



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DEĞİŞEN KOL POZİSYONLARINDA ÖN KOLDAN ÖLÇÜLEN SEMG SİNYALLERİ VE ATALETSEL VERİLER KULLANILARAK EL HAREKETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Emre PARLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Elektronik Mühendisliği (Türkçe)

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Ulvi BAŞPINAR

İSTANBUL, 2021



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DEĞİŞEN KOL POZİSYONLARINDA ÖN KOLDAN ÖLÇÜLEN SEMG SİNYALLERİ VE ATALETSEL VERİLER KULLANILARAK EL HAREKETLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Emre PARLAK
523118008

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Elektronik Mühendisliği (Türkçe)

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Ulvi BAŞPINAR

İSTANBUL, 2021

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana desteğini esirgemeyen sayın Doktor Öğretim Üyesi Ulvi BAŞPINAR hocama, manevi desteğiyle yanımdan ayrılmayan sevgili nişanlım Fatma CAYVAZ'a ve beni bu günlere getiren aileme teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER.....	vi
KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER.....	viii
TABLOLAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	3
2.1. Elektromyografi	3
2.2. Veri Toplama	4
2.2.1. Myo kol bandı.....	6
2.3. Özellik Çıkarma	7
2.3.1. Hareket bölgelerinin belirlenmesi	7
2.3.2. Willison genliği	9
2.3.3. Ortalama mutlak değer	10
2.3.4. Eğim işareti değişimi	10
2.3.5. Dalga boyunun uzunluğu.....	11
2.3.6. Sıfır geçiş sayısı.....	12
2.3.7. Ortalama frekans.....	12
2.3.8. İvme ve jiroskop verileri.....	13
2.4. Yapay Sinir Ağı	14
2.5. Yapay Sinir Ağının Eğitilmesi.....	15
2.6. Destek Vektör Makinesi	20
2.7. Destek Vektör Makinesinin Eğitilmesi	21
3. BULGULAR	23
3.1. Tüm Farklı Kol Pozisyonlarında ve Tüm Farklı Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Sınıflandırılması	23
3.1.1. Kol vücuda paralel ve bilek açısı 0 dereceyken yapılan hareketler (P11)	23
3.1.2. Kol vücuda paralel ve bilek açısı 90 dereceyken yapılan hareketler (P12)	23
3.1.3. Kol vücuda paralel ve bilek açısı 180 dereceyken yapılan hareketler (P13)	24
3.1.4. Kol vücuda dik ve bilek açısı 0 dereceyken yapılan hareketler (P21).....	25
3.1.5. Kol vücuda dik ve bilek açısı 90 dereceyken yapılan hareketler (P22)....	25
3.1.6. Kol vücuda dik ve bilek açısı 180 dereceyken yapılan hareketler (P23)..	26

3.1.7. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve bilek açısı 0 dereceyken yapılan hareketler (P31)	26
3.1.8. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve bilek açısı 90 dereceyken yapılan hareketler (P32)	27
3.1.9. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve bilek açısı 180 dereceyken yapılan hareketler (P33)	28
3.1.10. Farklı kol pozisyonlarında ve bilek açılarındaki yapılan hareket sınıflamalarının sonuçlarının değerlendirilmesi	29
3.2. Aynı Kol Pozisyonunda ve Farklı Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Sınıflandırılması	31
3.2.1. Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (P1x)	31
3.2.2. Kol yere paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler(P2x).....	31
3.2.3. Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (P3x)	32
3.2.4. Bilek açısı tanıma	33
3.2.5. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareket sınıflamalarının sonuçlarının değerlendirilmesi	36
3.3. Tüm Kol Pozisyonlarında ve Tüm Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Beraber Sınıflandırılması.....	39
3.3.1. Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (Pxx)	39
3.3.2. Bilek açısı ve kol pozisyonu tanıma	40
3.4. İvme ve Jiroskop Verilerinin Aynı Kol Pozisyonu ve Farklı Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Sınıflandırılmalarına Etkileri	42
3.4.1. Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (P1x+ivme+jiroskop).....	42
3.4.2. Kol yere paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (P2x+ivme+jiroskop).....	43
3.4.3. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (P3x+ivme+jiroskop).....	45
3.4.4. Bilek açısı tanıma	46
3.4.5. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareket sınıflamalarının sonuçlarına ivme ve jiroskop verilerinin etkilerinin değerlendirilmesi	51
3.5. İvme ve Jiroskop Verilerinin Tüm Kol Pozisyonu ve Tüm Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Beraber Sınıflandırılmalarına Etkileri.....	53
3.5.1. Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketler (Pxx + ivme + jiroskop)	53
3.5.2. Bilek açısı ve kol pozisyonu tanıma	56
3.6. Destek Vektör Makinesi Kullanarak Yapılan Sınıflandırmalar.....	58
3.6.1. Tüm farklı kol pozisyonlarında ve tüm farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılması	58

3.6.2. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması	60
3.6.3. Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması	61
3.6.4. İvme ve jiroskop verilerinin aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılmalarına etkileri	62
3.6.5. İvme ve jiroskop verilerinin tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmalarına etkileri	63
4. DEĞERLENDİRME	64
REFERANSLAR	65



ÖZET

MYO bileklik gibi çeşitli veri toplama araçlarıyla ön koldan ölçülen EMG sinyalleri işlendiğinde kişinin yaptığı hareketler tahmin edilebiliyor. Uygulamalarda tahmin tutarlılığı kişiye veya çeşitli çevre etkilerine göre azalabilir. Kol kaslarının yorulması, ciltteki ter, elektrotlardan kaynaklanan gürültüler alınan verilerin kalitesini etkileyebilir. Bunlara ek olarak aynı hareketi yaparken kolun ve bileğin değişen pozisyonları EMG sinyallerinin değişiminde önemli rol oynar. Bu çalışmada 13 kişinin sağ kolundan alınan veriler kullanılarak yaptığı el hareketi, bilek açısı ve kol pozisyon bilgisi bulunmak istenmiştir. Bunun için toplanan veriler ile yapay sinir ağı ve destek vektör makinaları kullanılarak hareket ve pozisyonlar birbirinden ayrılmak istenmiştir. İkisi bilek hareketi olmak üzere toplam dört ayrı hareket, toplam 3 ayrı bilek açısı ve 3 ayrı kol pozisyonu, kombinasyonlarla yapılarak hareket tanıma, hareket ve bilek açısı tanıma ve hareket, bilek açısı ve kol pozisyonu tanıma olmak üzere üç farklı sınıfta incelenmiştir. Tahmin doğruluğunu arttırmak için MYO bileklik üzerinde bulunan jiroskop ve ivme sensor verileri de ikinci ve üçüncü sınıfların eğitiminde kullanılmıştır. MYO bileklik 8 kanala sahiptir ve bu kanallar farklı kas ve kas grupları üzerine denk gelmektedir. Bu kanallar üzerinde alınan verilerden hareket bölgeleri çıkartılıp bu hareket bölgelerinden çıkarılan özellikler eğitimde kullanılır. Çalışma kaydedilmiş veriler üzerinden yapıldığı için çevrimdışı olarak 5 farklı grupta sınıflama yapılmıştır. Yapılan çalışmaya göre farklı kol pozisyonlarında ve farklı bilek açılarında ayrı ayrı yapılan sınıflama sonuçlarının %73,5 ile %92,5 arasında değiştiği görülmüştür. Aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarında yapılan el hareket tanıma başarısı minimum %74,17 maksimum %92,5 olarak tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca sadece EMG sinyali ile kol pozisyonunun ve/veya bilek açısının tespit edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sadece EMG sinyali ile tespitin yetersiz olduğu, ivme verisinin eklenmesiyle başarının fark edilir oranda arttığı tespit edilmiştir. İvme ve jiroskop verilerinin farklı kol pozisyonlarında el hareket sınıflandırmaya olan etkisi incelendiğinde ivme ve jiroskop verilerinin el hareket tanımaya bazı kol pozisyonlarında pozitif etki ettiği, bazılarında negatif etki ettiği ve bazılarında ise etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak ivme ve jiroskop verilerinin el hareket sınıflandırmalarında ön görülebilir bir katkı sunmadığı anlaşılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan bir diğer araştırma ise YSA ve DVM sınıflayıcılarının performanslarının karşılaştırılmasıdır. Karşılaştırma sonucunda DVM'nin sınıflama performanslarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: MYO bileklik, EMG, Yapay Sinir Ağları, Destek Vektör Makineleri, hareket tanıma

ABSTRACT

When EMG signals measured from the forearm are processed with various data collection tools such as MYO armband, the movements of the person can be estimated. In applications, the prediction consistency may decrease depending on the person or various environmental effects. For example, exhaustion of the arm muscles, skin sweat, and noises from electrodes can affect the quality of the data received. In addition, changing positions of the arm and wrist play an important role in the change of EMG signals while performing the same movement. In this study, it was aimed to find hand movement, wrist angle and arm position made by 13 people using data from the right arm. For this, with the data collected, the artificial neural network and support vector machines are used to separate the movements and positions. Four different movements, two of which are wrist movements, a total of 3 different wrist angles and 3 different arm positions, have been examined in three different classes as motion recognition, motion and wrist angle recognition and motion, wrist angle and arm position recognition. Gyroscope and acceleration sensor data on MYO wristband were also used in the training of the second and third grades to increase the accuracy of the prediction. MYO armband has 8 channels, and these channels correspond to different muscle and muscle groups. Motion zones are extracted from the data received on these channels and features extracted from these motion zones are used in training. Since the study was conducted on the recorded data, classification was made offline in 5 different groups. According to the study, it was seen that the results of the classification made separately at different arm positions and different wrist angles varied between 73.5% and 92.5%. The hand gesture recognition success in the same arm position and different wrist angles was determined as a minimum of 74.17% and a maximum of 92.5%. In the study, it was also investigated whether the arm position and/or wrist angle could be detected with the EMG signal alone. According to the results obtained, it was determined that detection with only the EMG signal was insufficient, and the success increased noticeably with the addition of acceleration data. When the effect of acceleration and gyroscope data on hand gesture classification in different arm positions was examined, it was determined that acceleration and gyroscope data had a positive effect on hand motion recognition in some arm positions, had a negative effect on some, and had no effect on others. As a result, it is understood that acceleration and gyroscope data do not make a predictable contribution to hand gesture classification. Another research carried out within the scope of this thesis is the comparison of the performances of ANN and SVM classifiers. As a result of the comparison, it has been seen that the classification performances of SVM are higher.

KEY WORDS: MYO armband, EMG, Artificial Neural Networks, Support Vector Machines, gesture recognition

SEMBOLLER

δ : Eğim işareti değişim sayısı

θ : Sıfır geçiş sayısı

$\bar{X}_l$: Ortalama mutlak değer

ℓ : Dalga formu uzunluğu

μf : Ortalama frekans



KISALTMALAR

EMG: elektromiyogram / elektromiyografi

YSA: yapay sinir ağıları

DVM: destek vektör makinası

İME: İnsan Makine Etkileşimi

IMU: Atalet Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)

WAMP: Wilson Amplitude, Wilson Genliği



ŞEKİLLER

Şekil 2-1: MATLAB platformunda çizdirilmiş örnek bir kol EMG sinyali (20 hareket)	3
Şekil 2: Veriler alınırken bilek açıları ve kol pozisyonları.....	5
Şekil 3: Yapılan el hareketleri, P21 konumunda	6
Şekil 4: MYO kol bandı	7
Şekil 5: Örnek bir kol EMG sinyalinin üzerinden hareket bölgelerinin tespiti	8
Şekil 6: Şekil 5’de belirtilen sinyalin birinci hareket bölgesi.....	9
Şekil 7: Şekil 6’de verilen sinyalin mutlak değeri üzerinde uygulanan WAMP fonksiyonu konumları.....	10
Şekil 8: Şekil 6’de verilen sinyalin eğim değişim noktaları ve eşik değeri.....	11
Şekil 9: Şekil 6’de verilen sinyalin sıfır geçiş noktaları ve eşik değerleri	12
Şekil 10: Bilek ekstensiyon hareketi kol vücuda paralel ve bilek açısı sıfır derece (P11) pozisyonunda x eksenine için ivme verisi ve aktivasyon bölgeleri.....	13
Şekil 11: McCulloch-Pitts nöron modeli	14
Şekil 12: Örnek bir Yapay Sinir Ağı modeli	14
Şekil 13: Nntool arayüzünde fonksiyonlar seçilmiş bir Ağ Özellikleri sekmesi[27].	15
Şekil 14: Eğitilecek ağıın ön gösterimi. Giriş katmanı 48 elemanlı, gizli katmanda 25 nöron bulunmakta ve çıkış katmanında 4 düğüm bulunmakta[27].	16
Şekil 15: Destek Vektör Makinesi.....	20
Şekil 16: Tüm farklı kol pozisyonlarında ve tüm farklı bilek açılarında yapılan hareketleri sınıflandırmak için eğitilen ağların başarı yüzdeleri	30
Şekil 17: Tüm farklı kol pozisyonlarında ve bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen ağların sonuçlarına göre hata yoğunlukları	30
Şekil 18: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen tüm ağların başarı yüzdeleri	36
Şekil 19: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen ağların sonuçlarına göre hata yoğunlukları	37
Şekil 20: Bilek açısı tanımlamada yapılan hataların aslında olması gerektiği açılarını gösterir grafik	39
Şekil 21: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması için eğitilen ağların sonuçlarına göre hata yoğunlukları	40
Şekil 22: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı bilek açısı tahminlerinin hata dağılımları	41
Şekil 23: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı kol pozisyonu tahminlerinin hata dağılımları.....	42
Şekil 24: İvme ve jiroskop verilerinin başarı yüzdelerine etkisi	51
Şekil 25: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırmak için eğitilen ağların hatalı sınıflandırmalarının yoğunlukları.....	52
Şekil 26: EMG verilerine ivme ve jiroskop verileri eklendikten sonra tahmin hatalarının dağılımlarını gösterir tablo	53
Şekil 27: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmaları için eğitilen ağa ivme ve jiroskop verilerinin etkisi.....	55
Şekil 28: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmaları için ivme ve jiroskop verileriyle eğitilen ağların hataların dağılımı.	55
Şekil 29: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin bilek açısı tespiti için eğitilen ağların yaptıkları hataların karşılaştırılması	57
Şekil 30: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin kol pozisyonu tespiti için eğitilen ağların yaptıkları hataların dağılımlarının karşılaştırılması	58
Şekil 31: Tüm bilek ve kol pozisyonlarında Destek Vektör Makinesi (DVM/SVM) çıktılarına ek olarak YSA çıktıları.....	58

Şekil 32: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen DVM sınıflamalarının ve daha önce eğitilen YSA başarı oranları.....	60
Şekil 33: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması için eğitilen DVM ve YSA başarı oranları	61
Şekil 34: İvme ve jiroskop verilerinin aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılmalarına etkileri için kullanılan DVM ve YSA başarı oranları.....	62
Şekil 35: İvme ve jiroskop verilerinin tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmalarına etkilerini incelemek için kullanılan DVM ve YSA sınıflamaları başarı oranları	63



TABLolar

Tablo 1: Hareketler tablosu	4
Tablo 2: İkinci madde için hareketlerin ve pozisyon bilgilerinin eğitim ve test verisinde sıralanması ve hedef matrisinin dizilimi.....	17
Tablo 3: Üçüncü madde için hareketlerin ve pozisyon bilgilerinin eğitim ve test verisinde sıralanması ve hedef matrisinin diziliminden bir parça	18
Tablo 4: İkinci ve dördüncü maddelerde kullanılabilecek eğitim ve hedef verilerinin el hareketi tahminine ek olarak bilek açısı tahmininde kullanılabilmesi için dizilimleri...	19
Tablo 5: Üçüncü ve beşinci maddede kullanılacak eğitim ve hedef matrislerin dizilimleri	19
Tablo 6: İkinci madde için kullanılacak DVM hedef vektörü	22
Tablo 7: Üçüncü madde için kullanılacak DVM hedef vektörü.....	22
Tablo 8: Kol vücuda paralel ve avuç içi sırt doğrultusunda (bilek açısı 0 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	23
Tablo 9: Kol vücuda paralel ve avuç içi kişiye dönük (bilek açısı 90 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	24
Tablo 10: Kol vücuda paralel ve avuç içi yüz doğrultusunda (bilek açısı 180 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları.....	24
Tablo 11: Kol vücuda dik ve avuç içi yere dönük (bilek açısı 0 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	25
Tablo 12: Kol yere paralel ve avuç içi sola dönük (bilek açısı 90 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	25
Tablo 13: Kol yere paralel ve avuç içi yukarı dönük (bilek açısı 180 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	26
Tablo 14: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve avuç içi aşağı dönük (bilek açısı 0 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları.....	27
Tablo 15: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve avuç içi kişiye dönük (bilek açısı 90 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları.....	28
Tablo 16: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve avuç içi yukarı dönük (bilek açısı 180 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	29
Tablo 17: Tüm farklı kol pozisyonlarında ve bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen tüm ağlar için karışım matrisini gösterir tablo	30
Tablo 18: Kol vücuda paralel iken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları	31
Tablo 19: Kol vücuda dik pozisyonda tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları.....	32
Tablo 20: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırma sonuçları	32
Tablo 21: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerde bilek açısıyla beraber yapılan hareket sınıflama sonuçları	33
Tablo 22: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarındaki hareketlerin yapıldığı açıların sınıflandırma sonuçları	34
Tablo 23: Kol yere paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerde bilek açılarıyla beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları.....	34
Tablo 24: Kol yere paralelken tüm bilek açılarındaki hareketlerin yapıldığı bilek açılarının sınıflandırma sonuçları	35
Tablo 25: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerle beraber bilek açısı tespiti sırasında yapılan hareketlerin sınıflandırma sonuçları	35
Tablo 26: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarındaki hareketlerin yapıldığı bilek açısının sınıflandırma sonuçları.....	36

Tablo 27: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen tüm ağların sonuçlarını gösterir tablo	37
Tablo 28: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı bilek açısı tespiti için eğitilen ağların sonuçları	38
Tablo 29: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları.....	39
Tablo 30: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açılarının sınıflandırma sonuçları	40
Tablo 31: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı kol pozisyonlarının sınıflandırma sonuçları	41
Tablo 32: Kol vücuda paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle beraber sınıflama sonuçları	42
Tablo 33: Kol yere paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle beraber sınıflama sonuçları	43
Tablo 34: Kol yere paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle beraber sınıflama sonuçları	44
Tablo 35: Kol yere paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle beraber sınıflama sonuçları	44
Tablo 36: Kol yukarı uzanır pozisyondayken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle beraber sınıflama sonuçları	45
Tablo 37: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle beraber sınıflama sonuçları	46
Tablo 38: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında bilek açısı tespitiyle beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları.....	46
Tablo 39: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları	47
Tablo 40: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları	47
Tablo 41: Kol yere paralelken tüm bilek açılarında bilek açısı tespitiyle beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları	48
Tablo 42: Kol yere paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları.....	48
Tablo 43: Kol yere paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları.....	49
Tablo 44: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında bilek açısı tespitiyle beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları.....	49
Tablo 45: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları	50
Tablo 46: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları	50
Tablo 47: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamak için ivme verileri eklenerek eğitilen tüm ağların toplam sonuçlarını gösterir tablo.....	51
Tablo 48: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırma için ivme ve jiroskop verileri eklenerek eğitilen tüm ağların toplam sonuçlarını tablo	52
Tablo 49: EMG verilerine ek ivme verileri kullanılarak bilek açısı tahmini için eğitilen ağların karışıklık matrisi olarak toplam sonuçları (a) ile EMG ve ivme verilerine ek jiroskop verileri de kullanılarak eğitilen ağların bilek açısı tespiti için sonuçlarını karışıklık matrisi olarak(b) gösterir tablolar.	52
Tablo 50: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme	

verileriyle sınıflandırma sonuçları.....	54
Tablo 51: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları.....	54
Tablo 52: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları	56
Tablo 53: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı kol pozisyonunun ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları	56
Tablo 54: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı bilek açılarının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları	57
Tablo 55: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı kol pozisyonunun ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları	57
Tablo 56: Şekil 31’de verilen grafiğe dair değerleri gösterir tablo	59
Tablo 57: Şekil 32’deki grafiği çizdirmek için kullanılan başarı oranları.....	60
Tablo 58: Şekil 34’deki grafiği çizdirmek için kullanılan başarı yüzdeleri	62



1. GİRİŞ

Bilgisayarların ve bilgisayar arayüzleri kullanan sistemlerin yaygınlaşmasıyla bu sistemleri kullananlar için kullanım kolaylığı sağlama çalışmaları hız kazanmıştır. Bu sebeple İnsan Makine Etkileşimi (İME) adı altında çalışmalar yapılmaktadır [1]. Bu çalışma alanlarından bazıları da robot kollar, protez eller gibi sistemlerdir. El veya kol, gün içinde çok yaygın kullanıldığından önemli bir organdır. Eğer kol üzerinden bir ölçüm yapıp hareketi yapan kişinin amacı anlaşılabilirse, protez ve robot kol gibi uygulamalar, ve hatta tekerlekli sandalyeler gibi başka çeşitli uygulamalar kontrol edilebilir [2].

Biyoelektrik sinyaller genellikle vücutta meydana gelen farklı elektrokimyasal olayların bir sonucu olarak özel bir doku veya organdaki elektriksel potansiyel farklılıklarının toplamı tarafından üretilen elektrik akımları olarak anılır. EMG sinyali, en iyi bilinen biyoelektrik sinyallerden biridir ve cilt yüzeyinde tespit edilebilen ve kas liflerinin kasılma veya gevşeme sırasında elektriksel aktivitesi ile üretilen bir sinyaldir. Kasların her hareketi, birkaç kas lifinin belirli bir aktivasyon desenine karşılık gelir; bu nedenle çok kanallı EMG kayıtları hareketi tanımlamak için kullanılabilir. Sinyalin karmaşık yapısı nedeniyle, özellikle EMG hareketle ilgiliyse, ayrıntılı analiz ve sınıflandırma genellikle zordur [3]. Bu amaçla, özellik çıkarma ve sınıflandırmadan oluşan farklı hareket tanıma algoritmaları kullanılmıştır [4].

2012 yılında Hareket tanımlaması için yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık kullanılan bir çalışmada dört farklı kişiden alınan verilerle 7 hareket, 10 özellik kullanılarak 20 ve 30 nöronlu YSA ile sırasıyla %91,25 ve %89,26 başarı elde edilmiştir [5]. 2013 yılında yapılan bir çalışmada 8 kişiden 6 hareket dörder tekrar ile kaydedilmiş, kaydedilen verilerden 20 nöronlu YSA kullanılarak %96 başarı ile hareket tanıma sağlanmıştır[6]. YSA kullanılarak yapılan başka bir çalışmada 5 farklı kişiden 5 el hareketi için 5 özellik kullanılarak ortalama %88,4 başarı elde edilmiştir [7]. 6 hareketi tespit etmek için 5 özellik ile YSA kullanan başka bir çalışmada iki farklı YSA algoritması ile %94,81 ve %94,05 başarı elde edilmiştir [8]. 2019 yılında yayınlanan başka bir çalışmada 6 farklı hareket iki farklı özellik çıkarma metodu ile YSA eğitilerek sınıflanmak istenmiş ve ortalama %92 başarı elde edilmiştir [9]. 4 farklı kişiden toplanan 8 farklı el hareketini sınıflamak için YSA eğitilmiş ve %93 başarı elde edilmiştir [10].

El hareketi tanımlamada destek vektör makinaları (DVM) kullanan çalışmalar da yapılmıştır. 2009'da yayınlanan bir çalışmada 10 kişiden 6 hareket için veri toplanmış, bire karşı tümü metodu ile %96 sınıflama başarısı elde edilmiştir [11]. 2013'te yayınlanan bir başka çalışmada 27 kişiden invazif bir şekilde EMG verileri toplanmış, kişilerden bilek fleksiyon hareketleri yapmaları istenmiş ve kaydedilen sinyaller DVM ve parçacık sürü optimizasyonlu DVM ile sınıflanmış, başarı oranları sırasıyla %96,75 ve %97,41 olmuştur [3]. 4 el hareketi tanıyarak protez kol kullanmak için yapılmış bir çalışmada tek bir özellik ile DVM kullanılarak %99 doğruluk oranı elde edilmiştir [12]. Verilerin tek bir kişiden toplandığı bir çalışmada 7 hareket için gerçek zamanlı sınıflama yapılmak istenmiş, el hareketlerine eklem açıları da gerçek zamanlı tespit edilmiştir. Veriler 4 kanal ile toplanmış ve sürekli olarak işlenmiş, sınıflama için DVM kullanılmış, en yüksek başarı oranının %94.17 olmasıyla birlikte toplam 10 iterasyonda

ortalama %90 üzerinde başarı elde edilmiştir [13]. 2020’de yayınlanan bir çalışmada 6 farklı hareketin EMG sinyallerinden özellik çıkarmak için istatistiksel metotlar kullanılmış, farklı sınıflandırıcılar test edilmiş ve içlerinden DVM %94.73 başarı oranıyla en yüksek performansı sergilemiştir [14]. 7 adet parmak hareketinin tek bir özellik kullanılarak tespit edilmeye çalışıldığı bir çalışmada 4 farklı sınıflandırma aracı kullanılmış ve bunların içinden DVM %94 başarı oranı elde etmiştir [15]. EMG sinyallerinden daha anlamlı özellikler çıkarabilmek için yapılmış bir çalışmada farklı el ve parmak hareketlerini ayırt etme performansı ve farklı kuvvet seviyelerinde gösterdiği performanslar incelenmiş; 9 ampute insandan alınan altı farklı el ve parmak hareketi 3 farklı özellik çıkarılarak 3 farklı sınıflandırma aracı kullanılarak tespit edilmiş, DVM sınıflandırıcı ortalama %55 oranında başarı elde etmiştir [16].



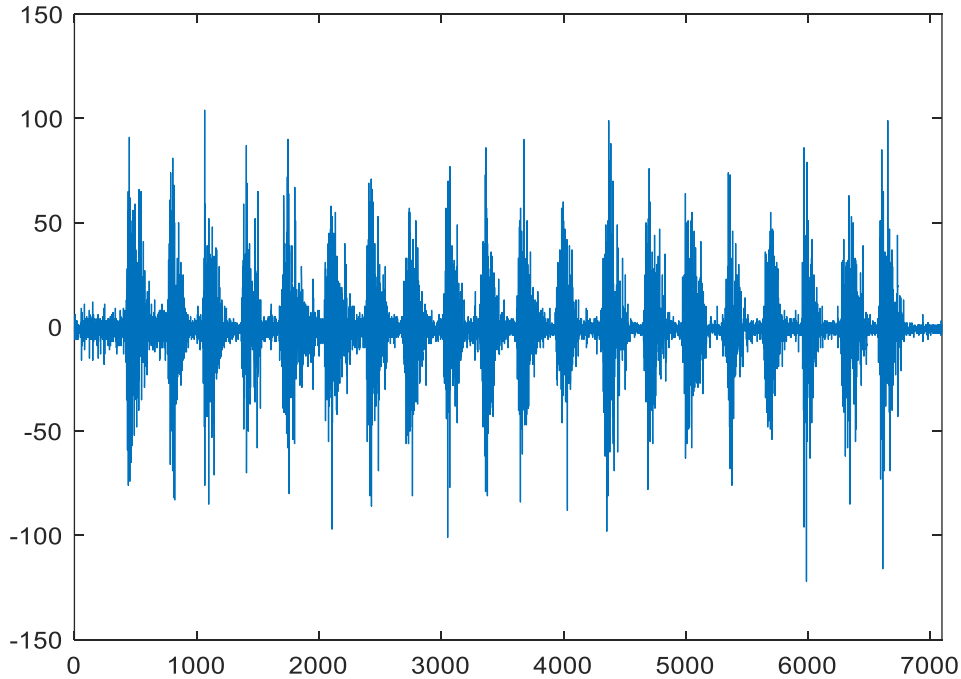
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Elektromyografi

Elektromiyogram, elektriksel aktivite anlamına gelen “electro”; kas anlamına gelen muscle kelimesinin kökü “myo” ve miktar anlamında “gram” kelimelerinin birleşimi ile meydana gelmektedir ve “electromyogram” kelimesi oluşmaktadır. Elektromiyografi ise kas elektrik sinyallerini inceleyen daldır ve EMG şeklinde kısaltılır. EMG aynı zamanda bazen miyoelektrik aktivite anlamında da kullanılmaktadır. Kas dokusu tıpkı sinir hücreleri gibi elektrik sinyallerini iletir ve bu sinyallere kas aksiyon potansiyeli denmektedir. Bu kas aksiyon sinyallerinin deri yüzeyinden ölçülmesine yüzey elektromiyografi yani sEMG denmektedir ve bu çalışmada da sEMG sinyalleri kullanılmaktadır [17, 18].

Ölçülen EMG sinyallerinin frekansı 0-2kHz aralığında olsa da enerji dağılımı 30-500Hz arasında yoğunlaşmaktadır ve bu sinyallerin genlikleri 0-10mV dolaylarında olmaktadır. Kaslardaki kasılmanın şiddeti arttıkça üretilen EMG sinyalinin genlik değeri de artacağından, EMG sinyalinin genliğinin takip edilmesi, kas aktivitesinin tespit edilmesinde kullanılabilir [19].

Elektromiyografi (EMG), insan vücudunun iskelet kaslarındaki elektriksel aktivitenin bir ölçüsüdür[20]. Kullanılan sensörlerin türüne bağlı olarak iki tip EMG vardır: yüzey ve kas içi. Yüzey EMG'sinde, altındaki kasların elektriksel aktivitesini kaydetmek için cilde invaziv olmayan yüzey sensörleri yerleştirilir. EMG ölçümü deri üstünden yapıldığı durumlarda ifadenin başına bir “s” harfi gelerek sEMG şeklinde ifade edilir, bu “surface” yani yüzey demektir. Bu çalışmada yüzey EMG ölçümleri yapılacaktır.



Şekil 2-1: MATLAB platformunda çizdirilmiş örnek bir kol EMG sinyali (20 hareket)

EMG için çok sayıda tıbbi ve mühendislik uygulaması mevcuttur. Tıp alanında, EMG'ler gerçek zamanlı olarak sinirlere ve kaslara göre fizyolojik olarak neler olduğunu izlemek için kullanılır. Mühendislikte, EMG uygulamaları protezlerin, rehabilitasyon cihazlarının ve insan makine etkileşim sistemlerinin geliştirilmesini içerir[20, 21].

2.2. Veri Toplama

Veri toplama aracı olarak Thalmic Labs tarafından geliştirilen ve temsili bir görseli Şekil 4'de gösterilen MYO bileklik kullanılmıştır. Veriler iki cinsiyetten ve farklı yaşlardan insanlardan izinleri dahilinde alınmıştır. Veri alma işlemi tek seansta gerçekleştirilmiş böylece kol bandının kol üzerinde kayması ihtimalinden kaynaklanan veri toplama hataları engellenmeye çalışılmıştır. Kendisinden veri alınan bireylerin herhangi bir kas problemleri bulunmamaktadır.

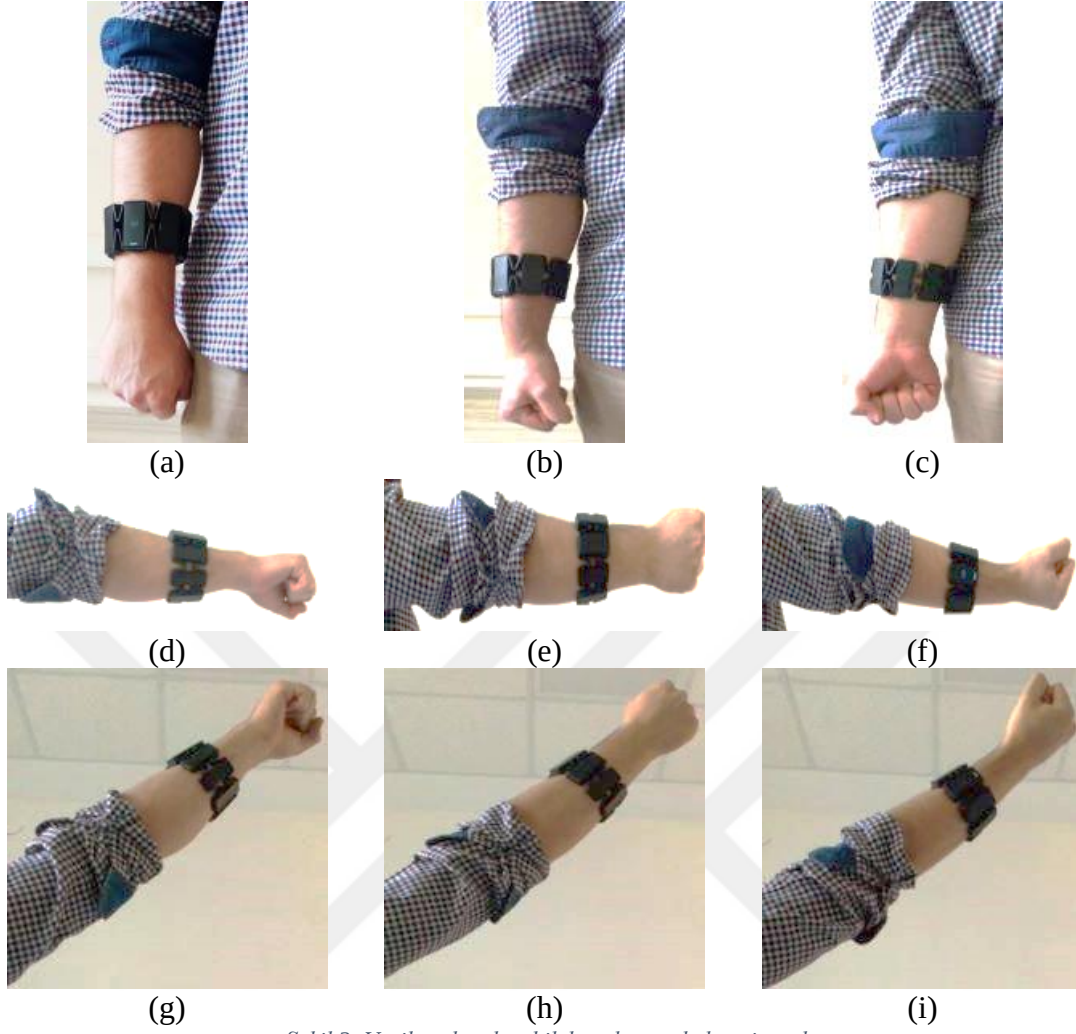
Kişiler kendilerine tarif edilen hareketleri rastgele aralıklarla 20şer defa tekrarlamışlardır. Her bir hareket tamamlandıktan sonra kişiler kısa bir süre dinlenmiş ve ardından diğer harekete geçilmiştir. Kişiler hareketleri yaparlarken ayakta durmuşlardır.

Toplamda 4 farklı hareket, 3 farklı bilek açısı ve 3 farklı kol pozisyonunda yapılmıştır. Tablo 1'de bu hareketlerin hangi bilek açıları ve kol pozisyonlarında yapıldığı tablolanmıştır.

Tablo 1: Hareketler tablosu

Hareket\Bilek açısı	0°	90°	180°
El açma	Vücuda paralel	Yere paralel	Yukarı uzanır
El kapama	Vücuda paralel	Yere paralel	Yukarı uzanır
Bilek ekstensiyon	Vücuda paralel	Yere paralel	Yukarı uzanır
Bilek fleksiyon	Vücuda paralel	Yere paralel	Yukarı uzanır

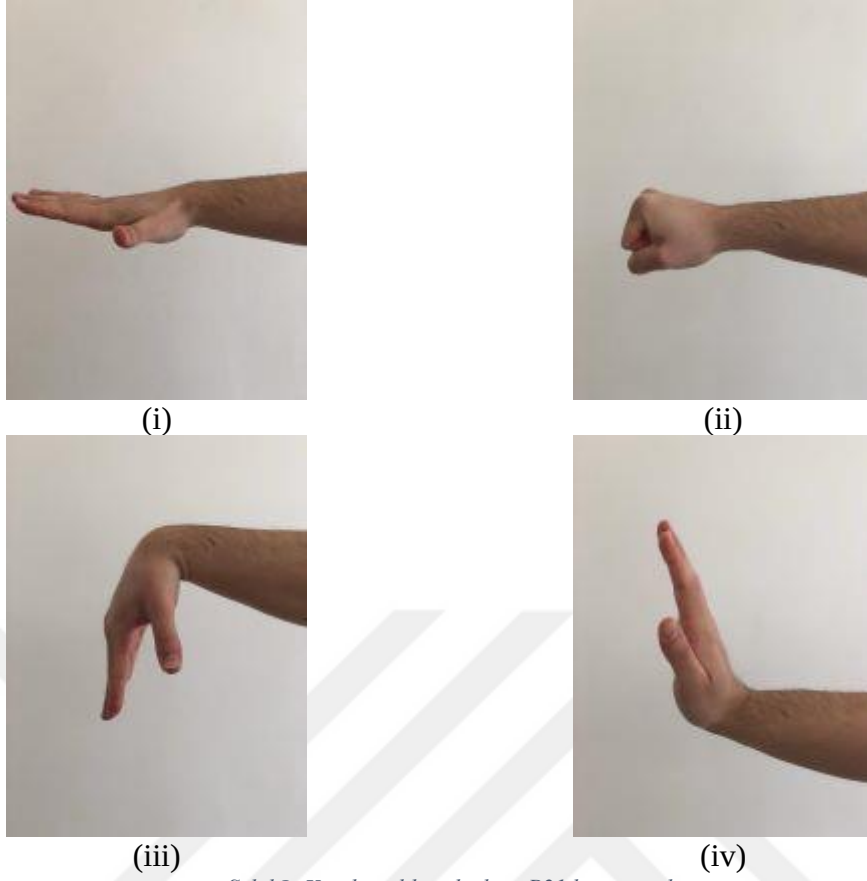
Tablo 1'de bilek açısı 0° ve vücuda paralel olarak belirtilen pozisyon Şekil 2(a) görselinde gözüken açı ve 90° ve 180° olarak belirtilen bilek açıları da sırasıyla Şekil 2(b) ve (c) görsellerinde belirtilmiştir. Dört hareket de sırasıyla bu bilek açısı ve kol pozisyonu takip edilerek yapılmıştır.



Şekil 2: Veriler alınırken bilek açıları ve kol pozisyonları

Aynı şekilde yere dik kol pozisyonunda yapılan hareketler temsili olarak sırasıyla Şekil 2 (d, e ve f) görsellerinde ve yukarı uzanır pozisyondaki hareketler de Şekil 2(g, h ve i) görsellerinde gösterilmiştir.

Bu çalışmada kolaylık açısından bu pozisyonlar kısaltılarak kodlanmıştır. Şekil 2’de gösterilen a, b ve c pozisyonları sırasıyla P11, P12 ve P13 olarak kodlanmıştır. Burada Pxy için x kol pozisyonunu ve y de bilek açısını göstermektedir. Aynı şekilde d, e ve f için sırasıyla P21, P22 ve P23 ifadeleri kullanılmış olup; g, h ve i için de yine sırasıyla P31, P32 ve P33 kısaltmaları kullanılmıştır.



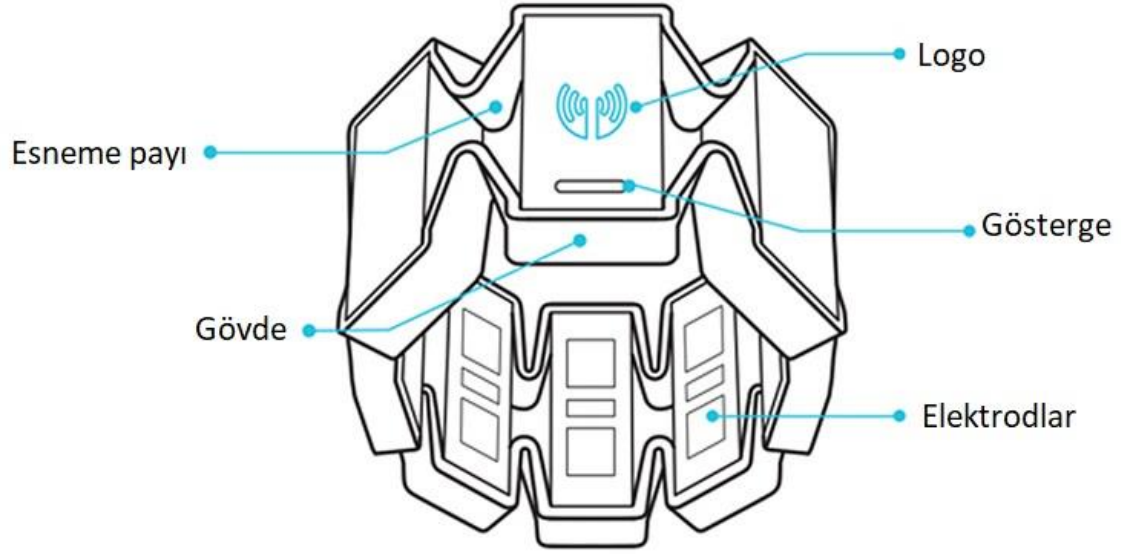
Şekil 3: Yapılan el hareketleri, P21 konumunda

Yapılan el hareketleri Şekil 3’da verilmiştir. Örnek görseller Şekil 2’de verilen konumlara göre d şıkkı yani P21 konumunda yapılmıştır. i şıkkı el açma hareketini, ii şıkkı el kapama hareketini, iii şıkkı bilek fleksiyon hareketini ve iv şıkkı da bilek ekstensiyon hareketini göstermektedir.

Veri toplama işlemi tamamlandıktan sonra eğitim ve test olarak kullanılabilmeye uygun olmayan veriler ayıklanmış, eğitim ve test verileri kalan verilerden rastgele olacak şekilde seçilmiştir. Her eğitim ve test verisinin boyutu ilgili yerlerde belirtilmiştir.

2.2.1. Myo kol bandı

Şekil 4’te temsili bir görseli verilen MYO kol bilekliği Thalmic Labs tarafından üretilmiştir. MYO üzerinde el hareketlerini ve kolların hareketini tanıyan bazı sensörler barındırmaktadır. 8 kanal üzerinden bilek kaslarından EMG sinyali okur. EMG sensörlerine ek olarak ayrıca kol hareketinin algılanmasını sağlayan dokuz eksenli bir atalet ölçüm birimine (IMU) sahiptir. IMU, üç eksenli bir jiroskop, üç eksenli ivmeölçer ve üç eksenli bir manyetometre içerir. Bileklik bazı el hareketlerini tanıyabilir halde gelmektedir. Bu hareketler kullanıcı tarafından yapıldığında bileklik belirli şekillerde titreşerek kullanıcıya hareketleri tanıdığına dair geri bildirimler vermektedir. Üzerinde bulunan Bluetooth modülü ve şarj edilebilir Li-on pilleri sayesinde kablosuz kullanılabilir[22, 23].



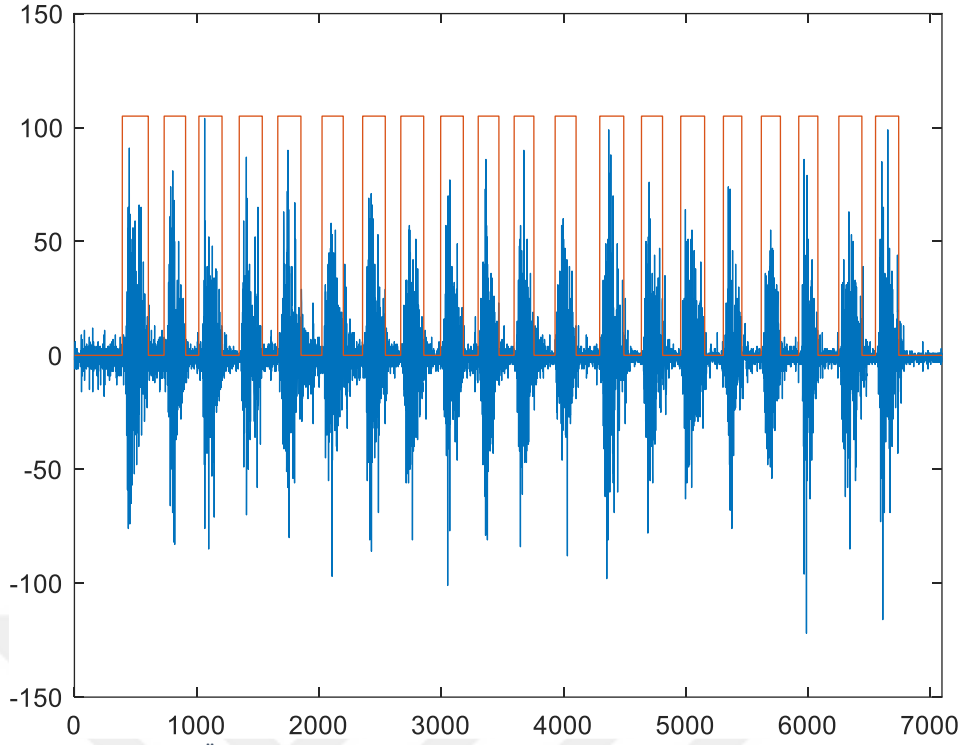
Şekil 4: MYO kol bandı

MYO ile elde edilen ham EMG verileri -128+127 aralığında, zaman damgalı ve 200 Hz örnekleme frekansı ile okunan sayısal değerlerdir. Kaslarda oluşan kasılma ve gevşemelerin şiddetine göre sensörler bu aralıkta elektriksel sinyaller üretmektedir. Bu verilere Thalmic Labs tarafından sağlanan geliştirme kiti yazılımı sayesinde ulaşılabilir. MYO kol bandı, işaret dili tanıma uygulamalarından tekerlekli sandalye kontrolüne [14, 15], fizyoterapi uygulamalarından protez el ve kol kontrollerine ve hatta sanal ortamda el ve kol modellerinin kontrolünde kullanılmıştır [12, 16].

2.3. Özellik Çıkarma

2.3.1. Hareket bölgelerinin belirlenmesi

Özellik çıkarma işlemi her bir hareket bölgesi üzerinden yapılacağından ve veri toplama işlemi denekler 20 hareket yapacak şekilde olduğundan, hareket bölgelerini kaydedilmiş toplam veriden ayırmak gerekir. Şekil 5’de görüldüğü üzere, 20 hareket bölgesinden oluşan kaydedilmiş bir EMG sinyalinde hareketin gerçekleştiği bölgeler işaretlenmiştir.



Şekil 5: Örnek bir kol EMG sinyalinin üzerinden hareket bölgelerinin tespiti

Hareket bölgelerinin tespiti için onset detection metodu kullanılmıştır. Hareket bölgesi bulmada kullanılan en yaygın metotlardan biri “tek eşik yöntemi”dir. EMG sinyalini sabit bir eşikle karşılaştıran "tek eşik yöntemi", kas kasılma aktivitesinin başlangıcını belirleyen sezgisel ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Algoritma genel hatlarıyla, belirli bir örnek sayısının ortalamasının, belirli sayıda standart sapma (SD) ile temel aktivite seviyesini aştığı veya ham EMG sinyalinden çıkarılan bir değişkenin değerinin aştığı noktalarda operatör tarafından seçilen sabit bir eşik noktası üzerinden aktivasyon bölgesinin tespitinin yapılması şeklinde çalışır. Bu çalışmada ilk yöntem yani belirli sayıda örneklerin standart sapmalarının sinyal aktivasyon bölgesinin genliğini aşıp aşmadığına bakılarak aktivasyon bölgesi tespiti yapılmıştır[17, 24, 25]. Bu çalışmada takip edilen yöntem denklem 1-3'te açıklandığı gibidir:

$$\bar{x}_k, \sigma_k = |S_{n+k*u} : S_{n+p+k*u}|_{k \rightarrow N} \quad (1)$$

$$\mu, \sigma = \mu(\bar{x}_k)_{k \rightarrow N}, \sigma(\sigma_k)_{k \rightarrow N} \quad (2)$$

$$p_n = \begin{cases} 1, & \bar{x}_k > \mu + \sigma * y \\ 0, & \bar{x}_k < \mu + \sigma * y \end{cases} \quad (3)$$

S: sinyal, n: sinyal üzerinde bir örnek, k: katsayı ve k'nci indis, u: segment uzunluğu, p: sinyal üzerinde bir örnek, N: k'nın alabileceği en büyük değer, $\bar{x}$: (*) ortalama, σ = standart sapma, μ : medyan, y: katsayı, p_n : hareket bölgesi

Sinyalin mutlak değeri alınır. Belirli sayıda seçilen örneklerin standart sapmasının hesaplanabilmesi için bir pencere seçilir. Bu seçilen pencerenin gürültü bölgesinde olmasına dikkat edilir. Şekil 5 'de seçilen pencere (0:352) aralığındadır. Seçilen pencere belirli bir segment uzunluğu boyunca sinyal üzerinde kaydırılır. Bu çalışmada belirlenen segment uzunluğu 50 örnektir. Sinyal üzerinde kaydırılan bu pencere boyunca hesaplanan ortalamalar ve standart sapmalar bir dizi üzerinde kaydedilir. Bu

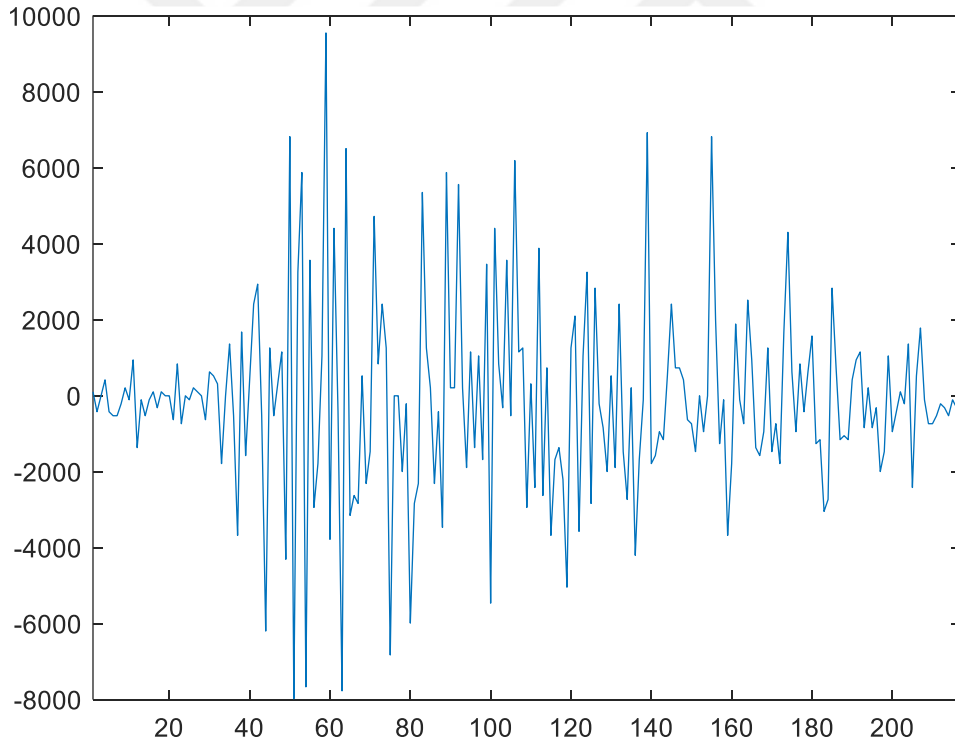
işlemler yukarıda 1 numaralı denklemde belirtilmiştir.

Pencere kaydırma işlemi bittikten sonra ortalamaların medyanı bulunur. Bu değer sinyalin ortalama değeridir. Ardından kaydedilen standart sapmaların medyan değeri bulunur. Bu işlemler yukarıda 2 numaralı denklemde belirtilmiştir.

Bu değerler bulunduktan sonra sinyal üzerinde pencere kaydırma işlemi tekrar yapılır ve pencere üzerine düşen örneklerin ortalaması, sinyalin ortalaması ile standart sapmaların medyan değerinin bir kat sayısı ile çarpımının, ki bu kat sayısı bu çalışmada “2”dir, toplamından büyük ise bu pencere bölgesi bir hareket bölgesidir ve hareket başlangıç bölgesi olarak işaretlenir. Bu işlemler 3 numaralı denklemde belirtilmiştir. Denklemlerde kullanılan semboller yıldız ile işaretlenmiş kısımda açıklanmıştır.

Yani yapılan işlem, pencere kaydırma işlemi ile, o pencere üzerine düşen bölgenin sinyal bölgesi mi yoksa gürültü bölgesi mi olduğunu anlamak için, pencerenin mutlak ortalamasının sinyalin mutlak ortalaması ile standart sapmasının karşılaştırılmasının yapılmasıdır.

Sonuç olarak hareket başlangıç ve bitiş noktalarının tespit edilmesi ile hareket bölgeleri Şekil 6’de görüldüğü gibi ayıklanabilir. Ayıklanan hareket bölgeleri üzerinden özellik çıkarma işlemi gerçekleştirilir.



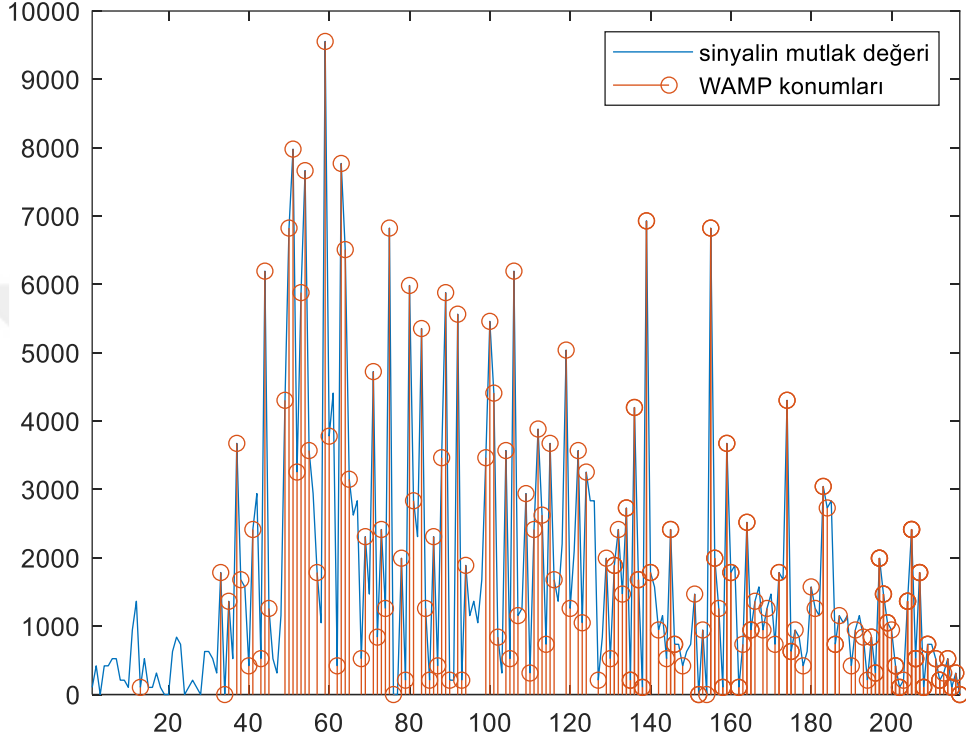
Şekil 6: Şekil 5’de belirtilen sinyalin birinci hareket bölgesi

2.3.2. Willison genliği

Willison Genliği (Willison Amplitude, WAMP), birbiri ardına gelen örneklerin farkının büyüklüğünün belirlenen eşik değerini geçiş sayısıdır ve denklemi denklem 4’te verildiği gibidir.

$$WAMP = \sum_k^{N-1} f(|x_k - x_{k+1}|) \quad (4)$$

Ardışık değerler arasındaki farkın büyüklüğü yani mutlak değeri üzerinden hesap yapıldığından, sinyalin mutlak değeri alınır. Şekil 6'deki sinyal üzerinden WAMP değeri incelendiğinde Şekil 7'de görüldüğü gibi bir tablo ortaya çıkıyor. Burada eşik değeri, mutlak değerleri alınan sinyalin tepe noktasının onda biri olarak belirlenmiştir.



Şekil 7: Şekil 6'de verilen sinyalin mutlak değeri üzerinde uygulanan WAMP fonksiyonu konumları

2.3.3. Ortalama mutlak değer

Ortalama mutlak değer, mutlak değerleri alınmış sinyalin değerlerinin ortalaması olarak tanımlanır. Sinyalin genliğiyle doğrudan ilişkili olduğundan EMG ile el hareketleri tanımlamada yaygın olarak kullanılan bir özelliktir. Sinyallerin genlikleri kasların ürettiği kuvvetle ilişkili olduğundan bu özellik hareketin kuvvetiyle ilgili de bilgi vermektedir.

$$\bar{X}_t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k| \quad (5)$$

Denklem 5'te, N örnek sayısını, x_k x sinyalinin k'ncı değerini ve X_t ortalama mutlak değeri göstermektedir.

2.3.4. Eğim işareti değişimi

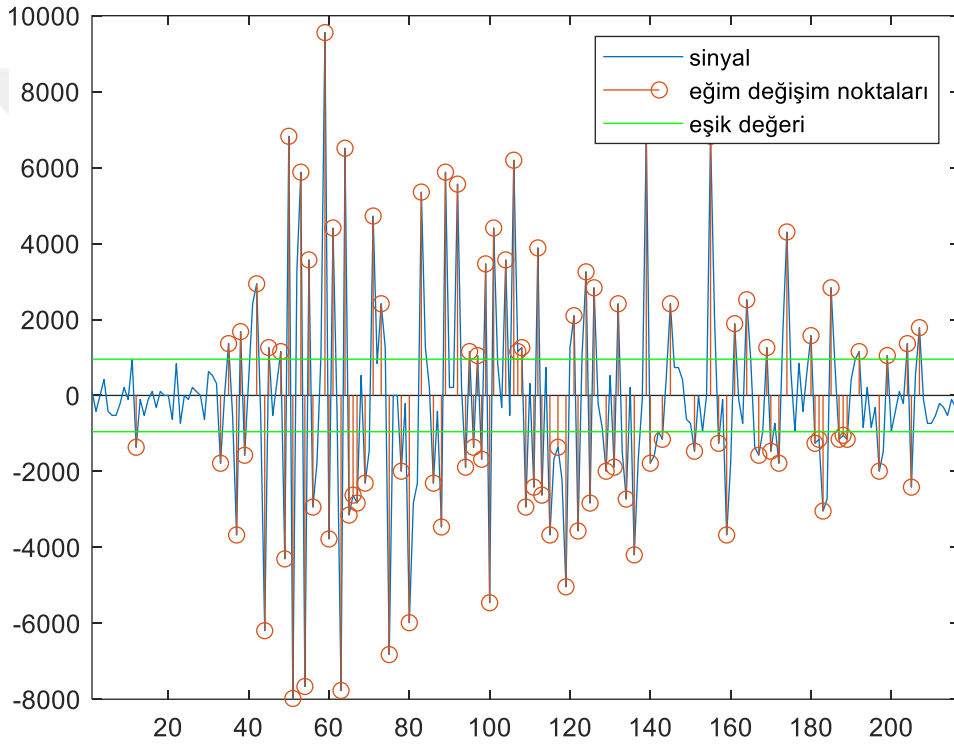
Sinyal üzerindeki ardışık üç değerın eğimlerinin işaret değiştirme sayısıdır. Sinyal

üzerinde işlem yapıp gürültünün etkisini en aza indirmek için bir eşik değeri belirlenir ve bu eşik değerinin aşıldığı pencerelerdeki eğim değişikliği sayılarak bir özellik elde edilir.

$$\delta = \sum_{k=2}^{N-1} [f[(x_k - x_{k-1})x(x_k - x_{k-1})]] \quad (6)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \geq \text{eşik} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (7)$$

Denklem 6’da δ Eğim İşareti Değişimi (Slope Sign Change) (EİD) değerini gösterirken, N örnek sayısını göstermektedir. x_k x sinyalinin k’ıncı değerini göstermektedir. Şekil 8’de ise örnek bir eğim işareti değişimi ve eğimin değiştiği noktalar verilmiştir. Eşik değeri sinyalin tepe noktasının onda biri olarak tanımlanmıştır.



Şekil 8: Şekil 6’de verilen sinyalin eğim değişim noktaları ve eşik değeri

2.3.5. Dalga boyunun uzunluğu

Dalga boyunun uzunluğu sinyalin dalga şekli üzerindeki ardışık genliklerin farklarının toplamıdır. Bu toplam sonuç olarak, dalganın iki ucundan tutup uzatıldığında vereceği toplam uzunluğa denk gelecektir. Denklemi denklem 8’de verilmiştir.

$$\ell = \sum_{k=1}^{N-1} |x_{k+1} - x_k| \quad (8)$$

Denklem 8’de N örnek sayısıdır. ℓ dalga formunun uzunluğuna denk gelmektedir. x_k x sinyalinin k’ıncı değerini göstermektedir. Şekil 6’de verilen dalga şeklinin uzunluğu 5643 çıkmıştır.

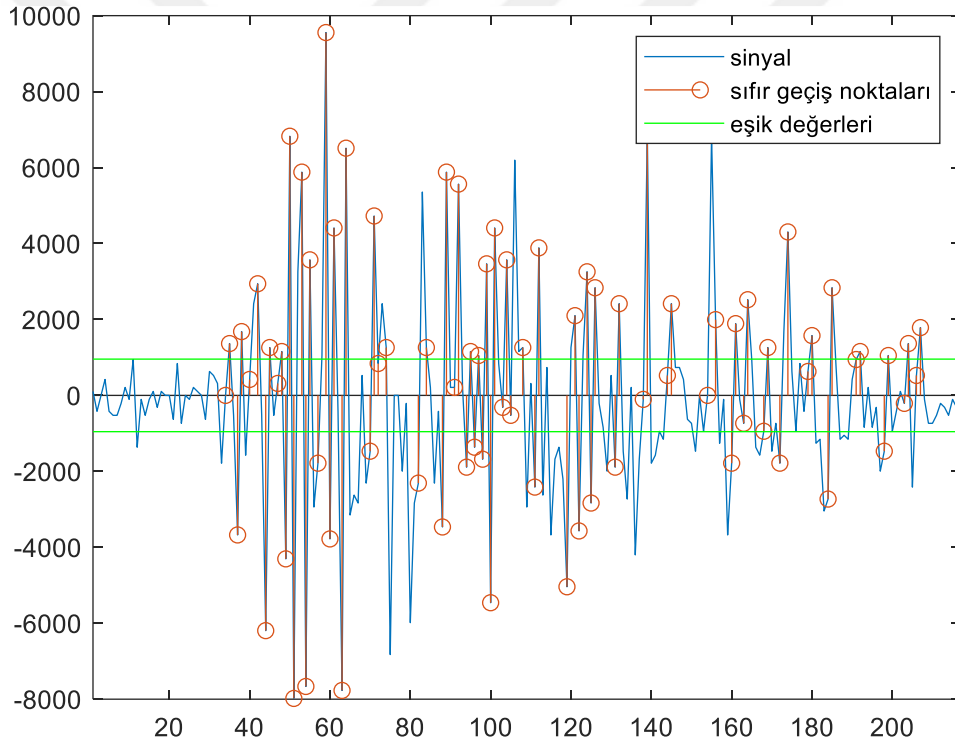
2.3.6. Sıfır geçiş sayısı

Sıfır geçiş sayısı, sinyalin genliğinin 0 ekseninden kaç kez geçtiğine dair sayıdır. Gürültüyü filtrelemek için bir eşik değeri belirlenerek 0 ekseninden değil -eşik +eşik eksenlerinden geçiş sayıları hesaplanabilir. Denklemi denklem 9-10'da verildiği gibidir.

$$\theta = \sum_{k=1}^{N-1} işaret(x_k - x_{k-1}) \cap |x_k - x_{k-1}| \geq eşik \quad (9)$$

$$işaret = \begin{cases} 1, & x \geq eşik \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (10)$$

Burada θ x ekseninden veya bu durumda -eşik/eşik eksenlerinden geçiş sayısını verirken N rnek sayısını vermektedir. şekil 9'da ise örnek bir sıfır geçiş noktaları verilmiştir. Burada eşik değerleri sinyalin tepe noktasının onda biri olarak belirlenmiştir, bu sayede eşik değerinin altında kalan sıfır geçişleri dikkate alınmamıştır.



şekil 9: şekil 6'de verilen sinyalin sıfır geçiş noktaları ve eşik değerleri

2.3.7. Ortalama frekans

Ortalama frekans, güç spektrumunun frekans ile çarpılması ve bu çarpımların toplamlarının, toplam güç yoğunluğuna bölümlenmesi ile elde edilir. Denklem 11'de bu ifade daha net görülmektedir.

$$\mu f = \frac{\sum_{k=1}^M f_k P_k}{\sum_{k=1}^M P_k} \quad (11)$$

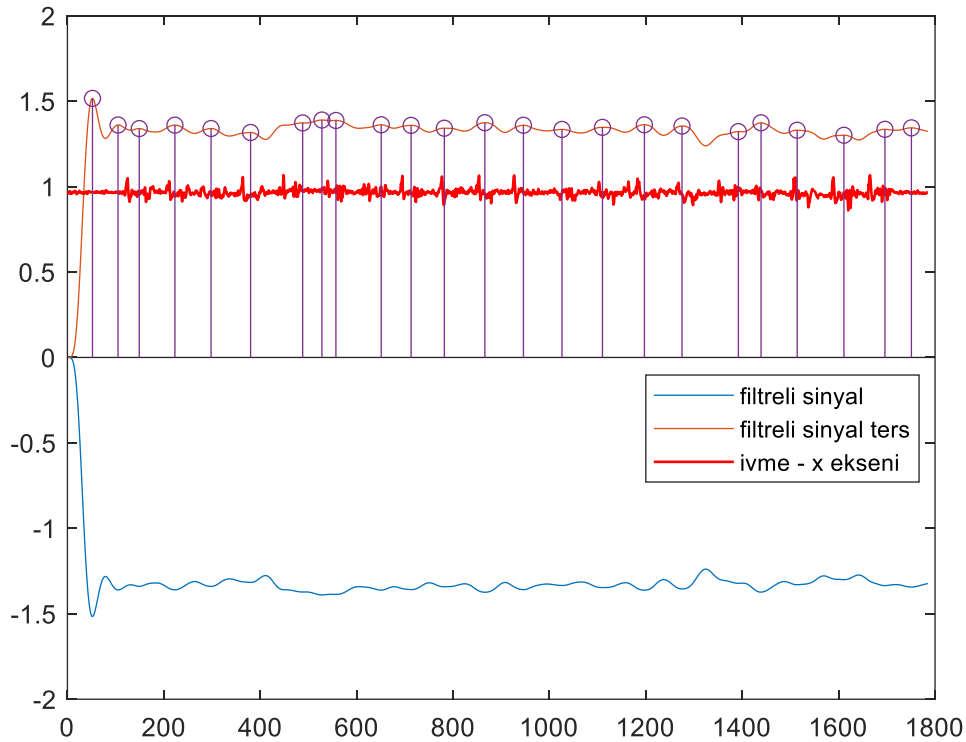
Denklem 11’de k değerleri frekans binlerini, P_k o bindeki gücü ve M Frekans bölgesini göstermektedir. Örnek olarak Şekil 6’da verilen sinyalin ortalama frekansı 149.3316 çıkmaktadır.

2.3.8. İvme ve jiroskop verileri

EMG verilerinden özellik çıkarma işleminin yanı sıra, ivme verilerinden de özellikler çıkarılmıştır. İvme verilerinden Willison Genliği, standart sapma ve ortalama mutlak değer özellikleri çıkarılmıştır. MYO bileklik üzerinde 3 eksen ivme ölçer olduğu için ve her eksen 3 özellik çıkarıldığı için ivme özellik vektörü 9 elemandan oluşmaktadır.

Jiroskop verilerinden özellik çıkarmak için de ivme verilerinde kullanılan 3 fonksiyon kullanılmaktadır. MYO bileklik üzerindeki jiroskop da 3 eksenli olduğu için jiroskop özellik vektörü de tıpkı ivme özellik vektörü gibi 9 elemandan oluşmaktadır.

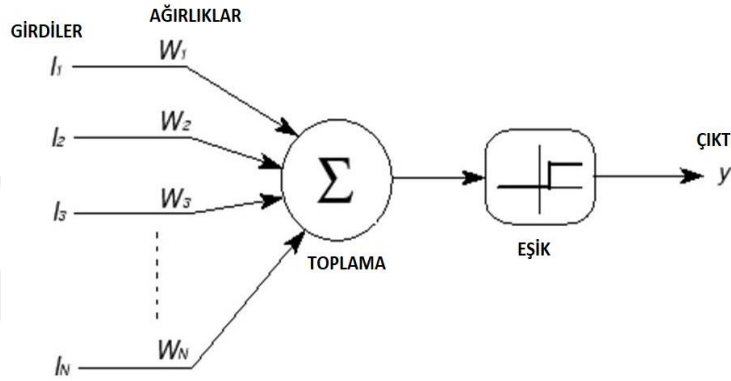
İvme ve jiroskop verilerinden özellik çıkarmak için veriler alçak geçiren filtreden geçirilmektedir. Alçak geçiren filtre için örnekleme frekansı 1024 Hz, kesim frekansı 20 Hz ve seviyesi 5 olarak seçilmiştir. Filtreli sinyal üzerinde tepe noktaları bulunur ve bu noktaların konumları kaydedilir. Bu konumlar arasında kalan alanlar ivme sinyali üzerinde aktivite olan bölgelerdir. Şekil 10’da bir kişinin bilek ekstensiyon hareketini P11 konumunda yaparken kaydedilen ivme verilerinin x eksenini ve yukarıda belirtilen işlemler sonrası aktivasyon bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 10: Bilek ekstensiyon hareketi kol vücuda paralel ve bilek açısı sıfır derece (P11) pozisyonunda x eksenini için ivme verisi ve aktivasyon bölgeleri

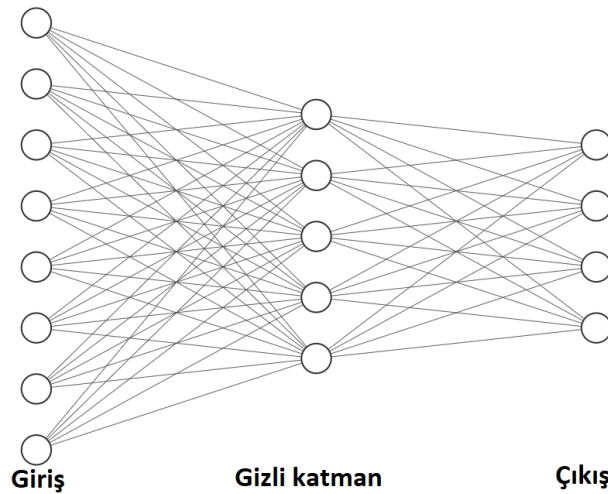
2.4. Yapay Sinir Ağı

Yapay sinir ağları (YSA), çok sayıda birbirine bağlı basit işlemciye sahip büyük ölçüde paralel sistemlerdir. Temelleri 1940'lara dayanan bu sistemler desen sınıflama, kategorize etme, optimizasyon, kontrol ve tahmin yöntemleri gibi daha birçok alanlarda kullanılabilir. 1980'lerin başlarında hatanın geri yayılması metodunun geliştirilmesi ile YSA büyük bir ilgi görmüştür. Adını beyindeki sinir hücrelerinden alan bu sistemler, başta Şekil 11'deki gibi tek bir hücre, bu hücreye bağlanan ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonu olarak eşikleme araçları olarak tasvir ediliyordu [26].



Şekil 11: McCulloch-Pitts nöron modeli

Bu çalışmada kullanılan yapay sinir ağı modeli, MATLAB platformunda bulunan deep learning tool ile oluşturulmuştur. İleri beslemeli ve hatanın geri yayılımı metotları kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 12'de giriş katmanında 8 düğüm, tek gizli katmanında 5 düğüm veya nöron ve çıkış katmanında 4 düğüm olan bir yapay sinir ağı modeli gösterilmiştir. 8 kanaldan toplanan verilerle 5 nöronlu bir yapay sinir ağı eğitilip 4 farklı el hareketi tespiti yapmak için bu model kullanılabilir.



Şekil 12: Örnek bir Yapay Sinir Ağı modeli

2.5. Yapay Sinir Ağının Eğitilmesi

Hareket bölgeleri belirlenip özellikler çıkarıldıktan sonra YSA eğitimi yapılır. Bu çalışmada YSA eğitim ortamı olarak MATLAB’ platformunda bulunan Deep Learning Toolbox paketinin bir fonksiyonu olan “nntool” veri yöneticisi kullanılmıştır[27].

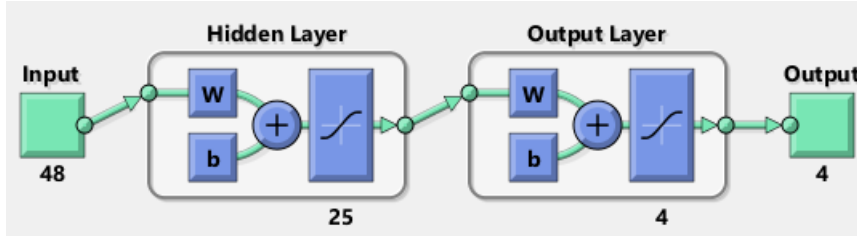
Bu çalışmada kullanılan YSA üç katmanlıdır. Ağ tipi olarak “feed-forward backpropagation” kullanılmıştır. Feed-forward yani ileri beslemeli ağlar, veriyi yalnızca ileri iletirler. İlk katmana girdi katmanı, son katmana çıktı katmanı ve arada kalan katmana da gizli katman adı verilir. Bir katmandaki nöronlar kendinden sonraki katmandaki tüm nöronlarla bağlantılıdır. Bu bağlantı üzerindeki ağırlıklar bağlantılı olan nöronların önemini belirler. Çıkış katmanında değerler aktivasyon fonksiyonu ile belirlenerek çıkışa verilir[28]. Eğitim fonksiyonu olarak “Levenberg-Marquardt backpropagation” algoritması kullanılmıştır. Kenneth Levenberg ve Donald Marquardt tarafından bağımsız olarak geliştirilen Levenberg-Marquardt algoritması, doğrusal olmayan bir fonksiyonu en aza indirme problemine sayısal bir çözüm sağlar. Hızlıdır ve istikrarlı bir yakınsamaya sahiptir. Yapay sinir ağları alanında, bu algoritma küçük ve orta ölçekli problemleri eğitmek için uygundur. Levenberg-Marquardt algoritması, Deep Learning Toolbox paketindeki genel olarak en hızlı geri yayılım algoritmasıdır ve diğer algoritmalarından daha fazla bellek gerektirmesine rağmen, denetimli öğrenme algoritmalarında birinci tercih olarak şiddetle tavsiye edilir.[29, 30].

Adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak dereceli alçalma kullanılmıştır. Bu algoritma, nöronun girdisi ve hatasına göre ağırlığı, öğrenme katsayısını, ve momentum sabitini değiştirmek için gerekli hesaplamaları yapar[31]. Performans fonksiyonu olarak ortalama hatanın karesi kullanılmıştır. Tüm bu fonksiyonlar nntool arayüzünden açılır menü olarak seçilebilmektedir ve ayarlar bahsedildiği gibi yapılmış bir YSA tanımlaması Şekil 13’de gösterilmiştir.

The screenshot shows the 'Network Properties' dialog box. The 'Network Type' is set to 'Feed-forward backprop'. The 'Input data' is 'karma_egitim_verisi_p11' and the 'Target data' is 'karma_target_p11'. The 'Training function' is 'TRAINLM', the 'Adaption learning function' is 'LEARNGDM', and the 'Performance function' is 'MSE'. The 'Number of layers' is 2. Under 'Properties for: Layer 1', the 'Number of neurons' is 25 and the 'Transfer Function' is 'TANSIG'.

Şekil 13: Nntool arayüzünde fonksiyonlar seçilmiş bir Ağ Özellikleri sekmesi[27].

Bu ara yüz, aynı zamanda eğitilecek ağ ile ilgili bir ön gösterim sunmaktadır. Bu ön gösterim de Şekil 14’de gösterilmiştir. Bu görselde örnek olarak kullanılan ağ özellikleri, bu çalışmada kullanılacak sınıflardan ilkinde aittir. Bu ilk sınıfta her bir hareket her bir bilek açısı ve her bir kol pozisyonunda ayrı ayrı tanıma yapılacaktır.



Şekil 14: Eğitilecek ağın ön gösterimi. Giriş katmanı 48 elemanlı, gizli katmanda 25 nöron bulunmakta ve çıkış katmanında 4 düğüm bulunmakta[27].

Bu çalışmada sınıflamalar 5 ayrı madde halinde yapılacaktır. Birinci madde, tüm aynı bilek açısı ve tüm aynı kol pozisyonunda yapılacaktır. Toplamda 3 bilek açısı ve 3 kol pozisyonu olduğu için toplam 9 ayrı sınıflama yapılacaktır. Bu nedenle ilk maddede 9 yapay sinir ağı eğitilecektir. Bu konumlar Şekil 2’de gösterilmiştir. Buna göre, kolaylık olması açısından, bu çalışmada kullanılan pozisyonlar Şekil 2’den a,b,c,d,e,f,g,h,i şıkları sırasıyla p11,p12,p13; p21,p22,p23 ve p31,p32,p33 olarak isimlendirilecektir. Burada p## sayılarından ilki kol pozisyonunu ve ikincisi de bilek açısını göstermektedir. Bu maddede yapılan hareketin hem bilek açısına hem de kol pozisyonuna bakılır.

Yukarıdaki şekillerde gösterilen ağ birinci maddeye göre oluşturulmuştur. Yapılan hareketler sırasıyla el açma, el kapama, bilek fleksiyon ve bilek ekstensiyon hareketleridir. Hareket bölgelerinin her birinden 6 özellik çıkarılmıştır. Her hareket verisi 8 kanal üzerinden alınmıştır. Özellikler bu 8 kanaldan gelen veriler üzerinden çıkarıldığından her bir harekette 6x8 yani 48 özellik bulunmaktadır. Bu özellikler birinci kanaldan sekizinci kanala kadar tekrar eden altılılar şeklinde dizilerek 48x1 boyutunda bir vektör olarak dizilmiştir. Bu yüzden Şekil 14’de input yani girdi kısmında 48 düğüm görülmektedir. Elde edilmek istenen çıktı hangi hareketin yapıldığı olduğu için, output layer yani çıkış katmanı 4 düğümden oluşmaktadır. Bu düğümler sırasıyla yapılan hareketleri belirtmektedir.

Bu çalışmada yapılan işlem denetimli öğrenme olduğu için, eğitim verisinin yanı sıra hedef verisi de sunulmalıdır. Hedef verisi tam anlamıyla 1 ve 0’lardan oluşan bir matristir. Uzunluğu eğitim verisi ile aynıdır, fakat 48xN yerine 4xN şeklindedir. Burada N matrisin uzunluğunu vermektedir. Öreğin matristeki ilk hareket el açma hareketiyse, hedef matrisinin ilk sütunu 1000 şeklinde olacaktır. İlk hareketin bilek fleksiyon hareketi olması durumunda ise bu sütun 0010 şeklinde olacaktır.

Özellikler çıkarıldıktan sonra toplanan veriler eğitim ve test verileri olarak ayrılır. Bu çalışmada eğitim verileri toplam verilerin %90’ını oluşturmaktadır. Denekler her bir hareketi 20 tekrar şeklinde yaparsa, toplamda 4 hareket olduğundan tek bir kişiden 80 veri çıkarılır. On kişiden veri toplanması halinde toplam 800 veri elde edilir. Bu verilerin %90’ı eğitim verisi olarak ayrılacağından 48x720 şeklinde bir eğitim verisi ve

48x80 şeklinde bir test verisi elde edilir. Hedef matrisi de eğitim verisi ile aynı uzunlukta olup 4x720 şeklindedir.

Eğitim ve test sırasında rastgeleliği arttırmak için eğitim ve test verileri kendi içlerinde karıştırılır. Eğitim verisi ile hedef verisi birebir aynı şekilde karıştırılır. Eğitim sonucunda ağ test verileri ile çalıştırılır. Sonuçlar kontrol edilir.

İkinci maddede ise, aynı kol pozisyonlarında tüm bilek açıları için sınıflama yapılır. Yani, Şekil 2’de göre ve birinci madde açıklanırken anlatılan P11, P12... gibi devam eden pozisyonlar, ikinci maddede P1x, P2x ve P3x olarak kullanılacaktır. Bu durumda P1x; P11, P12 ve P13’ü kapsar. Bu üç pozisyona göre eğitimler birinci adımda anlatılan ile aynı şekilde yapılır. Aynı kol pozisyonundaki tüm maddeler yan yana dizilerek ve el hareketleri de aynı şekilde gruplandırılarak eğitim ve test verileri oluşturulmuş ve kendi içlerinde karıştırılmışlardır. Bu maddede yapılan hareketin hangi bilek açısında yapıldığına değil hangi kol pozisyonunda yapıldığına dikkat edilir.

Tablo 2: İkinci madde için hareketlerin ve pozisyon bilgilerinin eğitim ve test verisinde sıralanması ve hedef matrisinin dizilimi

	Eğitim verisi P1x Dizimi											
Yapılan Hareket	El Açma			El Kapama			Bilek Fleksiyon			Bilek Ekstensiyon		
Hareketin Pozisyonu	P11	P12	P13	P11	P12	P13	P11	P12	P13	P11	P12	P13
Hedef Matrisi Dizimi	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Tablo 2’de P1x için eğitim verisinin nasıl dizildiği gösterilmiştir. Aynı bu dizimde test verisi de yapılmıştır. Ardından hedef verisi yine bu dizime göre düzenlenmiştir. Bu şekilde oluşturulan P1x eğitim verisinin boyutu 48x2256’dır.

Madde 3’te ise, tüm kol pozisyonları ve bilek açılarına göre hareket tanınması yapılacaktır. Daha önce bahsedilen P11 P12... ve diğer tüm pozisyonlar birleştirilerek Pxx şeklinde bir pozisyon elde edilmiş olup bu pozisyon üzerinden eğitim ve test verileri oluşturulur.

Tablo 3: Üçüncü madde için hareketlerin ve pozisyon bilgilerinin eğitim ve test verisinde sıralanması ve hedef matrisinin diziliminden bir parça

	Eğitim verisi P1x Dizimi											
Yapılan Hareket	El Açma									El Kapama		
Hareketin Pozisyonu	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P31	P32	P33	P11	P12	P13
Hedef Matrisi Dizimi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3'te Pxx eğitim, test ve hedef matrislerinin dizilimi görülmektedir. Bu şekilde oluşturulan Pxx eğitim verisi 48x6768 boyutundadır. Tüm pozisyonlar yan yana dizilip bu pozisyonlardan el açma, el kapama, bilek fleksiyon ve bilek ekstensiyon hareketlerinin verileri yan yana gelecek şekilde dizilir. Bu maddede tahmin edilmeye çalışılan hareketin yapıldığı bilek açısı ve kol pozisyonu önemsenmeyip sadece hareket tahmini yapılmaya çalışılmıştır.

Dördüncü madde, ikinci maddeye ivme ve jiroskop verileri eklenip sonuçların incelenmesidir. Bu maddede eğitim, test ve hedef matrislerinin dizimi Tablo 2 ile aynı olup, madde 2'den farklı olarak her sütunda 48 yerine 57 ve 66 veri bulunmasıdır. 48 veri 6x8 olarak özellik sayısı x kanal sayısı iken; 57 veri 6x8 + 3x3 olacak şekilde x, y ve z eksenlerinden çıkarılan üç ivme özelliklerini göstermektedir. 66 veri ise 6x8 + 3x3 + 3x3 olmak üzere yine x, y ve z eksenlerinden çıkarılan üç jiroskop özelliklerini göstermektedir. Bu özellikler ivme ve jiroskop verileri için aynı olarak Willison genliği (2.3.2), standart sapma ve ortalama mutlak değerdir (2.3.3).

Beşinci madde, üçüncü maddeye ivme ve jiroskop verileri eklenip sonuçların incelenmesidir. Bu maddede eğitim ve test verilerinde sütun uzunluğu EMG + ivme verileri içeren grupta 57 ve EMG + ivme + jiroskop verileri içeren grupta 66 olacaktır. Veri boyutu bu bağlamda 57x6768 ve 66x6768 şeklinde olacaktır.

Yapılan el hareketlerini tanımak için yukarıda verilen 5 madde kullanılacaktır. Yapılan el hareketini tahmin etmeye ek olarak bu hareketin her üç kol pozisyonu için hangi bilek açısında yapıldığı tespit edilmek istenirse bu durumu ikinci ve dördüncü maddeler kullanılabilir. Bu sayede bilek açısının tahminine ivme ve jiroskop verilerinin etkisi de incelenebilmiş olunur.

İkinci maddedeki eğitim ve hedef verilerinin gösterildiği Tablo 2'de görüldüğü gibi hareketler dizildiğinde, hedef dizilimindeki değişiklikler Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4: İkinci ve dördüncü maddelerde kullanılabilir eğitim ve hedef verilerinin el hareketi tahminine ek olarak bilek açısı tahmininde kullanılabilmesi için dizimleri

	Eğitim verisi P1x Dizimi											
Yapılan Hareket	El Açma			El Kapama			Bilek Fleksiyon			Bilek Ekstensiyon		
Hareketin Pozisyonu	P11	P12	P13	P11	P12	P13	P11	P12	P13	P11	P12	P13
Hedef Matrisi Dizimi	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1

Tablo 4'te hedef matrisi 7x... şeklinde olmuştur. İlk 4 satır hareketi temsil ederken son 3 satır bilek açısını temsil etmektedir.

El hareketi ve bilek açısı tanınmasına ek olarak kol pozisyonu tanınması da yapılacaktır. Bu durumda üçüncü ve beşinci maddeler kullanılabilir. Ağların eğitimi ve hedef matrislerinin dizilmesi açısından yukarıda verilen adımlardan bir farklılık, hedef matrisinde 7xn yerine 10xn'lik bir yapı görülecektir. İlk 4 eleman yapılan hareketi, sonraki 3 eleman bilek açısını ve son 3 eleman da kol pozisyonunu gösterecektir. Bu durumda Tablo 5'teki gibi bir dizim eğitim ve test verileri için kullanılabilir.

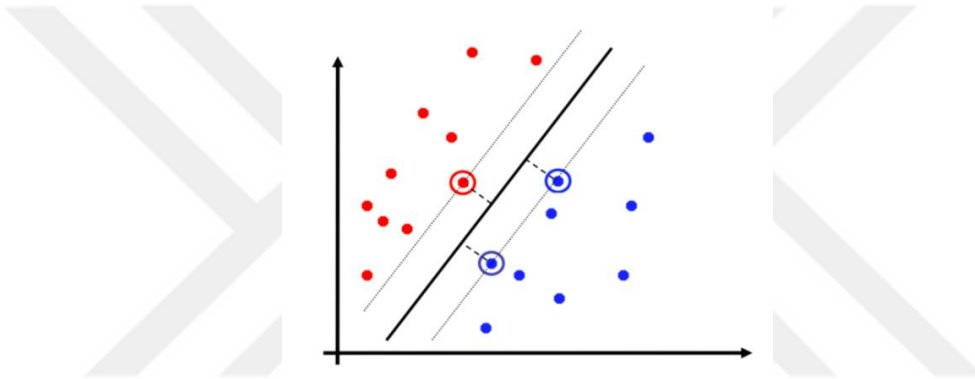
Tablo 5: Üçüncü ve beşinci maddede kullanılacak eğitim ve hedef matrislerin dizimleri

	Eğitim verisi P1x Dizimi											
Yapılan Hareket	El Açma									El Kapama		
Hareketin Pozisyonu	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P31	P32	P33	P11	P12	P13
Hedef Matrisi Dizimi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Bu maddelerde bir diğer amaç da ivme ve jiroskop verilerinin hareket, bilek açısı ve kol pozisyonu tanımaya etkilerini incelemektir. Bunun için ikinci ve dördüncü madde kendi aralarında; üçüncü ve beşinci madde kendi aralarında karşılaştırılacaktır.

2.6. Destek Vektör Makinesi

Destek vektör makinesi (DVM [Tr.], SVM [İng.]), nesnelere etiket atamayı örnek olarak öğrenen bir bilgisayar algoritmasıdır. Temelde, DVM matematiksel bir varlıktır, belirli bir matematiksel işlevi belirli bir veri koleksiyonuna göre maksimize etmek için bir algoritmadır (veya yöntemdir). Destek vektör makineleri çeşitli biyolojik uygulamalara başarıyla uygulanmıştır[32]. SVM veya DVM, girdi verilerini n boyutlu bir özellik uzayı olarak alır. Ardından $(n-1)$ boyutlu bir hiper düzlem özellik uzayını iki sınıfa ayırır. N boyutlu veri birinci sınıf için 1 ve ikinci sınıf için -1 olacak şekilde etiketlenir [12, 33].



Şekil 15: Destek Vektör Makinesi

Şekil 15’de bir hiper düzlemin, ki burada doğrusal olarak tanımlanmıştır, bir kısmında kalan veriler 1 ile etiketlenirken altında kalan veriler -1 ile etiketlenebilir. Bu hiper düzlem iki sınıftan da mümkün olan en uzak noktalardan geçtiği takdirde optimal hiper düzlem olarak adlandırılır [34].

Destek vektör makinaları ikili sınıflandırma problemlerinde yüksek genelleme başarısına sahip olsalar da çok sınıflı problemlerde aynı yüksek performansı gösteremeyebilirler. Bu çalışmada destek vektör makinesi eğitimi için kullanılan özellikler yapay sinir ağını eğitmede kullanılan özellikler ile aynıdır. Bu yüzden sınıflama problemi çok sınıflı bir problemidir. Beş maddeden birinci madde için 48 adet özellik bulunmaktadır. Bu özelliklerin destek vektör makinesi ile sınıflanabilmesi için çok sınıflı sınıflama yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ilki bire karşı bir metodu [35] ve diğeri de bire karşı tamamı metodudur [36].

Çok sınıflı DVM problemlerini çözme yöntemi, değişken sayısının sınıf sayısı ile orantılı olmasını gerektirir, bu nedenle çok sınıflı bir problemi çözmek, aynı sayıda veriye sahip ikili bir problemten hesaplama açısından daha zahmetlidir. Çok sınıflı DVM sınıflandırmalarında kullanılan en eski uygulama muhtemelen bire karşı tümü yöntemidir. Sınıf sayısının k olduğu bir durumda bire karşı tümü yöntemi k adet DVM modeli kurar. Eğitim sırasında bu metot, bir özelliği +1 olarak işaretler ve diğer tüm özellikleri -1 olarak işaretler ve sınıflamayı buna göre tüm özellikler için teker teker

yapar. Bire karşı bir metodu ise aynı durumda $k(k-1)/2$ adet model kurar. Bu metot sınıflama esnasında tüm özellikler içinden iki tanesini +1 ve -1 olarak işaretler ve kalan özellikleri 0 olarak işaretler [35, 36].

2.7. Destek Vektör Makinesinin Eğitilmesi

Bu kısımda, önceki adımlarda elde edilen özellikler aynen kullanılacaktır. Yalnız verilerin dizilimi önceki adımlardakinden farklı olarak transpoze şeklinde olacaktır. Birinci sınıfta P11 verileri için eğitilecek bir DVM girdilerinden eğitim girdileri, 48x784 değil; 784x48 şeklinde olacaktır.

Önceki adımlarda kullanılan hedef matrisleri burada vektör olarak kullanılmıştır. birinci maddede hedef matrisinin el açma hareketine karşılık gelen sütunu 1000 iken, DVM için hedef vektöründe el açma hareketine karşılık gelen değer 1 olmaktadır. Aynı şekilde el kapama hareketi 0100 iken, DVM için eğitim vektöründe değeri 2 olmaktadır.

Çok sınıflı eğitilen DVM için iki farklı metot kullanılmıştır. Bunlardan ilki bire karşı bir, diğeri de bire karşı hepsi metotlarıdır. Çok sınıflı eğitimi yapabilmek için MATLAB platformunda fitcecoc komutu kullanılmıştır[37]. Bu fonksiyonun varsayılan eğitim fonksiyonu bire karşı birdir. Bire karşı tümü şeklinde sınıflama yapmak için 'Coding','onevsall' parametre çiftini fonksiyon argümanı olarak girmek gerekmektedir.

Bire karşı bir ve bire karşı tümü fonksiyonlarının hareket tanımda başarı oranları incelenecektir. Buna ek olarak özellik sayısının başarıya etkisi de incelenecektir. birinci madde için özellik sayısı 48 olmaktadır. Öncelikle 48 özellik ile bire karşı bir ve bire karşı tümü fonksiyonları kullanılarak DVM başarı oranları incelenecektir. Ardından bir MATLAB fonksiyonu olan “sequentialfs” komutu kullanılarak belirli sayıda birbirleriyle en uygun özellikler seçilecek ve bu özellik sayısı kullanılarak bire karşı bir ve bire karşı tümü fonksiyonları ile DVM eğitimleri yapıp başarı oranları incelenecektir [38]. Seçilecek özellik sayıları 4,5,6 ve 8dir. Belirlenen kriterlere göre sequentialfs komutu özellikleri kendi seçtiğinden, her farklı madde için farklı özellikler seçilmektedir.

Özellik seçiminde kullanılacak kriter için bir MATLAB komutu olan predict fonksiyonu kullanılmaktadır. Predict fonksiyonuna parametre olarak fitcecoc ile oluşturulan DVM modeli ve bu model için test verileri girilmektedir. Predict fonksiyonu çıktı olarak test verilerinin etiketlerini yani el açma hareketi için 1, el kapama hareketi için 2 şeklinde değerler vermektedir [39]. Bu çıktılar daha sonra gerçek test verileri etiketleriyle karşılaştırılır ve bir başarı oranı üretilir. Ardından bu başarı oranı sequentialfs fonksiyonuna argüman olarak beslenir ve bu orana göre birlikte kullanılmaya en uygun özellikler belirlenir.

İkinci madde için kullanılacak hedef vektörünün dizimi Tablo 6’da verilmiştir. İkinci maddede de tıpkı ilk maddede olduğu gibi eğitim ve test verileri YSA verileri ile aynı, ancak transpoze şeklindedir. P1x konumu için eğitim matrisi 2256x48 şeklindedir. Bu madde ile amaçlanan YSA ile aynıdır.

Tablo 6: İkinci madde için kullanılacak DVM hedef vektörü

	Eğitim verisi P1x Dizimi											
Yapılan Hareket	El Açma			El Kapama			Bilek Fleksiyon			Bilek Ekstensiyon		
Hareketin Pozisyonu	P11	P12	P13	P11	P12	P13	P11	P12	P13	P11	P12	P13
Hedef Matrisi Dizimi	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4

Üçüncü madde için kullanılacak hedef vektörü 6768x48 şeklindedir ve bu vektörün dizimi Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7: Üçüncü madde için kullanılacak DVM hedef vektörü

	Eğitim verisi P1x Dizimi											
Yapılan Hareket	El Açma									El Kapama		
Hareketin Pozisyonu	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P31	P32	P33	P11	P12	P13
Hedef Matrisi Dizimi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

Dördüncü madde için kullanılacak hedef vektörü p1x için 2256x57 olmaktadır. İkinci madde ile aralarındaki fark, EMG verilerinin üzerine ivme verilerinin de eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu madde için EMG ve ivme verilerine ek jiroskop verileri de eklendiğinde hedef vektörü 2256x66 olmaktadır. Hedef vektörünün dizimi ise Tablo 6’da verildiği gibidir.

Beşinci madde için kullanılacak hedef vektörü 6768x57 olmaktadır. Bu vektör EMG ve ivme verilerinden oluşmaktadır. Jiroskop verileri de eklendiğinde 6768x66 şeklinde bir vektör elde edilir. Hedef matrisin dizimi ise Tablo 7’de verildiği gibidir.

3. BULGULAR

3.1. Tüm Farklı Kol Pozisyonlarında ve Tüm Farklı Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Sınıflandırılması

3.1.1. Kol vücuda paralel ve bilek açısı 0 dereceyken yapılan hareketler (P11)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x784 ve test verisinin boyutu 48x96 şeklindedir. Toplam hata sayısı 12'dir. Bu durumda başarı oranı %87,5'tir. Karışıklık matrisi Tablo 8'de gösterildiği gibidir:

Tablo 8: Kol vücuda paralel ve avuç içi sırt doğrultusunda (bilek açısı 0 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P11) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
G e r ç e k	El açma	18	1	0	3
	El kapama	0	22	1	0
	Bilek fleksiyon	0	1	23	0
	Bilek ekstensiyon	6	0	0	21



Tablo 8'e göre, el açma hareketinden 6 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu 6 hatanın altısı da gerçekte bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 2 hata yapılmış olup, bu hataların biri aslında el açma hareketi ve diğeri de aslında bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen bilek fleksiyon hareketinin aslı el kapama hareketi iken; hatalı tahmin edilen 3 bilek ekstensiyon hareketinin üçü de aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.1.2. Kol vücuda paralel ve bilek açısı 90 dereceyken yapılan hareketler (P12)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x752 ve test verisinin boyutu 48x80 şeklindedir. Toplam hata sayısı 20'dir. Bu durumda başarı oranı %75'tir. Karışıklık matrisi Tablo 9'da gösterildiği gibidir:

Tablo 9: Kol vücuda paralel ve avuç içi kişiye dönük (bilek açısı 90 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P12) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
G e r ç e k	El açma	16	0	0	16
	El kapama	3	20	0	0
	Bilek fleksiyon	0	0	20	0
	Bilek ekstensiyon	1	0	0	4



Tablo 9'a göre, el açma hareketinden 4 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hataların üçü gerçekte el kapama hareketiyken biri de aslında bilek ekstensiyon hareketidir. Bu kez el kapama hareketinden ve bilek fleksiyon hareketinden hata yapılmamıştır. İlginç bir biçimde hatalı tahmin edilen 16 bilek ekstensiyon hareketinin hepsi de aslında el açma hareketi olmalıdır. Bu kadar fazla olmasa da bu durum benzeri P11'de de görülmüştür. Bilek ekstensiyon hareketi ile ilgili yapılan tüm hatalar P11'de de el açma hareketinden çıkmıştır.

3.1.3. Kol vücuda paralel ve bilek açısı 180 dereceyken yapılan hareketler (P13)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x752 ve test verisinin boyutu 48x80 şeklindedir. Toplam hata sayısı 6'dır. Bu durumda başarı oranı %92,5'tir. Karışıklık matrisi Tablo 10'da gösterildiği gibidir:

Tablo 10: Kol vücuda paralel ve avuç içi yüz doğrultusunda (bilek açısı 180 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P13) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
G e r ç e k	El açma	19	0	0	1
	El kapama	0	18	2	0
	Bilek fleksiyon	0	2	16	0
	Bilek ekstensiyon	1	0	0	19



Tablo 10'a göre, el açma hareketinden tek hatalı yapılan tahmin bilek ekstensiyon hareketidir. El kapama hareketinden 2 hata yapılmış olup bu iki hata da bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 2 bilek fleksiyon hareketinin aslı el kapama hareketi iken; hatalı tahmin edilen tek bilek ekstensiyon hareketini yine aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.1.4. Kol vücuda dik ve bilek açısı 0 dereceyken yapılan hareketler (P21)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x784 ve test verisinin boyutu 48x96 şeklindedir. Toplam hata sayısı 12'dir. Bu durumda başarı oranı %78,13'tür. Karışıklık matrisi Tablo 11'de gösterildiği gibidir:

Tablo 11: Kol vücuda dik ve avuç içi yere dönük (bilek açısı 0 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P21) Giriş Verisi (EMG)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	23	1	2
	El kapama	0	23	0
	Bilek fleksiyon	0	0	22
	Bilek ekstensiyon	1	0	0
				

Tablo 11'e göre, el açma hareketinden yapılan tek hatalı tahmin gerçekte bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden yapılan tek hata da aslında el açma hareketidir. Hatalı tahmin edilen 2 bilek fleksiyon hareketinin ikisi de gerçekte el açma hareketi iken; hatalı tahmin edilen 17 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır. Bu durum P12'de benzer bir şekilde görülmektedir. Hatalı 16 bilek ekstensiyon hareketlerinin tamamı el açma hareketinden çıkmaktadır.

3.1.5. Kol vücuda dik ve bilek açısı 90 dereceyken yapılan hareketler (P22)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x752 ve test verisinin boyutu 48x80 şeklindedir. Toplam hata sayısı 16'dır. Bu durumda başarı oranı %80'dir. Karışıklık matrisi Tablo 12'de gösterildiği gibidir:

Tablo 12: Kol yere paralel ve avuç içi sola dönük (bilek açısı 90 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P22) Giriş Verisi (EMG)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	11	2	3
	El kapama	8	17	0
	Bilek fleksiyon	0	1	17
	Bilek ekstensiyon	1	0	0
				

Tablo 12'ye göre, el açma hareketinden 9 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu 9 hatanın sekizi

gerçekte el kapama hareketiyken biri bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 3 hata yapılmış olup, bu hataların ikisi aslında el açma hareketi ve diğeri de aslında bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 3 bilek fleksiyon hareketinin aslı el açma hareketi iken; hatalı tahmin edilen tek bilek ekstensiyon hareketini de aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.1.6. Kol vücuda dik ve bilek açısı 180 dereceyken yapılan hareketler (P23)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x768 ve test verisinin boyutu 48x96 şeklindedir. Toplam hata sayısı 9'dur. Bu durumda başarı oranı %90,63'tür. Karışıklık matrisi Tablo 13'te gösterildiği gibidir:

Tablo 13: Kol yere paralel ve avuç içi yukarı dönük (bilek açısı 180 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P23) Giriş Verisi (EMG)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	20	1	0
	El kapama	1	22	0
	Bilek fleksiyon	2	1	24
	Bilek ekstensiyon	1	0	0
				

Tablo 13'e göre, el açma hareketinden 4 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu 4 hatanın biri gerçekte el kapama hareketiyken ikisi bilek fleksiyon hareketi ve biri de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 2 hata yapılmış olup, bu hataların biri aslında el açma hareketi ve diğeri de aslında bilek fleksiyon hareketidir. Bilek fleksiyon hareketlerinin tamamı doğru tahmin edilmişken; hatalı tahmin edilen 3 bilek ekstensiyon hareketinin üçü de aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.1.7. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve bilek açısı 0 dereceyken yapılan hareketler (P31)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x784 ve test verisinin boyutu 48x96 şeklindedir. Toplam hata sayısı 23'tür. Bu durumda başarı oranı %76,04'tür. Karışıklık matrisi Tablo 14'te gösterildiği gibidir:

Tablo 14: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve avuç içi aşağı dönük (bilek açısı 0 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P31) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	16	3	2	1
	El kapama	5	17	0	0
	Bilek fleksiyon	1	1	19	2
	Bilek ekstensiyon	2	3	3	21
					

Tablo 14'e göre, el açma hareketinden 8 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin beşi gerçekte el kapama hareketiyken biri aslında bilek fleksiyon hareketi ve ikisi de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 7 hata yapılmış olup, bu hataların üçü aslında el açma hareketi, biri bilek fleksiyon hareketi ve diğer üçü de aslında bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 5 bilek fleksiyon hareketinin ikisi aslen el açma hareketi olup üçünün aslı da bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 3 bilek ekstensiyon hareketinin biri el açma ikisi bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

3.1.8. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve bilek açısı 90 dereceyken yapılan hareketler (P32)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x768 ve test verisinin boyutu 48x96 şeklindedir. Toplam hata sayısı 20'dir. Bu durumda başarı oranı %79,17'dir. Karışıklık matrisi Tablo 15'te verildiği gibidir:

Tablo 15: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve avuç içi kişiye dönük (bilek açısı 90 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P32) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	18	0	7	1
	El kapama	2	24	4	0
	Bilek fleksiyon	2	0	13	2
	Bilek ekstensiyon	2	0	0	21



Tablo 15'e göre, el açma hareketinden 6 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin ikisi aslında el kapama hareketidir. İki bilek fleksiyon hareketi ve ikisi de aslında bilek ekstensiyon hareketidir. El kapama hareketinden hatalı tahmin yapılmamıştır. Bilek fleksiyon hareketinden yedisi el açma, dördü el kapama olmak üzere toplam 11 hatalı tahmin yapılmışken; hatalı tahmin edilen 3 bilek ekstensiyon hareketinin biri aslında el açma hareketi ve ikisi bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

3.1.9. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve bilek açısı 180 dereceyken yapılan hareketler (P33)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x784 ve test verisinin boyutu 48x80 şeklindedir. Toplam hata sayısı 12'dir. Bu durumda başarı oranı %73,75'tir. Karışıklık matrisi Tablo 16'da gösterildiği gibidir:

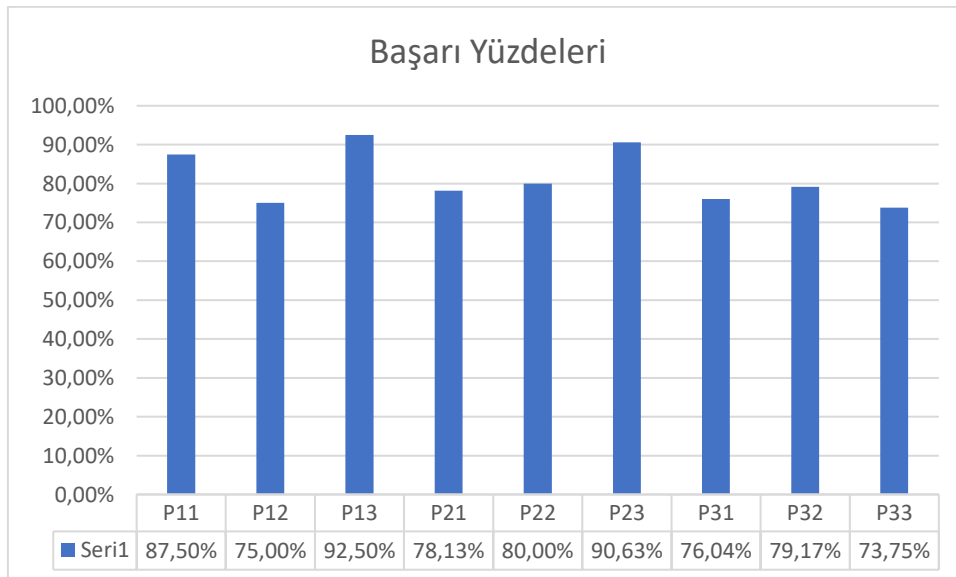
Tablo 16: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve avuç içi yukarı dönük (bilek açısı 180 derece) yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P33) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	17	0	0	2
	El kapama	1	16	1	1
	Bilek fleksiyon	0	3	16	7
	Bilek ekstensiyon	2	1	3	10
	Toplam	3	4	4	10



Tablo 16'ya göre, el açma hareketinden 3 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu 3 hatanın biri gerçekte el kapama hareketi ve ikisi de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 4 hata yapılmış olup, bu hataların üçü aslında bilek fleksiyon hareketi ve biri de aslında bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek fleksiyon hareketinin biri gerçekte el kapama hareketi iken üçü aslında bilek ekstensiyon hareketi ve hatalı tahmin edilen 10 bilek ekstensiyon hareketinin ikisi el açma, biri el kapama, yedisi bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

3.1.10. Farklı kol pozisyonlarında ve bilek açılarında yapılan hareket sınıflamalarının sonuçlarının değerlendirilmesi



Şekil 16: Tüm farklı kol pozisyonlarında ve tüm farklı bilek açılarında yapılan hareketleri sınıflandırmak için eğitilen ağların başarı yüzdeleri

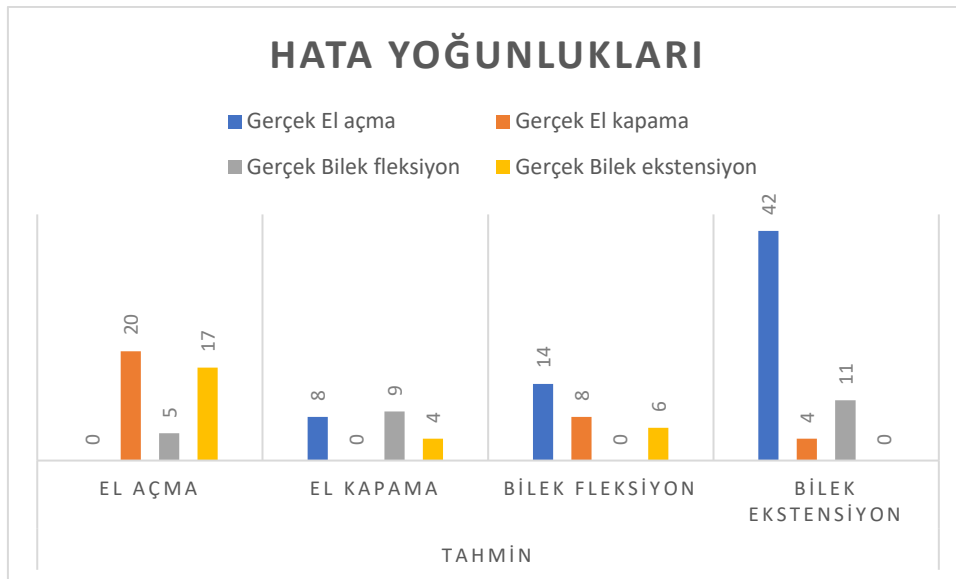
Başarı yüzdelерinin ortalaması %81,41 olan önceki bölümde bahsedilen tüm ağların kendi başarı yüzdeleri topluca Şekil 16’de verilmiştir. Başarı yüzdeleri %73,75 ile en düşük başarı ile P33’ten; %92,5 ile en yüksek başarı yüzdesiyle P13 arasında değişmektedir.

Tablo 17’de ise tüm kol pozisyonu ve bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırmalarına ait karışım matrisi verilmektedir.

Tablo 17: Tüm farklı kol pozisyonlarında ve bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen tüm ağlar için karışım matrisini gösterir tablo

Hareket Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	158	8	14	42
	El kapama	20	179	8	4
	Bilek fleksiyon	5	9	170	11
	Bilek ekstensiyon	17	4	6	143

Tüm 9 farklı bilek açısı ve kol pozisyonu için üretilen yapay sinir ağlarında, toplam 42 adet hatalı el açma hareketi tanımlaması olmuştur. Bu hatalardan 20 tanesi aslında el kapama, 5 tanesi bilek fleksiyon ve 17 tanesi bilek ekstensiyon hareketleridir. Yani el açma hareketini tanımlarken en sık yapılan hata, bu hareketi el kapama hareketiyle karıştırmaktır denebilir. Aynı şekilde el kapama hareketi en çok bilek fleksiyon hareketiyle; bilek fleksiyon hareketi en çok el açma hareketiyle ve bilek ekstensiyon hareketi en çok el açma hareketiyle karışıyor denebilir. Şekil 17’de bu durum grafikselleştirilmiş olarak verilmiştir. Şekil incelendiğinde, el açma hareketinde el kapama hareketinin en çok karıştırılan hareket olduğu, bilek ekstensiyon hareketinde ise el açma hareketinin en çok karıştırılan hareket olduğu görülüyor. El kapama ve bilek fleksiyon hareketlerini tanımda yapılan hatalar diğerlerine nispeten homojen dağılmış gibi görünüyor.



Şekil 17: Tüm farklı kol pozisyonlarında ve bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen ağların sonuçlarına göre hata yoğunlukları

Yine tüm tablolar incelendiğinde, el açma hareketinin en çok yanlış tanındığı açı ve pozisyon P32'dir ve bu pozisyonda en çok el kapama hareketi ile karıştırılmıştır. El kapama ve bilek fleksiyon hareketlerinde hareketler arası karıştırılmada birbirleri arasından sıyrılan hareketler görülmemektedir. Bilek ekstensiyon hareketine gelindiğindeyse en çok hatanın P12 ve P21 pozisyonlarında ve bu iki pozisyonda da el açma hareketiyle karıştığı görülmektedir.

3.2. Aynı Kol Pozisyonunda ve Farklı Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Sınıflandırılması

3.2.1. Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketler (P1x)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x2256 ve test verisinin boyutu 48x240 şeklindedir. Toplam hata sayısı 18'dir. Bu durumda başarı oranı %92,5'tir. Karışıklık matrisi Tablo 18'de gösterildiği gibidir:

Tablo 18: Kol vücuda paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	56	1	1	4
	El kapama	0	52	1	0
	Bilek fleksiyon	0	6	58	0
	Bilek ekstensiyon	4	1	0	56
					

Tablo 18'e göre, el açma hareketinden 4 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin hepsi gerçekte bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 8 hata yapılmış olup, bu hatalardan biri aslında el açma hareketi, altısı bilek fleksiyon hareketi ve bir tanesi de aslında bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 2 bilek fleksiyon hareketinin biri aslen el açma hareketi olup birinin aslı da el kapama hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.2.2. Kol yere paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketler(P2x)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x2256 ve test verisinin boyutu 48x240 şeklindedir. Toplam hata sayısı 33'tür. Bu durumda başarı oranı %86,25'tir. Karışıklık matrisi Tablo 19'da gösterildiği gibidir:

Tablo 19: Kol vücuda dik pozisyonda tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
G e r ç e k	El açma	40	4	2	4
	El kapama	11	55	1	0
	Bilek fleksiyon	1	1	56	0
	Bilek ekstensiyon	8	0	1	56
					

Tablo 19'a göre, el açma hareketinden 20 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin on biri gerçekte el kapama hareketiyken, biri bilek fleksiyon ve sekizi de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 5 hata yapılmış olup, bu hatalardan dördü aslında el açma hareketi ve biri de bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek fleksiyon hareketinin ikisi aslen el açma hareketi olup birinin aslı da el kapama hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.2.3. Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında yapılan hareketler (P3x)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x2304 ve test verisinin boyutu 48x240 şeklindedir. Toplam hata sayısı 32'dir. Bu durumda başarı oranı %74,17'tir. Karışıklık Matrisi Tablo 20'de gösterildiği gibidir:

Tablo 20: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırma sonuçları

Hareket Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
G e r ç e k	El açma	50	3	1	4
	El kapama	5	51	7	1
	Bilek fleksiyon	2	4	46	24
	Bilek ekstensiyon	3	2	6	31
					

Tablo 20'ye göre, el açma hareketinden 10 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı

tahminlerin beşi gerçekte el kapama hareketiyken, ikisi bilek fleksiyon ve üçü de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 9 hata yapılmış olup, bu hatalardan üçü aslında el açma hareketi, dördü bilek fleksiyon hareketi ve ikisi de bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 14 bilek fleksiyon hareketinin biri aslen el açma hareketi olup yedisinin aslı da el kapama hareketi ve altısı da bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 29 bilek ekstensiyon hareketinin dördü aslında el açma hareketiyken biri el kapama hareketi ve yirmi dört tanesi de bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

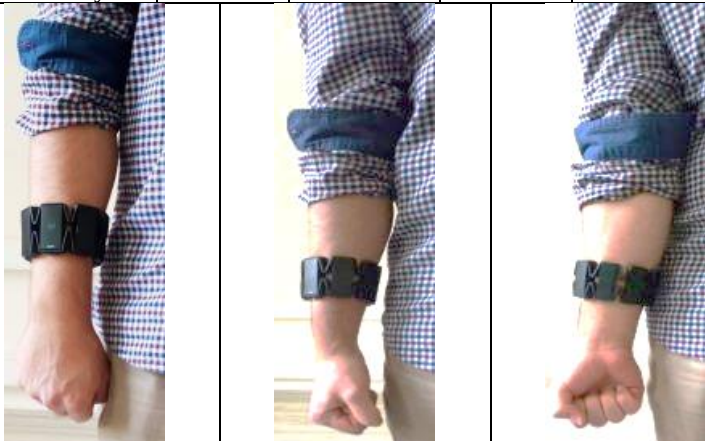
3.2.4. Bilek açısı tanıma

Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan el hareketlerinin sınıflandırılmasının yanında hareketin yapıldığı bilek açısı da tahmin edilebilir. YSA eğitimi için kullanılan hedef matrisi değişmektedir.

3.2.4.1. Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketin sınıflandırılması (P1x)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x2256 ve test verisinin boyutu 48x240 şeklindedir. Bir önceki gruplardan farklı olarak hedef verisinin boyutu 7x2304 şeklindedir. Ağ eğitimi aynı anda hem hareket hem de bilek açısı tanımak üzere yapılmıştır. Hareket tanımada yapılan toplam hata sayısı 26'dır. Bu durumda hareket tanımlamada başarı oranı %89,17'tür. Eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 21'de gösterildiği gibidir:

Tablo 21: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerde bilek açısıyla beraber yapılan hareket sınıflama sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	57	1	8	10
	El kapama	0	56	1	0
	Bilek fleksiyon	0	3	51	0
	Bilek ekstensiyon	3	0	0	50
					

Tablo 21'e göre, el açma hareketinden 3 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin tamamı aslında bilek ekstensiyon hareketi olmalıdır. Aynı şekilde el kapama hareketinden 4 hata yapılmış olup, bu hatalardan biri aslında el açma hareketi ve üçü de bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 9 bilek fleksiyon hareketinin sekizi aslen el açma hareketi olup biri de el kapama hareketidir. Hatalı tahmin edilen 10 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

Bilek açısı tanımada yapılan toplam hata sayısı 168'dir. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %30'dur. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 22'de gösterildiği gibidir:

Tablo 22: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı açıların sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	23	37	17
	Px2 (90°)	28	20	34
	Px3 (180°)	29	23	29

Tablo 22 incelendiğinde hata sayılarının birbirlerine yaklaşık oldukları görülmektedir. Bu da bilek açısı tahmini yaparken hatanın neredeyse homojen dağıldığını, yani tahminlerin rastgele yapıldığını göstermektedir.

3.2.4.2. Kol yere paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması (P2x)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x2256 ve test verisinin boyutu 48x240 şeklindedir. Hareket tanımada yapılan toplam hata sayısı 25'tir. Bu durumda hareket tanımlamada başarı oranı %89,58'tir. Hareket tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 23'de gösterildiği gibidir:

Tablo 23: Kol yere paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerde bilek açılarıyla beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	47	2	4	4
	El kapama	9	57	1	0
	Bilek fleksiyon	1	1	55	0
	Bilek ekstensiyon	3	0	0	56
					

Tablo 23'e göre, el açma hareketinden 13 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı

tahminlerin dokuzu aslında el kapama hareketi, biri aslında bilek fleksiyon hareketi ve üçü de bilek ekstensiyon hareketi olmalıdır. Aynı şekilde el kapama hareketinden 3 hata yapılmış olup, bu hareketlerin ikisi aslında el açma hareketi ve biri de bilek fleksiyon hareketi olmalıdır. Hatalı tahmin edilen 5 bilek fleksiyon hareketinin dördü aslen el açma hareketi olup biri de el kapama hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

Bilek açısı tanımada yapılan toplam hata sayısı 142'dir. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %40,83'tür. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 24'te gösterildiği gibidir:

Tablo 24: Kol yere paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açılarının sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG)		Beklenen (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	2	24	8
	Px2 (90°)	43	35	11
	Px3 (180°)	35	21	61

Tablo 24 incelendiğinde hata sayılarının birbirlerine yaklaşık oldukları görülmektedir. Yalnızca px1 bilek açısı diğerlerinden daha fazla hatalı çıkmıştır.

3.2.4.3. Kol yukarı uzanır pozisyondayken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması (P3x)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x2304 ve test verisinin boyutu 48x240 şeklindedir. Hareket tanımada yapılan toplam hata sayısı 70'tir. Bu durumda hareket tanımlamada başarı oranı %70,83'tür. Hareket tanımlamak için eğitilen ağın sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 25'te gösterildiği gibidir:

Tablo 25: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında yapılan hareketlerle beraber bilek açısı tespiti sırasında yapılan hareketlerin sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	45	1	2	9
	El kapama	9	58	3	1
	Bilek fleksiyon	1	1	55	38
	Bilek ekstensiyon	5	0	0	12



Tablo 25'e göre, el açma hareketinden 15 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin dokuzu aslında el kapama hareketi, biri aslında bilek fleksiyon hareketi ve beşi de bilek ekstensiyon hareketi olmalıdır. Aynı şekilde el kapama hareketinden 2 hata yapılmış olup, bu hareketlerin biri aslında el açma hareketi ve diğeri aslında bilek fleksiyon hareketi olmalıdır. Hatalı tahmin edilen 5 bilek fleksiyon hareketinin ikisi aslen el açma hareketi olup üçü de el kapama hareketidir. Hatalı tahmin edilen 48 bilek ekstensiyon hareketinin dokuzu aslında el açma, biri el kapama ve otuz sekizi de bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

Bilek açısı tanımda yapılan toplam hata sayısı 134'tür. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %44,17'dir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağın sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 26'da gösterildiği gibidir:

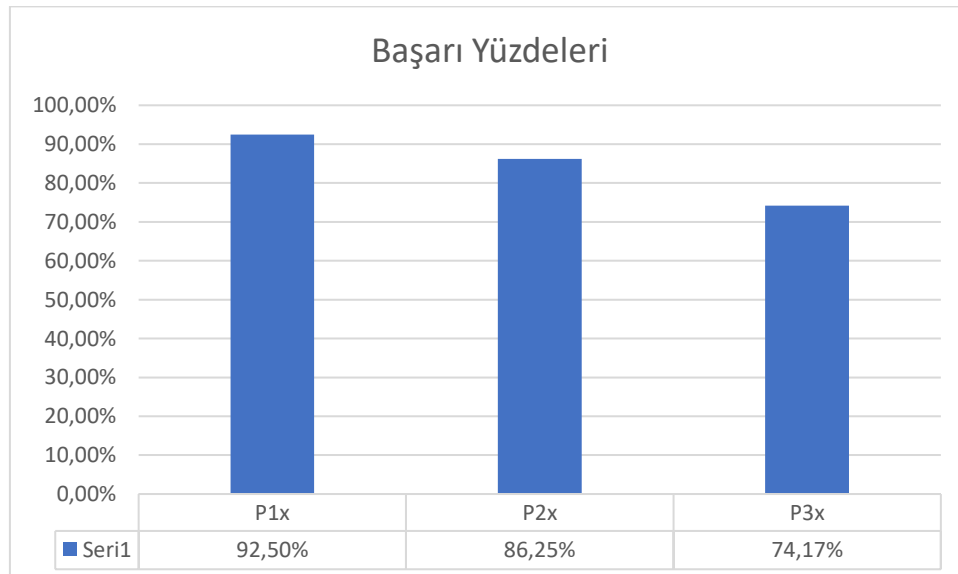
Tablo 26: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	38	86	29
	Px2 (90°)	106	91	64
	Px3 (180°)	96	63	147

Tablo 26 incelendiğinde hata sayılarının birbirlerine yaklaşık oldukları görülmektedir. Yalnızca px1 bilek açısı diğerlerinden daha fazla çıkmıştır.

3.2.5. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamalarının sonuçlarının değerlendirilmesi

Başarı yüzdelerinin ortalaması %84,31 olan önceki maddede bahsedilen tüm ağların kendi başarı yüzdeleri topluca Şekil 18'te verilmiştir. Başarı yüzdeleri %74,17 ile en düşük başarı ile P3x'den; %92,5 ile en yüksek başarı yüzdesiyle P1x arasında değişmektedir.



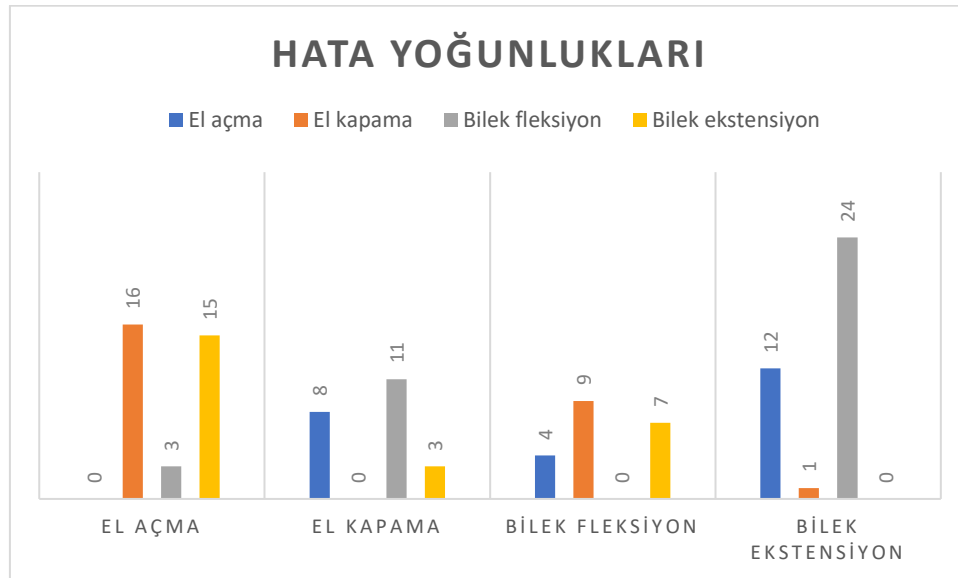
Şekil 18: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen tüm ağların

Tablo 27’te ise aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen tüm ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak verilmiştir. Aynı kol pozisyonundaki tüm bilek açılarına göre üretilen 3 adet yapay sinir ağında, toplam 34 adet hatalı el açma hareketi tanımlaması olmuştur. Bu hatalardan 16 tanesi aslında el kapama, 3 tanesi bilek fleksiyon ve 15 tanesi bilek ekstensiyon hareketleridir. El açma hareketini tanımlarken en sık yapılan hata, bu hareketi el kapama hareketiyle karıştırmaktır denebilir. El kapama hareketi ile bilek ekstensiyon hareketinin hataları yakın olduğundan, el açma hareketi bilek ekstensiyon hareketi ile de karıştırılıyor denebilir.

Tablo 27: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen tüm ağların sonuçlarını gösterir tablo

Hareket Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
El açma	146	8	4	12
El kapama	16	158	9	1
Bilek fleksiyon	3	11	160	24
Bilek ekstensiyon	15	3	7	143

Aynı şekilde el kapama hareketi en çok bilek fleksiyon hareketiyle; bilek fleksiyon hareketi en çok el kapama hareketiyle ve bilek ekstensiyon hareketi en çok bilek fleksiyon hareketiyle karışıyor denebilir. Fakat Tablo 27 incelendiğinde, aslında hareketlerin hatalarının kısmen homojen olduğu da söylenebilir. Bilek fleksiyon hareketinde 9 el kapama hatası yapılmışken 7 tane de bilek ekstensiyon hatası yapılmıştır. Şekil 19’da bu durum grafikselleştirilmiş olarak verilmiştir.



Şekil 19: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareket sınıflamaları için eğitilen ağların sonuçlarına göre hata yoğunlukları

Şekil 19 incelendiğinde, el açma hareketini tanımlarken en az hata yapılan hareketin

bilek fleksiyon hareketi olduğu görülebiliyor. Bilek ekstensiyon hareketinde ise bilek fleksiyon hareketinin en çok karıştırılan hareket olduğu görülüyor. El kapama ve bilek fleksiyon hareketlerini tanımada yapılan hatalar diğerlerine nispeten homojen dağılmış gibi görünüyor.

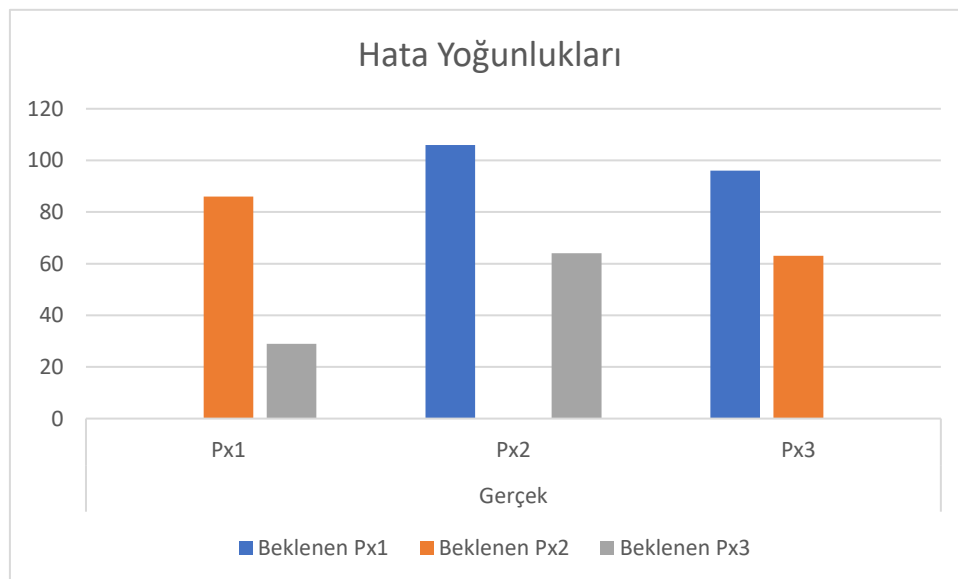
Yine tüm tablolar incelendiğinde, el açma hareketinin en çok yanlış tanındığı kol pozisyonu P2x'dir ve bu pozisyonda en çok el kapama hareketi ile karıştırılmıştır ve bunu hemen ardından az bir farkla bilek ekstensiyon hareketi takip eder. El kapama hareketi için P2x pozisyonunda en az hata yapılmış ve yapılan hataların büyük çoğunluğu el açma hareketi ile karıştırılarak yapılmıştır. Bilek fleksiyon hareketi en çok P3x konumunda el kapma ve bilek ekstensiyon ile karıştırılmıştır. Bilek ekstensiyon hareketine gelindiğindeyse en çok hatanın P3x pozisyonlarında ve bilek fleksiyon hareketiyle karıştırılarak yapıldığı görülmektedir.

Tablo 28'de bilek açısı tespiti için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak verilmiştir.

Tablo 28: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı bilek açısı tespiti için eğitilen ağların sonuçları

Bilek Açısı Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	38	86	29
	Px2 (90°)	106	91	64
	Px3 (180°)	96	63	147
	Toplam	202	149	93

Tablo 28 incelendiğinde hataların kendi içlerinde neredeyse eşit oldukları görülüyor. Bu da tahmin etme sırasında tahminlerin rastgele yapıldığını gösteriyor. Yukarıdaki tabloya göre sonuçlar grafikselleştirilmek istenirse Şekil 20'deki grafik ortaya çıkmaktadır.



3.3. Tüm Kol Pozisyonlarında ve Tüm Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Beraber Sınıflandırılması

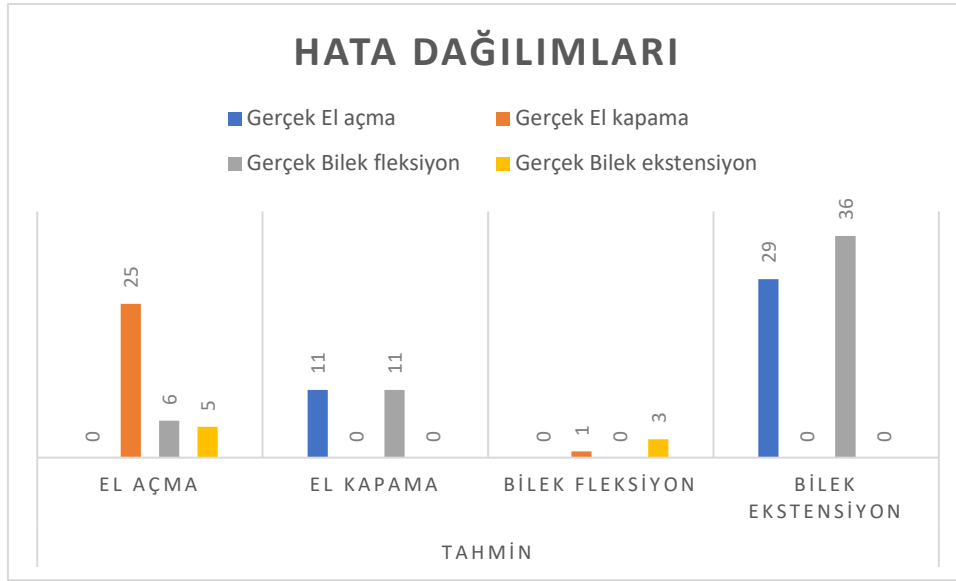
3.3.1. Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketler (Pxx)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 48x6768 ve test verisinin boyutu 48x720 şeklindedir. Toplam hata sayısı 127'dir. Bu durumda başarı oranı %82,36'dır. Karışıklık matrisi Tablo 29'da gösterildiği gibidir:

Tablo 29: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflama sonuçları

Hareket-Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	144	11	0	29
	El kapama	25	158	1	0
	Bilek fleksiyon	6	11	176	36
	Bilek ekstensiyon	5	0	3	115

Tablo 29'a göre, el açma hareketinden 36 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin yirmi beşi gerçekte el kapama hareketiyken, altısı bilek fleksiyon ve beşi de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 22 hata yapılmış olup, bu hatalardan on biri aslında el açma hareketi ve on biri de bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek fleksiyon hareketinin biri aslen el kapama hareketi olup üçünün aslı da bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 65 bilek ekstensiyon hareketinin yirmi dokuzu aslında el açma hareketiyken otuz altı tanesi de bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.



Şekil 21: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması için eğitilen ağların sonuçlarına göre hata yoğunlukları

Şekil 21’de Pxx verisinden eğitilen tek bir yapay sinir ağının hareket tahmini sonucu yaptığı yanlışları hangi hareketlerle karıştırdıklarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde el açma hareketi en çok el kapama hareketi ile karıştırılmıştır. El kapama hareketinde el açma ve bilek fleksiyon hareketleriyle aynı miktarda şaşma olmuştur. Bilek fleksiyon hareketi, bu sınıflamada tek bir ağ için en düşük hataya sahip hareket olup; karıştırılan hareketler ise el kapama ve bilek ekstensiyon hareketleridir. Bilek ekstensiyon hareketi ise en çok bilek fleksiyon hareketiyle karıştırılmış olup, bunu el açma hareketi takip etmektedir.

3.3.2. Bilek açısı ve kol pozisyonu tanıma

Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmasının yanı sıra bilek açısı ve kol pozisyonu tanınması da yapılmıştır. Eğitim verisinin boyutu 48x6768, hedef verisinin boyutu 10x6768’dir. Test verisinin boyutu ise 48x720’dir. Sistem yukarıdaki diğer gruplarla aynı şartlarda eğitildiğinde bilek açısı tanımda 397 hata yapılmıştır. Bu durumda başarı oranı %44,86’dır. Karışıklık matrisi Tablo 30’da gösterildiği gibi olmaktadır:

Tablo 30: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açılarının sınıflandırma sonuçları

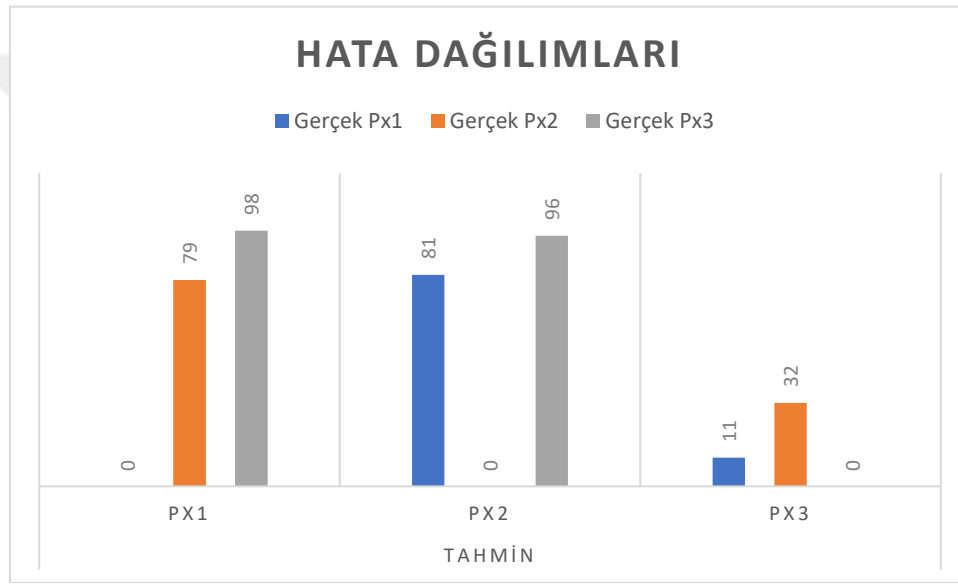
Hareket-Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	63	81	11
	Px2 (90°)	79	63	32
	Px3 (180°)	98	96	197

Kol pozisyonu tanıma göre yapılan hataların sayısı 454’tür. Bu durumda başarı oranı %36,84’tür. Karışıklık matrisi Tablo 31’de gösterildiği gibidir:

Tablo 31: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı kol pozisyonlarının sınıflandırma sonuçları

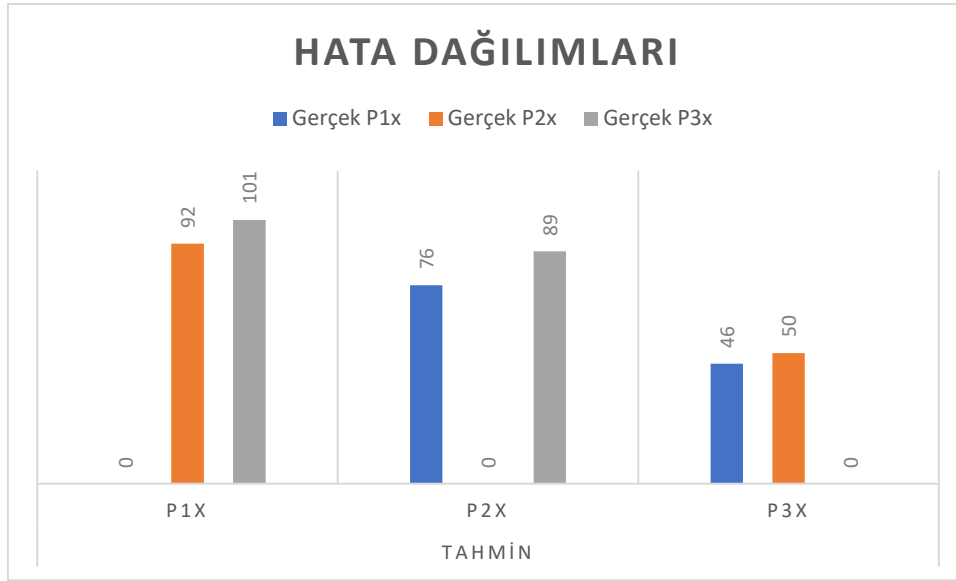
Hareket-Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)		Tahmin (Kol Pozisyonu)		
		P1x (kol vücuda paralel)	P2x (kol yere paralel)	P3x (kol yukarı uzanır)
Gerçek	P1x (kol vücuda paralel)	47	76	46
	P2x (kol yere paralel)	92	75	50
	P3x (kol yukarı uzanır)	101	89	144

Bu durumda bilek açısı tahminleri Şekil 22’de verildiği gibi gösterilebilir:



Şekil 22: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı bilek açısı tahminlerinin hata dağılımları

Kol pozisyonu tahminleri için yapılan tabloya göre veriler ise Şekil 23 ile gösterilebilir:



Şekil 23: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı kol pozisyonu tahminlerinin hata dağılımları

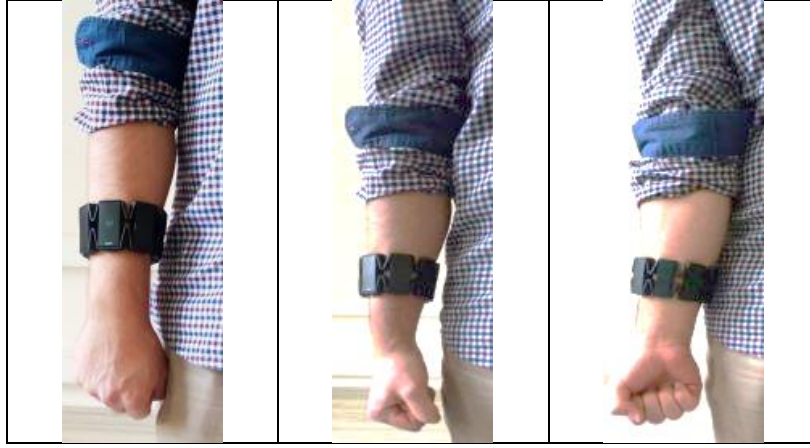
3.4. İvme ve Jiroskop Verilerinin Aynı Kol Pozisyonu ve Farklı Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Sınıflandırılmalarına Etkileri

3.4.1. Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketler (P1x+ivme+jiroskop)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 57x2256 ve test verisinin boyutu 57x240 şeklindedir. Normal eğitim verilerine yalnızca ivme verileri eklenmiştir. Toplam hata sayısı 25'tir. Bu durumda başarı oranı %89,58'dir. Karışıklık matrisi Tablo 32'de gösterildiği gibidir:

Tablo 32: Kol vücuda paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle beraber sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG+ivme)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	59	1	5	14
	El kapama	0	56	1	0
	Bilek fleksiyon	0	3	54	0
	Bilek ekstensiyon	1	0	0	46



Tablo 32'ye göre, el açma hareketinden 1 hatalı tahmin yapılmıştır ve bu hareket gerçekte bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 4 hata yapılmış olup, bu hatalardan biri aslında el açma hareketi, üçü bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 6 bilek fleksiyon hareketinin beşi aslen el açma hareketi olup birinin aslı da el kapama hareketidir. Hatalı tahmin edilen 14 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslına el açma hareketi olmalıdır.

Bu maddede eğitim verilerine bir de jiroskop verileri eklendiğinde, eğitim verisinin boyutu 66x2256 ve test verisinin boyutu 66x240 şeklindedir. Toplam hata sayısı 13'tür. Bu durumda başarı oranı %94,58'dir. Karışıklık matrisi Tablo 33'de gösterildiği gibidir:

Tablo 33: Kol yere paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle beraber sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	59	1	0	11
	El kapama	0	59	0	0
	Bilek fleksiyon	0	0	60	0
	Bilek ekstensiyon	1	0	0	49

Tablo 33'e göre, el açma hareketinden 1 hatalı tahmin yapılmış olup bu hareketin aslı bilek fleksiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 1 hata yapılmış olup, bu hatalardan aslı aslında el açma hareketidir. Bilek fleksiyon hareketlerinden hatalı tahmin yapılmamıştır. Bilek ekstensiyon hareketinden 11 hatalı tahmin yapılmış olup bu tahminlerin tamamı aslında el açma hareketidir.

3.4.2. Kol yere paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketler (P2x+ivme+jiroskop)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 57x2256 ve test verisinin boyutu 57x240 şeklindedir. Normal eğitim verilerine yalnızca ivme verileri eklenmiştir. Toplam hata sayısı 33'tür. Bu durumda başarı oranı %86,25'tir. Karışıklık matrisi Tablo 34'de gösterildiği gibidir:

Tablo 34: Kol yere paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle beraber sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG+ivme)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	43	2	3
	El kapama	11	54	1
	Bilek fleksiyon	2	4	55
	Bilek ekstensiyon	4	0	1
				

Tablo 34'e göre, el açma hareketinden 17 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin on biri gerçekte el kapama hareketiyken ikisi bilek fleksiyon hareketi ve dördü de gerçekte bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 6 hata yapılmış olup, bu hatalardan ikisi aslında el açma hareketi ve dördü de bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 5 bilek fleksiyon hareketinin üçü aslen el açma hareketi olup birinin aslı da el kapama hareketidir. Bir tane de bilek ekstensiyon hareketi yanlış tahmin edilmiştir. Hatalı tahmin edilen 5 bilek ekstensiyon hareketinin dördü aslında el açma hareketi olup biri de el kapama hareketi olmalıdır.

Bu maddede eğitim verilerine bir de jiroskop verileri eklendiğinde, eğitim verisinin boyutu 66x2256 ve test verisinin boyutu 66x240 şeklindedir. Toplam hata sayısı 39'dur. Bu durumda başarı oranı %83,75'tir. Karışıklık matrisi Tablo 35'de gösterildiği gibidir:

Tablo 35: Kol yere paralel iken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle beraber sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	35	4	2
	El kapama	21	52	1
	Bilek fleksiyon	0	4	56
	Bilek ekstensiyon	4	0	1

Tablo 35'e göre, el açma hareketinden 25 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin yirmi biri gerçekte el kapama hareketi ve dördü de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 8 hata yapılmış olup, bu hatalardan dördü aslında el açma hareketi ve dördü de bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 4 bilek fleksiyon hareketinin ikisi aslen el açma hareketi olup birinin aslı el kapama hareketi ve birinin de aslı bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 2 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

3.4.3. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve tüm bilek açılarında yapılan hareketler (P3x+ivme+jiroskop)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 57x2304 ve test verisinin boyutu 57x240 şeklindedir. Normal eğitim verilerine yalnızca ivme verileri eklenmiştir. Toplam hata sayısı 38'dir. Bu durumda başarı oranı %84,17'dir. Karışıklık matrisi Tablo 36'da gösterildiği gibidir:

Tablo 36: Kol yukarı uzanır pozisyondayken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle beraber sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG+ivme)	Tahmin			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	49	1	5
	El kapama	5	53	3
	Bilek fleksiyon	0	6	50
	Bilek ekstensiyon	6	0	2
				

Tablo 36'ya göre, el açma hareketinden 11 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin beşi gerçekte el kapama hareketiyken altısı da bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 7 hata yapılmış olup, bu hatalardan biri aslında el açma hareketi ve altısı da bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 10 bilek fleksiyon hareketinin beşinin aslı el açma hareketi, üçü aslında el kapama hareketi ve ikisi de bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 10 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında bilek fleksiyon hareketidir.

Bu maddede eğitim verilerine bir de jiroskop verileri eklendiğinde, eğitim verisinin boyutu 66x2304 ve test verisinin boyutu 66x240 şeklindedir. Toplam hata sayısı 55'tir. Bu durumda başarı oranı %77,08'dir. Karışıklık matrisi Tablo 37'de gösterildiği gibidir:

Tablo 37: Kol yukarı uzanır pozisyonda ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle beraber sınıflama sonuçları

Hareket Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	32	1	5	10
	El kapama	14	58	0	0
	Bilek fleksiyon	7	1	46	1
	Bilek ekstensiyon	7	0	9	49

Tablo 37'ye göre, el açma hareketinden 28 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin on dördü gerçekte el kapama hareketiyken, yedisi bilek fleksiyon ve yedisi de bilek ekstensiyon hareketidir. El kapama hareketinden 2 hata yapılmış olup bu hatalardan biri aslında el açma hareketi ve biri de aslında bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 14 bilek fleksiyon hareketinin beşinin aslı el açma hareketi ve dokuzu da bilek ekstensiyon hareketidir. Bilek ekstensiyon hareketinden 11 hatalı tahmin yapılmış olup bu tahminlerden onu aslında el açma ve biri de bilek fleksiyon hareketidir.

3.4.4. Bilek açısı tanıma

İvme ve jiroskop verilerinin aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin yapıldığı bilek açıları ve kol pozisyonu tespitlerine etkileri de incelenebilir.

3.4.4.1. Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması (P1x+ivme+jiroskop)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 57x2256 ve test verisinin boyutu 57x240 şeklindedir. Bir önceki gruplardan farklı olarak hedef verisinin boyutu 7x2256 şeklindedir. Ağ eğitimi aynı anda hem hareket hem de bilek açısı tanımak üzere yapılmıştır. Hareket tanımadaki yapılan toplam hata sayısı 28'dir. Bu durumda hareket tanımlamada başarı oranı %88,33'tür. Hareket tanımlamada eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 38'de gösterildiği gibidir:

Tablo 38: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında bilek açısı tespitiyle beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	59	2	0	16
	El kapama	0	49	0	0
	Bilek fleksiyon	0	9	60	0
	Bilek ekstensiyon	1	0	0	44

Tablo 38' göre, el açma hareketinden 1 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahmin

aslında bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 11 hata yapılmış olup, bu hatalardan ikisi aslında el açma ve dokuzu da aslında bilek fleksiyon hareketidir. Bilek fleksiyon hareketinden hatalı tahmin yapılmamıştır. Hatalı tahmin edilen 16 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

Bilek açısı tanımada yapılan toplam hata sayısı 116'dır. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %51,67'dir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 39'da gösterildiği gibidir:

Tablo 39: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları

	Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG+ivme)	Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	2	15	16
	Px2 (90°)	42	61	3
	Px3 (180°)	36	4	61

Tablo 39 ivme verilerinin bilek açısı tanımaya etkilerini de göstermektedir. Tabloya göre birinci bilek açısını tahminlerinde 78 hata yapılmıştır. Bu hatalardan kırk iki tanesi aslında ikinci açı ve otuz altı tanesi de aslında üçüncü açı olmalıdır. İkinci bilek açısı tahmininde 19 hata yapılmış olup bu hatalardan on beşi aslında birinci bilek açısı ve dördü de üçüncü bilek açısı olmalıdır. Son olarak üçüncü bilek açısı tahmininde 19 hata yapılmış olup, bu hatalardan on altısı aslında birinci bilek açısı ve üç tanesi de ikinci bilek açısıdır.

EMG ve ivme verilerine ek olarak jiroskop verileri de eklendiğinde, bilek açısı tanımlamada yapılan hataların sayısı 117 oluyor. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %51,25'tir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 40'da gösterildiği gibidir:

Tablo 40: Kol vücuda paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları

	Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P1x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)	Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	24	20	23
	Px2 (90°)	33	54	12
	Px3 (180°)	23	6	45

Tablo 40 ivme verilerine ek olarak jiroskop verilerinin bilek açısı tanımaya etkilerini de göstermektedir. Tabloya göre birinci bilek açısını tahminlerinde 56 hata yapılmıştır. Bu hatalardan otuz üç tanesi aslında ikinci açı ve yirmi üç tanesi de aslında üçüncü açı olmalıdır. İkinci bilek açısı tahmininde 26 hata yapılmış olup bu hatalardan yirmisi aslında birinci bilek açısı ve altısı da üçüncü bilek açısı olmalıdır. Son olarak üçüncü bilek açısı tahmininde 35 hata yapılmış olup, bu hatalardan yirmi üçü aslında birinci

bilek açısı ve on ikisi de ikinci bilek açısıdır.

3.4.4.2. Kol yere paralelken ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılması (P2x + ivme + jiroskop)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 57x2256 ve test verisinin boyutu 57x240 şeklindedir. Hareket tanımlamada yapılan toplam hata sayısı 51'dir. Bu durumda hareket tanımlamada başarı oranı %78,75'tir. Hareket tanımlama için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 41'de gösterildiği gibidir:

Tablo 41: Kol yere paralelken tüm bilek açılarındaki bilek açısı tespitiyle beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	45	5	1	14
	El kapama	9	41	0	0
	Bilek fleksiyon	2	14	57	0
	Bilek ekstensiyon	4	0	2	46

Tablo 41'e göre, el açma hareketinden 15 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin dokuzu aslında el kapama hareketi, ikisi aslında bilek fleksiyon hareketi ve dördü de bilek ekstensiyon hareketi olmalıdır. Aynı şekilde el kapama hareketinden 19 hata yapılmış olup, bu hareketlerin beşi aslında el açma hareketi ve on dördü aslında bilek fleksiyon hareketi olmalıdır. Hatalı tahmin edilen 3 bilek fleksiyon hareketinin biri aslen el açma hareketi olup ikisi bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 14 bilek ekstensiyon hareketinin tamamı aslında el açma hareketi olmalıdır.

Bilek açısı tanımlamada yapılan toplam hata sayısı 31'dir. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %87,08'dir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 42'de gösterildiği gibidir:

Tablo 42: Kol yere paralelken tüm bilek açılarındaki hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG + ivme)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	76	12	0
	Px2 (90°)	2	67	14
	Px3 (180°)	2	1	66

Tablo 42 ivme verilerinin bilek açısı tanımlamaya etkilerini göstermektedir. Tabloya göre birinci bilek açısını tahminlerinde 4 hata yapılmıştır. Bu hatalardan ikisi aslında ikinci açı ve ikisi de aslında üçüncü açı olmalıdır. İkinci bilek açısı tahmininde 13 hata yapılmış olup bu hatalardan on ikisi aslında birinci bilek açısı ve biri de üçüncü bilek

açısı olmalıdır. Son olarak üçüncü bilek açısı tahmininde 14 hata yapılmış olup, bu hataların tamamı aslında ikinci bilek açısı olmalıdır.

EMG ve ivme verilerine ek olarak jiroskop verileri de eklendiğinde, bilek açısı tanımlamada yapılan hataların sayısı 41 oluyor. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %82,92'dir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 43'te gösterildiği gibidir:

Tablo 43: Kol yere paralelken tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P2x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	78	16	0
	Px2 (90°)	2	51	10
	Px3 (180°)	0	13	70

Tablo 43 ivme verilerine ek olarak jiroskop verilerinin bilek açısı tanımaya etkilerini göstermektedir. Tabloya göre birinci bilek açısını tahminlerinde 2 hata yapılmıştır. Bu hataların tamamı aslında ikinci bilek açısı olmalıdır. İkinci bilek açısı tahmininde 29 hata yapılmış olup bu hatalardan on altısı aslında birinci bilek açısı ve on üçü de üçüncü bilek açısı olmalıdır. Son olarak üçüncü bilek açısı tahmininde 10 hata yapılmış olup, bu hataların tamamı aslında ikinci bilek açısı olmalıdır.

3.4.4.3. Kol yukarı uzanır pozisyonda ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması (P3x + ivme + jiroskop)

Bu grupta eğitim verisinin boyutu 57x2304 ve test verisinin boyutu 57x240 şeklindedir. Hareket tanımlamada yapılan toplam hata sayısı 74'tür. Bu durumda hareket tanımlamada başarı oranı %69,17'dir. Hareket tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 44'de gösterildiği gibidir:

Tablo 44: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında bilek açısı tespitiyle beraber yapılan hareketin sınıflandırma sonuçları

Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	35	0	22	1
	El kapama	15	56	2	1
	Bilek fleksiyon	5	4	33	16
	Bilek ekstensiyon	5	0	3	42

Tablo 44'e göre, el açma hareketinden 25 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin on beşi aslında el kapama hareketi, beşi aslında bilek fleksiyon hareketi ve beşi de bilek ekstensiyon hareketi olmalıdır. Aynı şekilde el kapama hareketinden 4 hata yapılmış olup, bu hareketlerin tamamı aslında bilek fleksiyon hareketi olmalıdır. Hatalı

tahmin edilen 27 bilek fleksiyon hareketinin yirmi ikisi el açma hareketi, ikisi el kapama hareketi ve üçü de bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 18 bilek ekstensiyon hareketinin biri aslında el açma, biri el kapama ve on altısı da bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

Bilek açısı tanımada yapılan toplam hata sayısı 62'dir. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %74,17'dir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 45'de gösterildiği gibidir:

Tablo 45: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları

	Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG + ivme)	Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	71	10	0
	Px2 (90°)	7	61	34
	Px3 (180°)	2	9	46

Tablo 45 ivme verilerinin bilek açısı tanımaya etkilerini göstermektedir. Tabloya göre birinci bilek açısını tahminlerinde 9 hata yapılmıştır. Bu hatalardan yedisi aslında ikinci açı ve ikisi de aslında üçüncü açı olmalıdır. İkinci bilek açısı tahmininde 19 hata yapılmış olup bu hataların onu aslında birinci bilek açısı ve dokuzu da üçüncü bilek açısı olmalıdır. Son olarak üçüncü bilek açısı tahmininde 34 hata yapılmış olup, bu hataların tamamı aslında ikinci bilek açısı olmalıdır.

EMG ve ivme verilerine ek olarak jiroskop verileri de eklendiğinde, bilek açısı tanımlamada yapılan hataların sayısı 45 oluyor. Bu durumda bilek açısı tanımlamada başarı oranı %81,25'tir. Bilek açısı tanımlamak için eğitilen ağların sonuçları karışıklık matrisi olarak Tablo 46'da gösterildiği gibidir:

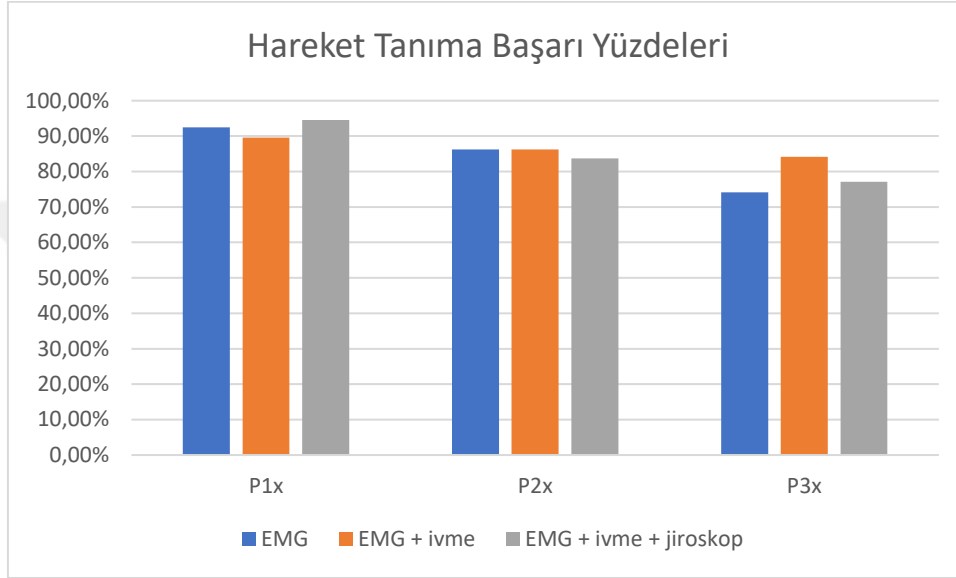
Tablo 46: Kol yukarı uzanır pozisyonda tüm bilek açılarında hareketlerin yapıldığı bilek açısının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları

	Hareket-Bilek Açısı Tanıma (P3x) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)	Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	69	2	0
	Px2 (90°)	9	76	30
	Px3 (180°)	2	2	50

Tablo 46 ivme verilerine ek olarak jiroskop verilerinin bilek açısı tanımaya etkilerini göstermektedir. Tabloya göre birinci bilek açısını tahminlerinde 11 hata yapılmıştır. Bu hataların dokuzu aslında ikinci bilek açısı ve ikisi de üçüncü bilek açısı olmalıdır. İkinci bilek açısı tahmininde 4 hata yapılmış olup bu hatalardan ikisi aslında birinci bilek açısı ve ikisi de üçüncü bilek açısı olmalıdır. Son olarak üçüncü bilek açısı tahmininde 30 hata yapılmış olup, bu hataların tamamı aslında ikinci bilek açısı olmalıdır.

3.4.5. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamalarının sonuçlarına ivme ve jiroskop verilerinin etkilerinin değerlendirilmesi

Bu madde bölüm 3.2 (Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması) ile benzer olduğundan incelemeler bu bölümün sonuçlarına göre yapılacaktır. Bölüm 3.2’de eğitilen 3 ağı başarı yüzdeleri %84,31 oranında çıkmıştı. İkinci maddede hareket tanımlama işlemi yalnızca EMG verileri kullanılarak yapılmıştı. Şekil 24’de ivme ve jiroskop verilerinin başarı oranlarına etkisi görülmektedir.



Şekil 24: İvme ve jiroskop verilerinin başarı yüzdelere etkisi

Tablo 47’de EMG verilerine ek olarak ivme verileri de kullanılarak eğitilen ağların tüm sonuçlarının karışıklık matrisi ve hatalı tahminlerin asıl olması gereken değerleri verilmiştir. Aynı kol pozisyonundaki tüm bilek açılarında göre üretilen 3 adet yapay sinir ağında, toplam 48 adet hatalı el açma hareketi tanımlaması olmuştur. Bu hatalardan 24 tanesi aslında el kapama, 16 tanesi bilek fleksiyon ve 8 tanesi bilek ekstensiyon hareketleridir. Yani el açma hareketini tanımlarken en sık yapılan hata, bu hareketi el kapama hareketiyle karıştırmaktır denebilir.

Tablo 47: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflamak için ivme verileri eklenerek eğitilen tüm ağların toplam sonuçlarını gösterir tablo

Hareket Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG)	Tahmin (El Hareketi)			
	El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	151	4	13
	El kapama	16	163	5
	Bilek fleksiyon	2	13	159
	Bilek ekstensiyon	11	0	3

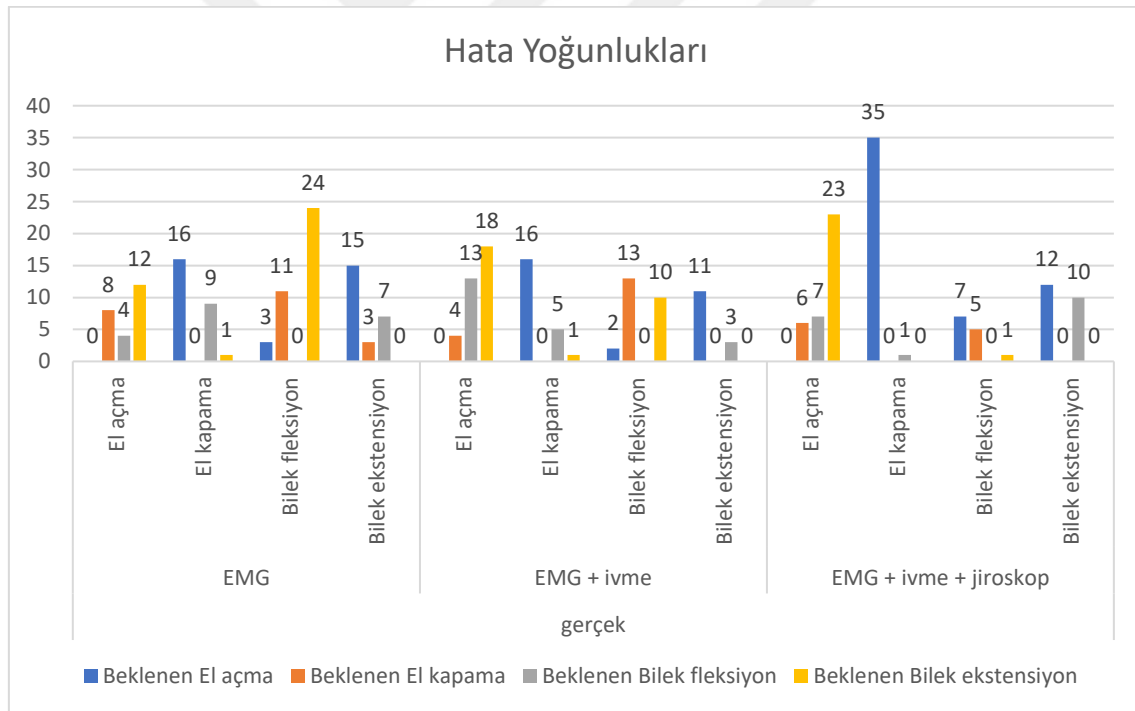
Tablo 48’de ise EMG ve ivme verilerine ek olarak jiroskop verileri eklenerek eğitilen ağların toplam karışıklık matrisi verilmiştir. En fazla hata 157 ile el açma hareketini

tanımlamada yapılmıştır ve bu hareket en fazla bilek fleksiyon hareketiyle karışmaktadır.

Tablo 48: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırma için ivme ve jiroskop verileri eklenerek eğitilen tüm ağların toplam sonuçlarını tablo

Hareket Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	126	6	7	23
	El kapama	35	169	1	0
	Bilek fleksiyon	7	5	162	1
	Bilek ekstensiyon	12	0	10	156

Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket tespiti için eğitilen ağların toplam hatalarının dağılımları Şekil 25’de “EMG” kısmında aynen verilmiştir. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırmaya ivme verilerinin eklenmesi ile elde edilen ağların hataları “EMG + ivme” parçasında gösterilmiştir.



Şekil 25: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırmak için eğitilen ağların hatalı sınıflandırmalarının yoğunlukları

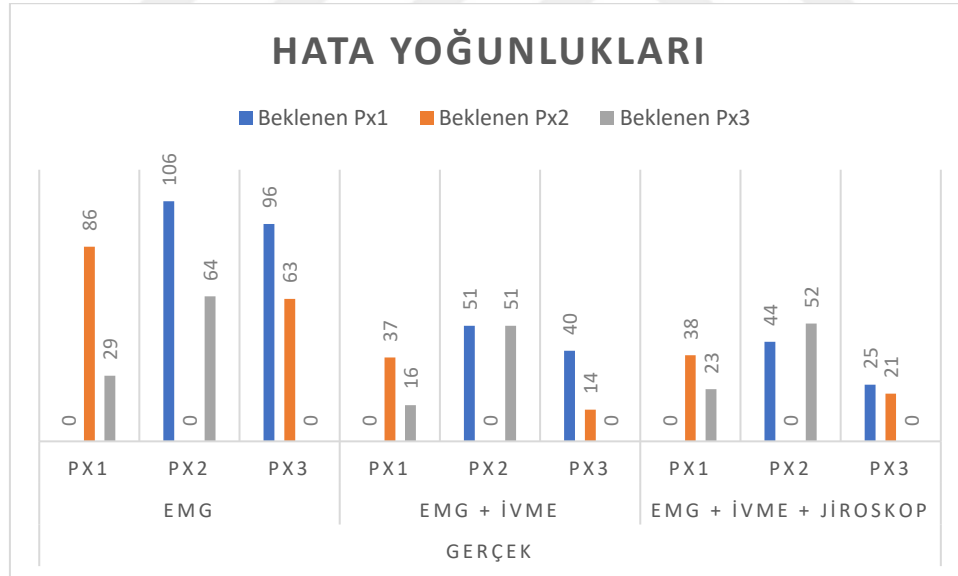
Tablo 49’da yukarıda eğitilen ağlardan, EMG verilerine ek olarak ivme verileri de kullanılarak eğitilen ağların bilek açısı tespitinde yaptıkları hataların dağılımı gösterilmiştir (a). Aynı şekilde hemen altında da EMG verilerine ek olarak ivme ve jiroskop verilerinin de eğitime dahil edilmesiyle yapılan bilek açısı tahminleri gösterilmiştir (b).

Tablo 49: EMG verilerine ek ivme verileri kullanılarak bilek açısı tahmini için eğitilen ağların karışıklık matrisi

olarak toplam sonuçları (a) ile EMG ve ivme verilerine ek jiroskop verileri de kullanılarak eğitilen ağların bilek açısı tespiti için sonuçlarını karışıklık matrisi olarak(b) gösterir tablolar.

Karışıklık Matrisi (a)		Tahmin		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	149	37	16
	Px2 (90°)	51	189	51
	Px3 (180°)	40	14	173
Karışıklık Matrisi (b)		Tahmin		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	171	38	23
	Px2 (90°)	44	181	52
	Px3 (180°)	25	21	165

Şekil 26’de ise aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareket sınıflandırmak için EMG verileri ile eğitilen ağlar ile elde edilen bilek açıları tahminlerinin hatalarının toplamı, sonra bu verilere eklenen ivme ve jiroskop verilerinin tahmin hatalarına etkileri görülmektedir. Bu hatalar p1x, p2x ve p3x gruplarında eğitilen ağların hatalarının toplamına göre ve px1, px2 ve px3 bilek açılarının tahminlerine göre yapılmıştır.



Şekil 26: EMG verilerine ivme ve jiroskop verileri eklendikten sonra tahmin hatalarının dağılımlarını gösterir tablo

3.5. İvme ve Jiroskop Verilerinin Tüm Kol Pozisyonu ve Tüm Bilek Açılarında Yapılan Hareketlerin Beraber Sınıflandırılmalarına Etkileri

3.5.1. Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketler (Pxx + ivme + jiroskop)

EMG verilerine ivme verilerinin de eklenmesiyle elde edilen bu grupta eğitim verisinin

boyutu 57x6768 ve test verisinin boyutu 57x720 şeklindedir. Toplam hata sayısı 125'tir. Bu durumda başarı oranı %82,64'tür. Karışıklık matrisi Tablo 50'da gösterildiği gibidir:

Tablo 50: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları

Hareket Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	135	2	4	16
	El kapama	31	161	6	0
	Bilek fleksiyon	6	17	168	33
	Bilek ekstensiyon	8	0	2	131

Tablo 50'ye göre, el açma hareketinden 45 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin otuz biri gerçekte el kapama hareketiyken altısı bilek fleksiyon hareketi ve sekizi de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 19 hata yapılmış olup, bu hatalardan iki tanesi aslında el açma hareketi ve on yedisi bilek fleksiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 12 bilek fleksiyon hareketinin dördü aslen el açma hareketi olup altısının aslı el kapama ve ikisinin aslı da bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 49 bilek ekstensiyon hareketinin on altısı aslında el açma hareketiyken otuz üçü de bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

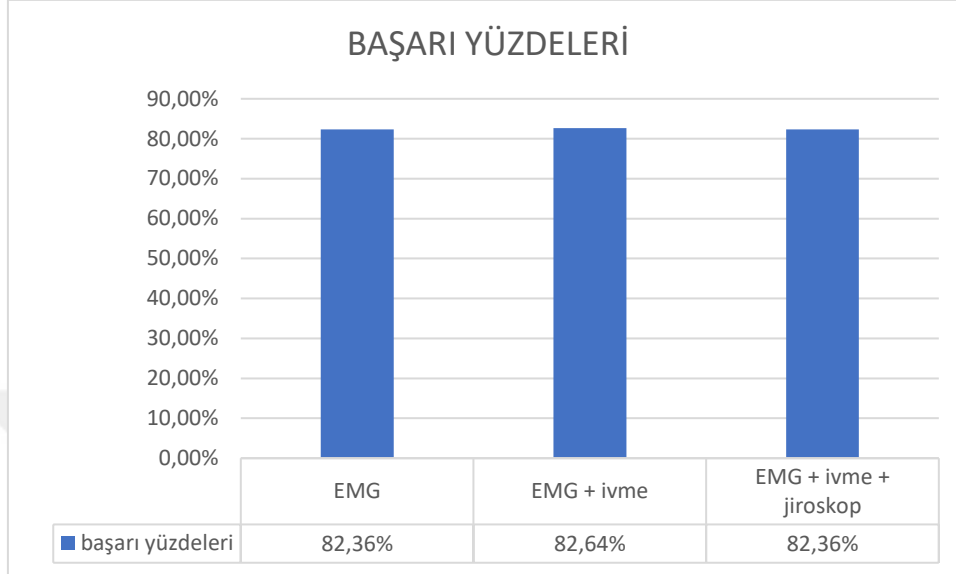
EMG ve ivme verilerine jiroskop verilerinin de eklenmesiyle elde edilen bu grupta eğitim verisinin boyutu 66x6768 ve test verisinin boyutu 66x720 şeklindedir. Toplam hata sayısı 127'dir. Bu durumda başarı oranı %82,36'dır. Karışıklık matrisi Tablo 51'de gösterildiği gibidir:

Tablo 51: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları

Hareket Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (El Hareketi)			
		El açma	El kapama	Bilek fleksiyon	Bilek ekstensiyon
Gerçek	El açma	139	3	5	4
	El kapama	19	143	4	1
	Bilek fleksiyon	7	33	167	31
	Bilek ekstensiyon	15	1	4	144

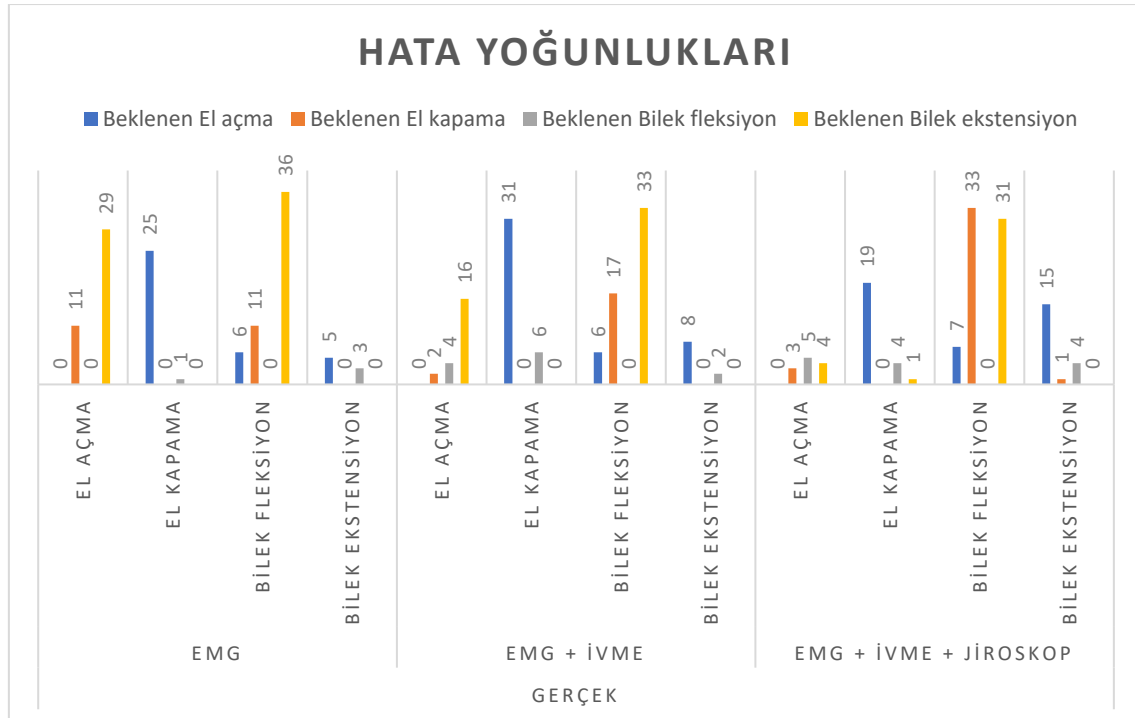
Tablo 51'e göre, el açma hareketinden 41 hatalı tahmin yapılmıştır. Bu hatalı tahminlerin on dokuzu gerçekte el kapama hareketiyken yedisi bilek fleksiyon hareketi ve on beşi de bilek ekstensiyon hareketidir. Aynı şekilde el kapama hareketinden 37 hata yapılmış olup, bu hatalardan üçü aslında el açma hareketi, otuz üçü bilek fleksiyon hareketi ve biri de bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 13 bilek fleksiyon hareketinin beşi aslen el açma hareketi olup dördünün aslı el kapama ve dördünün aslı da bilek ekstensiyon hareketidir. Hatalı tahmin edilen 36 bilek ekstensiyon hareketinin dördü aslında el açma hareketiyken biri el kapama ve otuz biri de bilek fleksiyon hareketi olmalıdır.

Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmaları için eğitilen ağı başarı yüzdesine ek olarak tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmalarına ivme ve jiroskop verilerinin etkisini incelemek için eğitilen iki ağı başarı yüzdesi Şekil 27’de verildiği gibidir.



Şekil 27: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmaları için eğitilen ağı ivme ve jiroskop verilerinin etkisi

Daha önce bahsedilen tablolarda verilen beklenen hareketler ve bu hareketlerin gerçek değerlerine göre yapılan hatalara ait hataların dağılımları ve bunlara ek olarak üçüncü maddede eğitilen ağı çıktılarının hata dağılımları Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarındaki yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmaları için ivme ve jiroskop verileriyle eğitilen ağların hataların dağılımı

3.5.2. Bilek açısı ve kol pozisyonu tanıma

Bu grupta ivme ve jiroskop verileri kullanılarak yapılan hareketin hangi bilek açısı ve hangi kol pozisyonunda yapıldığı tespit edilmeye çalışılacak. Üçüncü maddede sadece EMG verileri ile eğitilen ağ ile performans karşılaştırması yapılacaktır. Bunun için öncelikle yalnız ivme verileri kullanılarak bir ağ eğitilmiştir. Bu ağda bilek açısı tespitinde 236 hata yapılmıştır. Bu durumda başarı oranı %67,28 olmaktadır. Bilek açılarının karışıklık matrisi Tablo 52’de verilmiştir:

Tablo 52: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı bilek açısının ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları

Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	147	47	21
	Px2 (90°)	63	162	44
	Px3 (180°)	30	31	175

Yine sadece EMG ve ivme verileri kullanılarak kol pozisyonu tahmini yapılmak istediğinde hata sayısı 16 ve bu durumda başarı oranı %97,78 olmaktadır. Karışıklık matrisi Tablo 53’te verilmiştir.

Tablo 53: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı kol pozisyonunun ivme verileriyle sınıflandırma sonuçları

Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme)		Tahmin (Kol Pozisyonu)		
		P1x (Kol vücuda paralel)	P2x (Kol yere paralel)	P3x (Kol yukarı uzanır)
Gerçek	P1x (Kol vücuda paralel)	228	0	3
	P2x (Kol yere paralel)	0	240	1
	P3x (Kol yukarı uzanır)	12	0	236

EMG ve ivme verilerine ek olarak jiroskop verileri de eklenip ağ eğitildiğinde, bilek açısı tahminlerinde yapılan hata sayısı 244 ve başarı oranı da %66,1 olmaktadır. Hataların dağılımı ise Tablo 54’te gösterildiği gibidir:

Tablo 54: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı bilek açılarının ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları

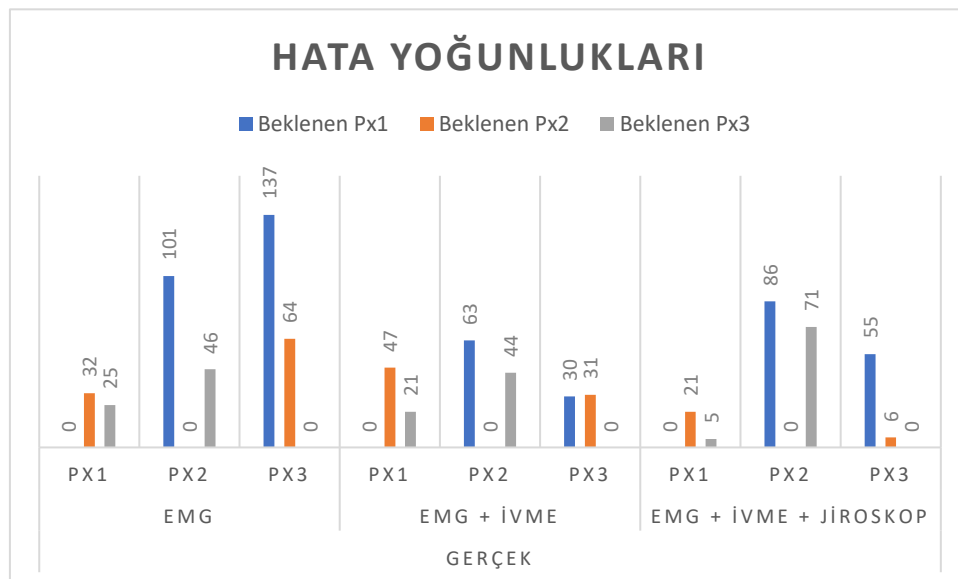
Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (Bilek Açısı)		
		Px1 (0°)	Px2 (90°)	Px3 (180°)
Gerçek	Px1 (0°)	99	21	5
	Px2 (90°)	86	213	71
	Px3 (180°)	55	6	164

EMG ve ivme verilerine ek jiroskop verileri de kullanılarak eğitilen ağda kol pozisyonu tahminlerinin hata sayısı 26 ve başarı oranı %96,33 olmaktadır. Karışıklık matrisi Tablo 55'te verilmiştir.

Tablo 55: Tüm kol pozisyonları ve tüm bilek açılarında hareketin yapıldığı kol pozisyonunun ivme ve jiroskop verileriyle sınıflandırma sonuçları

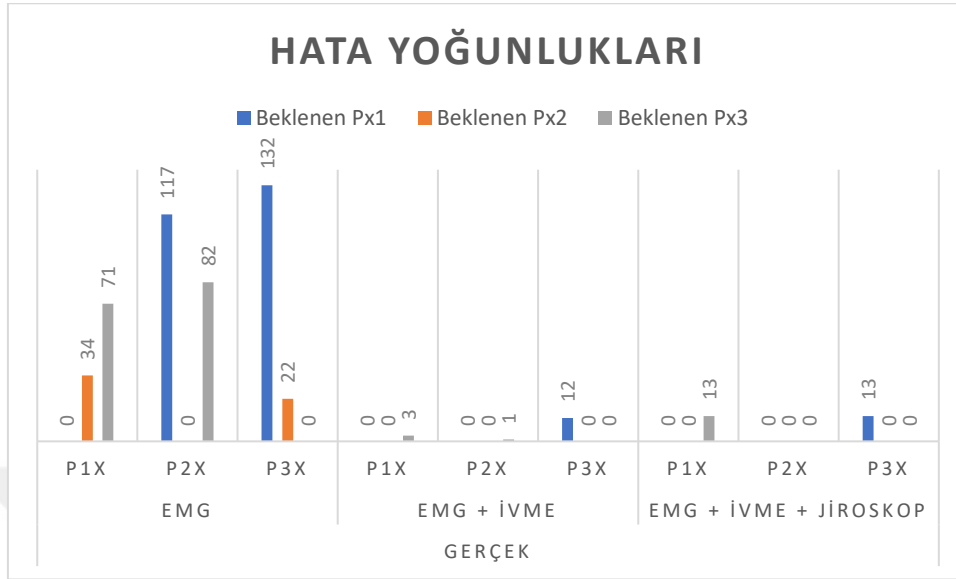
Bilek Açısı-Kol Pozisyonu Tanıma (Pxx) Giriş Verisi (EMG + ivme + jiroskop)		Tahmin (Kol Pozisyonu)		
		P1x (Kol vücuda paralel)	P2x (Kol yere paralel)	P3x (Kol yukarı uzanır)
Gerçek	P1x (Kol vücuda paralel)	227	0	13
	P2x (Kol yere paralel)	0	240	0
	P3x (Kol yukarı uzanır)	13	0	227

Tüm bu sonuçlar göze alındığında, yalnız EMG, EMG + ivme ve EMG + ivme + jiroskop verileriyle eğitilen ağların bilek açılarını tahminlerine göre yaptıkları hataların dağılımları Şekil 29'da verilmiştir.



Şekil 29: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin bilek açısı tespiti için eğitilen ağların yaptıkları hataların karşılaştırılması

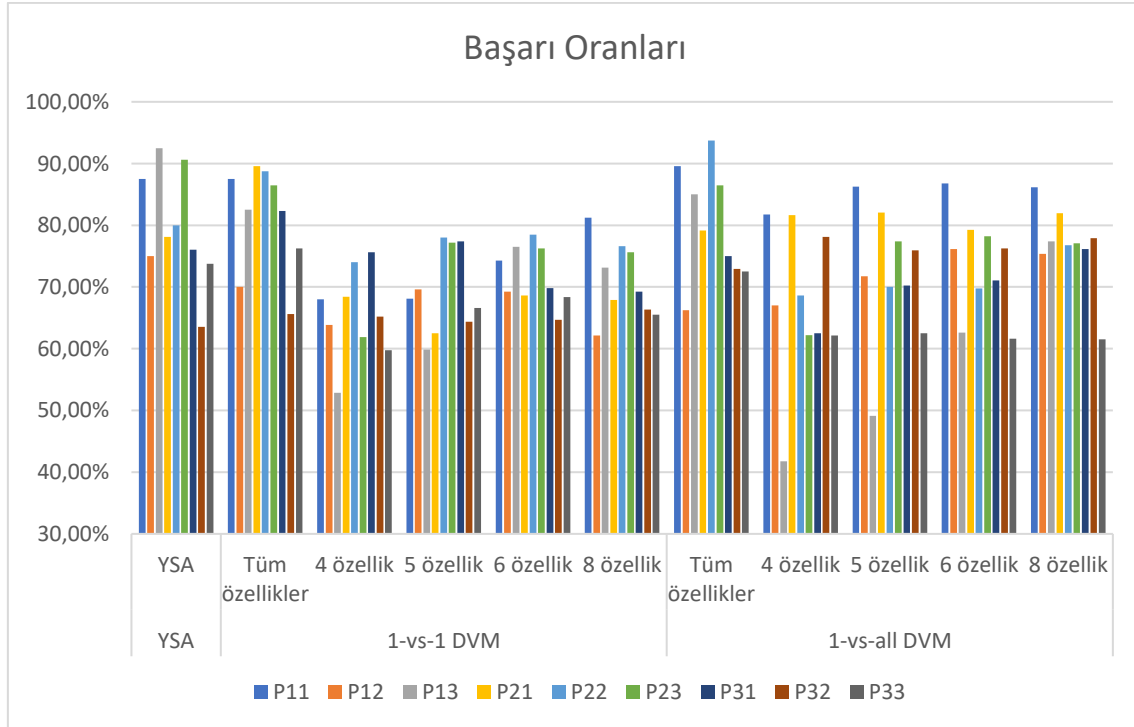
Aynı şekilde eğitilen ağların kol pozisyonu tahminlerinde sonuçları karışıklık matrisi olarak Şekil 30’da verilmiştir.



Şekil 30: Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin kol pozisyonu tespiti için eğitilen ağların yaptıkları hataların dağılımlarının karşılaştırması

3.6. Destek Vektör Makinesi Kullanarak Yapılan Sınıflandırmalar

3.6.1. Tüm farklı kol pozisyonlarında ve tüm farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin sınıflandırılması



Şekil 31: Tüm bilek ve kol pozisyonlarında Destek Vektör Makinesi (DVM/SVM) çıktılarına ek olarak YSA çıktıları

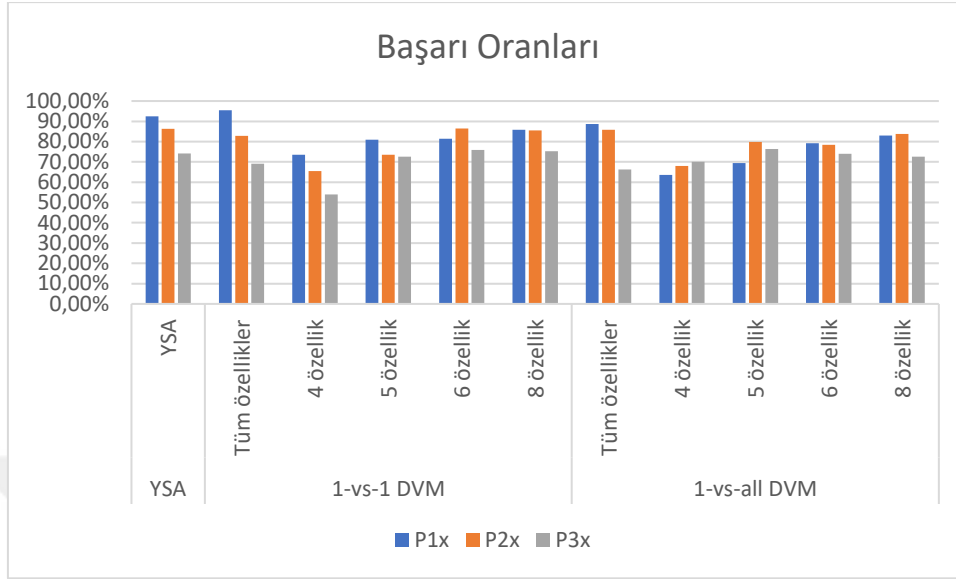
Birinci maddede DVM eğitimi bire karşı bir ve bire karşı tümü metotları ile yapılmış ve başarı oranları kaydedilmiştir. Birinci maddede eğitilen YSA (Yapay Sinir Ağı / ANN) sonuçları da karşılaştırma için grafiğe eklenmiştir. Şekil 31 incelendiğinde, YSA kısmında P11'den P33'e kadar tüm pozisyonların eğitim çıktıları verilmiştir. Aynı şekilde DVM çıktıları da grafikte sırasıyla belirtilmiştir. Tablo 56'de bu grafiğe dair değerler verilmiştir. Her bir sınıflama için en yüksek değerler kalın font ile belirtilmiştir.

Tablo 56: Şekil 31 'de verilen grafiğe dair değerleri gösterir tablo

		P11 (%)	P12 (%)	P13 (%)	P21 (%)	P22 (%)	P23 (%)	P31 (%)	P32 (%)	P33 (%)
YSA	YSA	87,50	75,00	92,50	78,13	80,00	90,63	76,04	63,54	73,75
1-vs-1 DVM	Tüm özellikler	87,50	70,00	82,50	89,58	88,75	86,46	82,29	65,63	76,25
	4 özellik	68,02	63,88	52,88	68,44	74,00	61,88	75,63	65,21	59,75
	5 özellik	68,13	69,63	59,88	62,50	78,00	77,19	77,40	64,38	66,63
	6 özellik	74,27	69,25	76,50	68,65	78,50	76,25	69,79	64,69	68,38
	8 özellik	81,25	62,13	73,13	67,92	76,63	75,63	69,27	66,35	65,50
1-vs-all DVM	Tüm özellikler	89,58	66,25	85,00	79,17	93,75	86,46	75,00	72,92	72,50
	4 özellik	81,77	67,00	41,75	81,67	68,63	62,19	62,50	78,13	62,13
	5 özellik	86,25	71,75	49,13	82,08	70,00	77,40	70,21	75,94	62,50
	6 özellik	86,77	76,13	62,63	79,27	69,79	78,23	71,04	76,25	61,63
	8 özellik	86,15	75,38	77,38	81,98	76,75	77,08	76,15	77,92	61,50

Bu durumda Tablo 56 incelendiğinde, P11 pozisyonu için en iyi başarı oranını veren sınıflama tüm özelliklerin sınıflamada kullanıldığı bire karşı tümü sınıflamasıdır. Aynı şekilde P12 pozisyonu için en yüksek başarı oranı 6 özellik kullanılan bire karşı tümü sınıflamasıdır. P13 pozisyonu için en yüksek başarı YSA iken, P21 için tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı bir sınıflamasıdır. P22 için en yüksek başarı tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı tümü sınıflaması olmuştur. P23 için YSA, P31 için tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı bir, P32 için 4 özellikli bire karşı tümü ve P33 için de tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı bir sınıflandırmaları en yüksek başarı oranlarını vermiştir.

3.6.2. Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılması



Şekil 32: Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen DVM sınıflamalarının ve daha önce eğitilen YSA başarı oranları

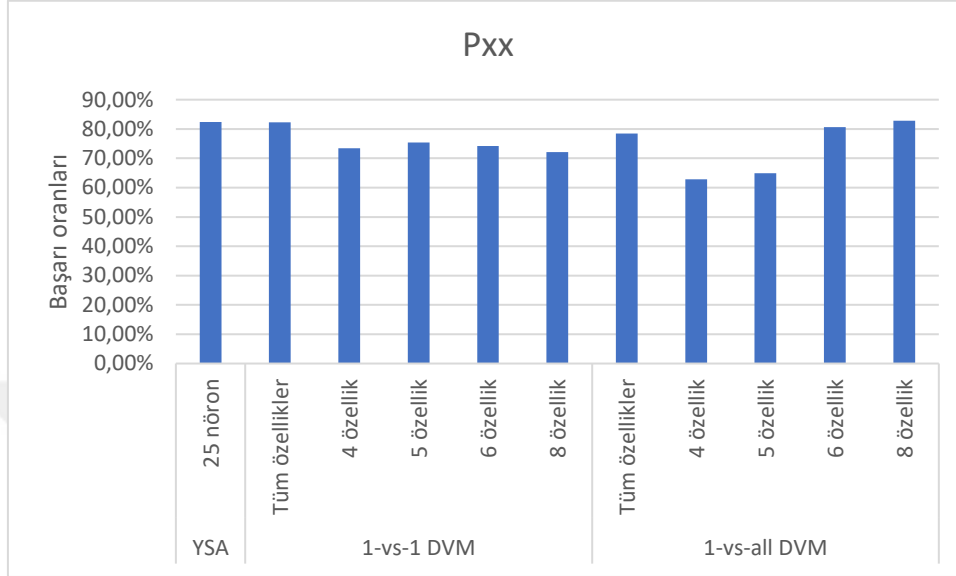
Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılması için eğitilen destek vektör makinesi ve daha önceki adımlarda eğitilmiş olan yapay sinir ağının çıktılarına göre başarı oranları Şekil 32’de gösterilmiştir. Yine bu grafiği elde etmek için kullanılan değerler Tablo 57’de gösterilmiştir. En yüksek başarı oranını veren sınıflama kalın font ile gösterilmiştir.

Tablo 57: Şekil 32’deki grafiği çizdirmek için kullanılan başarı oranları

		P1x (%)	P2x (%)	P3x (%)
YSA	YSA	92,50	86,25	74,17
1-vs-1 DVM	Tüm özellikler	95,42	82,92	69,17
	4 özellik	73,50	65,46	53,96
	5 özellik	80,92	73,54	72,54
	6 özellik	81,38	86,50	75,88
	8 özellik	85,79	85,46	75,33
1-vs-all DVM	Tüm özellikler	88,75	85,83	66,25
	4 özellik	63,58	68,00	70,13
	5 özellik	69,38	79,79	76,42
	6 özellik	79,17	78,50	73,96
	8 özellik	83,00	83,75	72,63

Tablo 57’ye göre P1x pozisyonunda en yüksek başarıyı YSA verirken, P2x konumunda en yüksek başarıyı 6 özellik kullanılan bire karşı bir DVM vermektedir. P3x için en yüksek başarı oranı ise 5 özellik kullanılan bire karşı tümü DVM sınıflaması vermiştir.

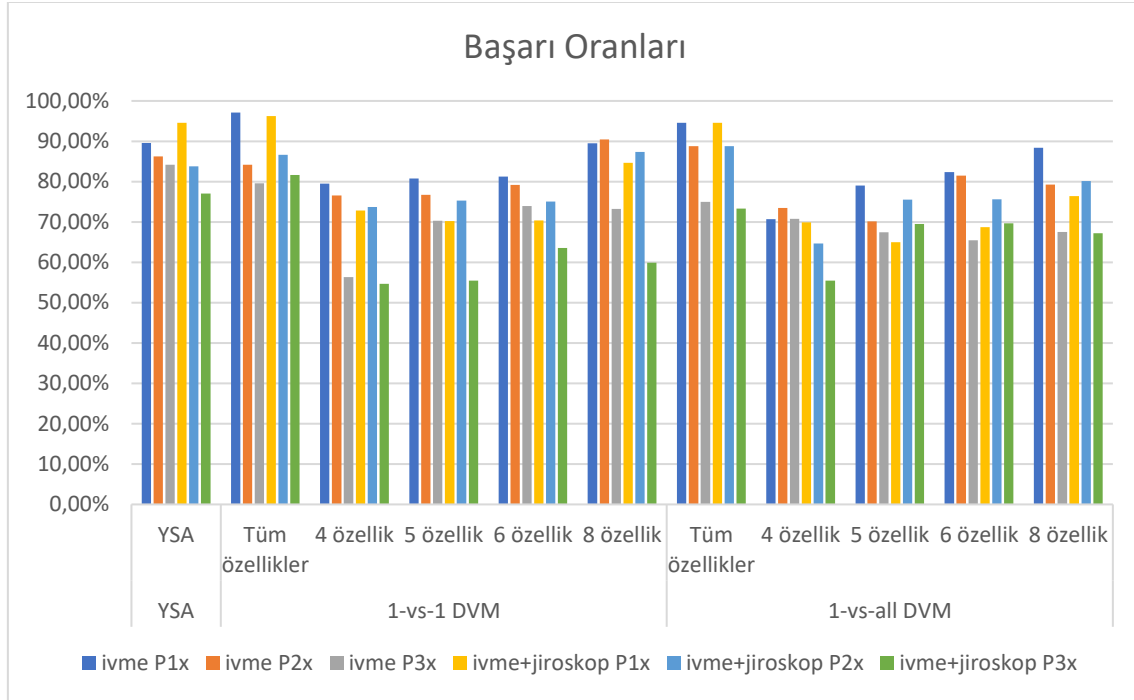
3.6.3. Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması



Şekil 33: Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması için eğitilen DVM ve YSA başarı oranları

Tüm kol pozisyonlarında ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılması için eğitilen DVM ve daha önceden eğitilmiş olan YSA başarı oranları Şekil 33'te verilmiştir. Bu grafiğe göre tüm durumlar için başarı oranları hemen hemen aynı olup, en yüksek başarıyı 8 özellikli bire karşı tümü DVM sınıflaması vermektedir.

3.6.4. İvme ve jiroskop verilerinin aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılmalarına etkileri



Şekil 34: İvme ve jiroskop verilerinin aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılmalarına etkileri için kullanılan DVM ve YSA başarı oranları

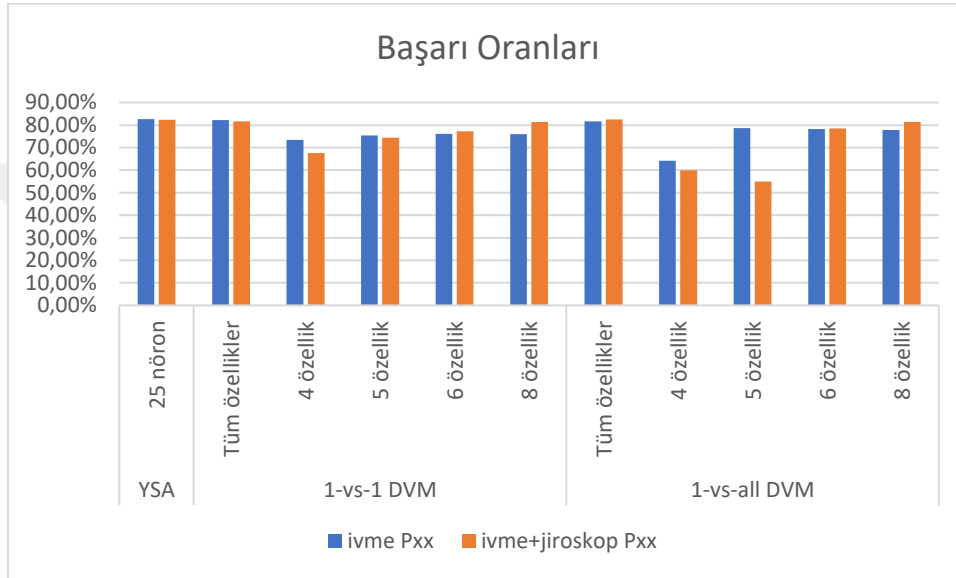
İvme ve jiroskop verilerinin aynı kol pozisyonu ve farklı bilek açılarındaki yapılan hareketlerin sınıflandırılmalarına etkileriyle daha önceden eğitilmiş olan YSA ve yeni eğitilen DVM sınıflamalarının başarı oranları Şekil 34’de verilmiştir. Bu grafiği elde etmek için kullanılan başarı yüzdeleri ise Tablo 58’de gösterilmiştir. En yüksek başarı oranları yine koyu font ile belirlenmiştir.

Tablo 58: Şekil 34’deki grafiği çizdirmek için kullanılan başarı yüzdeleri

		İvme			İvme + jiroskop		
		P1x (%)	P2x (%)	P3x (%)	P1x (%)	P2x (%)	P3x (%)
YSA	YSA	89,58	86,25	84,17	94,58	83,75	77,08
1-vs-1 DVM	Tüm özellikler	97,08	84,17	79,58	96,25	86,67	81,67
	4 özellik	79,50	76,58	56,38	72,88	73,71	54,67
	5 özellik	80,79	76,71	70,33	70,21	75,29	55,50
	6 özellik	81,21	79,17	73,96	70,42	75,08	63,58
	8 özellik	89,50	90,46	73,21	84,63	87,38	59,92
1-vs-all DVM	Tüm özellikler	94,58	88,75	75,00	94,58	88,75	73,33
	4 özellik	70,67	73,46	70,75	69,92	64,67	55,50
	5 özellik	79,04	70,17	67,46	64,96	75,50	69,54
	6 özellik	82,33	81,50	65,46	68,71	75,63	69,67
	8 özellik	88,38	79,29	67,50	76,42	80,17	67,21

Tablo 58'e göre; EMG verilerine ek ivme verileri de kullanılarak sınıflama metotları eğitildiğinde, P1x için en yüksek başarıyı tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı bir DVM, P2x için 8 özelliğin kullanıldığı bire karşı bir DVM ve P3x için ise YSA sınıflamaları vermektedir. EMG ve ivme verilerine jiroskop verileri de eklenip sınıflamalar tekrar yapıldığında en yüksek başarı oranlarını P1x için tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı bir DVM, P2x için tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı tümü DVM ve P3x için de tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı bir DVM sınıflama metotları vermektedir.

3.6.5. İvme ve jiroskop verilerinin tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmalarına etkileri



Şekil 35: İvme ve jiroskop verilerinin tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmalarına etkilerini incelemek için kullanılan DVM ve YSA sınıflamaları başarı oranları

Tüm kol pozisyonu ve tüm bilek açılarında yapılan hareketlerin beraber sınıflandırılmaları için kullanılan özelliklere ivme ve jiroskop verilerinin eklenmesiyle başarı oranlarındaki değişim gözlenmek istendiğinde kullanılabilecek olan beşinci madde için eğitilen DVM ve daha önceki bölümde eğitilmiş olan YSA sınıflamalarının başarı oranları Şekil 35'da verilmiştir. Bu grafiğe göre EMG verilerine ek ivme verileri kullanılarak eğitilen sistemlerde en yüksek başarıyı YSA vermektedir. EMG ve ivme verilerine ek jiroskop verileri de kullanılarak eğitilen sistemlerde en yüksek başarıyı tüm özelliklerin kullanıldığı bire karşı tümü DVM sınıflaması vermektedir. Fakat grafiğe bakıldığında neredeyse tüm başarı oranlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

4. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında yapılan el hareketleri ve bu hareketlerin hangi bilek açısı ve kol pozisyonunda yapıldığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapay sinir ağları ve destek vektör makineleri kullanılarak sonuçlar elde edilip karşılaştırmalar yapılmıştır. Sınıflamalar farklı maddeler altında incelenip sonuçlar kaydedilmiştir. Hangi sınıflama için hangi metodun daha iyi sonuçlar vermesi açısından grafikler elde edilmiştir.

Farklı kol pozisyonlarında ve farklı bilek açılarında yapılan el hareketlerinin tespiti için ayrı ayrı eğitilen YSA ve DVM sonuçlarındaki farklılıklardan, el hareketi tespitinde hareketin yapıldığı kol pozisyonu ve bilek açısının sınıflama sonuçlarını etkilediği görülmüştür.

Aynı kol pozisyonunda ve farklı bilek açılarında yapılan hareketlerin tespitinde YSA ve DVM sonuçlarındaki değişikliklerden, hareketin yapıldığı kol pozisyonunun hareket sınıflamaya etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.

Yalnızca EMG verileri kullanılarak hareketin yapıldığı bilek açısı ve kol pozisyonu tespitinde başarılı sonuçlar elde edilemediği görülmüştür.

İvme ve jiroskop verilerinin el hareketi sınıflandırmada etkilerinin az olduğu tespit edilmiştir. Bilek açısı ve kol pozisyonu tespitlerinde ivme ve jiroskop verilerinin büyük ölçüde etkileri gözlemlenmiştir. Yalnızca EMG ve ivme verileri kullanılarak elde edilen bilek açısı ve kol pozisyonu tespiti sonuçlarının yeterli olduğu, jiroskop verilerinin kullanımının ayrıca bir performans iyileştirmesinde bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

El hareketi sınıflamasında DVM sınıflandırıcıların YSA sınıflandırıcılarından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. DVM eğitimlerinde belirli sayıda özellikler seçilip yalnız bu özellikler eğitilerek sınıflandırmalar yapılmış, en iyi sonuçların tüm özellikler kullanılarak elde edildiği gözlemlenmiştir.

Çalışmada aynı zamanda hareket tahminleri yapılırken yapılan hataların sayısı ve bu hataların dağılımları verilmiştir. Karışıklık matrisleri ile yanlış yapılan tahminlerin aslında hangi hareket olması gerektiği görülmektedir. Bu sayede hareket tahminlerindeki hata sayısının yanı sıra, birbirleriyle sıklıkla karıştırılan hareketler de tespit edilebilir.

El hareketi tahmini, bilek pozisyonu ve kol pozisyonu tahmini ile sanal gerçeklik uygulamaları, video oyunları, simülasyonlar gibi uygulamalar yapılabilir. Ayrıca rehabilitasyon uygulamalarında da kullanılabilir. Uzaktan kumanda sistemleri bu uygulamalardan faydalanabilir. Robot kollarla yapılan uygulamalarda bilek açıları ve kol pozisyonu tahmini bir geliştirme sunabilir.

İlerleyen aşamalarda hareket sayısının artırılması, bilek açılarının darlığı yani daha fazla hassasiyet, kol pozisyonlarının çoğaltılması sağlanabilir. Toplanan veri sayısı arttırıldıkça başarı oranları da artacaktır. Bu tez çalışması gerçek bir robot kol ile gerçekleştirilebilir ve robot kol ile hassas görevler yapılabilir.

REFERANSLAR

1. Alaçam, Ö. and K. Çağıltay, *ODTÜ Bidb insan bilgisayar etkileşimi laboratuvarı ve yürütülen çalışmalar*. Akademik Bilişim'07-IX. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 2007: p. 401-404.
2. Inhyuk, M., et al. *Wearable EMG-based HCI for Electric-Powered Wheelchair Users with Motor Disabilities*. in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005.
3. Subasi, A., *Classification of EMG signals using PSO optimized SVM for diagnosis of neuromuscular disorders*. Computers in biology and medicine, 2013. **43**(5): p. 576-586.
4. Englehart, K. and B. Hudgins, *A Robust, Real-Time Control Scheme for Multifunction Myoelectric Control*. IEEE transactions on bio-medical engineering, 2003. **50**: p. 848-54.
5. Baspinar, U., H.S. Varol, and K. Yildiz. *Classification of hand movements by using artificial neural network*. in *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*. 2012. IEEE.
6. Akgün, G., et al., *EMG Sinyallerinin Öznitelik Çıkarımı ve Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı, Algoritması İle Sınıflandırılması*. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2013, 2013: p. 26-28.
7. Sayin, F.S., S. Ozen, and U. Baspinar. *Hand gesture recognition by using sEMG signals for human machine interaction applications*. in *2018 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*. 2018. IEEE.
8. TAŞAR, B., *EMG SINYALLERİNİN ANLAMLANDIRILMASI İCİN RADYAL FONKSİYONLU YAPAY SINIR AĞI TASARIMI*. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi. **10**(2): p. 153-159.
9. Ali, A., A. Furkan, and D. HANBAY, *EMG Sinyallerinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşüm Özellikleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması*. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019. **31**(2): p. 443-451.
10. Ç, Ç. and H. Temeltaş. *Feature extraction of EMG signals, classification with ANN and kNN algorithms*. in *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 2018.
11. Rekhi, N.S., et al. *Multi-class SVM classification of surface EMG signal for upper limb function*. in *2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. 2009. IEEE.
12. Alkan, A. and M. Günay, *Identification of EMG signals using discriminant analysis and SVM classifier*. Expert Systems with Applications, 2012. **39**(1): p. 44-47.
13. Yoshikawa, M., M. Mikawa, and K. Tanaka. *Real-Time Hand Motion Estimation Using EMG Signals with Support Vector Machines*. in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*. 2006.
14. ALÇİN, Ö.F., *Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgalılık Analizi ve Pencereleli Kare Ortalamasının Karekökü Tabanlı EMG Sınıflandırma*. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2020. **32**(2): p. 359-368.
15. Altan, E., K. Pehlivan, and E. Kaplanoğlu. *Comparison of EMG Based Finger Motion Classification Algorithms*. in *2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 2019.
16. Fatih, O. and M. Ahmet, *Değişken Kuvvetli EMG Sinyallerinin Çok Değişkenli Görgül Kip Ayırışımı ile Analizi ve Sınıflandırılması*. International Journal of

- Advances in Engineering and Pure Sciences, 2020. **32**(3): p. 229-238.
17. Reaz, M.B.I., M.S. Hussain, and F. Mohd-Yasin, *Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications*. Biological procedures online, 2006. **8**(1): p. 11-35.
 18. De Luca, C., *Electromyography*, in *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*.
 19. Moon, I., et al. *Wearable EMG-based HCI for electric-powered wheelchair users with motor disabilities*. in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005. IEEE.
 20. Weiss, L.D., J.M. Weiss, and J.K. Silver, *Easy EMG e-book: A guide to performing nerve conduction studies and electromyography*. 2015: Elsevier Health Sciences.
 21. Benalcázar, M.E., et al. *Hand gesture recognition using machine learning and the Myo armband*. in *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2017.
 22. Sathiyarayanan, M. and S. Rajan. *MYO Armband for physiotherapy healthcare: A case study using gesture recognition application*. in *2016 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*. 2016.
 23. *Big Data: Raw EMG Free for Developers in December*, in *Big Data: Raw EMG Free for Developers in December*, M.a.A. Steve, Editor. 2014, CO-FOUNDERS: <https://developerblog.myo.com/big-data/>.
 24. Micera, S., et al., *Improving detection of muscle activation intervals*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2001. **20**(6): p. 38-46.
 25. Van Boxtel, G., et al., *Detection of EMG onset in ERP research*. Psychophysiology, 1993. **30**(4): p. 405-412.
 26. Jain, A.K., M. Jianchang, and K.M. Mohiuddin, *Artificial neural networks: a tutorial*. Computer, 1996. **29**(3): p. 31-44.
 27. mathworks. *Open Network/Data Manager*. 2006 [cited 2020 10.12.2020]; nntool opens the Network/Data Manager window, which allows you to import, create, use, and export neural networks and data.]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/nntool.html>.
 28. Svozil, D., V. Kvasnicka, and J.í. Pospichal, *Introduction to multi-layer feed-forward neural networks*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997. **39**(1): p. 43-62.
 29. Yu, H. and B.M. Wilamowski, *Levenberg-marquardt training*. Industrial electronics handbook, 2011. **5**(12): p. 1.
 30. mathworks. *Levenberg-Marquardt backpropagation*. 2006 [cited 2020 10.12.2020]; trainlm is a network training function that updates weight and bias values according to Levenberg-Marquardt optimization.]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainlm.html>.
 31. mathworks. *Gradient descent with momentum weight and bias learning function*. 2006 [cited 2020 10.12.2020]; Available from: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/learnsgdm.html>.
 32. Noble, W.S., *What is a support vector machine?* Nature Biotechnology, 2006. **24**(12): p. 1565-1567.
 33. Lucas, M.-F., et al., *Multi-channel surface EMG classification using support vector machines and signal-based wavelet optimization*. Biomedical Signal Processing and Control, 2008. **3**(2): p. 169-174.
 34. Wang, A., et al., *A novel pattern recognition algorithm: Combining ART*

- network with SVM to reconstruct a multi-class classifier*. Computers & Mathematics with Applications, 2009. **57**(11): p. 1908-1914.
35. Debnath, R., N. Takahide, and H. Takahashi, *A decision based one-against-one method for multi-class support vector machine*. Pattern Analysis and Applications, 2004. **7**(2): p. 164-175.
 36. Chih-Wei, H. and L. Chih-Jen, *A comparison of methods for multiclass support vector machines*. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002. **13**(2): p. 415-425.
 37. mathworks. *Fit multiclass models for support vector machines or other classifiers*. 2014 [cited 2020 jan 30th]; Fit multiclass models for support vector machines or other classifiers]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/stats/fitcecoc.html>.
 38. mathworks. *Sequential feature selection using custom criterion*. 2008 [cited 2020 jan 30th]; Sequential feature selection using custom criterion]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/stats/sequentialfs.html>.
 39. mathworks. *Predict labels using classification tree*. 2011 [cited 2020 jan 30th]; Predict labels using classification tree]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/stats/compactclassificationtree.predict.html>.