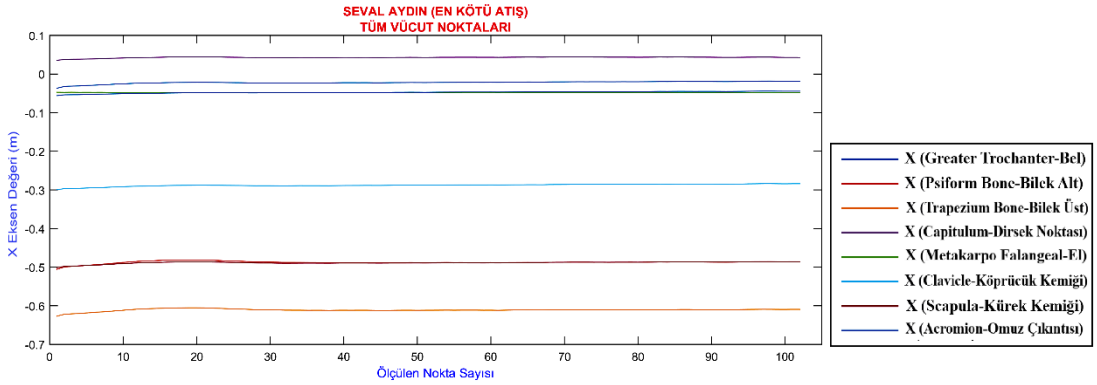
Şekil 7.32. KS-2'nin en yüksek puanlı atışında Y-ekseni değişimleri



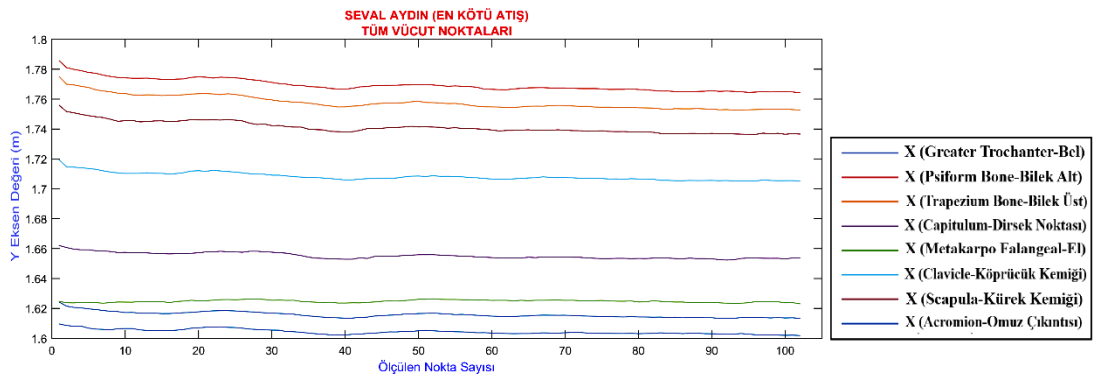
Şekil 7.33. KS-2'nin en yüksek puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

KS-2, sporcu grubunda tecrübesiz kadın sporcu olarak tanımlanmıştır. En yüksek puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X ve Z eksenlerinde dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Atış yönüne göre sağa veya sola yönde hareketlerin izlenebildiği, Y-ekseninde omuz noktasında sağa yönde oluşan hareketin atış puanını etkileyebileceği değerlendirilmektedir.

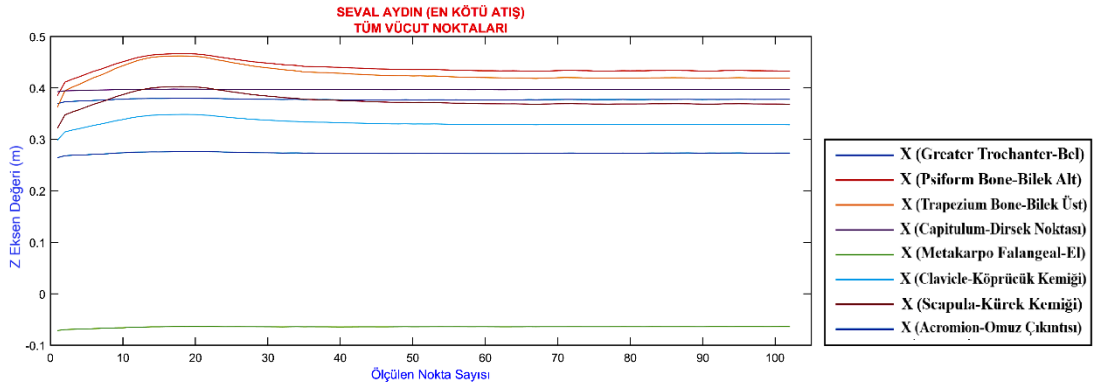
Şekil 7.34 – 7.36'da KS-2'nin en düşük puan aldığı atışında tüm vücut noktalarının üç eksendeki hareketlerinin grafiği sunulmuştur.



Şekil 7.34. KS-2'nin en düşük puanlı atışında X-ekseni değişimleri



Şekil 7.35. KS-2'nin en düşük puanlı atışında Y-ekseni değişimleri



Şekil 7.36. KS-2'nin en düşük puanlı atışında Z-ekseni değişimleri

Sporcunun, en düşük puanlı vuruşu gerçekleştirdiği atışta özellikle X-ekseninde yani atış yönünde dengeli bir duruş gerçekleştirildiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Z eksenlerinin grafikleri incelendiğinde, bilek ve dirsek noktalarının yukarı hareketi görülmektedir. Y-ekseninde de hafif sağa meyilli hareket edildiği görülmektedir. Sporcunun aldığı düşük puanın bu hareketlerden ve olası nişan hatasından kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir.

Özellikle tecrübesiz sporcuların atışları incelendiğinde bilek dirsek ve omuz noktalarında atış yönüne göre aşağı ve sağa-sola hareketlerin olduğu görülmektedir. Bunun olası sebeplerinden bir tanesi silahın ağırlığını taşıyabilecek kas gelişimlerinin olmamasıdır. Bir diğer neden ise denge çalışmalarının yeterli seviyede olmamasından dolayı vücut dengesinin sağlanamamasıdır.

7.4. Atış Kartlarının Değerlendirilmesi

Atış esnasında ISSF'nin (International Shooting Sport Federation) standart 10 metre havalı tabanca atış kartları kullanılmıştır. Şekil 7.37'de standart ISSF 10 metre atış kartı görülmektedir.

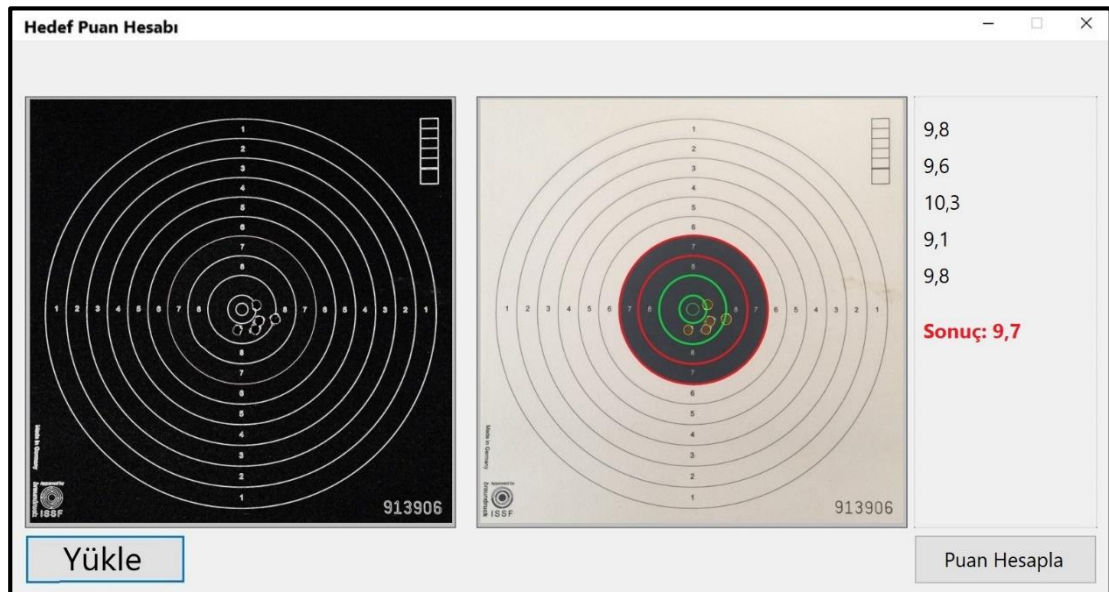


Şekil 7.37. Standart ISSF 10 metre atış kartı

Resmi müsabakalarda atış kartlarının puanlanması, 1.0 ile 10.9 arasında belirlenmektedir. Bunun için elektronik hedefler kullanılabildiği gibi kart okuyucu sistemler de kullanılmaktadır. Bunların olmadığı durumlarda ise manuel olarak puanlar belirlenmektedir. Standart olarak kullanılan kâğıt hedeflerde hedef okuma sistemleri ile sınıflandırılmayan atışlar jüri üyeleri tarafından elle, ISSF onaylı gereçler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan uygulamada kullanılan kartların puanlaması yapılırken hedef puanlama yazılımı kullanılmıştır.

Bu kapsamda OpenCV kütüphaneleri kullanılarak bir yazılım hazırlanıp FHAY sistemine entegre edilmiştir. Yazılım ile fotoğrafı çekilen hedef kartının puanlama çizgileri ve sporcunun vuruş noktaları otomatik olarak belirlenmektedir. Puanlama çizgilerinin birbirlerine olan piksel mesafeleri ile vuruş noktalarının bu çizgilere olan uzaklıkları belirlenerek enterpolasyon ile vuruş puanı çıkarılmaktadır.

Bunun için öncelikle görüntüde bir takım düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle binary olarak düzenlenen görüntülerde kenar bulma (edge detection) algoritması çalıştırılmıştır. Bu işlemlerin ardından görüntüler otomatik geometrik şekil bulma algoritmasından geçirilerek hedef kâğıdındaki puan çizgileri yakalanmaktadır. Ardından vuruş noktaları da aynı algoritma ile bulunarak enterpolasyon işleminin girdi verileri elde edilmektedir. Uygulamanın kullanıcı arayüzü Şekil 7.38’de sunulmuştur.



Şekil 7.38. Hedef puanlama uygulaması arayüzü

Günümüzde yaygın olarak kullanılan cep telefonu kameralarında daha etkin faydalanmak ve atış puanlarına en kısa yoldan ulaşabilmek için geliştirilen bu yazılımın mobil versiyonlarının oluşturulması gerekmektedir. Böylelikle sporcular atışlarının ardından puanlamalarına çok kısa sürede erişebileceklerdir.

Geliştirilen hedef puanı hesaplama algoritması ile tüm sporcu kartlarının puanlaması gerçekleştirilmiştir. Hedef kartlarının orijinal, filtrelenmiş ve puanlanmış görüntüleri Şekil 7.39’da sunulmuştur.

Cihat Veysel				1. Atış	9,8
				2. Atış	9,6
				3. Atış	10,3
				4. Atış	9,1
				5. Atış	9,8
				Ortalama	9,7
Görkem Neşet Akçam				1. Atış	9,3
				2. Atış	9,3
				3. Atış	9,1
				4. Atış	9,2
				5. Atış	8,0
				Ortalama	9,0
Gözdem Yersu Kaya				1. Atış	9,1
				2. Atış	10,6
				3. Atış	8,9
				4. Atış	9,1
				5. Atış	9,6
				Ortalama	9,5
Seval Aydın				1. Atış	9,0
				2. Atış	9,9
				3. Atış	9,5
				4. Atış	9,1
				5. Atış	8,2
				Ortalama	9,1

Şekil 7.39. Tüm hedef kartları ve sonuçları

Geliştirilen hedef puanı hesaplama algoritması ile hesaplanan atış sonuçları ile atış kartlarının manuel hesaplama neticesinde belirlenen atış sonuçlar Çizelge 7.8’de sunulmuştur.

Çizelge 7.8. Atış puanlarının karşılaştırılması

	ES-1		ES-2		KS-1		KS-2	
	Program ile Hesaplanan Puan	Manuel Belirlenen Puan	Program ile Hesaplanan Puan	Manuel Belirlenen Puan	Program ile Hesaplanan Puan	Manuel Belirlenen Puan	Program ile Hesaplanan Puan	Manuel Belirlenen Puan
1. Atış	9,8	9,8	9,3	9,3	9,1	9,1	9,0	9,0
2. Atış	9,6	9,5	9,3	9,2	10,6	10,5	9,9	10,0
3. Atış	10,3	10,5	9,1	9,0	8,9	9,0	9,5	9,5
4. Atış	9,1	9,0	9,2	9,2	9,1	9,0	9,1	9,2
5. Atış	9,8	9,8	8,0	8,0	9,6	9,5	8,2	8,1
Ortalama	9,7	9,7	9,0	8,9	9,5	9,4	9,1	9,2

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde program ile hesaplanan puanlar ile manuel hesaplanan puanlar arasında bir miktar farklar mevcuttur. Özellikle manuel hesaplama herhangi bir algoritmaya dayanmadığı ve sadece kart okuyan kişinin tecrübesine bağlı olarak gerçekleştirildiği için genel anlamda bir standardı yoktur. Bu sebeple programla belirlenen puanlara göre pozitif veya negatif yönde farklılıklar olabilmektedir. Geliştirilen hedef kartı puanlama algoritması ile puanlama işlemleri, kişilerden bağımsız ve standart bir halde gerçekleştirilmektedir.

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sporcu hareketlerinin farklı kayıt yöntemleri kullanılarak incelenmesi ve sonuçların analizinin yapılması, günümüzde farklı disiplinlerdeki birçok araştırmacının ilgi alanına girmektedir. Ulusal platformda bu analizlerin gerçekleştirildiği birçok çalışmada fotogrametrik değerlendirme yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar özellikle yersel fotogrametrik veri üretimine yönelik tasarlanmış ticari yazılımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu yazılımların asıl amaçlarının dışında kullanılması durumunda ise kullanıcıların farklı beklentilerine cevap alamadıkları görülmektedir. Ayrıca bu yazılımların en önemli dezavantajı, görüntü alımı ve fotogrametrik veri üretimi (3B koordinatların üretilmesi) aşamalarının gerçek zamanlı olmamasıdır. Bu durum sporcu hareket analizlerinin gerçekleştirildiği çalışmaların etkinliğini düşüren bir olgudur.

Ticari hareket analiz yazılımlarında ise en önemli kısıtlardan birisi yazılımın beraberinde gelen donanımla kullanılabilir olmasıdır. Bu durumda kullanıcılar sadece önceden belirlenmiş donanımları kullanmak zorunda kalacaktır. Aynı zamanda yazılımların kaynak kodlarına müdahale imkânı olmadığı için kullanıcılar yazılıma ekstra özellikler ekleyememektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması ile sporcu üzerindeki işaretçilerin üç boyutlu uzay koordinatları gerçek zamanlı olarak belirlenmiş ve elde edilen veriler nokta bulutu olarak ekranda gösterilmiştir. Aynı zamanda ekran gösterimi de gerçek zamanlı olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan ve gerçekleştirilen yazılımın, açık kaynak kodlu bilgisayarlı görme kütüphaneleri ve özgün uygulama kodlarını içermesi, yazılımın farklı spor branşlarına uyum yeteneğini artırmaktadır.

Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılım (FHAY), Hazırlık, Ölçüm, Analiz ve Raporlama Modülü olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin tamamının tek bir arayüzde birleştirilmesi ve kullanıcı müdahalesini en aza indirgenmesiyle kullanım kolaylığı sağlanmıştır. Aynı zamanda yazılımın markadan bağımsız farklı kamera sistemleri ile çalışabilecek yapıda olması ve sonuçları gerçek zamanlı olarak alabilmesi geliştirilen sistemin en önemli artılarından biridir.

Yazılımın Hazırlık Modülü ile kamera bağlantıları sağlanmakta, kameraların kalibrasyonu yapılmakta ve iç yöneltme parametreleri oturma kaydedilmektedir.

Kalibrasyon modülünde kullanılan Zhang Kalibrasyon Algoritması ile hızlı ve esnek bir biçimde kamera parametreleri elde edilmektedir. Aynı zamanda sistemde kullanılan kameraların senkronlanması ile elde edilen her bir görüntü çiftinin aynı zaman damgasına sahip olması sağlanmıştır.

Yazılımın Ölçüm Modülü ile koordinatları önceden belirlenmiş referans levhasıyla görüntü alımı gerçekleştirilerek dış yöneltme parametreleri belirlenmektedir. Böylelikle izdüşüm merkezinin 3B uzay koordinatları ile kameraların üç eksenindeki dönüklükleri belirlenerek oturuma kaydedilmektedir.

Referans ölçümünün ardından kamera sisteminin hareket etmemesi gerekmektedir. Eğer kamera sisteminin konumunda bir değişiklik meydana gelirse referans ölçümünün tekrarlanması gerekmektedir. Referans levhasının sporcu hareketlerinin kayıt altına alındığı esnada her iki kamerada da görünür bir şekilde ve sabit olarak sahnede bulundurulması ile kameranın hareket etmesinden kaynaklı dış yöneltme parametrelerinin değişiminin önüne geçilebilmektedir. Ancak FHAY sisteminde bu durum tercih edilmemiştir. Bunun nedeni ise, sporcunun hareketini gerçekleştirdiği alan içerisinde hareketin doğallığını kısıtlayacak herhangi bir unsurun bulunmamasının tercih edilmesidir. Böylelikle sporcunun hareketinin doğallığı korunmakta ve gerçekleştirilecek analizlerden en iyi sonuçların alınması sağlanmaktadır.

Yazılımın Analiz Modülü ile gerçek zamanlı olarak belirlenen 3B koordinatları ekranda görüntülenmekte ve kayıt altına almaktadır. Aynı zamanda kullanıcının belirlediği antropometrik noktaların ölçüm anındaki grafikleri gerçek zamanlı olarak ekrana getirilmektedir. Böylelikle daha sporcu hareketini gerçekleştirdiği kısa zaman aralığında bu hareket ile ilgili ön yorumlamalar gerçekleştirilebilmektedir. Yazılımın bu özelliği antrenman aşamasında sporcu hareketinin doğru yönde evrilmesi için kullanılabilir.

Yazılımın Raporlama Modülü ile elde edilen 3B noktalar dosya bazlı kayıt altına alınmaktadır. Aynı zamanda ölçüm esnasında seçilen noktaların birbirlerine göre değişimleri ve 3B nokta bulutu da kayıt altına alınması ile ölçümlerin sonrasında farklı analizler gerçekleştirilebilmektedir. Bu bilgiler aynı zamanda sporcu gelişiminin takibinde de kullanılabilir.

Havalı tabanca atışında en önemli değerlendirme faktörü, atış sonuçlarının puanlanmasıdır. Atıcıların aldıkları puanlar teker teker hesaplanmakta ve ortalama puan şeklinde değerlendirilerek en iyi ve en kötü atışları belirlenmektedir. Özellikle düşük puanlı atışlar esnasında atıcının vücut noktalarının incelenmesi ile elde edilen kötü sonucun nedenleri belirlenebilmektedir. Bu kapsamda ele alındığında, atış kartlarının hızlı ve doğru biçimde puanlanarak atıcının elde ettiği skorun belirlenmesi önem arz etmektedir. Yazılımın raporlama modülüne eklenen atış kartı puanlama programı ile atış kartlarının puanlaması otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle hem objektif bir değerlendirme yapılmakta hem de sporcunun atışı ile ilgili geri beslemenin yapılmasına olanak sağlanmaktadır.

Özellikle sporcu gelişiminin takip edileceği çalışmalarda, tasarlanan ve gerçekleştirilen bu uygulamanın belirli periyotlarla sporcular üzerinde test edilerek elde edilen sonuçlara göre antrenman programı hazırlanması gerekmektedir. İcra edilecek ilk testten elde edilen sonuçlar ışığında, sporcuya özel hazırlanacak antrenman programının uygulanması ve antrenman sonrasında sporcunun nasıl bir gelişim içerisinde olduğunun takibinin bu uygulama ile mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.

EMG veya elektromiyografi, sinir ve çizgili kasların elektrik potansiyelinin incelenmesine dayanan bir nörolojik tetkik yöntemidir. Tıbbi anomalileri, aktivasyon seviyesini teşhis etmek veya insan veya hayvanların biyomekanik hareketini analiz etmek için bu sinyaller kullanılabilir. Geliştirilen Fotogrametrik Hareket Analiz Yazılımı, optik sistemler ile hareketin belirlenmesi ve yorumlanması üzerine tasarlanmıştır. Bu sisteme entegre edilecek bir EMG cihazı ile sporcunun eklem hareketlerinin yanında kas gruplarının kuvvetlerinin ölçümü de gerçekleştirilebilecektir. Optik sistem ve EMG'nin eş zamanlı çalışması ile sporcu hareket analizine yeni bir boyut getirilebilecektir.

Sonuç olarak fotogrametrik konum belirleme altyapısını kullanarak geliştirilen gerçek zamanlı hareket analiz yazılımı; başta antrenörler olmak üzere, akademisyenlerin, kinematik analizleri inceleyen biyomekanikçilerin, mühendislerin, hekimlerin, fizyoterapistlerin ve spor bilimcilerin çalışmalarında kullanabileceği kolay kullanım özelliği olan bir yazılımdır. Ayrıca bu yazılım sporcuların bireysel kullanımına da müsait olduğu için kendi gelişimlerini takip etmek isteyen sporcular tarafından bireysel olarak da kullanılabilir. Uygulama sonucunda elde edilen

bilgiler ile sporcunun yanlış yönde gerçekleştirdiği hareket veya duruşlar belirlenerek, bu yanlışlıkların giderilmesi yönünde kişiye özel antrenman programları hazırlanabilir. Uygulamanın raporlama modülünün çıktıları ile sporcunun yanlış yönde evrilmiş hareketleri belirlenebilecek, böylelikle hem başarı oranının artırılacak hem de sakatlanma riskleri ortadan kaldırılabilir. Raporlama modülünden gelen çıktıların arşivlenmesiyle sporcu gelişiminin takibi sağlanabilecektir.



KAYNAKLAR

- Açıkada, C. ve Demirel, H., 1993. *Biyomekanik ve Hareket Bilgisi*. Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi Yayınları,5-9, Eskişehir.
- Acharya, T. and Ray, A.K., 2005. *Image Processing: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Ambrosio, J., Lopes, G., Costa, J. and Abrantes, J., 2001. Spatial Reconstruction of the Human Motion Based on Images of a Single Camera. *J. Biomech.*, 34, 1217-1221.
- Amca, A., Harbili, E. ve Arıtan, S., 2010. Koparma Kaldırışının Biyomekanik Analizi için Mekanik Model Geliştirilmesi. *Hacettepe Spor Bilimleri Dergisi*, 21, 21-29.
- Anonymous, 2018a. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <http://isprs.org/society/Default.aspx> (Erişim Tarihi:28 Aralık 2018)
- Anonymous, 2018b. ThermoWorks Emissivity Table. <http://www.thermoworks.com/emissivity> (Erişim Tarihi: 12 Aralık 2018)
- Arıtan, S., Çilli, M. ve Amca, A., 2010. HUBAG:Üç Boyutlu Hareket Yazılımı. *Hacettepe J.Of Sport Sciences*, 21:1, 30-36.
- Awan, R., Smith, J. and Boon, A. J., 2002. Measuring Shoulder Internal Rotation Range of Motion: a Comparison of 3 Techniques. *Arch Phys Med Rehabil*, 83, 1229-1234.
- Aydın, S., 2018. Havalı tabanca atışlarında denge antrenmanlarının atış başarısına etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalı 66, Konya
- Bartlett, R.,2007. *Introduction to Sports Biomechanics – Analysing Human Movement Patterns* (2nd Edition). Routledge Taylor&Francis Group, New York.
- Basu, M., 2002. *Gaussian Based Edge Detection Methods a Survey*. IEEE Transactions on Systems, New Jersey.
- Bell, A. L., Pederson, D. R. and Brand, D., 1990. A Comparison of the Accuracy of Several Different Hip Center Location Prediction Methods. *Journal of Biomechanics*, 23, 617-621.
- Bendjaballah, M. Z., Shirazi,-Adl, A. and Zukor, D. J., 1997. Finite Element Analysis of Human Knee Joint in Valgus-Varus. *Clinical Biomechanics*, 12, 139-148.

- Beyer, H., 1991. *An Introduction to Photogrammetric Camera Calibration* (Technical Report). Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH, Zurich.
- Bradski, G. and Kaehler, A., 2008. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 16-17, CA, California.
- Braune, W. and Fischer, O., 1987. *The Human Gait*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Buff, H. U., Jones, L. C. and Hungerford, D. S., 1988. Experimental Determination of Forces Transmitted Through the Patello-Femoral Joint. *Journal of Biomechanics*, 21, 17-23.
- Bulgan, Ç., 2005. Cirit atma tekniğinin biyomekanik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalı, 84, Kocaeli.
- Canny, J., 1986. *A Computational Approach to Edge Detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 679-700, New Jersey.
- Cerveri, P., Pedotti, A. and Ferrigno, G., 2003. Robust Recovery of Human Motion From Video Using Kalman Filters and Virtual Humans. *Human Movement Science*, 22, 377-404.
- Ceseracciu, E., Sawacha, Z. and Cobelli C., 2014. Comparison of Markerless and Marker-Based Motion Capture Technologies Through Simultaneous Data Collection During Gait: Proof Of Concept. *Plos One*, 9, 3-12.
- Civelek, E., 2006. Comparison of kinematic results between Metu---Kiss & Ankara University vicon gait analysis systems. Master's Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU, Department of Mechanical Engineering, 106, Ankara.
- Coleman, S.G.S., 1993. A Three-Dimensional Cinematographic Analysis of the Volleyball Spike. *Journal Of Sport Sciences*, 11, 295-302.
- Crane, R., 1997. *A Simplified Approach To Image Processing: Classical and Modern Techniques in C*. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- Çetin, N., 1997. *Biyomekanik*. Setma Baskı, 4-38, Ankara.
- Çölkesen, İ. ve Sesli, F.A., 2007. Kıyı Çizgisinde Meydana Gelen Zamansal Değişimlerin Bilgi Teknolojileri ile Belirlenmesi: Trabzon Örneği. Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 30 Ekim – 02 Kasım, Trabzon.
- Daumas, B., Xu, W. L. and Bronlund, J., 2005. Jaw Mechanism Modeling and Simulation. *Mechanism and Machine Theory*, 40, 821-833.

- Dörstel, C., Jacobsen, K. and Stallmann, D., 2003. DMC -Photogrammetric Accuracy-Calibration Aspects and Generation of Synthetic DMC Images. Photogrammetric Week (Optical 3D Measurement Techniques VI), 1-5 September, 74-82, Stuttgart, Germany.
- Duda, R. and Hart, P., 1972. Use Of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Communications of the ACM.*, 15, 11-15, doi: 10.1145/361237.361242.
- Dunning, E., Malcolm, D. and Waddington I., 2004. *Sport Histories Figurational Studies in the Development of Modern Sports*. Taylor&Francis Group, New York.
- Elliott, B.C., 1995. *The Biomechanics of Tennis Stroke Production in Science and Racket Sports*. E. & F.N. Spon, London.
- Erdoğan, M., Sağiroğlu, İ., Şenduran, F., Ada, M. ve Ateş, O., 2016. Elit Atıcıların El Kavrama Kuvveti ile Atış Performansları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. *Spor Bilimleri Dergisi*, 6:3, 22-30.
- Göktepe, A., Özfıdan, I., Karabörk, H. ve Korkusuz, F., 2009. Buz Hokeyi Sporunda Slap-Shot Vuruşunun Fotogrametrik Yöntemler Kullanılarak Biyomekanik Analizi. *Niğde Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 3:2, 106-112.
- Göktepe, A., Ak, E., Karabörk, H., Şeref, Ç. ve Korkusuz, F., 2009. Futbolda Penaltı Atışının Fotogrametrik Yöntemler Kullanılarak Analiz Edilmesi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Dergi*, 1, 1-7.
- Gürbüz, H., 2006. *Genel Fotogrametri-1*. Birlik Matbaacılık-Yayıncılık, Ankara.
- Hajny, O. and Farkasova, B., 2010. A Study of Gait and Posture with the Use of Cyclograms. *Acta Polytechnica*, 50:4, 48-51.
- Halliday, D. and Resnick, R., 1991. *Fiziğin Temelleri*. (çev. C. Yalçın), Arkadaş Yayınları, 29-30, Ankara.
- Hang, S. and Zhaoli, M., 2011. Kinematics Simulation of Sit to Stand Based on Simmechanics. International Conference on Future Computer Science and Education, 20-21 August, 59-61, Xi'an, China.
- Harbili, E. ve Arıtan S., 2005. Elit Haltercilerin Koparma Tekniklerinin Biyomekanik Analizi. *Hacettepe Spor Bilimleri Dergisi*, 16:3, 124-134.
- Hernandez-Santos, C., Soto, R. and Rodriguez, E., 2011. Design and Dynamic Modeling of Humanoid Biped Robot e-Robot. Electronics Robotics and

Automotive Conference, 15-18 November, 191-196, Cuernavaca, Morelos, Mexico.

Heuvel, F.A., 1999. Vanishing Point Detection for Architectural Photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32:5, 652-659.

Hida, S., 1994. The Collateral Ligaments of the Elbow Joint: Their Functional Anatomy with Special Reference to the Pathology and Treatment of Post-Traumatic Stiff Elbow. *The Journal of the Japanese Orthopaedic Association*, 864-877.

Hildreth, E.C., 1985. *Edge Detection*. Artificial Intelligence Laboratory, MIT-AI:858, Massachusetts.

Hough, P.V.C., 1962. Method and Means of Recognizing Complex Patterns, US Patent 3069654.

Ioannou, D., Huda, W. and Laine, A. F., 1999. Circle Recognition Through a 2D Hough Transform and Radius Histogramming. *Image and Vision Computing*, 17:1, 15 -26.

İnal, H.S., 2004. *Spor Biyomekaniği Temel Prensipler*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.

Jain, N., and Jain, N., 2012. Coin Recognition Using Circular Hough Transform. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 2:3, 101-104.

Jamshidi, N., Rostami, M., Najarian, S., Saadatnia, M. and Firooz S., 2009. Modelling of Human Walking to Optimise the Function of Ankle-Foot Orthosis in Guillan-Barre Patients with Drop Foot. *Singapore Medical Journal*, 50:4, 412-417.

Kaptein, B.L., Valstar, E.R., Stoel, B.C., Rozing, P.M. and Reiber, J.H., 2004. Evaluation of Three Pose Estimation Algorithms for Model-Based Roentgen Stereophotogrammetric Analysis. *Journal of Engineering in Medicine*, 218:4, 231-238. doi: 10.1243/0954411041561036218.

Karşlı, F. ve Ayhan, E., 2005 Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameraların Metrik Performanslarının Belirlenmesi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart - 1 Nisan, Ankara, Türkiye.

Karşlı, F., 2004. Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameraların fotogrametrik potansiyellerinin araştırılması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi Ve Fotogrametri Anabilim Dalı, 240, Trabzon.

Khalil, O.A., 2002. Solutions for Exterior Orientation in Photogrammetry: A Review, *Photogrammetric Record*, 17:100, 615-634.

- Kraus, K., 2007. *Fotogrametri*. (çev. O. Altan, S. Külür, G. Toz, H. Demirel, Z. Duran, M. Çelikoyan), Nobel Dağıtım, Ankara.
- Krosshaug, T. and Bahr, R., 2005. A Model-Based Image-Matching Technique for Three-Dimensional Reconstruction of Human Motion From Uncalibrated Video Sequences. *Journal of Biomechanics*, 38: 919-929.
- Laubach, L.L., 1976. Comparative Muscular Strength of Men and Women: A Review of the Literature. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 47:534-542.
- Lee, K., 2006. Cad Systems For Human-Centered Design. *Computer-Aided Design & Applications*, 3:5, 615-628.
- Linder, W., 2009. *Digital Photogrammetry - A Practical Course*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Boehm, J., 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin.
- Malone, L.A., Gervais, P.L. and Steadward, R.D., 2002. Shooting Mechanics Related to Player Classification and Free Throw Success in Wheelchair Basketball, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 39:6, 701-710.
- Markolf, K. L., Burchfield, D. M., Shapiro, M. M., Shepard, M. F., Finerman, G. A. and Slauterbeck, J. L., 1995. Combined Knee Loading States That Generate High Anterior Cruciate Ligament Forces. *Journal of Orthopaedic Research*, 13: 930-935.
- McGinnis, P. M., 1999. *Biomechanics of Sport and Exercise*. Human Kinetics Publishers, 3-14, Illinois .
- Mehmood, A., Camescasse, B., Ouezdou, F.B. and Cheng, G., 2008. Simulation and Design of 3-Dof Eye Mechanism Using Listing's Law. 8th International Conference On Humanoid Robots, 1-3 December, 429-434., Daejeon, Korea.
- Monnet, T., Samson, M., Bernard, A., David, L. and Lacouture, P., 2014. Measurement of Three-Dimensional Hand Kinematics During Swimming with a Motion Capture System: A Feasibility Study. *Sports Engineering*, 17:17, 171-181.
- Muratlı, S., Toroman, F. ve Çetin, E., 2000. *Sportif Hareketlerin Biyomekanik Temelleri*. Bağırhan Yayinevi, 2-15, Ankara.
- O'Donoghue, P. and Ingram, B., 2001. A Notational Analysis Elite Tennis Strategy. *Journal Of Sports Science*, 19, 107-115.

- Özbek, A. 2002. *Anatomi ve Kinesiyoloji Ders Notları*. Kocaeli Üniversitesi.
- Özgören, N.Ş., 2014. Barfıkste ters devir ve düz devir hareketlerinin biyomekanik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Spoe Bilimleri ve Teknolojisi Programı, 96, Ankara.
- Parker, J.R., 2011. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. Wiley Publishing, Indianapolis.
- Pers, J., Bon, M., Kovacic, S., Sibilo, M. and Dezman, B., 2002. Observation and Analysis of Large-Scale Human Motion. *Human Movement Science*, 21, 295-311.
- Prewitt, J., 1970. *Object Enhancement and Extraction, Picture Processing and Psychopictorics*. New York Academic Press, New York.
- Qidwai, U. and Chen, C., 2010. *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach with MATLAB*. CRC Press, Florida.
- Rahmani, A. and Khalilzadeh, F. 2016. Real Time Eye Detection Using Edge Detection and Euclidean Distance. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC)*, 6, 2849-2855.
- Ramsey, D.K. and Wretenberg, P.F., 1999. Biomechanics of the Knee: Methodological Considerations in the in Vivo Kinematic Analysis of the Tibiofemoral and Patellofemoral Joint. *Clinical Biomechanics*, 14, 595–611.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H. and Wackrow, R., 2012. Parameterising Internal Camera Geometry with Focusing Distance. *The Photogrammetric Record* 27, 210-226.
- Seifozakerini, S., Yau, W., Mao, K. and Nejati, H., 2018. Hough Transform Implementation For Event-Based Systems: Concepts and Challenges. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 12, 1-18, doi:12. 10.3389/Fncom.2018.00103.
- Siegler, S., Toy, J., Seale, D. and Pedowitz, D.I., 2014. The Clinical Biomechanics Award 2013 -- Presented by the International Society of Biomechanics: New Observations on the Morphology of the Talar Dome and Its Relationship to Ankle Kinematics. *Clinical Biomechanics*, 29:1, 1-6.
- Smith, J. G., 1973. Biomechanical Analysis of Knee Flexion and Extension. *Journal of Biomechanics*, 6, 79-92.
- Sobel, I., 1970. Camera models and perception. Doctoral Dissertation, Stanford University, Dept Of Computer Science, 100, California.

- Song, M., Civco, D. and Hurd, J., 2005. A Competitive Pixel-Object Approach for Land Covers Classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26:22, 4981-4997.
- Tong, Y., Wang, H., Pi, D., and Zhang, Q., 2006. Fast Algorithm of Hough Transform -Based Approaches for Fingerprint Matching. In *Intelligent Control and Automation , WCICA 2006 The Sixth World Congress On*, 21-23 June , 10425 -10429, Dalian, China.
- Tsuruoka, Y., Tamura, Y., Shibasaki, R. and Tsuruoka, M., 2005. Analysis of Walking Improvement With Dynamic Shoe Insoles, Using Two Accelerometers. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 352, 645-658.
- Tutak, T. ve Güder, Y., 2014. Matematiksel Modellemenin Tanımı, Kapsamı ve Önemi, *Turkish Journal of Educational Studies*, TURK-JES-1:1, 173-190.
- Winter, D.A., 1990. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons, Waterloo.
- Wong Y., Kim W. and Ying N., 2005. Passive Motion Characteristics of the Talocrural and the Subtalar Joint Bydual Euler Angles. *Journal of Biomechanics*, 38, 2480-2485. doi:10.1016/J.jbiomech.2004.10.033.
- Yang, W. Y., 2011. Geometric Calibration of IR Camera Using Trinocular Vision. *Lightwave Technology*, 29:24, 3797-3803. doi: 10.1109/JLT.2011.2170812.
- Yavuzer, G., 2007. The Use of Computerized Gait Analysis in the Assessment of Neuromusculoskeletal Disorders, *Journal of Physical Medicine and Rehabilitation Sciences*, 10:2, 043-045.
- Yeadon, M.R. and Challis, J.H., 1992. *Future Directions for Performance Related Research in Sports Biomechanics*. Ancient House Press, 6-12, London.
- Yıldız, F., Karabörk, H., Yakar, M. and Yılmaz, H.M., 2005. Yersel Fotogrametride Kullanılan Metrik Olmayan Dijital Kameraların Kalibrasyonunda Kullanılan Yazılımların İncelenmesi Üzerine Bir Çalışma. *Harita Dergisi*, 134, 61-70.
- Zhang, Z., 2000. A Flexible New Technique For Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, 1330-1334.

EKLER

EK 1 [k_1, k_2] İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI

Nokta No	Düzeltilmemiş Koordinatlar (m)		[k_1, k_2] Düzeltilmiş Koordinatlar (m)		Farklar (m)		d_1 (mm)
	x	y	x	y	Δx	Δy	
1	-0,912634	0,484017	-0,913217	0,484587	-0,000583	0,000571	0,815927
2	-0,920527	0,333422	-0,920198	0,333833	0,000329	0,000411	0,526723
3	-0,928086	0,183987	-0,928370	0,183477	-0,000284	-0,000510	0,583424
4	-0,936252	0,032818	-0,936895	0,032860	-0,000643	0,000042	0,644554
5	-0,942200	-0,118522	-0,945322	-0,118161	-0,003122	0,000362	3,142806
6	0,061857	0,000567	0,060685	0,001530	-0,001172	0,000962	1,516841
7	0,054328	-0,146385	0,053676	-0,145547	-0,000653	0,000839	1,062775
8	0,047137	-0,293686	0,046646	-0,292664	-0,000491	0,001022	1,133728
9	-0,112314	0,446142	-0,111798	0,445487	0,000516	-0,000655	0,833825
10	-0,725799	0,176524	-0,724147	0,176026	0,001652	-0,000498	1,725468
11	-0,733880	0,026486	-0,732884	0,026431	0,000996	-0,000055	0,997598
12	-0,741342	-0,123658	-0,741062	-0,123748	0,000280	-0,000090	0,293550
13	-0,749117	-0,273961	-0,748627	-0,274163	0,000490	-0,000202	0,529701
14	-0,755735	-0,424194	-0,755859	-0,424581	-0,000124	-0,000387	0,406733
15	-0,505542	0,465403	-0,505524	0,463696	0,000018	-0,001706	1,706495
16	-0,514986	0,317103	-0,514398	0,316847	0,000588	-0,000256	0,641703
17	-0,523313	0,170120	-0,523366	0,169064	-0,000053	-0,001056	1,056869
18	-0,347063	-0,283533	-0,347326	-0,283859	-0,000262	-0,000326	0,418642
19	-0,353442	-0,432382	-0,353874	-0,432381	-0,000432	0,000002	0,431619
20	-0,315886	0,309114	-0,315982	0,309033	-0,000096	-0,000082	0,126119
21	-0,552419	-0,427955	-0,553702	-0,428453	-0,001283	-0,000498	1,376653
22	-0,307791	0,455223	-0,307440	0,454591	0,000351	-0,000632	0,722553
23	0,621730	-0,160996	0,620141	-0,160268	-0,001589	0,000728	1,747968
24	-0,325605	0,162910	-0,324493	0,162176	0,001112	-0,000734	1,332202
25	-0,333843	0,014147	-0,332658	0,014048	0,001184	-0,000099	1,188393
26	-0,340685	-0,133890	-0,340288	-0,134857	0,000397	-0,000967	1,045053
27	-0,134912	0,006722	-0,134905	0,007826	0,000007	0,001104	1,104211
28	-0,142442	-0,141185	-0,142230	-0,140278	0,000212	0,000907	0,931266
29	0,253555	-0,005629	0,253210	-0,004819	-0,000344	0,000810	0,880063
30	-0,120025	0,300722	-0,119561	0,301052	0,000465	0,000329	0,569598
31	-0,127838	0,155087	-0,127314	0,155125	0,000524	0,000037	0,525475
32	0,238470	-0,296462	0,239486	-0,296492	0,001016	-0,000030	1,016122
33	0,231503	-0,441252	0,232208	-0,441780	0,000705	-0,000528	0,880897
34	-0,149449	-0,288863	-0,149241	-0,288441	0,000209	0,000422	0,470889
35	-0,532459	0,021635	-0,531947	0,020220	0,000512	-0,001414	1,504144
36	-0,538877	-0,129148	-0,539862	-0,129329	-0,000985	-0,000181	1,001480
37	-0,546019	-0,278602	-0,547052	-0,279035	-0,001033	-0,000433	1,119525
38	0,068554	0,147590	0,067637	0,147812	-0,000916	0,000221	0,942611
39	0,264328	0,284960	0,265569	0,284012	0,001241	-0,000948	1,561789
40	0,258698	0,140843	0,259543	0,140246	0,000844	-0,000597	1,034008
41	0,080380	0,435856	0,081305	0,436092	0,000925	0,000235	0,954140
42	0,039541	-0,439616	0,039630	-0,439166	0,000088	0,000450	0,458727
43	0,270169	0,426253	0,271434	0,426341	0,001265	0,000088	1,267942
44	0,788460	-0,448653	0,787477	-0,447680	-0,000983	0,000973	1,382981
45	-0,952211	-0,270717	-0,953606	-0,269523	-0,001395	0,001194	1,835815
46	-0,959895	-0,422467	-0,962143	-0,421287	-0,002248	0,001179	2,538864
47	0,246419	-0,150639	0,246517	-0,150635	0,000098	0,000005	0,098412

48	0,436590	-0,156161	0,435479	-0,155535	-0,001111	0,000626	1,275203
49	0,816405	0,256961	0,816747	0,257228	0,000342	0,000266	0,433626
50	-0,156410	-0,435519	-0,155967	-0,436016	0,000443	-0,000497	0,665932
51	0,606201	-0,445776	0,606106	-0,445803	-0,000095	-0,000027	0,098927
52	0,074238	0,292937	0,074510	0,292718	0,000273	-0,000219	0,349630
53	0,453151	0,274522	0,453021	0,275045	-0,000131	0,000524	0,539617
54	0,448258	0,132378	0,447672	0,132512	-0,000586	0,000133	0,601339
55	-0,715464	0,325713	-0,715220	0,324892	0,000244	-0,000821	0,856639
56	0,456662	0,416735	0,458191	0,416352	0,001529	-0,000382	1,576567
57	0,640595	0,406135	0,641507	0,406385	0,000912	0,000250	0,945717
58	0,636464	0,265232	0,636629	0,266025	0,000165	0,000793	0,810157
59	0,632306	0,124436	0,631675	0,124750	-0,000631	0,000314	0,704952
60	0,626730	-0,017932	0,626244	-0,017463	-0,000485	0,000469	0,674651
61	0,419255	-0,443835	0,421125	-0,443930	0,001870	-0,000095	1,872110
62	0,614571	-0,303168	0,613364	-0,303177	-0,001207	-0,000009	1,206947
63	0,802003	-0,164828	0,800704	-0,164886	-0,001299	-0,000058	1,299990
64	0,793758	-0,306358	0,794268	-0,306309	0,000510	0,000049	0,512325
65	0,807593	-0,023558	0,806548	-0,023631	-0,001046	-0,000073	1,048168
66	-0,706604	0,474895	-0,706757	0,473383	-0,000153	-0,001512	1,519743
67	0,441883	-0,011545	0,441868	-0,011171	-0,000015	0,000374	0,374139
68	0,426948	-0,300000	0,428518	-0,299962	0,001569	0,000039	1,569499
69	0,820892	0,396390	0,821872	0,396802	0,000980	0,000412	1,062879
70	0,810949	0,117583	0,811809	0,117137	0,000860	-0,000446	0,968964

EK 2 [k_1, k_2, k_3] İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI

Nokta No	Düzeltilmemiş Koordinatlar (m)		[k_1, k_2, k_3] Düzeltilmiş Koordinatlar (m)		Farklar (m)		d_1 (mm)
	x	y	x	y	Δx	Δy	
1	-0,912634	0,484017	-0,913147	0,484547	0,000513	-0,000530	0,737570
2	-0,920527	0,333422	-0,920201	0,333835	-0,000326	-0,000413	0,526628
3	-0,928086	0,183987	-0,928388	0,183482	0,000303	0,000504	0,588106
4	-0,936252	0,032818	-0,936915	0,032862	0,000663	-0,000043	0,664209
5	-0,942200	-0,118522	-0,945341	-0,118162	0,003141	-0,000360	3,161715
6	0,061857	0,000567	0,060686	0,001534	0,001171	-0,000967	1,518585
7	0,054328	-0,146385	0,053677	-0,145550	0,000652	-0,000835	1,059568
8	0,047137	-0,293686	0,046646	-0,292670	0,000490	-0,001016	1,127946
9	-0,112314	0,446142	-0,111795	0,445485	-0,000519	0,000658	0,837763
10	-0,725799	0,176524	-0,724151	0,176028	-0,001649	0,000497	1,721744
11	-0,733880	0,026486	-0,732882	0,026430	-0,000998	0,000055	0,999930
12	-0,741342	-0,123658	-0,741059	-0,123748	-0,000283	0,000090	0,297018
13	-0,749117	-0,273961	-0,748627	-0,274164	-0,000490	0,000204	0,530252
14	-0,755735	-0,424194	-0,755868	-0,424587	0,000132	0,000393	0,414570
15	-0,505542	0,465403	-0,505531	0,463706	-0,000011	0,001697	1,696645
16	-0,514986	0,317103	-0,514395	0,316846	-0,000591	0,000257	0,644635
17	-0,523313	0,170120	-0,523359	0,169061	0,000046	0,001058	1,059115
18	-0,347063	-0,283533	-0,347325	-0,283860	0,000261	0,000327	0,418596
19	-0,353442	-0,432382	-0,353868	-0,432377	0,000425	-0,000005	0,425504
20	-0,315886	0,309114	-0,315977	0,309029	0,000091	0,000085	0,124418
21	-0,552419	-0,427955	-0,553696	-0,428452	0,001277	0,000497	1,370300
22	-0,307791	0,455223	-0,307438	0,454592	-0,000353	0,000630	0,722231
23	0,621730	-0,160996	0,620134	-0,160267	0,001596	-0,000730	1,754383
24	-0,325605	0,162910	-0,324491	0,162176	-0,001114	0,000734	1,333963
25	-0,333843	0,014147	-0,332662	0,014049	-0,001181	0,000098	1,185260
26	-0,340685	-0,133890	-0,340291	-0,134858	-0,000394	0,000968	1,044810
27	-0,134912	0,006722	-0,134911	0,007830	-0,000001	-0,001108	1,107648
28	-0,142442	-0,141185	-0,142237	-0,140280	-0,000205	-0,000904	0,927277
29	0,253555	-0,005629	0,253218	-0,004816	0,000336	-0,000813	0,879865
30	-0,120025	0,300722	-0,119558	0,301050	-0,000467	-0,000328	0,570964
31	-0,127838	0,155087	-0,127315	0,155129	-0,000523	-0,000041	0,524267
32	0,238470	-0,296462	0,239490	-0,296496	-0,001020	0,000034	1,020086
33	0,231503	-0,441252	0,232207	-0,441778	-0,000705	0,000525	0,878903
34	-0,149449	-0,288863	-0,149244	-0,288445	-0,000205	-0,000418	0,465229
35	-0,532459	0,021635	-0,531940	0,020219	-0,000519	0,001416	1,507862
36	-0,538877	-0,129148	-0,539855	-0,129329	0,000978	0,000181	0,994735
37	-0,546019	-0,278602	-0,547044	-0,279033	0,001025	0,000431	1,111644
38	0,068554	0,147590	0,067639	0,147818	0,000914	-0,000228	0,942187
39	0,264328	0,284960	0,265570	0,284010	-0,001241	0,000950	1,563144
40	0,258698	0,140843	0,259547	0,140250	-0,000849	0,000594	1,035622
41	0,080380	0,435856	0,081307	0,436088	-0,000927	-0,000232	0,955086
42	0,039541	-0,439616	0,039630	-0,439166	-0,000089	-0,000450	0,458875
43	0,270169	0,426253	0,271435	0,426337	-0,001265	-0,000085	1,268110
44	0,788460	-0,448653	0,787479	-0,447680	0,000981	-0,000973	1,381212
45	-0,952211	-0,270717	-0,953624	-0,269528	0,001413	-0,001189	1,846407
46	-0,959895	-0,422467	-0,962148	-0,421291	0,002253	-0,001176	2,541345
47	0,246419	-0,150639	0,246525	-0,150637	-0,000106	-0,000002	0,106393
48	0,436590	-0,156161	0,435483	-0,155535	0,001107	-0,000626	1,271383
49	0,816405	0,256961	0,816755	0,257232	-0,000350	-0,000270	0,441989
50	-0,156410	-0,435519	-0,155965	-0,436014	-0,000445	0,000496	0,666139
51	0,606201	-0,445776	0,606098	-0,445798	0,000103	0,000022	0,104838
52	0,074238	0,292937	0,074512	0,292717	-0,000275	0,000219	0,351309

53	0,453151	0,274522	0,453018	0,275042	0,000134	-0,000520	0,537299
54	0,448258	0,132378	0,447672	0,132512	0,000586	-0,000133	0,601339
55	-0,715464	0,325713	-0,715232	0,324900	-0,000232	0,000813	0,845460
56	0,456662	0,416735	0,458192	0,416352	-0,001531	0,000383	1,577824
57	0,640595	0,406135	0,641513	0,406390	-0,000919	-0,000256	0,953837
58	0,636464	0,265232	0,636626	0,266023	-0,000162	-0,000791	0,807921
59	0,632306	0,124436	0,631668	0,124748	0,000637	-0,000312	0,709566
60	0,626730	-0,017932	0,626238	-0,017463	0,000492	-0,000468	0,678886
61	0,419255	-0,443835	0,421120	-0,443925	-0,001865	0,000090	1,866868
62	0,614571	-0,303168	0,613356	-0,303174	0,001215	0,000006	1,214990
63	0,802003	-0,164828	0,800697	-0,164885	0,001306	0,000057	1,307216
64	0,793758	-0,306358	0,794264	-0,306307	-0,000505	-0,000051	0,507938
65	0,807593	-0,023558	0,806542	-0,023631	0,001051	0,000073	1,053914
66	-0,706604	0,474895	-0,706769	0,473395	0,000166	0,001500	1,509580
67	0,441883	-0,011545	0,441871	-0,011170	0,000012	-0,000375	0,375153
68	0,426948	-0,300000	0,428517	-0,299961	-0,001568	-0,000039	1,568745
69	0,820892	0,396390	0,821886	0,396811	-0,000995	-0,000421	1,079905
70	0,810949	0,117583	0,811808	0,117137	-0,000859	0,000446	0,967809



EK 3 [k_1, k_2, p_1, p_2] İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI

Nokta No	Düzeltilmemiş Koordinatlar (m)		[k_1, k_2, p_1, p_2] Düzeltilmiş Koordinatlar (m)		Farklar (m)		d_1 (mm)
	x	y	x	y	Δx	Δy	
1	-0,912634	0,484017	-0,913166	0,484676	0,000533	-0,000659	0,847501
2	-0,920527	0,333422	-0,920162	0,333971	-0,000365	-0,000549	0,659091
3	-0,928086	0,183987	-0,928332	0,183646	0,000247	0,000341	0,420775
4	-0,936252	0,032818	-0,936845	0,033064	0,000593	-0,000245	0,641911
5	-0,942200	-0,118522	-0,945262	-0,117901	0,003062	-0,000622	3,124511
6	0,061857	0,000567	0,060819	0,001289	0,001038	-0,000721	1,264049
7	0,054328	-0,146385	0,053836	-0,145805	0,000492	-0,000580	0,760779
8	0,047137	-0,293686	0,046794	-0,292869	0,000343	-0,000817	0,886215
9	-0,112314	0,446142	-0,111981	0,445507	-0,000333	0,000636	0,717530
10	-0,725799	0,176524	-0,724206	0,176084	-0,001593	0,000440	1,652951
11	-0,733880	0,026486	-0,732902	0,026487	-0,000978	-0,000001	0,978433
12	-0,741342	-0,123658	-0,741040	-0,123659	-0,000302	0,000001	0,302210
13	-0,749117	-0,273961	-0,748582	-0,273995	-0,000535	0,000035	0,536410
14	-0,755735	-0,424194	-0,755835	-0,424296	0,000100	0,000102	0,142902
15	-0,505542	0,465403	-0,505718	0,463741	0,000176	0,001661	1,670468
16	-0,514986	0,317103	-0,514537	0,316857	-0,000450	0,000246	0,512533
17	-0,523313	0,170120	-0,523447	0,169027	0,000134	0,001092	1,100335
18	-0,347063	-0,283533	-0,347235	-0,283971	0,000172	0,000438	0,470618
19	-0,353442	-0,432382	-0,353791	-0,432363	0,000349	-0,000019	0,349589
20	-0,315886	0,309114	-0,316104	0,308997	0,000217	0,000118	0,247211
21	-0,552419	-0,427955	-0,553646	-0,428317	0,001228	0,000362	1,279994
22	-0,307791	0,455223	-0,307647	0,454620	-0,000144	0,000603	0,619835
23	0,621730	-0,160996	0,620157	-0,160325	0,001573	-0,000671	1,710381
24	-0,325605	0,162910	-0,324538	0,162067	-0,001067	0,000843	1,359442
25	-0,333843	0,014147	-0,332640	0,013884	-0,001203	0,000263	1,231471
26	-0,340685	-0,133890	-0,340222	-0,135028	-0,000463	0,001138	1,228929
27	-0,134912	0,006722	-0,134822	0,007603	-0,000090	-0,000882	0,886136
28	-0,142442	-0,141185	-0,142108	-0,140517	-0,000333	-0,000668	0,746425
29	0,253555	-0,005629	0,253352	-0,005038	0,000202	-0,000591	0,624937
30	-0,120025	0,300722	-0,119634	0,300985	-0,000392	-0,000263	0,471916
31	-0,127838	0,155087	-0,127296	0,154969	-0,000542	0,000118	0,554603
32	0,238470	-0,296462	0,239614	-0,296668	-0,001144	0,000205	1,162598
33	0,231503	-0,441252	0,232278	-0,441836	-0,000775	0,000584	0,970197
34	-0,149449	-0,288863	-0,149112	-0,288625	-0,000337	-0,000238	0,412628
35	-0,532459	0,021635	-0,531972	0,020151	-0,000487	0,001483	1,561472
36	-0,538877	-0,129148	-0,539837	-0,129389	0,000960	0,000241	0,989802
37	-0,546019	-0,278602	-0,546994	-0,279025	0,000975	0,000423	1,062926
38	0,068554	0,147590	0,067708	0,147640	0,000846	-0,000050	0,847418
39	0,264328	0,284960	0,265553	0,283952	-0,001224	0,001008	1,585967
40	0,258698	0,140843	0,259626	0,140091	-0,000928	0,000752	1,194403
41	0,080380	0,435856	0,081149	0,436114	-0,000769	-0,000257	0,810738
42	0,039541	-0,439616	0,039732	-0,439245	-0,000190	-0,000371	0,416984
43	0,270169	0,426253	0,271284	0,426386	-0,001115	-0,000133	1,122699
44	0,788460	-0,448653	0,787475	-0,447551	0,000985	-0,001102	1,477468
45	-0,952211	-0,270717	-0,953562	-0,269178	0,001351	-0,001539	2,047638
46	-0,959895	-0,422467	-0,962181	-0,420846	0,002286	-0,001620	2,801947
47	0,246419	-0,150639	0,246673	-0,150865	-0,000255	0,000226	0,340484
48	0,436590	-0,156161	0,435580	-0,155695	0,001010	-0,000466	1,112469
49	0,816405	0,256961	0,816629	0,257443	-0,000224	-0,000481	0,530934
50	-0,156410	-0,435519	-0,155864	-0,436072	-0,000546	0,000553	0,776862
51	0,606201	-0,445776	0,606067	-0,445731	0,000134	-0,000045	0,140982
52	0,074238	0,292937	0,074482	0,292641	-0,000244	0,000295	0,383130

53	0,453151	0,274522	0,452973	0,275034	0,000178	-0,000512	0,542449
54	0,448258	0,132378	0,447717	0,132410	0,000541	-0,000032	0,542383
55	-0,715464	0,325713	-0,715312	0,324961	-0,000152	0,000752	0,767189
56	0,456662	0,416735	0,458019	0,416452	-0,001358	0,000283	1,387023
57	0,640595	0,406135	0,641309	0,406582	-0,000714	-0,000447	0,842724
58	0,636464	0,265232	0,636529	0,266102	-0,000065	-0,000871	0,873327
59	0,632306	0,124436	0,631649	0,124741	0,000657	-0,000305	0,724362
60	0,626730	-0,017932	0,626257	-0,017520	0,000473	-0,000412	0,626757
61	0,419255	-0,443835	0,421136	-0,443930	-0,001880	0,000094	1,882805
62	0,614571	-0,303168	0,613356	-0,303185	0,001216	0,000018	1,215871
63	0,802003	-0,164828	0,800667	-0,164819	0,001336	-0,000009	1,335582
64	0,793758	-0,306358	0,794237	-0,306214	-0,000478	-0,000144	0,499664
65	0,807593	-0,023558	0,806502	-0,023558	0,001092	0,000000	1,091712
66	-0,706604	0,474895	-0,706871	0,473449	0,000267	0,001446	1,470822
67	0,441883	-0,011545	0,441963	-0,011327	-0,000080	-0,000217	0,231646
68	0,426948	-0,300000	0,428585	-0,300067	-0,001636	0,000067	1,637576
69	0,820892	0,396390	0,821704	0,397153	-0,000812	-0,000763	1,114486
70	0,810949	0,117583	0,811736	0,117259	-0,000787	0,000324	0,850805



**EK 4 [k₁, k₂, k₃, p₁, p₂] İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ
KOORDİNATLARI**

Nokta No	Düzeltilmemiş Koordinatlar (m)		[k ₁ , k ₂ , k ₃ , p ₁ , p ₂] Düzeltilmiş Koordinatlar (m)		Farklar (m)		d ₁ (mm)
	x	y	x	y	Δx	Δy	
1	-0,912634	0,484017	-0,913175	0,484681	0,000541	-0,000664	0,856645
2	-0,920527	0,333422	-0,920162	0,333970	-0,000365	-0,000549	0,659064
3	-0,928086	0,183987	-0,928330	0,183645	0,000244	0,000342	0,419898
4	-0,936252	0,032818	-0,936843	0,033063	0,000591	-0,000245	0,639672
5	-0,942200	-0,118522	-0,945259	-0,117900	0,003060	-0,000622	3,122310
6	0,061857	0,000567	0,060819	0,001288	0,001038	-0,000721	1,263720
7	0,054328	-0,146385	0,053836	-0,145805	0,000492	-0,000581	0,761218
8	0,047137	-0,293686	0,046794	-0,292868	0,000343	-0,000818	0,886746
9	-0,112314	0,446142	-0,111982	0,445507	-0,000333	0,000635	0,716841
10	-0,725799	0,176524	-0,724206	0,176084	-0,001594	0,000441	1,653398
11	-0,733880	0,026486	-0,732902	0,026487	-0,000978	-0,000002	0,978050
12	-0,741342	-0,123658	-0,741040	-0,123659	-0,000302	0,000001	0,301826
13	-0,749117	-0,273961	-0,748582	-0,273995	-0,000535	0,000034	0,536392
14	-0,755735	-0,424194	-0,755834	-0,424295	0,000099	0,000101	0,141748
15	-0,505542	0,465403	-0,505718	0,463740	0,000175	0,001662	1,671573
16	-0,514986	0,317103	-0,514537	0,316857	-0,000449	0,000246	0,512196
17	-0,523313	0,170120	-0,523448	0,169028	0,000136	0,001092	1,100190
18	-0,347063	-0,283533	-0,347235	-0,283971	0,000172	0,000438	0,470350
19	-0,353442	-0,432382	-0,353792	-0,432364	0,000350	-0,000019	0,350325
20	-0,315886	0,309114	-0,316105	0,308997	0,000218	0,000118	0,247750
21	-0,552419	-0,427955	-0,553647	-0,428317	0,001229	0,000362	1,281099
22	-0,307791	0,455223	-0,307647	0,454620	-0,000144	0,000603	0,619746
23	0,621730	-0,160996	0,620158	-0,160325	0,001572	-0,000671	1,709322
24	-0,325605	0,162910	-0,324538	0,162067	-0,001067	0,000843	1,359442
25	-0,333843	0,014147	-0,332639	0,013884	-0,001203	0,000263	1,231847
26	-0,340685	-0,133890	-0,340221	-0,135028	-0,000464	0,001138	1,228807
27	-0,134912	0,006722	-0,134821	0,007603	-0,000091	-0,000881	0,885967
28	-0,142442	-0,141185	-0,142108	-0,140516	-0,000334	-0,000668	0,747283
29	0,253555	-0,005629	0,253351	-0,005038	0,000204	-0,000591	0,624766
30	-0,120025	0,300722	-0,119634	0,300985	-0,000391	-0,000263	0,471597
31	-0,127838	0,155087	-0,127296	0,154968	-0,000542	0,000119	0,555101
32	0,238470	-0,296462	0,239614	-0,296667	-0,001144	0,000205	1,162169
33	0,231503	-0,441252	0,232278	-0,441836	-0,000775	0,000584	0,970371
34	-0,149449	-0,288863	-0,149112	-0,288624	-0,000338	-0,000239	0,413441
35	-0,532459	0,021635	-0,531972	0,020152	-0,000487	0,001483	1,560959
36	-0,538877	-0,129148	-0,539838	-0,129389	0,000961	0,000241	0,990547
37	-0,546019	-0,278602	-0,546995	-0,279026	0,000976	0,000424	1,064098
38	0,068554	0,147590	0,067708	0,147639	0,000846	-0,000049	0,847368
39	0,264328	0,284960	0,265553	0,283952	-0,001224	0,001008	1,585784
40	0,258698	0,140843	0,259625	0,140091	-0,000927	0,000753	1,193988
41	0,080380	0,435856	0,081148	0,436114	-0,000768	-0,000258	0,810557
42	0,039541	-0,439616	0,039732	-0,439245	-0,000190	-0,000371	0,416984
43	0,270169	0,426253	0,271284	0,426387	-0,001115	-0,000134	1,122767
44	0,788460	-0,448653	0,787475	-0,447551	0,000985	-0,001102	1,477724
45	-0,952211	-0,270717	-0,953560	-0,269177	0,001349	-0,001539	2,046804
46	-0,959895	-0,422467	-0,962181	-0,420846	0,002286	-0,001621	2,802281
47	0,246419	-0,150639	0,246672	-0,150865	-0,000254	0,000226	0,339718
48	0,436590	-0,156161	0,435579	-0,155695	0,001011	-0,000466	1,112818
49	0,816405	0,256961	0,816628	0,257442	-0,000223	-0,000481	0,530187
50	-0,156410	-0,435519	-0,155865	-0,436072	-0,000545	0,000553	0,776797

51	0,606201	-0,445776	0,606068	-0,445732	0,000133	-0,000044	0,140435
52	0,074238	0,292937	0,074482	0,292641	-0,000244	0,000295	0,383130
53	0,453151	0,274522	0,452974	0,275035	0,000178	-0,000513	0,542868
54	0,448258	0,132378	0,447717	0,132410	0,000541	-0,000032	0,542000
55	-0,715464	0,325713	-0,715310	0,324960	-0,000154	0,000753	0,768342
56	0,456662	0,416735	0,458019	0,416452	-0,001358	0,000283	1,386965
57	0,640595	0,406135	0,641308	0,406581	-0,000713	-0,000447	0,841767
58	0,636464	0,265232	0,636529	0,266103	-0,000065	-0,000871	0,873642
59	0,632306	0,124436	0,631649	0,124741	0,000656	-0,000305	0,723787
60	0,626730	-0,017932	0,626258	-0,017520	0,000472	-0,000412	0,625888
61	0,419255	-0,443835	0,421137	-0,443930	-0,001881	0,000095	1,883615
62	0,614571	-0,303168	0,613357	-0,303186	0,001215	0,000018	1,214728
63	0,802003	-0,164828	0,800668	-0,164819	0,001335	-0,000009	1,334812
64	0,793758	-0,306358	0,794237	-0,306214	-0,000479	-0,000144	0,499949
65	0,807593	-0,023558	0,806502	-0,023558	0,001091	0,000000	1,091328
66	-0,706604	0,474895	-0,706870	0,473447	0,000266	0,001448	1,472243
67	0,441883	-0,011545	0,441962	-0,011327	-0,000079	-0,000217	0,231513
68	0,426948	-0,300000	0,428585	-0,300067	-0,001636	0,000067	1,637588
69	0,820892	0,396390	0,821702	0,397153	-0,000810	-0,000762	1,112495
70	0,810949	0,117583	0,811736	0,117259	-0,000787	0,000324	0,850805

EK 5 $[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2]$ İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ

KOORDİNATLARI

Nokta No	Düzeltilmemiş Koordinatlar (m)		$[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2]$ Düzeltilmiş Koordinatlar (m)		Farklar (m)		d_1 (mm)
	x	y	x	y	Δx	Δy	
1	-0,912634	0,484017	-0,913180	0,484684	0,000546	-0,000667	0,862035
2	-0,920527	0,333422	-0,920162	0,333970	-0,000366	-0,000548	0,659037
3	-0,928086	0,183987	-0,928329	0,183645	0,000243	0,000342	0,419463
4	-0,936252	0,032818	-0,936841	0,033063	0,000589	-0,000245	0,637788
5	-0,942200	-0,118522	-0,945258	-0,117900	0,003058	-0,000622	3,120862
6	0,061857	0,000567	0,060819	0,001288	0,001038	-0,000721	1,263556
7	0,054328	-0,146385	0,053836	-0,145804	0,000492	-0,000581	0,761877
8	0,047137	-0,293686	0,046794	-0,292868	0,000343	-0,000818	0,887012
9	-0,112314	0,446142	-0,111982	0,445507	-0,000332	0,000635	0,716408
10	-0,725799	0,176524	-0,724205	0,176083	-0,001594	0,000441	1,653922
11	-0,733880	0,026486	-0,732902	0,026488	-0,000978	-0,000002	0,977666
12	-0,741342	-0,123658	-0,741040	-0,123659	-0,000302	0,000001	0,301826
13	-0,749117	-0,273961	-0,748582	-0,273995	-0,000535	0,000034	0,536374
14	-0,755735	-0,424194	-0,755834	-0,424295	0,000098	0,000101	0,141005
15	-0,505542	0,465403	-0,505717	0,463738	0,000175	0,001664	1,673251
16	-0,514986	0,317103	-0,514537	0,316857	-0,000449	0,000246	0,511859
17	-0,523313	0,170120	-0,523448	0,169028	0,000136	0,001092	1,100238
18	-0,347063	-0,283533	-0,347235	-0,283971	0,000172	0,000438	0,470350
19	-0,353442	-0,432382	-0,353793	-0,432364	0,000350	-0,000018	0,350693
20	-0,315886	0,309114	-0,316105	0,308997	0,000218	0,000117	0,247952
21	-0,552419	-0,427955	-0,553648	-0,428317	0,001230	0,000362	1,281835
22	-0,307791	0,455223	-0,307647	0,454620	-0,000144	0,000603	0,619746
23	0,621730	-0,160996	0,620158	-0,160325	0,001571	-0,000671	1,708615
24	-0,325605	0,162910	-0,324538	0,162067	-0,001067	0,000843	1,359442
25	-0,333843	0,014147	-0,332639	0,013884	-0,001204	0,000263	1,232222
26	-0,340685	-0,133890	-0,340221	-0,135028	-0,000464	0,001138	1,228685
27	-0,134912	0,006722	-0,134820	0,007603	-0,000092	-0,000881	0,885759
28	-0,142442	-0,141185	-0,142107	-0,140516	-0,000334	-0,000669	0,747713
29	0,253555	-0,005629	0,253351	-0,005039	0,000204	-0,000590	0,624745
30	-0,120025	0,300722	-0,119634	0,300985	-0,000391	-0,000263	0,471278
31	-0,127838	0,155087	-0,127295	0,154968	-0,000543	0,000119	0,555538
32	0,238470	-0,296462	0,239614	-0,296667	-0,001144	0,000205	1,161741
33	0,231503	-0,441252	0,232278	-0,441837	-0,000775	0,000584	0,970544
34	-0,149449	-0,288863	-0,149111	-0,288624	-0,000338	-0,000239	0,413920
35	-0,532459	0,021635	-0,531973	0,020152	-0,000486	0,001483	1,560565
36	-0,538877	-0,129148	-0,539838	-0,129389	0,000962	0,000241	0,991292
37	-0,546019	-0,278602	-0,546996	-0,279026	0,000977	0,000424	1,065031
38	0,068554	0,147590	0,067708	0,147639	0,000846	-0,000048	0,847335
39	0,264328	0,284960	0,265553	0,283952	-0,001224	0,001008	1,585784
40	0,258698	0,140843	0,259625	0,140090	-0,000927	0,000753	1,194053
41	0,080380	0,435856	0,081148	0,436115	-0,000768	-0,000258	0,810285
42	0,039541	-0,439616	0,039732	-0,439245	-0,000190	-0,000371	0,416984
43	0,270169	0,426253	0,271284	0,426387	-0,001115	-0,000134	1,122802
44	0,788460	-0,448653	0,787474	-0,447551	0,000985	-0,001102	1,477980
45	-0,952211	-0,270717	-0,953559	-0,269177	0,001348	-0,001540	2,046262
46	-0,959895	-0,422467	-0,962181	-0,420845	0,002286	-0,001621	2,802447
47	0,246419	-0,150639	0,246672	-0,150865	-0,000253	0,000226	0,339432
48	0,436590	-0,156161	0,435579	-0,155695	0,001011	-0,000466	1,113166
49	0,816405	0,256961	0,816627	0,257442	-0,000222	-0,000480	0,529341
50	-0,156410	-0,435519	-0,155865	-0,436073	-0,000545	0,000554	0,776938

51	0,606201	-0,445776	0,606068	-0,445732	0,000133	-0,000044	0,139980
52	0,074238	0,292937	0,074482	0,292641	-0,000244	0,000295	0,383130
53	0,453151	0,274522	0,452974	0,275035	0,000177	-0,000513	0,543014
54	0,448258	0,132378	0,447718	0,132410	0,000541	-0,000032	0,541616
55	-0,715464	0,325713	-0,715309	0,324960	-0,000155	0,000753	0,769137
56	0,456662	0,416735	0,458019	0,416452	-0,001358	0,000283	1,386906
57	0,640595	0,406135	0,641308	0,406581	-0,000713	-0,000446	0,841289
58	0,636464	0,265232	0,636530	0,266103	-0,000066	-0,000871	0,873958
59	0,632306	0,124436	0,631650	0,124741	0,000655	-0,000305	0,723091
60	0,626730	-0,017932	0,626259	-0,017520	0,000471	-0,000412	0,625310
61	0,419255	-0,443835	0,421137	-0,443931	-0,001882	0,000096	1,884028
62	0,614571	-0,303168	0,613357	-0,303186	0,001214	0,000018	1,213964
63	0,802003	-0,164828	0,800668	-0,164820	0,001334	-0,000008	1,334426
64	0,793758	-0,306358	0,794238	-0,306215	-0,000479	-0,000143	0,500234
65	0,807593	-0,023558	0,806503	-0,023558	0,001091	0,000000	1,090944
66	-0,706604	0,474895	-0,706869	0,473446	0,000265	0,001449	1,473238
67	0,441883	-0,011545	0,441962	-0,011327	-0,000079	-0,000217	0,231382
68	0,426948	-0,300000	0,428585	-0,300067	-0,001636	0,000067	1,637611
69	0,820892	0,396390	0,821700	0,397152	-0,000809	-0,000762	1,110982
70	0,810949	0,117583	0,811736	0,117259	-0,000787	0,000324	0,850805