



T.C.
ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÖROBİLİM ANABİLİM DALI
NÖROBİLİM YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**“AMPUTE HASTALARIN REHABİLİTASYONUNDA
KULLANILAN YAPAY ZEKA TABANLI GİYİLEBİLİR ROBOTİK
DIŞ İSKELETLER: META ANALİZ”**

Merve ÇÖREKÇİ

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Türker Tekin ERGÜZEL

İSTANBUL-2024

T.C.
ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÖROBİLİM ANABİLİM DALI
NÖROBİLİM YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

“AMPUTE HASTALARIN REHABİLİTASYONUNDA
KULLANILAN YAPAY ZEKA TABANLI GİYİLEBİLİR ROBOTİK
DIŞ İSKELETLER: META ANALİZ”

Merve ÇÖREKÇİ

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Türker Tekin ERGÜZEL

İSTANBUL-2024

ÖZET

AMPUTE HASTALARIN REHABİLİTASYONUNDA KULLANILAN YAPAY ZEKA TABANLI GİYİLEBİLİR ROBOTİK DIŞ İSKELETLER: META ANALİZ

Amputasyon; kazalar, diyabet, kanser, tümör, osteomyelit, disvasküler hastalıklar gibi nedenlerden dolayı herhangi bir ekstremitenin tamamının ya da bir kısmının yokluğudur. Amputasyon dünya çapında milyonlarca insanın motor fonksiyonlarını ve yaşam kalitelerini etkilemektedir. Ayrıca bu engelliliğe sahip insanlar hareket yeteneklerinin azalmasının yanı sıra psikolojik olarak da etkilenmektedirler. Amputasyonlu hastaların günlük yaşama katılımlarını artırmak ve kendilerini daha iyi hissetmeleri için teknolojinin de gelişmesiyle birlikte birçok tedavi ve rehabilitasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan ve son yıllarda da popüler olan yapay zeka teknolojisi bulunmaktadır. Bu teknoloji ile yapılan dış iskeletler amputasyonlu hastaların hareket yeteneklerini artırmayı amaçladıkları için bu hastaların umut kaynağı olmuştur. Bu tez, ampute hastaların umut kaynağı olan yapay zeka tabanlı dış iskeletlerin ampute rehabilitasyonuna etkisini inceleyip kullanılan yapay zeka teknolojilerini karşılaştırmayı amaçladı. Bu amaç doğrultusunda literatür taranarak yapay zeka teknolojilerinden beyin-bilgisayar arayüzü, makine öğrenimi, derin öğrenme, yapay sinir ağlarının ampute hasta rehabilitasyonuna etkisi ile ilgili son 10 yılın araştırmaların nitel meta analizi yapıldı. Nitel meta analiz sonucunda ampute hasta rehabilitasyonunda en çok kullanılan yapay zeka teknolojisinin beyin-bilgisayar arayüzü olduğu ve kullanılan yapay zeka tabanlı dış iskeletlerin hepsinin rehabilitasyona olumlu etkisinin olduğu ayrıca bu yapay zeka teknolojileri sayesinde amputasyonlu hastaların hareket sınırlılıklarının azaldığı araştırmalarda görüldü. Fakat son yıllardaki ilerlemeci gelişmelere rağmen hala kaybedilen uzvun tam işlevini görebilecek dış iskelet üretilenmemiştir. Bu yüzden yapay zeka teknolojilerinin ampute hasta rehabilitasyonu üzerinde etkilerini daha iyi anlamak için gelecekte bu alanda daha çok araştırma yapılması önerilmektedir. Ek olarak kontrol paradigmasını ve rehabilitasyon etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için hem ampute denek üzerinde hem de sağlıklı denek üzerinde geniş bir popülasyona sahip daha fazla araştırmaya gerek vardır.

Anahtar Kelimeler: ampute hasta rehabilitasyonu, yapay zeka, beyin-bilgisayar arayüzü, dış iskeletler, derin öğrenme.



ABSTRACT

ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED WEARABLE ROBOTIC EXOSKELETONS FOR REHABILITATION OF AMPUTEE PATIENTS: META ANALYSIS

Amputation is the loss of all or part of an extremity due to accidents, diabetes, cancer, tumours, osteomyelitis, dysvascular diseases. Amputation affects the motor functions and quality of life of millions of people worldwide. In addition, people with this disability are psychologically affected as well as reduced mobility. Many treatment and rehabilitation methods have been developed with the development of technology to increase the participation of patients with amputation in daily life and to make them feel better. Among these methods, artificial intelligence technology is the most widely used and popular in recent years. Exoskeletons made with this technology have become a source of hope for amputees as they aim to increase their mobility. This thesis aims to examine the effect of artificial intelligence-based exoskeletons, which are the source of hope for amputees, on amputee rehabilitation and to compare the artificial intelligence technologies used. For this purpose, the literature was reviewed and a qualitative meta-analysis of the researches of the last 10 years on the effects of artificial intelligence technologies such as brain-computer interface, machine learning, deep learning, artificial neural networks on amputee patient rehabilitation was performed. As a result of the qualitative meta-analysis, it was seen that the most commonly used artificial intelligence technology in amputee patient rehabilitation is the brain-computer interface and all of the artificial intelligence-based exoskeletons used have a positive effect on rehabilitation, and thanks to these artificial intelligence technologies, the mobility limitations of patients with amputation are reduced. However, despite the progressive developments in recent years, an exoskeleton that can fully function the lost limb has still not been produced. Therefore, it is recommended to conduct more research in this field in the future to better understand the effects of artificial intelligence technologies on amputee rehabilitation. In addition, further research with a large population of both amputees and healthy subjects is needed to comprehensively evaluate the control paradigms and rehabilitation effect.

Keywords: amputee rehabilitation, artificial intelligence, brain-computer interface, exoskeletons, deep learning.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince danışmanlığımı yapan, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Türker Tekin Ergüzel'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini her daim hissettiğim, çocukları olmaktan gurur duyduğum kıymetli annem Samira Çörekçi ve değerli babam Fatih Çörekçi'ye, son olarak varlığına her zaman şükrettiğim, her zaman yanımda olan, bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren canım abim Burak Çörekçi'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



Merve ÇÖREKÇİ

Aralık-2023

BEYAN FORMU

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında zgn olduğunu, tarafımdan üretildiğini ve Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna göre yazıldığını beyan ederim.

27.12.2023

MERVE ÇÖREKÇİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	v
BEYAN FORMU	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1.Amputasyon Hakkında Bilgiler	2
2.1.1.Amputasyonun Nedenleri	3
2.1.2.Amputasyonun Çeşitleri	3
2.1.3.Amputasyon Sonrası Beynin Yapısal Değişimi.....	6
2.2.Üst ve Alt Ekstremitte Anatomisi ve Kinemekanığı.....	6
2.2.1.Üst Ekstremitte Anatomisi ve Kinemekanığı	6
2.2.2.Alt Ekstremitte Anatomisi ve Kinemekanığı	10
2.3.İnsan Beyin Anatomisi.....	14
2.3.1.İnsan Beyninin Çalışma Prensipleri	14
2.3.2.Elektroensefalografi (EGG).....	15
2.4.Amputasyon Rehabilitasyonunda Kullanılan Yapay Zeka Teknolojileri	17
2.4.1.Beyin-Bilgisayar Arayüzü (BCI)	17
2.4.2.Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme	20
2.4.3.Yapay Sinir Ağları	22
2.5.Yapay Zeka Tabanlı Dış İskeletler	24
2.6.Amputasyon Rehabilitasyonu	25

3. GEREÇ VE YÖNTEM	27
3.1.Araştırma Yöntemi	27
3.2.Nitel Meta Analizde Uygulama Adımları.....	27
3.2.1.Araştırma Probleminin Tanımlanması ve Konunun Belirlenmesi.....	28
3.2.2.Verilerin Toplanması	28
3.2.3.Verilerin Hazırlanması ve Analizi	29
3.2.4.Araştırmaların Kodlaması.....	30
3.2.5.Verilerin Geçerliliği ve Güvenirliliği	30
4. BULGULAR	35
5. TARTIŞMA	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	48

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1: Araştırmaya dahil edilme ve hariç tutulma kriterleri.	29
Tablo 2: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar	31
Tablo 3: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar (devam)	32
Tablo 4: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar (devam)	33
Tablo 5: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar (devam)	34
Tablo 6: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi.	39
Tablo 7: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).	40
Tablo 8: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).	41
Tablo 9: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).	42
Tablo 10: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1: Uzuv ampütasyonlarının seviyeleri (Meier ve Melton, 2014).....	5
Şekil 2: İnsan üst ekstremitenin anatomisi: (A) üst ekstremit segmentleri ve (B) omuz, dirsek ve bilek iskelet yapısı (Mart ve ark., 2020).....	7
Şekil 3: İnsan üst ekstremit kaslarının; (A) anterior görünümü, (B) posterior görünümü (Holtkamp, 2009).....	7
Şekil 4: İnsan üst ekstremit kinematiği modeli (Ochieze ve ark., 2023)	8
Şekil 5: Üst ekstremit inervasyonunu sağlayan sinirler (Patel ve Varacallo, 2023).	9
Şekil 6: Alt ekstremit anatomisi: kemikler ve eklemler (Niam Kh ve ark., 2021)	10
Şekil 7: Alt ekstremit kasları (ön, arka ve yan görünüm) (Cioroiu, 2020)	11
Şekil 8: Alt ekstremit serbestlik derecesi (DOF) (Su ve ark., 2022)	12
Şekil 9: Alt ekstremit serbestlik derecesi (DOF) ve kinematiği (Niam Kh ve ark., 2021)	12
Şekil 10: Alt ekstremit inervasyonu. (Brown ve ark., 2016, s. 819–831).....	13
Şekil 11: İnsan beyin anatomisi (Kumral, 2014, s. 28).....	14
Şekil 12: Nöronun temel yapısı (Suzuki, 2017).....	15
Şekil 13: Elektrotların 10–20 standardına göre düzenlenmesi (Kouddad ve ark., 2020).	16
Şekil 14: Sinyal kanalı ham EEG sinyali ve karşılık gelen frekans bantları: Delta (0:1 – 4 Hz), teta (4 – 8 Hz), alfa (8 – 14 Hz), Beta (14 – 30 Hz), gama (30 – 63 Hz) (Bajaj, 2020).	16
Şekil 15: BCI sistemlerinin bileşenleri: beyinden kayıt yapan ve beyni uyaran sinirsel arayüzler (solda), sinyal işleme ve kod çözme algoritmaları (ortada) ve hareketi uyandıran ve duyuşal girdiyi iletebilen efektörler (sağda) (Bockbrader, 2019).	18
Şekil 16: Beyin- bilgisayar arayüzü teknolojisinin özet gösterimi (Tang ve ark., 2023).	19
Şekil 17: Yapay zeka, makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki ilişki	20
Şekil 18: (A) AI sinir kod çözücüsüne ve sinyal işleme paradigmasına genel bakış. (B) Tekrarlayan sinir ağı (RNN) mimarisine dayalı derin öğrenme yapay zekasının tasarımı (Luu ve ark., 2022).	22
Şekil 19: Derin öğrenme yöntemlerinden yapay sinir ağıının beyinde ve matematiksel düzeyde işleyişi (Ateş, 2021).....	23

Şekil 20: (A) İnsan nöronu; (B) yapay nöron veya gizli birlik; (C) biyolojik sinaps; (D) YSA sinapsları (Suzuki, 2017).	23
Şekil 21: Ampute'ler için giyilebilir cihaz teknolojileri (Huaroto ve ark., 2020: 205-234).	25
Şekil 22: Meta-analiz uygulamasının aşamaları (Polat ve Ay, 2016).....	28
Şekil 23: Araştırmada kullanılan makalelerin yıllara göre dağılımı.....	35
Şekil 24: Araştırmada kullanılan makalelerde kullanılan yapay zeka teknolojisinin dağılımı.	36
Şekil 25: Nitel meta analize dahil edilen araştırmaların araştırılan vücut segmentine göre dağılımı.	36
Şekil 26: Araştırmaya dahil edilen makalelerdeki dış iskeletlerin DoF sayılarının dağılımı.	37
Şekil 27: Kullanılan deneklerin araştırmalara dağılımı.	38
Şekil 28: Araştırmalarda kullanılan deneklerin sayıları	38

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- AI (Artificial Intelligence):** Yapay Zeka
- CNS (Central nervous System) :** Merkezi Sinir Sistemi
- GM (Gray Matter):** Gri Madde
- WM (White Matter):** Beyaz Madde
- DOF (Degree Of Freedom):** Serbestlik Derecesi
- CC (Corpus Callosum):** Korpus Callosum
- EGG (Electroencephalography):** Elektroensefalografi
- FA (Fractional Anisotropy):** Fraksiyonel Anizotropi
- fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging):** Fonksiyonel Manyetik Rezonans Görüntüleme
- BT (Computed Tomography):** Bilgisayarlı Tomografi
- PET (Positron Emission Tomography):** Pozitron Emisyon Tomografisi
- ECoG (Electrocorticography):** Elektrokortikografi
- GH (Glenohumeral Joint):** Glenohumeral Eklem
- ML (Machine Learning):** Makine Öğrenimi
- YSA, ANN (Artificial Neural Networks):** Yapay Sinir Ağları
- DL (Deep Learning):** Derin Öğrenme
- NLP (Natural Language Processing):** Doğal Dil İşleme
- CV (Computer Vision):** Bilgisayarla Görme
- GYA:** Günlük Yaşam Aktiviteleri

1. GİRİŞ

Amputasyon, günlük yaşam aktiviteleri ve yaşam kalitesi üzerinde ani ve belirgin etkisi olan (Persine ve ark., 2022), vücuttaki uzuv veya ekstremitenin bir kısmının çıkarıldığı cerrahi bir prosedürdür (Kanchana. D ve ark., 2021). Vücudun bir bölümünün kaybı yaşam kalitesini önemli ölçüde etkilemekte, dolayısıyla fiziksel ve psikolojik sonuçlara neden olmaktadır (Egle ve ark., 2023). Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre amputeler dünya nüfusunun yaklaşık %0,25'ini ve %1,25'ini temsil etmektedir (Rodas ve Pérez, 2023). Raporlardan birine göre, her yıl 0,2 milyon ampute artış yaşanıyor ancak birçok ülke amputasyon istatistiklerini takip etmediğinden dünya çapında toplam uzuv ampute sayısını kesin olarak tespit etmek mümkün değildir (Kadir ve ark., 2021).

Bilgisayar tabanlı sistemlerin ve derin öğrenmeye dayalı algoritmaların hızlı gelişimi sayesinde, yapay zeka (AI) uzun süredir sağlık hizmetleri alanına entegre edilmiştir (Li ve ark, 2022). Ampute hastalarının rehabilitasyonunda da yapay zeka teknolojilerin kullanımı oldukça yaygındır ve giderek daha çok yaygınlaşmaktadır. Yapay zeka teknolojileri sayesinde çeşitli hastalık, doğuştan gelen hastalıklar ve kazalar sonucunda bir veya birkaç uzvunu kaybeden hastalar, kaybettikleri uzuvlarının motor fonksiyon işlevlerinin birçoğunu yerine getirmektedirler. Myoelektrik kontrol, beyin-bilgisayar arayüzleri, yapay sinir ağları, makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi birçok yapay zeka teknolojisi ampute hasta rehabilitasyonunda kullanılmaktadır.

Bu tez üst ekstremitte, alt ekstremitte ya da her ikisini birden kaybeden hastaları araştırarak bu hastaların günlük yaşamda karşılaştıkları zorlukları en aza indiren teknolojilerin kullanıldığı son 10 yılın araştırmaların meta analizini yapmıştır. Bu araştırma sayesinde başta fizyoterapistler olmak üzere bu alanda çalışan terapistlerin ve doktorların bu hastaların rehabilitasyonun da kullanılan teknolojileri ve etkilerini bir kaynakta bularak bu hastalarının rehabilitasyonunu planlayabileceklerdir.

Bu tezde IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Scienccedirect, PudMed, Scopus veritabanları kullanarak 2013-2023 yılları arasında yayımlanan araştırmaların meta analizini yapmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar tablolar ve grafikler şeklinde sunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

Bu kısımda amputasyon hakkında bilgiler (nedenleri, çeşitleri vs.), üst ve alt ekstremite anatomisi ve kinemekanığı, beyin anatomisi, EGG, amputasyon rehabilitasyonunda kullanılan yapay zeka teknolojileri (beyin-bilgisayar arayüzü, makine öğrenmesi vb.) ve yapay zeka tabanlı dış iskeletlerden bahsedilecektir. Ayrıca bu bölümde ampute hasta rehabilitasyonu hakkında da bilgi verilecektir.

2.1. Amputasyon Hakkında Bilgiler

Ampütasyon, travmatik, vasküler, onkolojik veya enfeksiyöz kökenli olabilecek bir yaralanma sonucu bir uzuvun tamamen veya kısmen yokluğu olarak tanımlanır (Molina-Rueda ve ark., 2019). Amputasyon, dünya çapında milyonlarca insanı etkilemekte, hareket yeteneklerini ve yaşam kalitelerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Hunt ve ark., 2022). Ulusal Sağlık İstatistikleri Merkezi'ne göre her yıl 50.000 yeni amputasyon vakası yaşanıyor (Sufri ve ark., 2022). Aynı şekilde günde 2800 amputasyon yapıldığı tahmin ediliyor (Rodas ve Pérez, 2023). Ayrıca modern tıbbın gelişmesine rağmen, bugünlerde amputasyon oranı artma eğilimindedir (Constantin ve ark., 2022).

Amputasyon üst ekstremite veya alt ekstremite seviyesinde olabilir; insan elinin veya kolunun herhangi bir kısmının çıkarılması üst ekstremite amputasyonu olarak kategorize edilir ve gövdenin altındaki vücut parçalarının çıkarılması alt ekstremite amputasyonu olarak adlandırılır (Kumarage ve ark., 2020).

Amputasyon şekil bozukluğuna, vücut imajının bozulmasına ve kişinin uğraşmak zorunda olduğu birçok açıdan fiziksel sakatlığa neden olur (Ligthelm ve ark., 2014). Bir uzvun kaybı sadece morfolojik değişikliklerle sonuçlanmaz, aynı zamanda eksik uzuvdan duysal girdi ve görsel geri bildirim eksikliği nedeniyle sinirsel yeniden yapılanmayla da sonuçlanır ve muhtemelen çeşitli hayalet uzuv fenomenlerine neden olur (Guo ve ark., 2017). Bu hayalet uzuv fenomenleri ampute hastaların %80'inde gözükabilir. Hayalet uzuv, vücudun ne olduğuna dair vücut şemasının güncellenmemesinden kaynaklanan, uzuv amputasyonundan sonra hissedilen canlı bir uzuv eksikliği hissidir (Oouchida ve Izumi, 2012). Ayrıca hayalet uzuv mekanik, termal ve ne yazık ki acı verici duyuların nesnesi olabilir (Jarrassé ve ark., 2017). Bu ağrıyı gidermeye yönelik iyi bilinen bir terapi, amputenin kontralateral sağlam tarafının, etkilenen taraftaki görsel geri bildirimini yeniden sağlamak için aynalandığı ayna terapisi (Thøgersen ve Petrini,

2017). Ayna terapisi hayalet uzuv ağrısını azaltmanın etkili bir yolu olmasına rağmen, çift taraflı uzuv amputasyonu olan hastalarda terapi işe yaramaz çünkü terapi sağlam uzvun görülmesini gerektirir (Oouchida ve Izumi, 2012).

Ampute kişiler için yapay uzuv fonksiyonunu iyileştiren ve eksik uzuvla ilgili hem motor hem de duysal fonksiyonları yeniden kazanmalarına başarılı bir şekilde yardımcı olan bir teknik olan hedefli reinnervasyondur (TR) (Chen ve ark., 2013). TR'de, daha önce kayıp uzvun sinirlendirilmesinden sorumlu olan inaktive edilmiş, artık duysal motor sinirler, cerrahi olarak alternatif denerve kas gruplarına ve göğüs üzerindeki veya kalan uzuvdaki cilt bölgelerine yeniden yönlendirilir (Hijjawi ve diğerleri, 2006; Kuiken, 2003; Kuiken ve diğerleri, 2004; Chen ve ark., 2013).

2.1.1. Amputasyonun nedenleri

Amputasyon birçok nedenden dolayı yapılabilir. Bunlar travmalar; kazalar, savaşlar, spor yaralanmaları, yanma vs., çeşitli hastalıklar; diyabet, kanser, tümör, septisemi (kan enfeksiyonu), kalp damar hastalıkları, donma (aşırı soğuk nedeniyle vücut dokularında yaralanmalar) ve osteomyelit (kemik enfeksiyonu) gibi hastalıklar farklı aşamalarda amputasyona neden olabilir (Asif ve ark., 2021). Bazı hastalıkların vücuda yayılmasını ve hastalara zarar vermesini önlemek içinde amputasyonlar yapılmaktadır (Sufri ve ark., 2022). Ayrıca geleneksel kemik yerleştirme ve klinik ihmal de amputasyona yol açabilir (Asif ve ark., 2021).

2.1.2. Ampütasyonun çeşitleri

Üst ekstremitte ampütasyonları

Ampütelerin %30'unda üst ekstremitte amputasyonu yaşanmıştır. Kol ampütasyonlarının yüzde 60'ı 21-64 yaş arası kişilerde görülüyor; %10'u ise 21 yaşın altındaki hastalardır. (Toledo ve ark., 2009). Çalışmalar, üst ekstremitte amputasyonunun ana nedeninin genellikle kentsel toplumlarda endüstriyel kaza (%92-90) nedeniyle meydana gelen travma (%68,8) olduğunu göstermektedir (Şahsavari ve ark., 2022).

Üst ekstremitte amputasyonu, ampute kişilere önemli bir yük getirmekte ve günlük yaşam aktiviteleri sırasında çevrelerini tam olarak keşfetmelerini kısıtlamaktadır (Samuel ve ark., 2019). Üst ekstremitte amputasyonundan sonra rehabilitasyon tedavisinin hedefleri, büyük ölçüde kişisel bakım, ev ve günlük aktiviteler alanlarındaki aktivite

fonksiyonunun iyileştirilmesine odaklanmıştır, böylece amputasyonu olan hastalar sonuçta hayatlarının her alanına tam katılıma geri dönebilirler (Resnik ve ark., 2017).

Üst ekstremitte amputasyonu olan hastalar fiziksel sorunların yanında psikolojik ve sosyal sorunlarda yaşamaktadırlar. Bu hastalar kronik ağrı, bozulmuş vücut imajı, zihinsel stres, düşük sosyal etkileşimler, uzun süreli yorgunluk, alışkanlıklarda değişiklik, depresyon, ekonomik stres, tedavi masrafları ve aile ve arkadaşların tepkileri gibi birçok sorunla karşılaşmaktadırlar (Şahsavari ve ark., 2022).

Üst ekstremitte amputasyonları, kısmi el amputasyonu (trans-metakarpal) amputasyon, metakarpal amputasyon, el bileği dezartikülasyonu, dirsek altı amputasyonu, dirsek dezartikülasyonu, transhumeral amputasyon ve omuz dezartikülasyonu olmak üzere yedi türe ayrılabilir (Kumarage ve ark., 2020). Şekil 1' de üst ekstremitte amputasyonları gösterilmiştir.

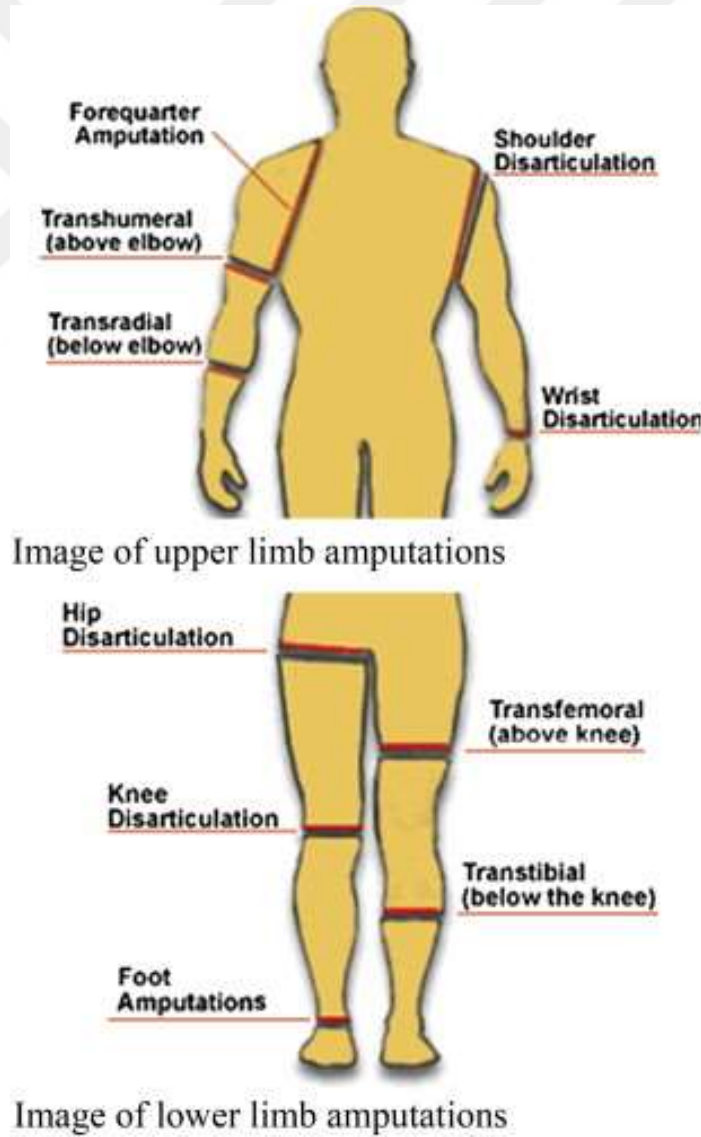
Alt ekstremitte amputasyonları

Her yıl milyon kişi başına 280 ila 300 alt ekstremitte amputasyon ameliyatı gerçekleştirilmektedir (Khudetsky ve ark., 2020). Alt ekstremitte amputasyonu insidansı üst ekstremitte amputasyonuna göre daha yaygındır (İmam ve ark., 2019). Alt ekstremitte amputasyonunun ana nedeni, bazı durumlarda doğrudan altta yatan diyabet komplikasyonlarıyla ilişkili olan periferik damar hastalığıdır (Boudali ve ark., 2019). Aynı zamanda alt ekstremitte amputasyonu travmatik yaralanmalar, uzuvlarda zayıf kan dolaşımı, kanserli tümörler, nöroma, donma gibi sorunları gidermek içinde reçete edilir (Kibria ve ark., 2023). Alt ekstremitte amputasyonu, vücudun belirli bir bölgesinde lokalize olsa da, ampute kişilerin fiziksel, davranışsal ve ruhsal yönlerini kapsayan ve değiştiren geniş kapsamlı etkilere sahiptir (Fatima, 2023).

Alt ekstremitte kasları, kişinin vücudunu, itişini ve stabilitesini desteklemesine yardımcı olur (Kibria ve ark., 2023). Bu stabilite bozulduğunda özellikle amputasyon seviyesi arttığında yürüyüş simetrisi bozulur. Amputasyon sonrası yürüyüş adaptasyonları yüklenme ve kas güçlendirme stratejilerinde değişikliklere yol açar, bu da ampute ve sağlam uzuvlar arasındaki asimetrisini etkiler (Finco ve ark., 2022). Bu fonksiyonel asimetri, osteoarroz, osteoporoz, rezidüel uzuv ağrısı, sırt ağrısı ve uzun vadede hepsi ek ameliyatlara gerektirebilecek kardiyovasküler hastalıklara yol açabilir (Kibria ve ark., 2023).

Alt ekstremitte kaybı olan ampute bireylerin, amputasyondan önceki gibi hareketlerin doğal olması için günlük yaşam aktiviteleri sırasında özel bakıma ihtiyaçları vardır (Asıf ve ark., 2021). Bu yüzden uzuv kaybindan sonra ampute hastalarının günlük yaşam aktivitelerinin çoğunu yapabilmeleri için rehabilitasyon sürecine girmeleri önerilmektedir. Rehabilitasyonun başarılı olması içinde ampute bireylerin yaşamlarının her yönünü ve düzenli olarak karşılaştıkları engelleri bilmek gerçekten önemlidir (Fatima, 2023).

Alt ekstremitte ampütasyonları, kısmi ayak ampütasyonu (transmetatarsal), metatarsal amputasyon, ayak bileği dezartikülasyonu, transtibial amputasyon, diz ampütasyonu, transfemoral amputasyon, kalça dezartikülasyonu olmak üzere yedi türe ayrılabilir. Şekil 1'de alt ekstremitte ampütasyonları gösterilmiştir.



Şekil 1: Uzuv ampütasyonlarının seviyeleri (Meier ve Melton, 2014).

2.1.3. Amputasyon sonrası beynin yapısal değişimi

Bir uzvun kaybı, merkezi sinir sistemine (CNS) ulaşan duyuşal girdilerde değişikliklere neden olur (Molina-Rueda ve ark., 2019) ve sonuç olarak hem periferik hem de merkezi sinir sistemlerinde derin ve uzun süreli değişiklikler ve yeniden organizasyon meydana gelecektir (Wang ve ark., 2017). Yeniden organizasyon, omurilik, beyin sapı, talamus ve korteks dahil olmak üzere merkezi sinir sisteminin çeşitli seviyelerinde gözlemlenmiştir (Lyu ve ark., 2016). Özellikle birincil duyuşal (S1) ve motor (M1) kortekslerde olmak üzere gri maddede (GM) fonksiyonel yeniden haritalamaya neden olduğunu göstermiştir (Guo ve ark., 2019). Bu yeniden yapılanma gri maddeyle sınırlı kalmayabilir ve beyaz maddede de (WM) değişikliğe neden olur. Kortikal nöroplastik değişiklikler sadece de-afferentasyonun karşı tarafındaki korteksle sınırlı değildir, aynı zamanda her iki hemisferin sensörimotor alanlarını etkileyen iki taraflı yeniden organizasyonla sonuçlanır (Di Pino ve ark., 2009:114-126).

Difüzyon tensör görüntüleme (DTI) kullanılarak, alt ekstremitte amputelerinin korpus kallosumda (CC), etkilenmemiş superior korona radiatada, etkilenmemiş temporal lobun altında yatan WM bölgelerinde fraksiyonel anizotropi (FA) değerlerinde azalma gösterdiği rapor edilmiştir (Guo ve ark., 2019).

Son zamanlarda, dinlenme durumu fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) çalışması, ampute kişilerde eksik el alanı ile sensörimotor aę arasındaki fonksiyonel bağlantının azaldığını, eksik el alanı ile varsayılan mod ağı arasındaki fonksiyonel bağlantının arttığını gösterdi (Lyu ve ark., 2016). Alt ekstremitte amputasyonu olan kişilerde de sensörimotor aę içinde ve ötesinde anormal fonksiyonel bağlantı vardır (Molina-Rueda ve ark., 2019).

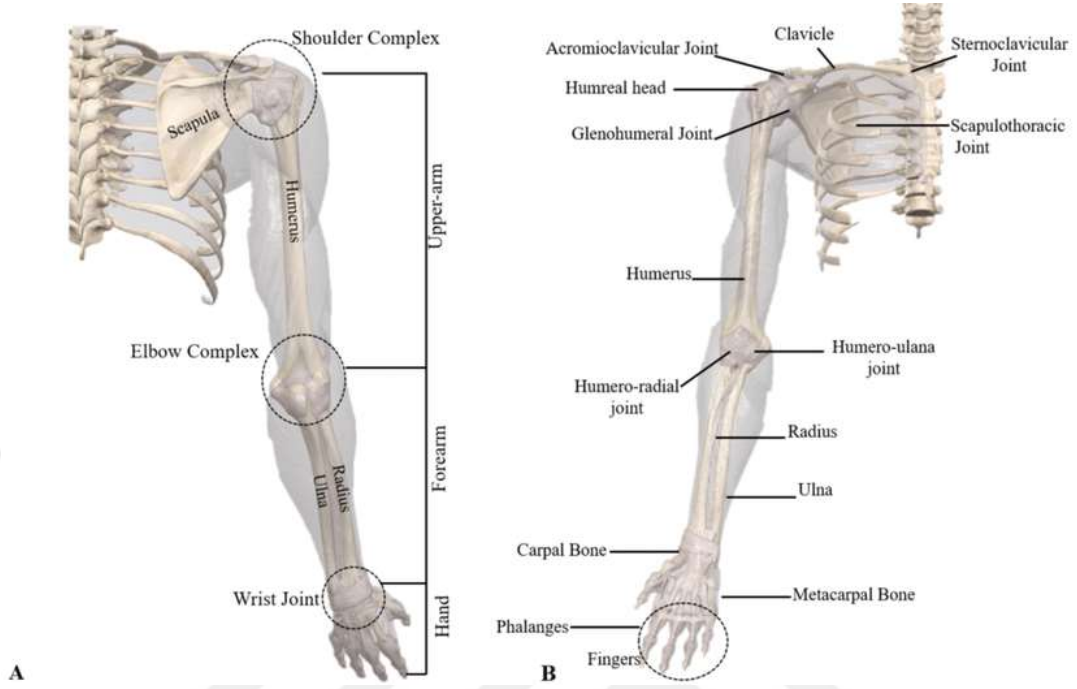
2.2. Üst ve alt ekstremitte anatomisi ve kinemekanığı

2.2.1. Üst ekstremitte anatomisi ve kinemekanığı

Üst ekstremitte Şekil 2A'de görüldüğü gibi omuz kompleksi, dirsek kompleksi, bilek eklemi ve parmak segmentlerinden oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 2B'de görüldüğü gibi üst ekstremitte clavícula, skapula, humerus, radius, ulna, karpal kemikler, metakarpal kemikler ve falankslardan oluşmaktadır.

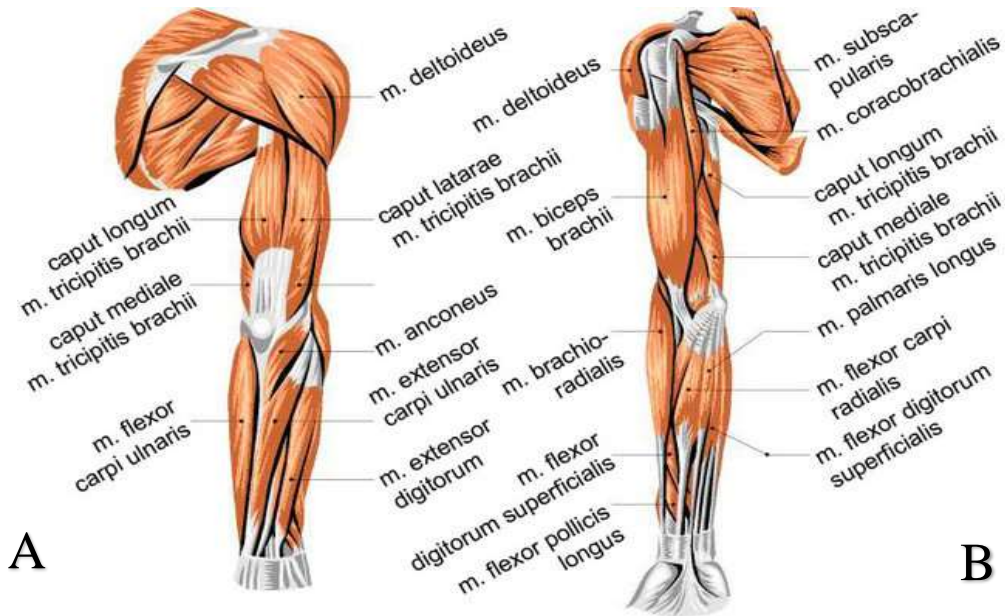
Üst ekstremitte hareketi sinir sistemleri, kas-iskelet sistemi ve bunların arayüzlerinin etkileşimini içerir (Ochieze ve ark., 2023). Bu hareketi sağlayan eklemler ise

glenohumeral eklem (GH), skapulotorasik eklem, sternoclavikular eklem, akromioclavicular eklem, subakromial eklem olmak üzere beş tanedir (Şekil 2B).



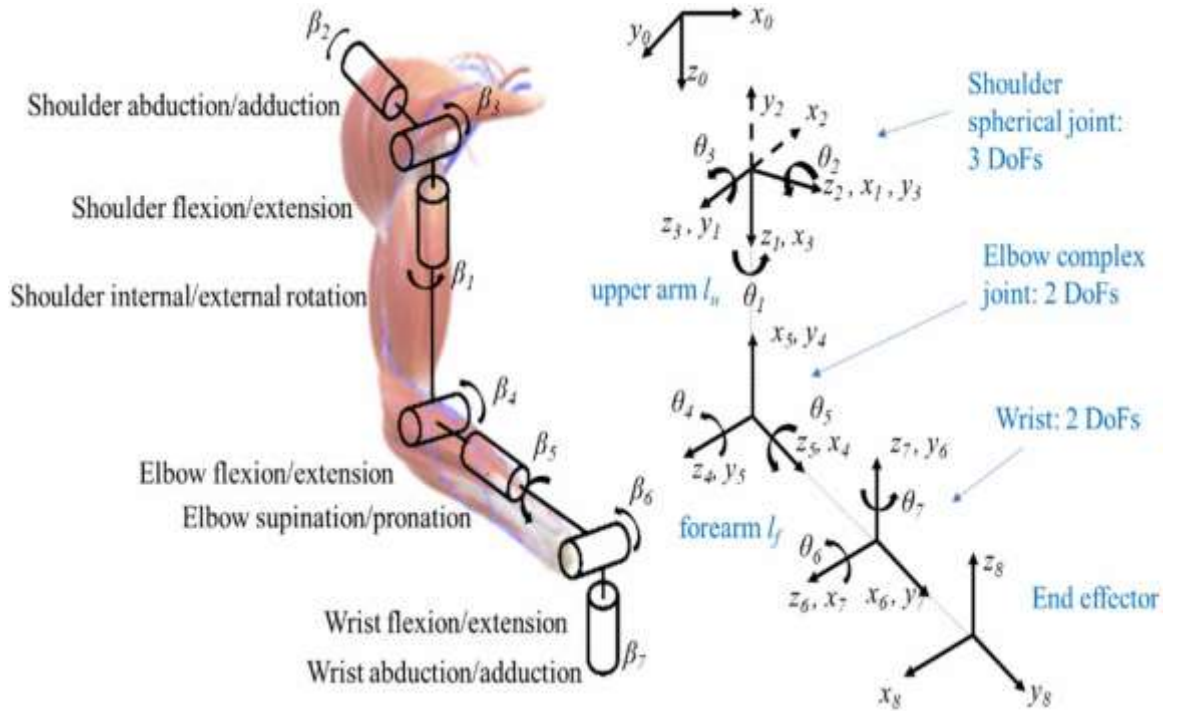
Şekil 2: İnsan üst ekstremitesinin anatomisi: (A) üst ekstremité segmentleri ve (B) omuz, dirsek ve bilek iskelet yapısı (Mart ve ark., 2020).

Şekil 3’de üst ekstremité hareketini sağlayan kaslar gösterilmiştir.



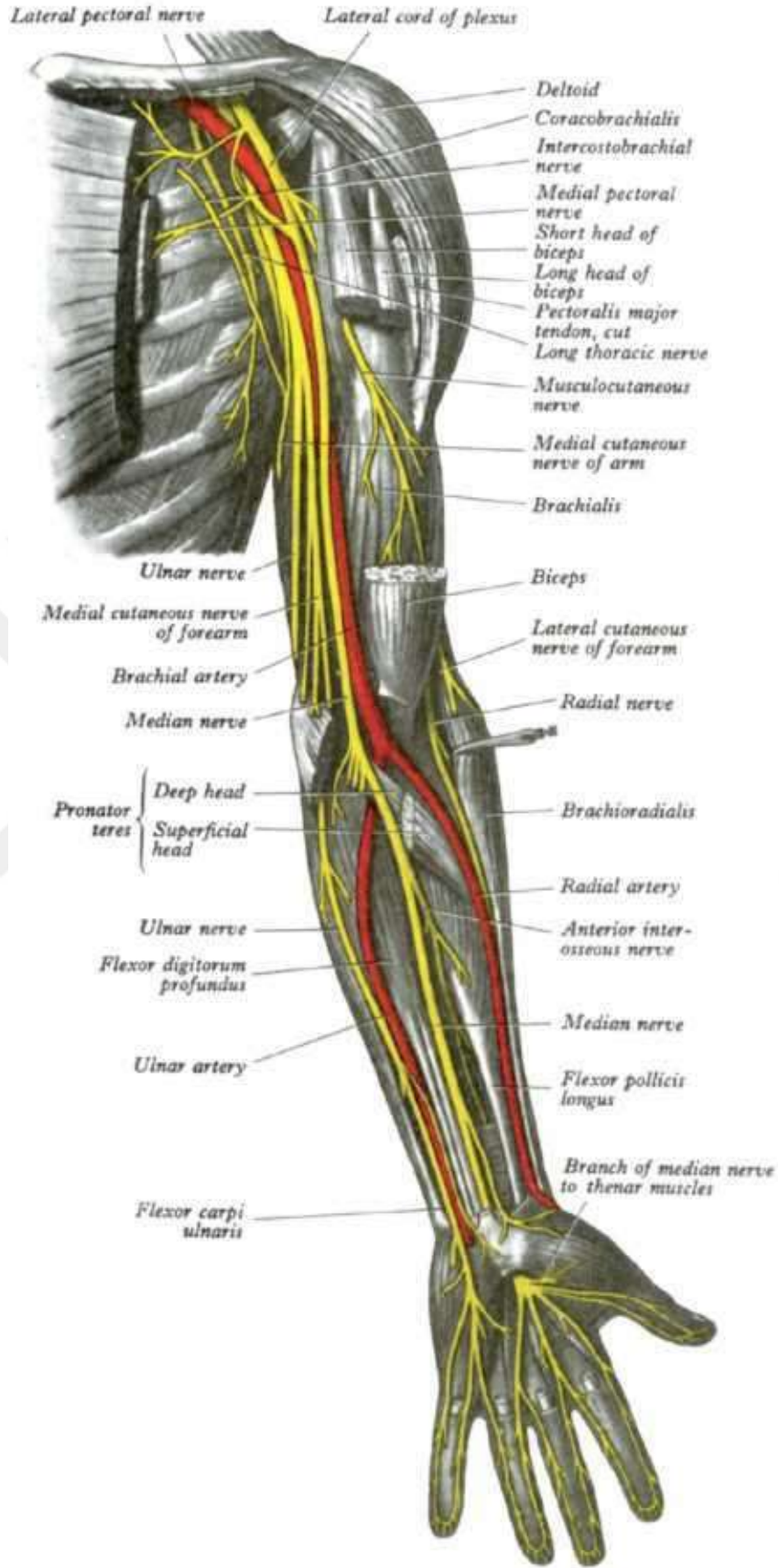
Şekil 3: İnsan üst ekstremité kaslarının; (A) anterior görünümü, (B) posterior görünümü (Holtkamp, 2009).

Üst ekstremité hareketliliği yedi serbestlik derecesine (DOF) kadar basitleştirilebilir. Omuz ekleminin üç DOF'si vardır; omuzun iç/dış rotasyonu (β_1), omuz abduksiyon/addüksiyonu (β_2) ve omuz fleksiyonu/ekstansiyonu (β_3); dirsek eklemi iki serbestlik dereceli harekete, dirsek fleksiyonu/ekstansiyonuna (β_4) ve dirsek supinasyonuna/pronasyonuna (β_5) izin verir. Bilek eklemi iki serbestlik dereceli el bileği fleksiyon/ekstansiyonuna (β_6) ve el bileği abduksiyon/addüksiyon sapmasına (β_7) izin verir. (Ochieze ve ark., 2023) (şekil 4).



şekil 4: İnsan üst ekstremité kinematiki modeli (Ochieze ve ark., 2023)

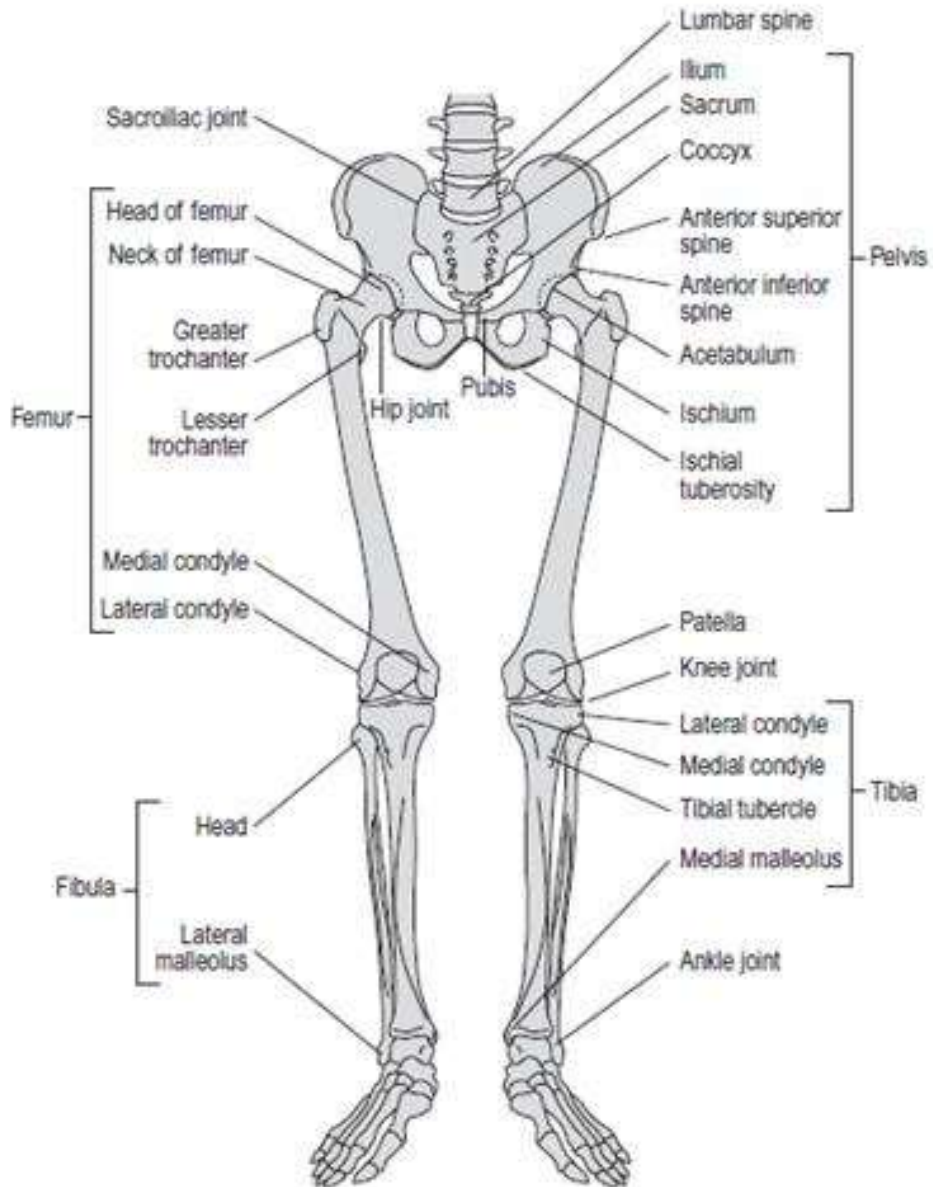
Üst ekstremité kaslarının inervasyonunu ve kolun duyu bilgisini taşıyan sinirler bulunmaktadır. Kolda bulunan bu sinirler brakiyal pleksusun terminal dallarıdır ve üst ekstremité kaslarını sinirlendirmeye ve duysal bilgiyi beynin daha yüksek işlem merkezlerine iletmeye hizmet eder (Mihir Patel ve Matthew Varacallo, 2023). Brakiyal pleksusun terminal dalları arasında aksiller, kas-deri, radyal, ulnar ve medyan sinirler bulunur ve her biri üst ekstremitenin spesifik motor ve duysal innervasyonundan sorumludur (Mihir Patel ve Varacallo, 2023). Üst ekstremité de kasların inervasyonunu bu sağlayan sinirler şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5: Üst ekstremité inervasyonunu sağlayan sinirler (Patel ve Varacallo, 2023).

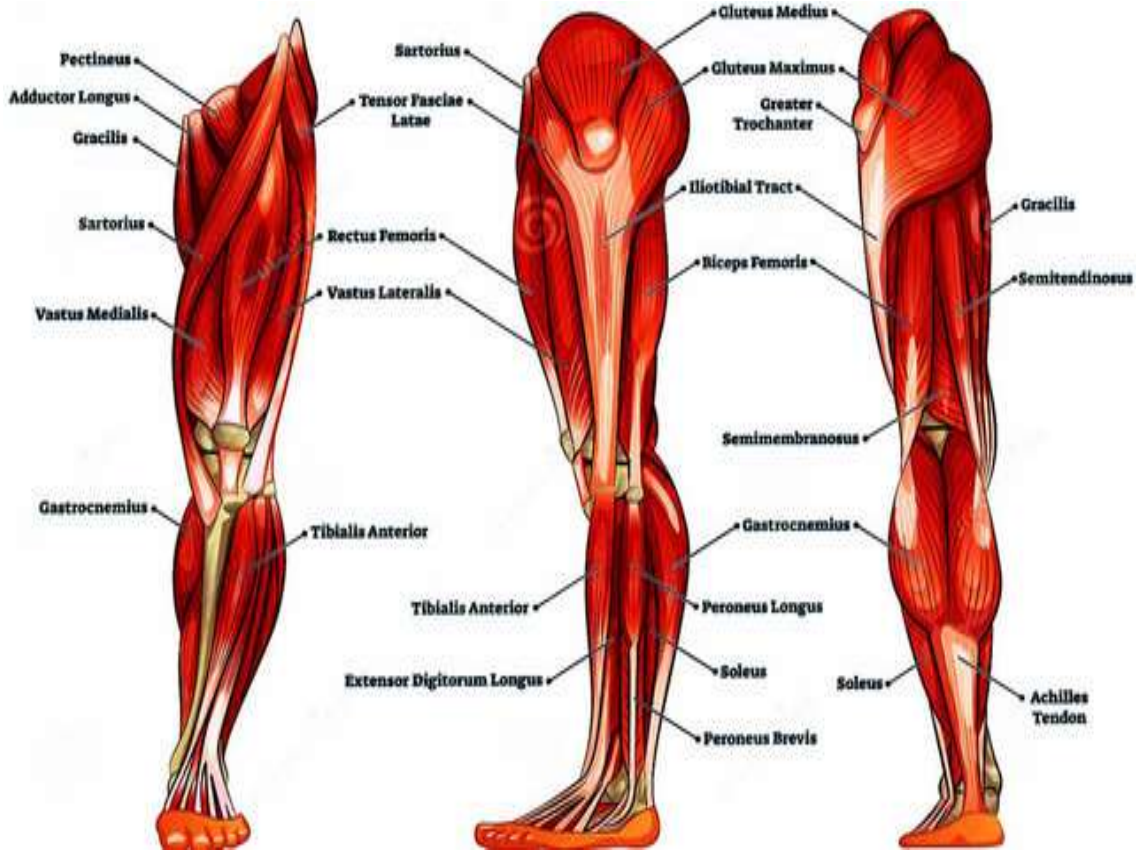
2.2.2. Alt ekstremite anatomisi ve kinemekanığı

Alt ekstremiteler ağırlığın aktarımını, hareket kabiliyetini ve vücudun dengesini sağlar (Standing ve diğerleri, 2016; Singh, 2011; Scheidt, 2019). Kemikler alt ekstremite kas-iskelet sisteminin statik ve dinamik fonksiyonlarında rol oynar. (Merriman ve Turner, 2005; Scheidt, 2019). Bu kemikler ve eklemler ayrıntılı bir şekilde Şekil 6'da gösterilmiştir.



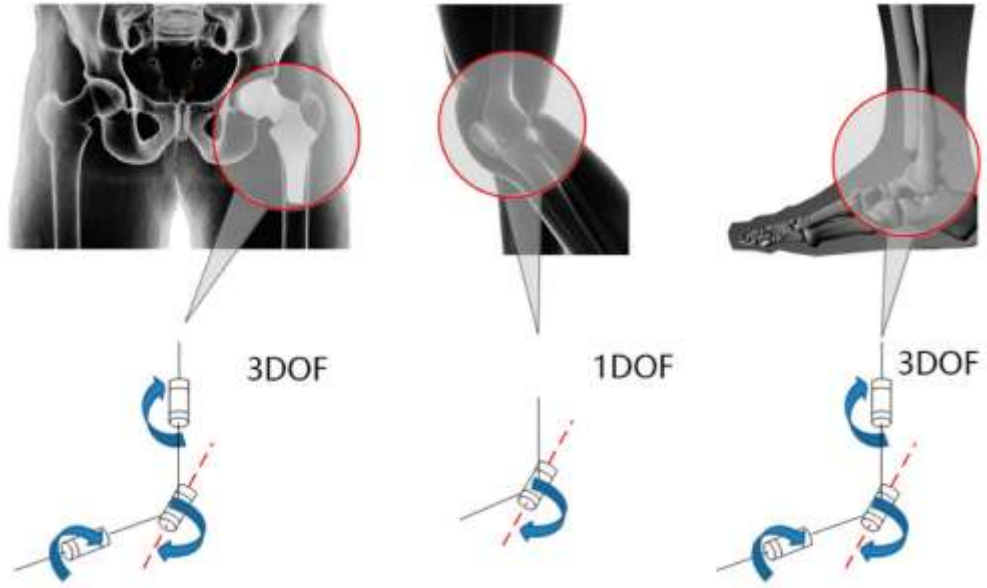
Şekil 6: Alt ekstremite anatomisi: kemikler ve eklemler (Niam Kh ve ark., 2021)

Alt ekstremitte iskelet kası kalça kasları, uyluk kasları, baldır kasları ve ayak kaslarından oluşur (Su ve ark., 2022). Alt ekstremitteyi oluşturan kaslar Şekil 7’de gösterilmiştir.

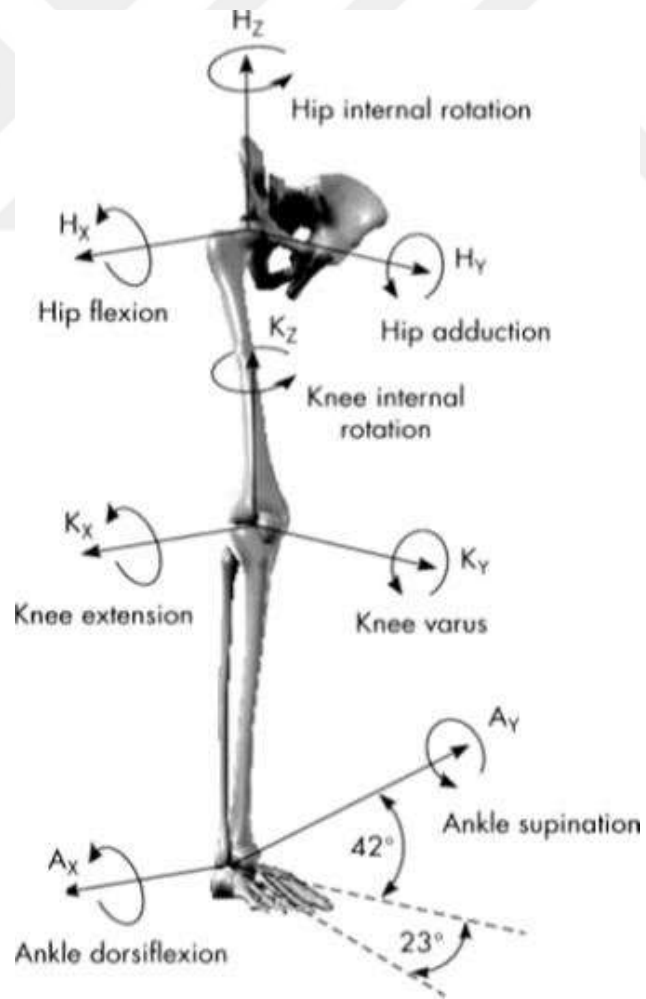


Şekil 7: Alt ekstremitte kasları (ön, arka ve yan görünüm) (Ciorou, 2020)

Yürüyüş, vücudun çok sayıda serbestlik derecesi (DOF) nedeniyle son derece karmaşık bir biyomekanik süreçtir (Al-Hayali ve ark., 2021) ve tek bacakta yedi serbestlik derecesi vardır (Su ve ark., 2022). Kalça ekleminde üç DOF vardır; kalça iç/dış rotasyon, kalça abdüksiyon/addüksiyon, kalça fleksiyon/ekstansiyonu; diz ekleminin bir tane serbestlik derecesi vardır; diz fleksiyon/ekstansiyonu; ayak bileği ekleminin ise üç serbestlik derecesi vardır; ayak bileği plantar fleksiyon/dorsi fleksiyon, ayak bileği inversiyon/eversiyonu, ayak bileği abdüksiyon/addüksiyon hareketleri vardır (Şekil 8 ve Şekil 9).

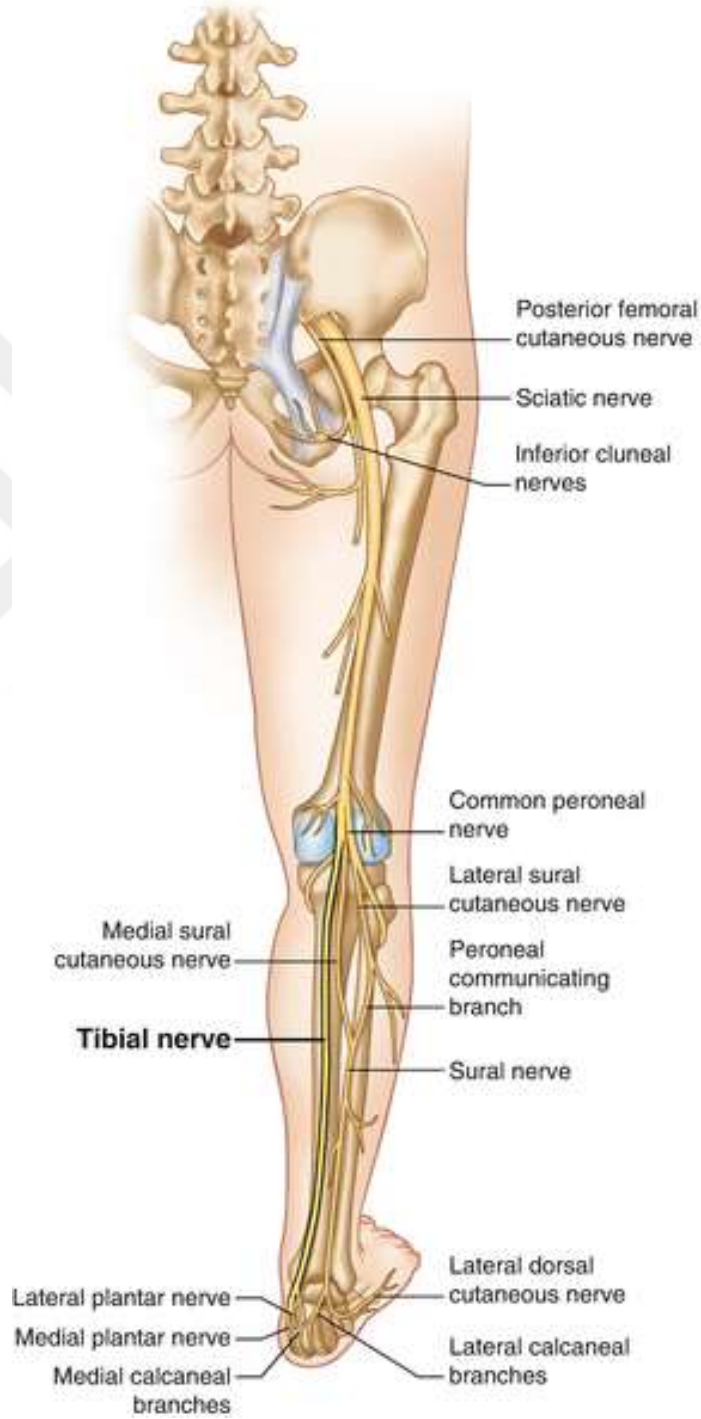


Şekil 8: Alt ekstremite serbestlik derecesi (DOF) (Su ve ark., 2022)



Şekil 9: Alt ekstremite serbestlik derecesi (DOF) ve kinematığı (Niam Kh ve ark., 2021)

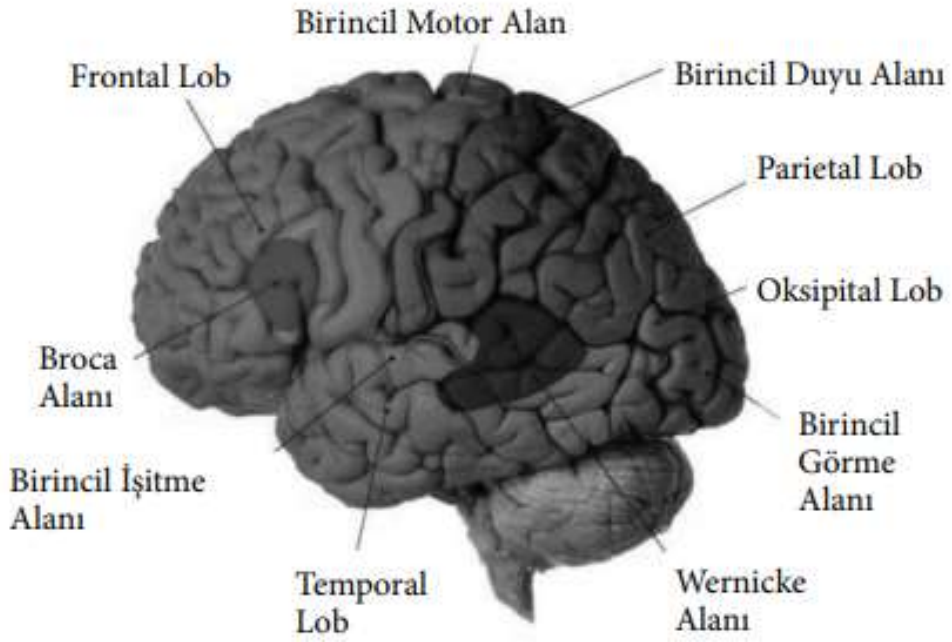
Alt ekstremitenin sinir beslemesi, uyluğun femoral, obturator ve lateral kutanöz sinirleri yoluyla lomber pleksusun ana sinirlerinden (L2-4) sağlanırken, geri kalanı büyük ölçüde siyatik sinir (L4-5 ve S1) tarafından sağlanır (Haddad ve Coventry, 2003). Bu sinirler ve dalları Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10: Alt ekstremitte inervasyonu. (Brown ve ark., 2016, s. 819–831).

2.3. İnsan Beyin Anatomisi

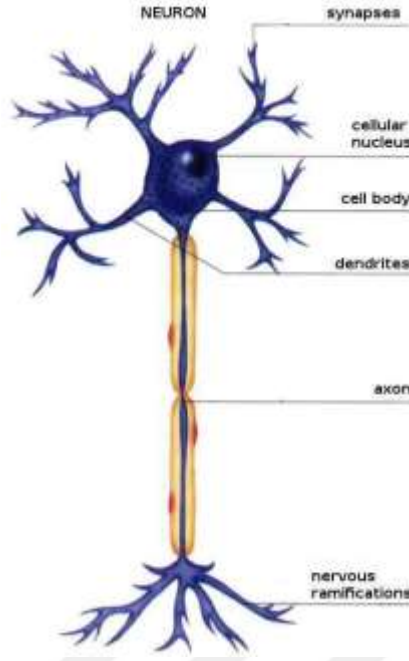
Beyin, merkezi sinir sisteminin parçası olan insan vücudunun en karmaşık yapılarından biridir. Beyin yaklaşık 1,5 kg ağırlığında, yaklaşık 1130- 1260 cm³ hacmimi ve yaklaşık 87 milyar nörona sahiptir. İnsan beyni dört ana lobtan oluşmaktadır. Bunlar frontal lob, oksipital lob, parietal lob, temporal lobdur. Şekil 11’de insan beyin anatomisi gösterilmiştir.



Şekil 11: İnsan beyin anatomisi (Kumral, 2014, s. 28)

2.3.1. İnsan beyninin çalışma prensibi

Beynin yaptığı görevleri yerine getirmek için sinir sisteminin her yerinde milyarlarca iletişim kurulumu (Elsayed ve ark., 2020). Bu iletişim nöronlar sayesinde kurulur. Nöron, sinir sisteminin temel hücresi olup duyuların algılanması, motor ve emosyonel cevapların oluşturulması, öğrenme ve hafıza gibi fonksiyonları yerine getirir (Arifoğlu, 2017, s. 432). Bu nöronlar kendi aralarında sinaps yaparak beyin çalışmasını sağlarlar. Sinaps ise bir nöron uzantısının diğer bir nöron uzantısı ile kurduğu bağlantıya denir getirir (Arifoğlu, 2017, s. 432). Nöronun temel yapısı Şekil 12’de gösterilmiştir.



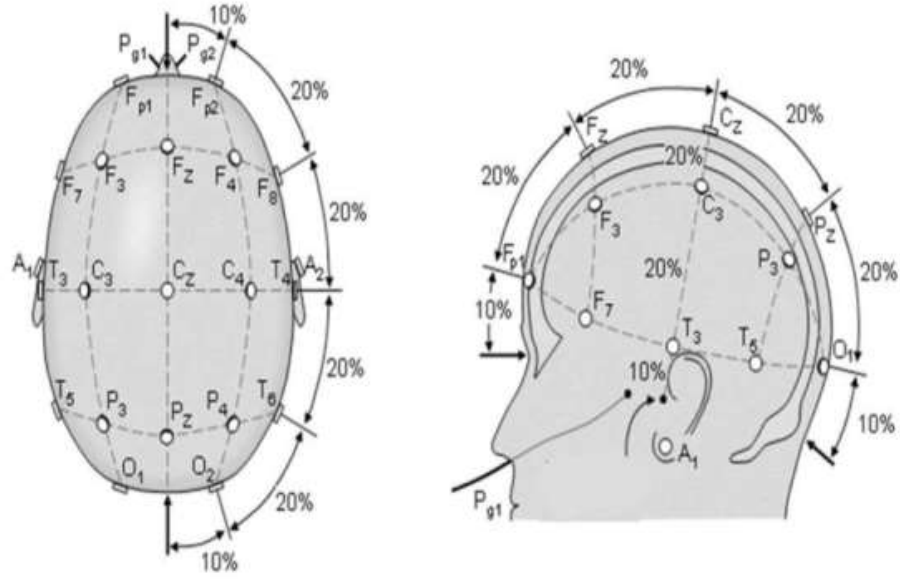
Şekil 12: Nöronun temel yapısı (Suzuki, 2017).

2.3.2. Elektroensefalografi (EGG)

Beynin bilimsel araştırmalarda sıklıkla kullanılan görüntüleme teknikleri şunlardır; fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI), bilgisayarlı tomografi (BT), pozitron emisyon tomografisi (PET), elektrokortikografisi (ECoG), Elektroensefalografi (EGG)' dir.

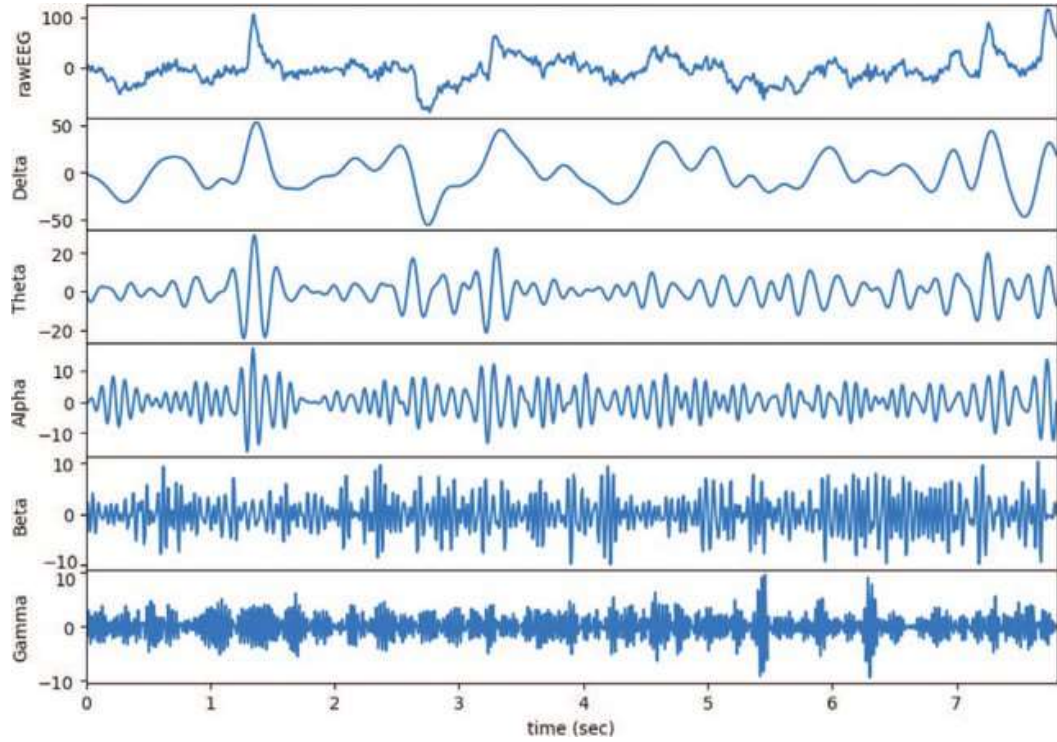
Elektroensefalogram (EEG), İnsan Varlığının Beyin aktivitesinin grafiksel temsilidir (Giridhari ve Joshi, 2020). Yani EEG, beynin elektriksel aktivitesi tarafından üretilen sinyalleri kaydetmek için kullanılan bir cihazdır (Laksono ve İmah, 2021). EGG, beyin ile ilgili çeşitli hastalıklarda erken teşhisinde, tedavisinde, izlenmesinde, analizinde, sınıflandırmasında kullanılabiliceği gibi beyin bilgisayar arayüzü gibi yapay zeka teknolojilerinde de birçok alanda kullanılmaktadır.

EGG ölçümleri genellikle bir veya daha fazla elektrot kullanılarak gerçekleştirilir. Bu elektrotlar genellikle standart bir model olan 10-20 uluslararası sistemine göre yerleştirilir. Şekil 13'de, 10-20 Uluslararası standartlara göre EEG ölçümü için standart konumları gösterilmektedir. Yeşil noktalar, bu deneyde kullanılan ekipmanla EEG'nin ölçüldüğü alanları göstermektedir. FPz merkezde yer alır ve EEG sinyalinin referans noktasının belirlenmesinde rol oynar (Kim ve ark., 2022).



Şekil 13: Elektrotların 10–20 standardına göre düzenlenmesi (Kouddad ve ark., 2020).

EGG sinyalleri farklı salınımlardan oluşur. Bu salınımlara ritim adı verilir. EGG dalgaları ise frekans aralığına göre alfa, delta, teta, beta, gama, mu olmak üzere 6 beyin ritmine ayrılır. Şekil 14’te bu beyin dalgaları gösterilmiştir.



Şekil 14 Sinyal kanalı ham EEG sinyali ve karşılık gelen frekans bantları: Delta (0:1 – 4 Hz), teta (4 – 8 Hz), alfa (8 – 14 Hz), Beta (14 – 30 Hz), gama (30 – 63 Hz) (Bajaj, 2020).

2.4. Ampütasyon Rehabilitasyonunda Kullanılan Yapay Zeka Teknolojileri

Yapay zeka (AI), bir insanla karşılaştırılabilir akıllı davranışı ve eleştirel düşünmeyi stimüle etmek için bilgisayarların ve teknolojinin kullanımını tanımlamak için kullanılan terimdir (Denecke ve Baudoin, 2022). Halk arasında "yapay zeka" terimi genellikle, "öğrenme" ve "problem çözme" gibi insanların insan zihniyle ilişkilendirdiği "bilişsel" işlevleri taklit eden makineleri (veya bilgisayarları) tanımlamak için kullanılır (Mu ve ark., 2021).

Makine öğrenimi (ML), sinir ağları (NN), derin öğrenme (DL), doğal dil işleme (NLP) ve bilgisayarla görme (CV) ile temsil edilen yapay zeka teknolojilerinin sağlık hizmetleri alanıyla entegrasyonu sürekli olarak derinleşmiştir (Wang ve ark., 2022) ve yapay zeka teknolojilerinin sağlık hizmetleri alanında kullanımı gittikçe artmıştır. Bu yapay zeka teknolojilerinden dış iskelet sistemleri, fonksiyonel elektriksel stimülasyon, yumuşak robotik, nörorobotik ve beyin-makine arayüzleri gibi farklı teknolojik yaklaşımlar kas sistemi veya beyin dalgaları arasındaki iletişimi okumak, işlemek ve bunları yürütme cihazına aktarmak için kullanılır (Kruppa ve ark., 2023). Sonuç olarak hızla gelişen bu alanın amacı, hareketlilik sorunları yaşayan insanların fiziksel yeteneklerini geliştirerek bağımsızlıklarını yeniden kazanmalarını ve yaşam kalitelerini artırmalarını sağlayan akıllı robotik cihazlar yaratmaktır (Faqiri ve ark., 2023).

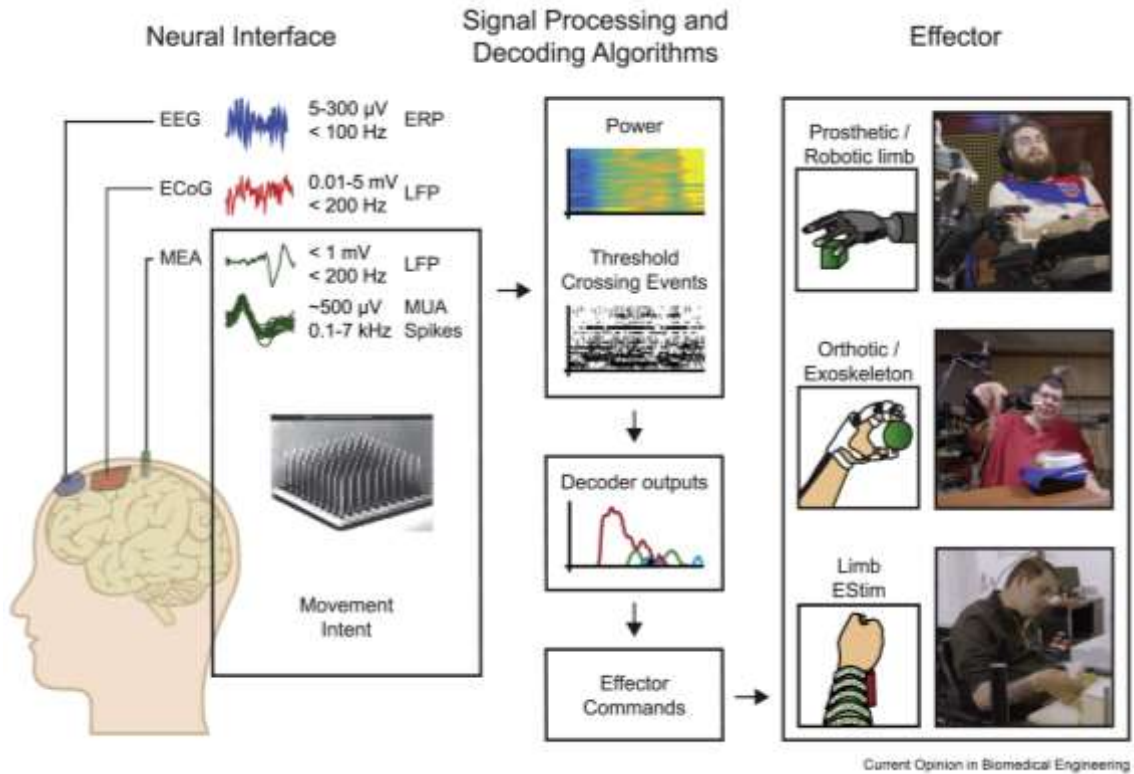
Ampute hastalarda kullanılan yapay zeka teknolojilerinden olan beyin-bilgisayar arayüzünden (BCI), makine öğrenmesi, derin öğrenme ve yapay sinir ağlarından bu bölümde kısaca bahsedilecektir.

2.4.1. Beyin-bilgisayar arayüzü (BCI)

Beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) sistemi, harici cihazların beyin dalgası aktivitesinin kullanımıyla kontrol edildiği yeni bir iletişim yoludur (Idowu ve ark., 2021). BCI sistemi, genellikle sinirsel sinyal edinimi, sinyal işleme, özellik çıkarımı, insan niyeti tespiti ve kullanıcı geri bildirim sinyali üretimini içeren sonraki süreçlerden oluşur (Jain ve Kumar, 2023). Bu sistemler beyin sinyalleri arasında iletişim kanalı oluşturacak bir arayüz geliştirmeyi amaçlamaktadır (Gupta ve ark., 2022). Bu tür uygulamaların örnekleri arasında kelime yazım sistemlerini çalıştırmak, bilgisayar programlarını kontrol etmek, robotik protezleri hareket ettirmek, tekerlekli sandalyeleri kontrol etmek veya nörorehabilitasyona yardımcı olmak için BCI'ların kullanılması yer alır (Williams ve ark., 2022).

BCI teknolojisinin beyin aktivitesini izlemek için üç uygulaması vardır. Bunlar; invaziv, kısmi invaziv ve non-invaziv yöntemlerdir. İnvaziv yöntemde elektrotların doğrudan gri maddeye implantasyonu yapılır. Kısmi invaziv yöntemde BCI elektrotları intrakranial olarak implante edilmektedir ve bu teknolojinin temsilcisi ise elektrokortikografidir (ECoG). Non-invaziv yöntemde ise kafa derisi üzerine yerleştirilen elektrotlar sayesinde beyin sinyalleri izlenir ve bu sistemin temsilcisi elektroensefalografdir (EEG). Bu elektrotlar ameliyat gerektirmeden kolayca yerleştirilebilir ve çıkarılabilir ancak sinyalleri invaziv araçlara göre daha boğuk ve belirsiz olabilir (Palmer, 2022). Kısacası invaziv BCI'lar daha iyi bir sinyal kalitesine sahiptir çünkü elektrotlar, invazif olmayan BCI'lara göre nöronlara çok daha yakın yerleştirilir (Murphy ve ark., 2017).

Vücut ve beyni yeniden bağlamak için, BCI sistemleri üç ana bileşenden yararlanır: beyinden kayıt yapan ancak aynı zamanda beyni uyaran sınırsal arayüzler, sinyal işleme ve kod çözme algoritmaları ve hareketi uyandıran ve duyuşal girdiyi iletebilen efektörlerden yararlanır (Bockbrader, 2019) (Şekil 15).

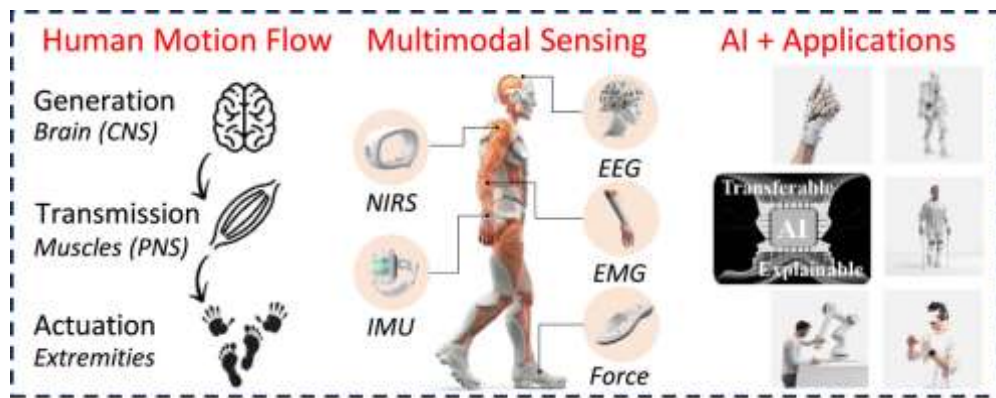


Şekil 15: BCI sistemlerinin bileşenleri: beyinden kayıt yapan ve beyni uyaran sınırsal arayüzler (solda), sinyal işleme ve kod çözme algoritmaları (ortada) ve hareketi uyandıran ve duyuşal girdiyi iletebilen efektörler (sağda) (Bockbrader, 2019).

BCI sisteminde EGG sinyallerini işleme yöntemleri ise şunlardır; ön işleme, özellik çıkarma, özellik seçimi ve sınıflandırma yöntemleri.

- **Ön işleme:** EEG (elektroensefalogram) verilerinin ön işlenmesi, gürültüyü, yapaylıkları ve diğer müdahale edici faktörleri ortadan kaldırmak ve böylece veri kalitesini ve güvenilirliğini artırmak için EEG sinyallerinin analiz edilmesi ve yorumlanmasından önce gerçekleştirilen bir dizi adımdır (Mengting He ve ark., 2023).
- **Özellik çıkarma:** Özellik çıkarma teknikleri, önceden işlenmiş sinyalleri, farklı zihinsel durumları veya bilişsel görevleri tanımlamak için kullanılabilen özellik vektörlerine dönüştürmek için kullanılır (Tang ve ark., 2023). Özniteliklerin çıkarılması için zaman alanı, frekans alanı, zaman-frekans alanı ve doğrusal olmayan teknikler gibi az sayıda yöntem kullanılır (Awang ve ark., 2013).
- **Özellik seçimi:** Özellik seçme yöntemleri, eldeki göreve en uygun özelliklerin belirlenmesine yardımcı olarak sınıflandırma performansının iyileştirilmesine ve hesaplama karmaşıklığının azaltılmasına yol açar (Tang ve ark., 2023).
- **Sınıflandırma:** Karar sisteminin sonunda seçilen özellikler, kullanıcının hareket niyetini belirleyen bir sınıflandırma algoritması kullanılır (Tang ve ark., 2023). Yani EEG özelliklerinin çıkarılmasının ardından EEG verileri, Karar Ağacı (DT), destek vektör makinesi ve K-En Yakın Komşu (KNN) vb. gibi endüstri standardı makine öğrenimi sınıflandırıcıları kullanılarak kategorize edilir (Mathur ve ark., 2022).

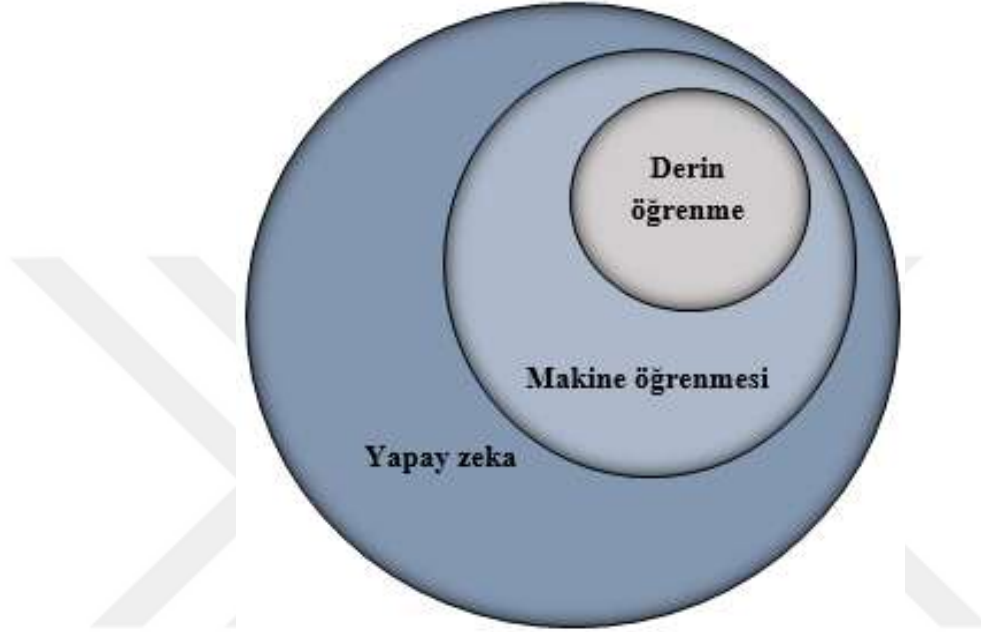
Kısacası sinir bilimi ve makine öğrenimi algoritmalarındaki ilerlemelerle birlikte, BCI sistemlerinden beynin motor işlevselliğine yardımcı olmak, bunları artırmak veya onarmak için faydalanılmaktadır (Jain ve Kumar, 2023) (Şekil 16).



Şekil 16: Beyin- bilgisayar arayüzü teknolojisinin özet gösterimi (Tang ve ark., 2023).

2.4.2. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yapay zeka teknolojilerinin içinde bulunan alt kümelerdir ve bunlar arasındaki ilişki şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17: Yapay zeka, makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki ilişki

Yapay zeka kavramının alt kümesi olarak görülen makine öğrenmesi, bilgisayarların olayları öğrenmesini sağlayan teknolojidir. Genellikle örnekler kullanılarak olayların girdi ve çıktıları arasındaki ilişkiler öğrenilir. Öğrenilen bilgiler ile benzer olaylar yorumlanarak kararlar verilir veya problemler çözülür (Öztemel, 2006:17). Yani makine öğrenmesi, bilinen girdilerden ve beklenen çıktılardan girdilerin anlamlı çıktılara dönüştürmeyi öğrenen modellerdir. Diğer bir deyişle makine öğrenmesi bilgisayarın bir olay ile ilgili bilgileri ve tecrübeleri öğrenerek gelecekte oluşacak benzeri olaylar hakkında kararlar verebilmesi ve problemlere çözümler üretebilmesidir denilebilir (Öztemel, 2006:21).

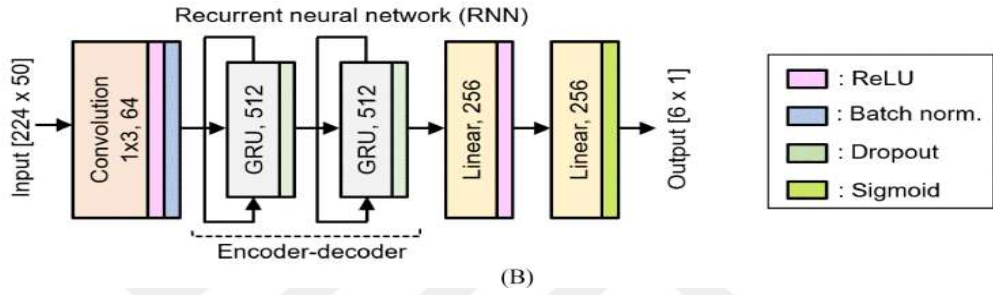
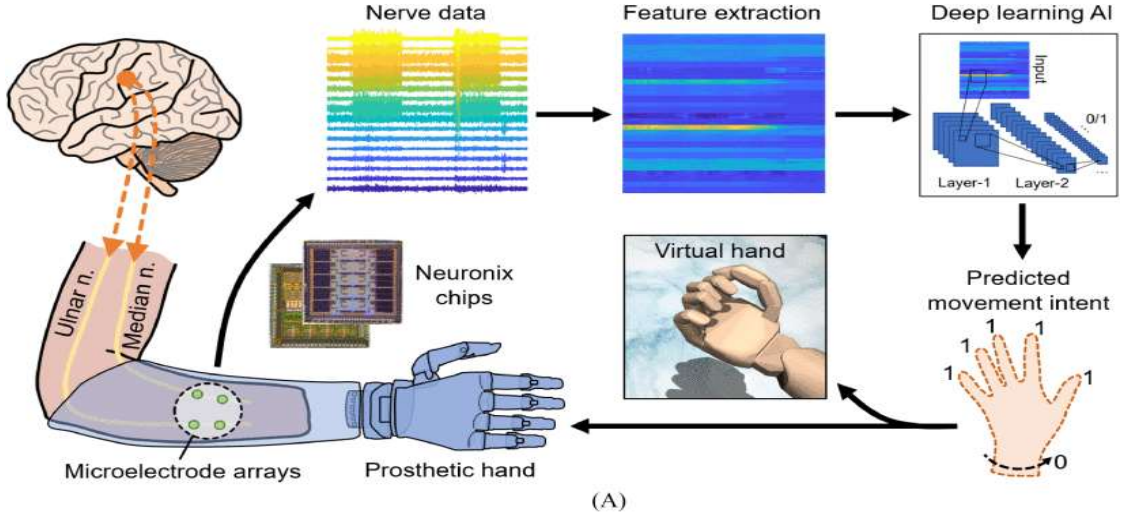
Makine öğrenimi yöntemleri genellikle üç ana kategoriye ayrılır; denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme, takviyeli öğrenme. Denetimli öğrenmede bilgisayara örnek girdiler ve istenen çıktılar sunulur. Denetimsiz öğrenme yönteminde herhangi bir girdi verisi verilmez,

yöntem kendi yapısına göre kendisini seçer. Takviyeli öğrenme yöntemlerinde bilgisayar, belirli bir amaç için hareket eden dinamik bir ortamla etkileşime girer (Ergene ve Durdu, 2017).

Derin öğrenme, birbirini takip eden katmanlarda veriler işlenirken giderek artan şekilde daha kullanışlı gösterimler elde edilebilen makine öğrenmesinin bir alt alanıdır (Chollet, F., 2019:8). Yani derin öğrenme yaklaşımı, verilerin temsillerini öğrenmek için birleştirilmiş çoklu soyutlama yapılarından ve çoklu işleme katmanlarından oluşur (Akbulut ve ark., 2022). Geleneksel makine öğrenimi yaklaşımlarıyla karşılaştırıldığında derin öğrenme modelleri, elle hazırlanmış özellik seçimine gerek kalmadan ham sinyalden karmaşık ve üst düzey özellikleri çıkarabilir ve öğrenebilir (Kang ve ark., 2022). Bu yüzden DL, bir özellik kümesine olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı ve sEMG gibi ham giriş sinyalini doğrudan kullanabildiği için uygulama kolaylığı nedeniyle popülerlik kazanmıştır (Barron ve ark., 2020). Ayrıca bu popülerlik ve son gelişmeler derin öğrenmenin hem işlem süreci hem de doğruluk açısından makine öğrenmesinden daha iyi performans gösterebileceğini kanıtlamıştır. Bu alan yakın zamanda görüntü tanıma, makine çevirisi ve sürücüsüz arabalar gibi çok çeşitli görevlerde inanılmaz derecede iyi performans gösteren akıllı sistemler oluşturmak için kullanılmıştır (Buongiorno ve ark., 2021). Ayrıca bu makine öğrenmesi ve derin öğrenme sağlık sektöründe birçok alanda kullanılmaktadır. Bu teknolojinin potansiyel kullanım alanları arasında tekerlekli sandalye ve otomobil kontrolünün yanı sıra tıbbi teşhis ve rehabilitasyon da yer alıyor (Kansal ve ark., 2023).

Ampute hastalarda makine öğrenmesi ve derin öğrenme, sEMG ve EGG ile alınan sinyallerinden yararlanmak ve istenilen hareketin sınıflandırılmasını elde etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca geleneksel makine öğrenme modelleri (örneğin Destek Vektör Makineleri, Yapay Sinir Ağı, Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu), sEMG sinyalleriyle ölçülen kas aktivasyon modellerinden üst ve alt ekstremitte hareketlerini tanımak için uygulanır (Xie ve ark., 2022).

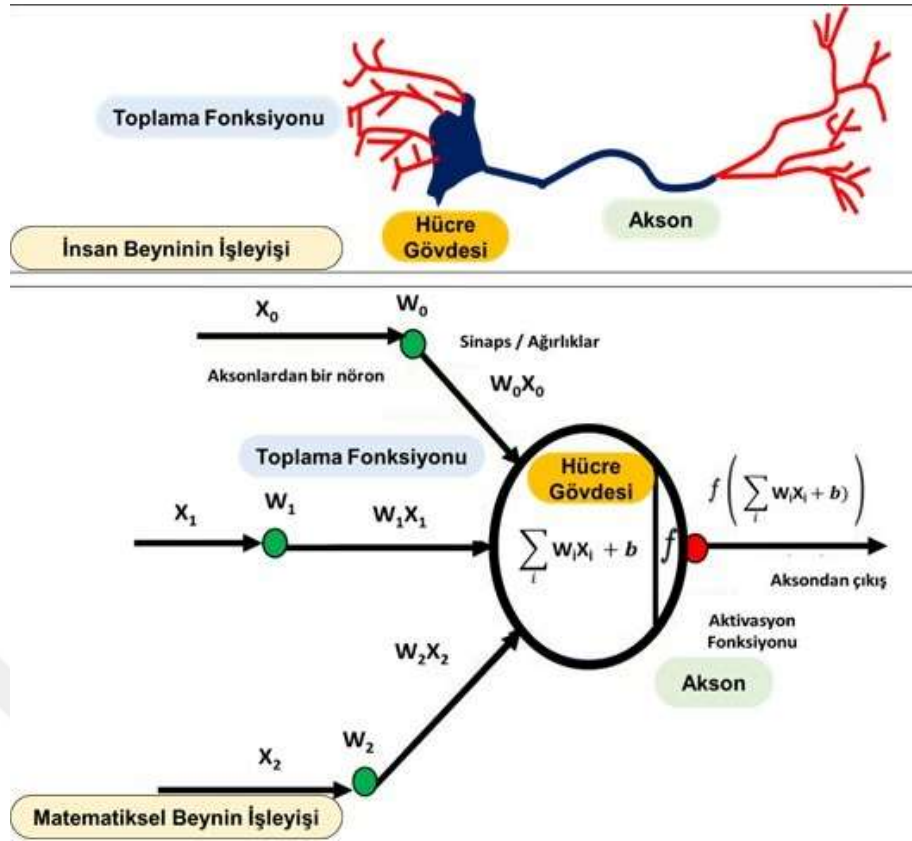
Sonuç olarak Şekil 18’te de görüldüğü gibi makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri ile sEMG ve EGG sinyallerinden alınan bilgiler ilişkilendirilerek miyoelektrik kontrollü protezler gibi dış iskeletlerin hareketlerini oluşturmak için kullanılmaktadır.



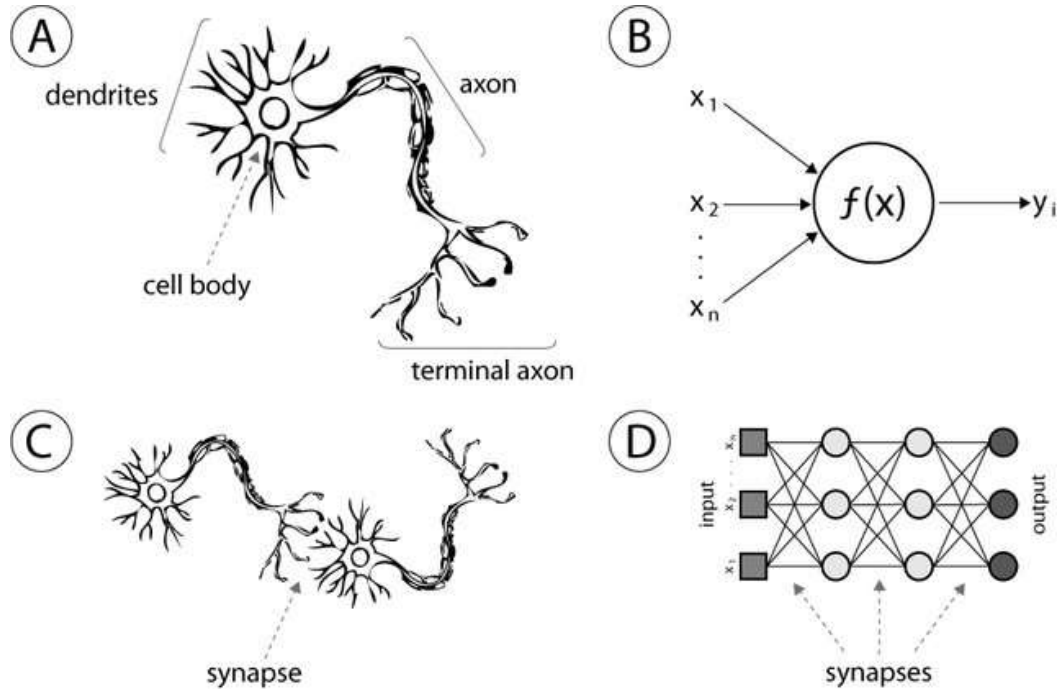
Şekil 18: (A) AI sinir kod çözücüsüne ve sinyal işleme paradigmasına genel bakış. (B) Tekrarlayan sinir ağı (RNN) mimarisine dayalı derin öğrenme yapay zekasının tasarımı (Luu ve ark., 2022).

2.4.3. Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks-ANN) derin öğrenmenin en yaygın şekli olup, teorik olarak herhangi bir işlevi öğrenebilen evrensel bir modelledir ve genellikle gizli katmanlar olarak bilinen yapıdan veri alır (Hornik vd., 1989; Klein & Frana, 2021; Ateş, 2021). Başka bir ifadeyle yapay sinir ağları, insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleridir (Öztemel, 2006:29). Bu sistem programlanması mümkün olmayan ya da programlanması zor olan olaylar için geliştirilmiş bir yapay zeka teknolojisidir. Bu teknoloji insan beyninin fonksiyonel özelliklerine benzer şekilde öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme ve optimizasyon gibi konularda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Öztemel, 2006:29). (Şekil 19 ve Şekil 20).



Şekil 19: Derin öğrenme yöntemlerinden yapay sinir ağının beyinde ve matematiksel düzeyde işleyişi (Ateş, 2021)



Şekil 20: (A) İnsan nöronu; (B) yapay nöron veya gizli birlik; (C) biyolojik sinaps; (D) YSA sinapsları (Suzuki, 2017).

Basit sınıflandırma prosedürlerinden görüntü işleme, sinyal işleme ve analize kadar YSA'lar klinik biyomekanikte standart yöntemler olma yolunda ilerlemektedir (WI Schöllhorn, 2004: 876-898). Ayrıca uçtan uca derin bir sinir ağı, karmaşık gizli özellikleri ham sinyallerden otomatik olarak çıkarabilir (Xie ve ark., 2022).

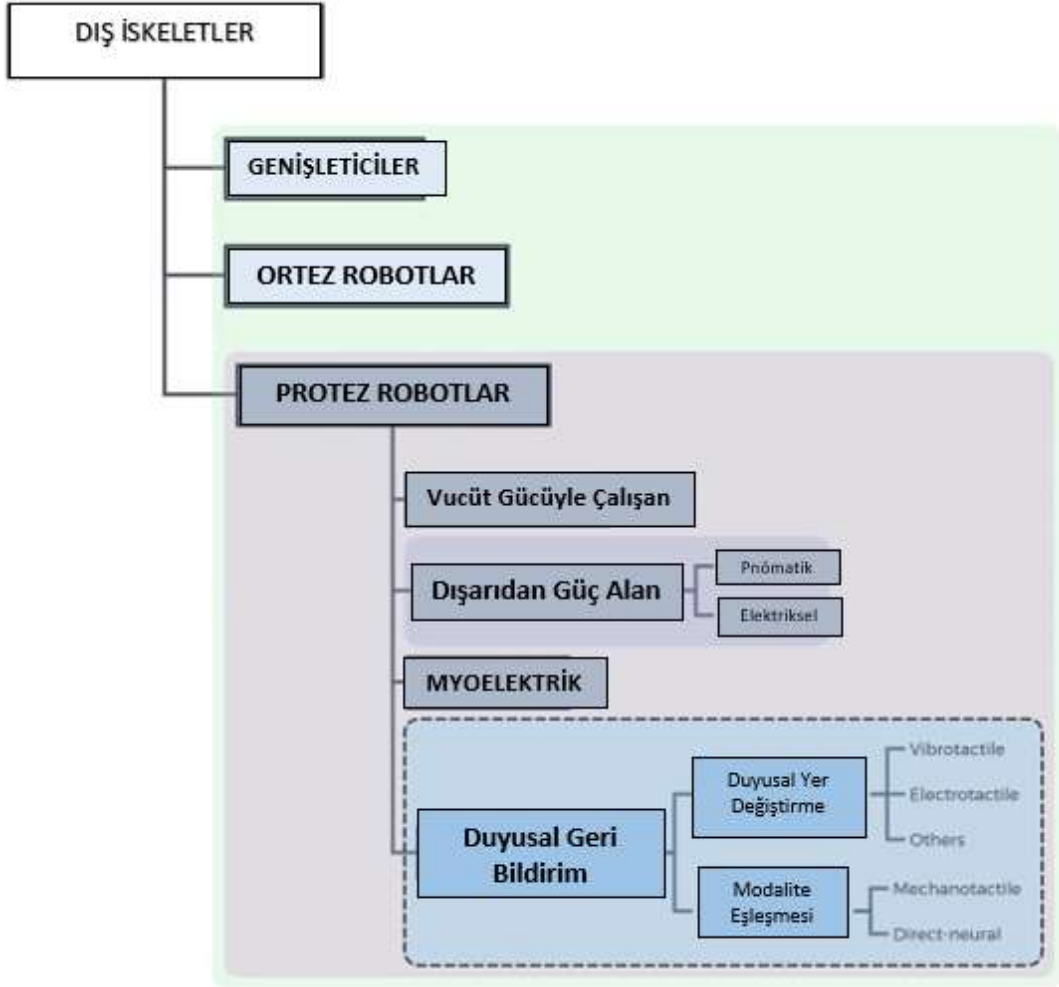
Kısacası YSA'lar, insanın sinir sisteminin çevredeki değişikliklere uyarlanabilir bir şekilde tepki verme yeteneğinden ilham alan doğrusal olmayan sınıflandırıcılardır (Tariq ve ark., 2018).

2.5. Yapay Zeka Tabanlı Dış İskeletler

Dış iskeletin tarihi, motor destekli rehabilitasyon fikrinin Khalili ve Zomlefer tarafından önerildiği 1988 yılına kadar izlenebilmektedir (Tageldeen ve ark., 2016). Dış iskelet, giyilebilir akıllı bir robot cihazıdır (Su ve ark., 2022). Giyilebilir dış iskeletler gibi robot destekli ekipmanlar, insan zekasını ve robot gücünü bütünleştiren robot sistemleridir (Tang ve ark., 2022). Araştırmacılar, ilk EEG tabanlı cihaz kontrollerinin gösterilmesinden bu yana robotik kolların, protezlerin, imleçlerin, tekerlekli sandalyelerin ve diğer cihazların daha karmaşık kontrolü için çeşitli elektroensefalografik beyin sinyallerini kullanmışlardır (Kansal ve ark., 2023).

Giyilebilir dış iskelet cihazları son yıllarda bilimsel araştırmalarda, endüstriyel üretimde ve günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan tıbbi rehabilitasyon, destekli hareket ve askeri alanlarda yaygın bir gelişme göstermektedir (Tang ve ark., 2022). Tıbbi rehabilitasyon alanında kullanılan giyilebilir dış iskeletler rehabilitasyon eğitimi alan hastalara yardımcı cihazlar olarak ya da ampute hastalarda eksik uzuvun fonksiyonunu yerine getirmek, GYA desteği sağlamak için kullanılır. Robotik dış iskelet modelleri ve stimülasyon yazılım paketleri, hareket analizini, hareket tahminini, ileri ve ters dinamiklerin yanı sıra kinematik hesaplamaları kolaylaştırmak için kullanılır (Noei ve Lakany, 2022).

Dış iskeletler görevlerine göre üç sınıfa ayrılırlar. Bu sınıflandırmanın şematik gösterimi Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21: Ampute'ler için giyilebilir cihaz teknolojileri (Huaroto ve ark., 2020: 205-234).

Son olarak giyilebilir dış iskeletler teknolojinin ilerlemesiyle birlikte görev aralıklarını, serbestlik derecelerini (DOF'ler) ve kullanıcıyla olan etkileşimlerini artırarak gelişmeye başlamıştır (Huaroto ve ark., 2020: 205-234). Fakat giyilebilir dış iskeletlerin geçmişten bu güne son durumuna bakıldığında teknolojinin gelişmesine rağmen hala olgunluk çağında olduğunu söyleyebiliriz.

2.6. Ampütasyon Rehabilitasyonu

Rehabilitasyon, engelli vakaların çevreyle etkileşimde bulunurken uygun aktif işlevleri yerine getirmelerine ve sürdürmelerine yardımcı olmayı amaçlayan bir dizi önlemdir (Muhammed ve Jammalamadaka, 2017). Ek olarak rehabilitasyon, klinik tedaviyle çözülemeyen eksikliklerin giderilmesine yönelik tamamlayıcı bir önlem olarak hizmet eder ve etkilenen bireye tedavi yolculuğunda yardımcı olur (Kansal ve ark., 2023).

Ampütasyonlu kişinin rehabilitasyonu, hastaların protezlerini tanımlarına, protez kullanımına eşlik eden komplikasyonların üstesinden gelmelerine, günlük yaşamlarına ve işlerine dönmelerine yardımcı olacak tüm müdahaleleri içermektedir (Ülger ve ark., 2018). Rehabilitasyon prosedürü öncelikle amputenin sağlığını ve fonksiyonel kapasitelerini amputasyonu takiben iyileştirmeye ve ampute için kişiselleştirilmiş bir tedavi planı geliştirmeye odaklanır (Nagarajapandian ve ark., 2023) ve hastanın rehabilitasyon sonrasında beklentileri de öğrenilerek rehabilitasyonun aşamaları hazırlanır. Ampute hasta rehabilitasyonun aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Amputasyon öncesi rehabilitasyon
2. Akut cerrahi sonrası rehabilitasyonu
3. Protez öncesi rehabilitasyon
4. Protez eğitimi ve rehabilitasyonu
5. Mesleki rehabilitasyon ve takip

Yukarıdaki her rehabilitasyon aşamasının kendine özgü değerlendirme yöntemleri, tedavi ve rehabilitasyon amaçları ve tedavi yöntemleri vardır. Ampütasyonlu bireylerde hareketin daha iyi anlaşılması, yürüyüş rehabilitasyonu ve protez teknolojisinin geliştirilmesi klinik karar vermede yardımcı olmak için vazgeçilmez bir ön koşuldur (Ichimura ve ark., 2022). Bu yüzden yapay zekanın da gelişmesiyle protez ve robot teknolojisi gelişmekte ve engelli hastalar için umut kaynağı olmaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Araştırma Yöntemi

Bu araştırma da literatür taraması metotlarından olan nitel meta-analiz yöntemi yani meta sentez kullanılmıştır. Nitel meta analiz, bir konu ile ilgili tüm çalışmaların kapsamlı şekilde toplanıp değerlendirme ve analizden sonra çıkan verilerden genel sonuca varmak için kullanılan yöntemdir. Yani meta-sentez, benzer bir konudaki farklı nitel çalışmaların bulgularını karşılaştırıp bütünleştirerek teorik bir model keşfetmek veya geliştirmek amacıyla kullanılan, nispeten yeni bir nitel yöntemdir (Güneş ve Erdem, 2022). İlk etapta sağlık bilimlerinde kullanılan meta-analiz yöntemi, bir ilacın etkisini incelenen, bir etkiye karşı bölgelerdeki ölüm oranlarını inceleme gibi amaçlarla kullanılmış, giderek yaygınlaşarak diğer bilim dallarında da kullanılmaya başlanmıştır (Dinçer, 2014). Bu çalışmada ise yapay zeka teknolojilerinden beyin bilgisayar arayüzü, makine öğrenimi, derin öğrenme ve yapay sinir ağlarının ampute hasta rehabilitasyonunda etkisinin nitel meta analizini yapmıştır.

3.2. Nitel Meta Analizde Uygulama Adımları

Meta-sentez çatı kavram olarak kullanılan, içerisinde birçok farklı yaklaşımı barındıran bir yöntemdir. Dolayısıyla meta-sentez yönteminin içeriği ve uygulama aşamaları ile ilgili net bir ortak çerçeveden söz etmek zordur (Güneş ve Erdem, 2022). Polat ve Ay (2016) meta sentez işlem adımlarını şu şekilde ifade etmiştir:

Adım 1: Araştırma sorularının belirlenmesi.

Adım 2: Çalışmanın konusuna uygun anahtar kelimeler belirlenip alanyazın taramasının yapılması.

Adım 3: Kaynakların sağlanması, gözden geçirilmesi, kimliklendirilmesi ve değerlendirilmesi.

Adım 4: Araştırmanın dâhil edilme ve hariç tutulma ölçütlerinin belirlenmesi ve değerlendirmeye alınacak çalışmaların seçilmesi.

Adım 5: Seçilen çalışmaların çözümlenmesi ile ortak temalar ve bu temalara ait alt temaların oluşturulması, benzer ve farklı yönlerinin ortaya konulması.

Adım 6: Temalar çerçevesinde elde edilen bulguların sentezlenerek çıkarımların yapılması.

Adım 7: Sürecin ve bulguların ayrıntılı bir şekilde raporlaştırılması.

Şekil 22’da verilen nitel meta analiz uygulamasının adımları kısaca gösterilmiştir.



Şekil 22: Meta-analiz uygulamasının aşamaları (Polat ve Ay, 2016).

3.2.1. Araştırma probleminin tanımlanması ve konunun belirlenmesi

Bütün bilimsel araştırmalarda olduğu gibi nitel meta analiz yöntemiyle yapılan araştırmalarda da konu belirleme kritik noktalardan biridir ve çalışmaların ilk adımıdır. Meta-sentezin amacı, mevcut bilgi durumuna bilimsel bir katkı sağlamak, bir araştırma boşluğunu doldurmak ve olgunun kavramsal modellerini tasarlamaktır (Chrastina, 2018). Bu yüzden bu araştırma da literatürde bulunmayan ve bilimsel katkı sağlamak amacıyla ampute hastalar seçilmiştir ve bu hastaların rehabilitasyonunda kullanılan BCI yapay zeka teknolojisinin etkisini ayrıntılı araştırarak nitel meta analiz yapılmıştır.

3.2.2. Verilerin toplanması

Veri toplamada kullanılan anahtar sözcükler

Çalışma konusu belirlendikten sonra konu ile ilgili anahtar kelimeler belirlenmiştir. Belirlenen anahtar kelimeler ‘ampute hasta’, ‘ampute hasta rehabilitasyonu’, ‘yapay zeka’, ‘beyin bilgisayar arayüzü’, ‘makine öğrenimi’, ‘derin öğrenme’ ve ‘ yapay sinir ağı’ kelimeleri kullanılmıştır. Bu anahtar kelimeler kullanılarak literatür taraması yapılmıştır.

Veri toplamada kullanılan veri tabanları

Literatür taraması IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Scencedirect, PudMed, Scopus veri tabanların da yapılmıştır. Ayrıca bu araştırma da 2013-2023 yılları arasındaki makaleler incelenmiştir. Literatür taraması sonucu dahil edilme kriterlerini taşıyan 20 makaleye ulaşılmıştır.

Araştırmaların dahil edilme/ hariç tutulma kriterleri

Makalelerin dahil edilme ve dışlanma kriterleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Araştırmaya dahil edilme ve hariç tutulma kriterleri.

	Dahil Edilme Kriterleri	Hariç Tutulma Kriterleri
Kriter 1	2013- 2023 yılları arasında yayınlanmış olması	2013-2023 yılları arasında yayınlanmamış olması
Kriter 2	IEEE, Sciencedirect, PudMed, Scopus veri tabanlarından birinde yayınlanmış olması	IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Sciencedirect, PudMed, Scopus veri tabanlarından birinde yayınlanmamış olması
Kriter 3	Araştırmada hareket açığa çıkaracak dış iskelet olması	Araştırmada yapay zeka destekli dış iskeletin kullanılmamış olması
Kriter 4	Yapılan araştırmanın denek üzerinde denenmiş olması	Araştırmada denek üzerinde deney yapılmamış olması
Kriter 5	Araştırmada yapay zeka teknolojilerinden beyin bilgisayar arayüzü, beyin makine arayüzü, makine öğrenimi, derin öğrenme, yapay sinir ağı kullanılmış olması	

3.2.3. Verilerin hazırlanması ve analizi

Meta-sentez çalışmalarında anlamlı ve geçerli meta-sentezlere ulaşmak amacıyla çalışma amacına uygun en az 10-12 araştırmanın çalışmaya dâhil edilmesi önerilmektedir (Poggenpoel ve Myburgh, 2008: 66). Araştırma için de dahil edilme ölçütlerini sağlayan 20 makalenin orijinal metinleri araştırmacı tarafından okunarak araştırmalar hakkında detaylı bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen bu bilgilerin meta analizi için içerik analizi tekniğı ve betimsel analiz tekniğı kullanılmıştır. Bu analiz şekli ampute hasta

rehabilitasyonun da kullanılan yapay zeka teknolojilerinden BCI, derin öğrenme, makine öğrenimi, yapay sinir ağları kullanılarak yapılmış nitel ve nicel araştırmaların sonuçları tanınmış ve değerlendirilmiştir. Belirlenen çalışmalar yayımlandıkları yıllara, vücut segmentine, DoF sayısına, kullanılan denek ve cihazın uygulamasına göre sonuçlar incelenmiş ve analiz edilmiştir. Ve bu analizden elde edilen bulgular tablolar ile sunulmuştur.

3.2.4. Araştırmaların kodlaması

Araştırmaya dahil edilen 20 makale analiz sürecine hazırlamak için çalışmaların betimsel özellikleriyle tablo oluşturulmuştur (Tablo 3.2). Bu tabloda dahil edilme ölçütlerini sağlayan makalelerin kodu, adı, yazarı, yayın yeri, yayın yılı yer almaktadır. Bu araştırmada bu tablo meta analiz süresince kullanılacaktır.

3.2.5. Verilerin geçerliliği ve güvenilirliği

Nitel araştırmalarda verilerin geçerliliği ve güvenilirliği, araştırmadan çıkan sonuçlar kadar önemlidir. Bu yüzden nitel meta analiz çalışmasının geçerliliği ve güvenilirliği için araştırmacının amacı net olarak belirtilmeli, çalışma için dahil edilme kriterleri açıkça belirtilmeli ayrıca çalışmaların yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmalıdır. Bondas ve Hall (2007) verilerin geçerlilik kriterlerini şu şekilde özetlemiştir;

- Rapor ve sentezlenmiş maddeler arasındaki ilişkiyi ve uyumu ortaya koymak için kullanıyor mu?
- Aşamalı bir problem, sonuçları nasıl etkiliyor?
- Meta- sentez hangi amaçlar doğrultusunda gerçekleştiriliyor?
- Araştırma soruları açıkça belirtilmiş mi?

Bu çalışmada araştırma soruları, araştırma amacı, veri toplama ve analiz süreci açık bir şekilde ifade edilmiştir. Ayrıca araştırmaya dahil edilen bütün araştırmalar tablo şeklinde sunularak araştırmacının geçerliliği ve güvenilirliği artırılmaya çalışılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar

Kodu	Adı	Yazarları	Yayın Yeri	Yayın Yılı
M1	FaNeuRobot: NeuCube Spiking Sinir Ağı Mimarisini ve Sonlu Otomata Teorisini Kullanan Robot ve Protez Kontrolüne Yönelik Bir Çerçeve	Kaushalya Kumarasinghe, Mahonri Owen, Denise Taylor, Nikola Kasabov, Chi Kiti	2018 IEEE Uluslararası Robotik ve Otomasyon Konferansı (ICRA)	2018
M2	Transtibial Amputeler İçin Elektroensefalografiye Dayalı Beyin Bilgisayar Arayüzü Komutlarına Sahip Ayak Bileği Protezi	Muhammed Yasin, Ahmed Arifin, Muhammed Hilman Fatoni	2022 Uluslararası Akıllı Teknoloji ve Uygulamaları Semineri (ISITIA)	2022
M3	Elektroensefalografik sinyallerle kontrol edilen görünür dokunsal duyuya sahip, düşük maliyetli bir robotik el protezi	Diego Ronaldo Cutipa-Puma, Cristian Giovanni Coaguila-Quispe, Pablo Raul Yanyachi	DonanımX	2023
M4	Gelişmiş Üst Ekstremit Motor Görüntüsü Kod Çözme için Sağlam Çok Kanallı EEG Sinyalleri Ön İşleme Yöntemi	Mojisola Grace Asogbon, Oluwarotimi Williams Samuel, Xiangxin Li, Naifu Jiang, Naifu Jiang, Oluwagbenga Paul Idowu, Yanbing Jiang... Guanglin Li	2020 IEEE Uluslararası Mekatronik ve Otomasyon Konferansı (ICMA)	2020
M5	Gelişmiş ConvNet-DL'nin Motor Görüntü Karakterizasyonu için Düşük Dereceli Uzay-zaman Tabanlı EEG Çoklu Yapı İptali Yöntemi	Mojisola Grace Asogbon, Oluwarotimi Williams Samuel, Xiangxin Li, Naifu Jiang, Naifu Jiang, Oluwagbenga Paul Idowu, Yanbing Jiang... Guanglin Li	2021 43. Yıllık Uluslararası IEEE Mühendislik ve Biyoloji Topluluğu Konferansı (EMBC)	2021

Tablo 3: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar (devam)

M6	ICA-EEG kullanarak biyonik kolun kontrolü	G Gayathri, Ganesha Udupa, GJ Nair	2017 Uluslararası Akıllı Hesaplama, Enstrümantasyon ve Kontrol Teknolojileri Konferansı (ICICICT)	2017
M7	Elektroensefalogram Tabanlı Beyin-Bilgisayar Arayüzü ve Alt Ekstremitte Protez Kontrolü: Bir Vaka Çalışması	Douglas P.Murphy, Ou Bai, Ashraf S. Gorgey, John Fox, William T. Lovegreen, Brian W. Burkhardt... Ding-Yu Fei	Ön. Neurol.	2017
M8	Derin öğrenmeye dayalı parmak kontrolüne sahip, taşınabilir, bağımsız bir nöroprotez el	An Tuan Nguyen, Markus W Drealan, Diu Khue Luu, Ming Jiang, Jian Xu, Jonathan Cheng... Zhi Yang	J Sinir Müh.	2021
M9	Alt ekstremitte nöroprotezlerini hedef alan beyin-bilgisayar arayüzleri için veri odaklı bir makine öğrenimi yaklaşımı	Arnau Dillen, Elke Lathouwers, Aleksandar Miladinoviç, Uros Marusiç, Fakhreddine Ghaffari, Olivier Romain... Kevin De Pauw	Ön. Himm. Neurosci	2022
M10	Transhumeral Protezin EEG Sinyalleriyle Kontrolüne Doğru	DSV Bandara, Jumpei Arata, Kazuo Kiguchi	Biyomühendislik	2018
M11	Yapay Zeka, Sinir Arayüzü Aracılığıyla Protezlerin Gerçek Zamanlı ve Sezgisel Kontrolünü Sağlıyor	Diu Khue Luu, Anh Tuan Nguyen, Ming Jiang, Markus W. Drealan, Jian Xu, Tong Wu... Zhi Yang	Biyomedikal Mühendisliğinde IEEE İşlemleri	2022

Tablo 4: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar (devam)

M12	DL-AMPUT-EEG: Üst ekstremite amputelerinin derin öğrenmeye dayalı teknikler kullanılarak rehabilitasyonuna yönelik düşük maliyetli protezin tasarımı ve geliştirilmesi	Sachin Kansal, Dhruv Garg, Aditya Upadhyay, Snehil Mittal, Guneet Singh Talwar	Yapay Zekanın Mühendislik Uygulamaları	2023
M13	Çevrimiçi üst ekstremite protez kontrolüne yönelik el hareketi tanıma için biyosinyal tabanlı aktarılabılır dikkat Bi-ConvGRU derin ağı	Baao Xie, James Meng, Baihua Li, Andy Harland	Biyotıpta Bilgisayar Yöntemleri ve Programları	2022
M14	Artımlı makine öğrenimi tabanlı miyokontrol kullanılarak üst ekstremite amputesinin eşzamanlı değerlendirmesi ve eğitimi: tek vakalı deneysel tasarım	Markus Nowak, Raoul M. Bongers, Corry K. van der Sluis, Alin Albu-Schäffer, Claudio Castellini	NöroMühendislik ve Rehabilitasyon Dergisi	2023
M15	Giyilebilir Sensörler ve Makine Öğrenmesi Kullanılarak Üst Ekstremitte Protez Cihazlarında Fonksiyonel Kullanımın Ölçülmesi	Elaine M. Bochniewicz, Geoff Emmer, Alexander W.Dromerick, Jessica Barth, Peter S.Lum	Sensörler	2023
M16	Transfemoral amputeler için derin sinir ağını kullanan güçlendirilmiş protez bacağın kusursuz ve sezgisel kontrolü	Minjae Kim, Ann M. Simon, Levi J. Hargrove	Giyilebilir Teknolojiler	2022
M17	Protez El ile Etkileşim için Hareketlerin ve Kuvvet Seviyelerinin Eşzamanlı sEMG Tanıma	Bin Fang, Chengyin Wang, Fuchun Güneş, Ziming Chen, Jianhua Shan, Huaping Liu... Wenyuan Liang	Sinir Sistemleri ve Rehabilitasyon Mühendisliğinde IEEE İşlemleri	2022

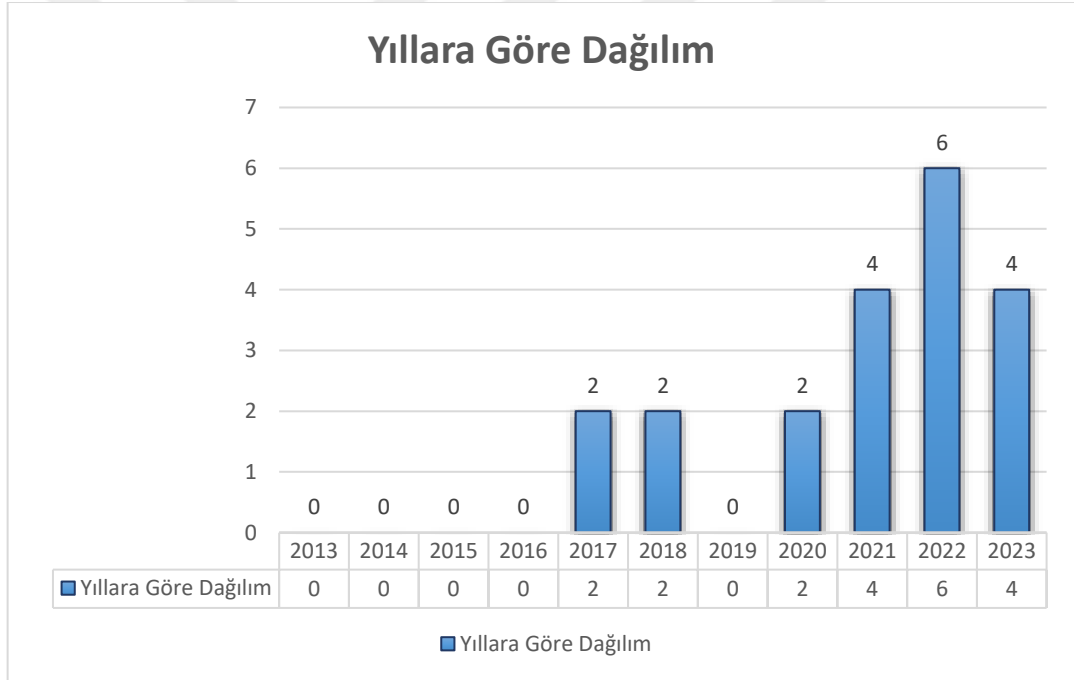
Tablo 5: Nitel meta analize kullanılan araştırmalar (devam)

M18	Evrişimsel Sinir Ağı Tabanlı Elektroensefalogram Kontrollü Robotik Kol	Zheng You Lim, Neo Yong Quan	2021 IEEE Uluslararası Otomatik Kontrol ve Akıllı Sistemler Konferansı (I2CACIS)	2021
M19	Ampute'ler için sezgisel protez kontrolüne yönelik biyoelektrik bir sinir arayüzü	Anh Tuan Nguyen, Jian Xu, Ming Jiang, Diu Khue Luu, Tong Wu, Wing-kin Tam... Qi Zhao	Sinir Mühendisliği Dergisi	2020
M20	Makine öğrenimi kontrollü üst ekstremite protezleri için kullanıcı eğitimi: ciddi bir oyun yaklaşımı	Morten B.Kristoffersen, Andreas W.Franzke, Raoul M. Bongers, Michael Değnek, Alessio Murgia, Corry K. van der Sluis	NöroMühendislik ve Rehabilitasyon Dergisi	2021

4. BULGULAR

Araştırmanın bu bölümünde araştırmaya dahil olma kriterlerini taşıyan gerekli alt kategorilere ayrılmış, kodlamaları yapılmış, karşılaştırmaları yapılarak nitel meta analizi yapılmıştır. Ve sonuçlar tablolar halinde bu bölümde sunulmuştur. Karşılaştırma, belirlenen çalışmaların yayımlandıkları yıllara, kullanılan yapay zeka teknolojisine, vücut segmentine, DoF sayısına, kullanılan deneğe göre yapılmıştır. Bu bölümün en sonunda ise karşılaştırılan bütün veriler ve araştırmaların sonuçları tek bir tabloda gösterilmiştir (Tablo 6).

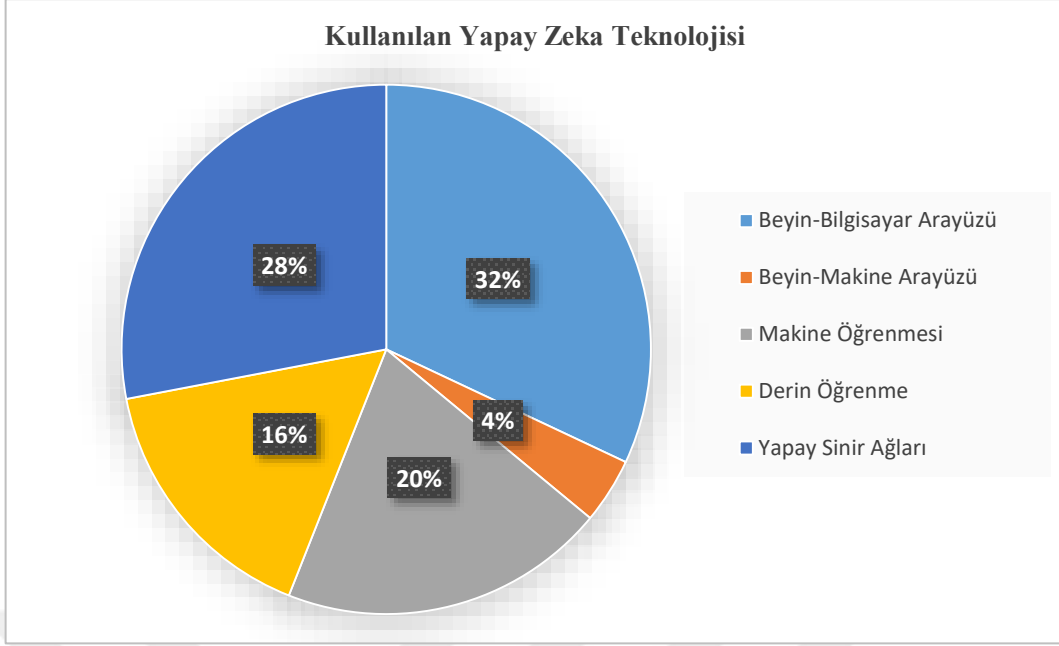
Şekil 23’de incelenen makalelerin yayımlandıkları yıllara göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 23: Araştırmada kullanılan makalelerin yıllara göre dağılımı

Şekil 23 incelendiğinde 2022’de 6 makale ile en fazla çalışmanın olduğu görülmektedir. 2013, 2014, 2015, 2016 ve 2019 yıllarında ise nitel meta analize dahil olma kriterlerini sağlayan çalışmalara ulaşamadığı görülmektedir.

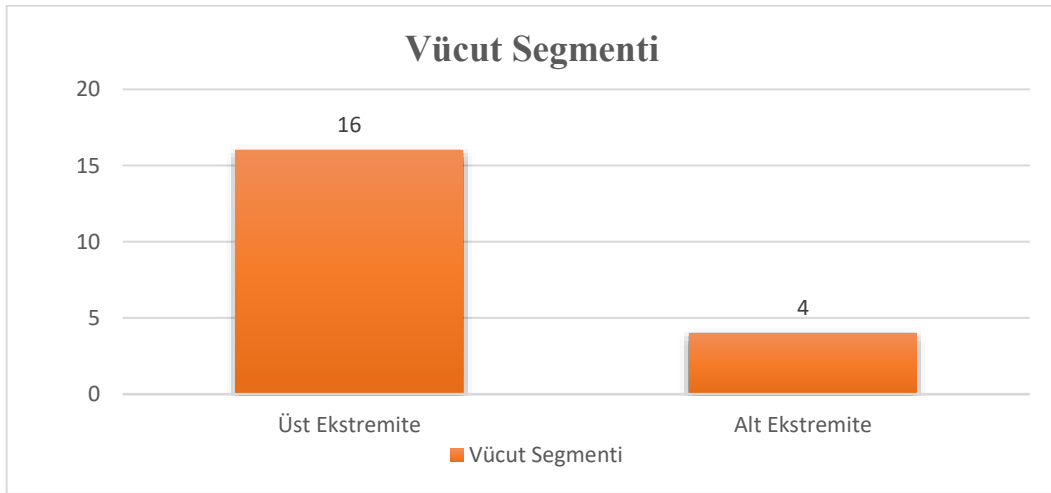
Şekil 23’te araştırmaya dahil edilen makalelerin kullandıkları yapay zeka teknolojisine göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 14: Araştırmada kullanılan makalelerde kullanılan yapay zeka teknolojisinin dağılımı.

Şekil 24 incelendiğinde %32 oranla beyin-bilgisayar arayüzü ampute hasta rehabilitasyonunda en çok kullanılan yapay zeka teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha sonra sırasıyla %28 oranla yapay sinir ağları, %20 oranla makine öğrenmesi, %16 oranla derin öğrenme ve en son olarak %4 oranla beyin-makine öğrenmesi gelmektedir.

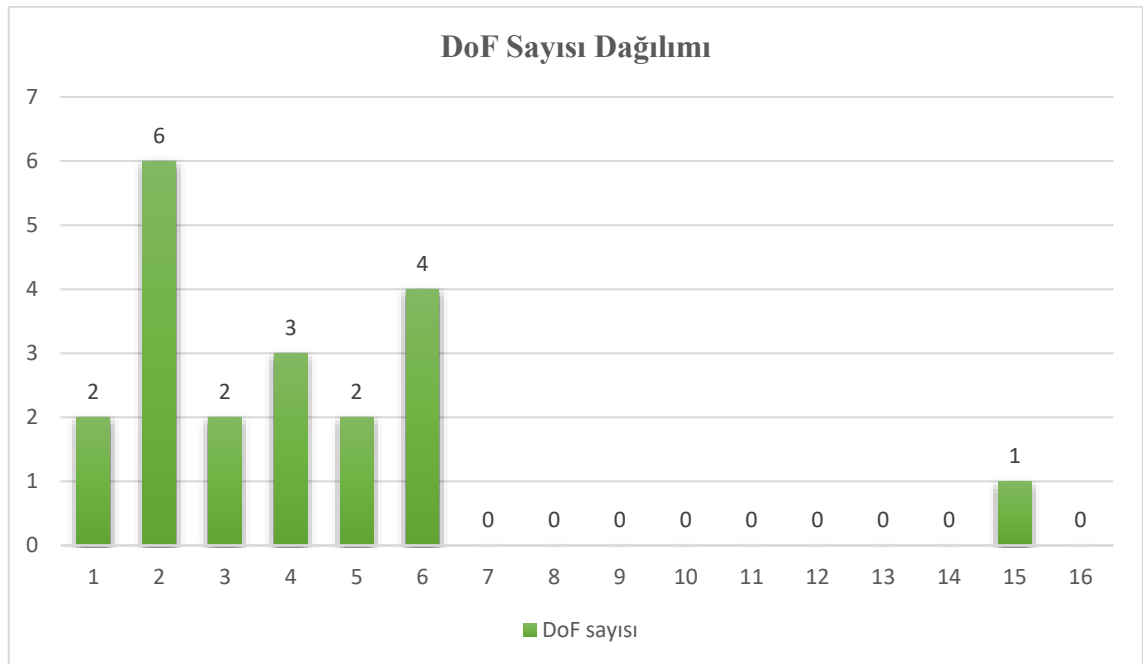
Şekil 25'te nitel meta analize dahil edilen araştırmaların hangi vücut segmentinde yapıldığını göstermektedir.



Şekil 25: Nitel meta analize dahil edilen araştırmaların araştırılan vücut segmentine göre dağılımı.

Şekil 25'te görüldüğü gibi bu araştırmada kullanılan makalelerde üst ekstremitelere alt ekstremitelere göre 4 kat daha fazla araştırmalarda tercih edilmektedir. Bunun nedeni merkezi sinir sisteminin bazı alanları EGG sinyallerini almak için daha elverişlidir. Örneğin beyindeki primer motor kortekste eli kontrol eden alanın yeri kabaca başın yan tarafıdır ama alt ekstremitenin herhangi bir yerinin kontrolü beyin kabuğunda spesifik olarak bulması daha zordur. Bu yüzden araştırmalarda daha çok üst ekstremitelere tercih edilmektedir.

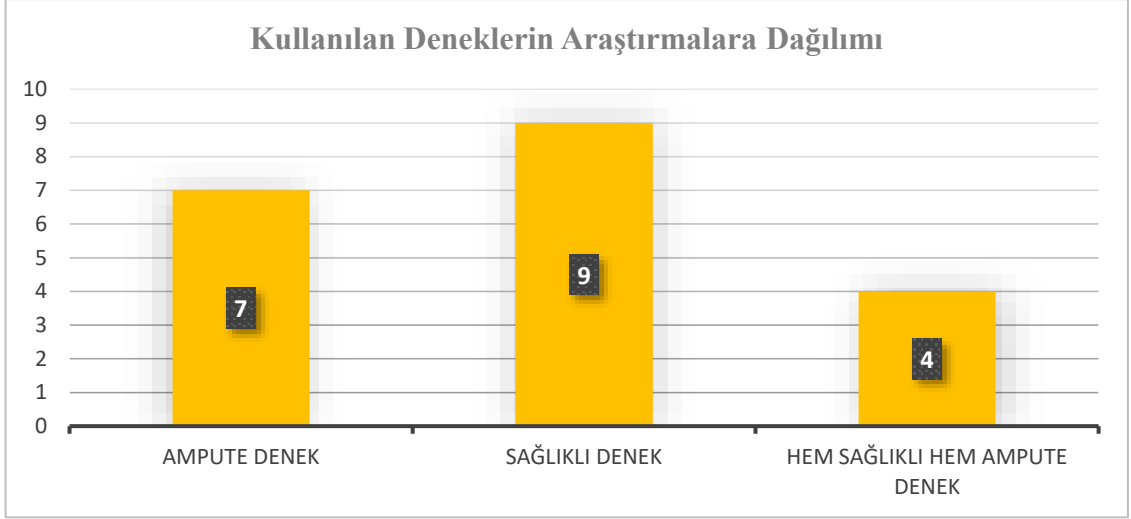
Şekil 26'te bu araştırmada tercih edilen makalelerde dış iskeletlerin DoF sayılarının dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 26: Araştırmaya dahil edilen makalelerdeki dış iskeletlerin DoF sayılarının dağılımı.

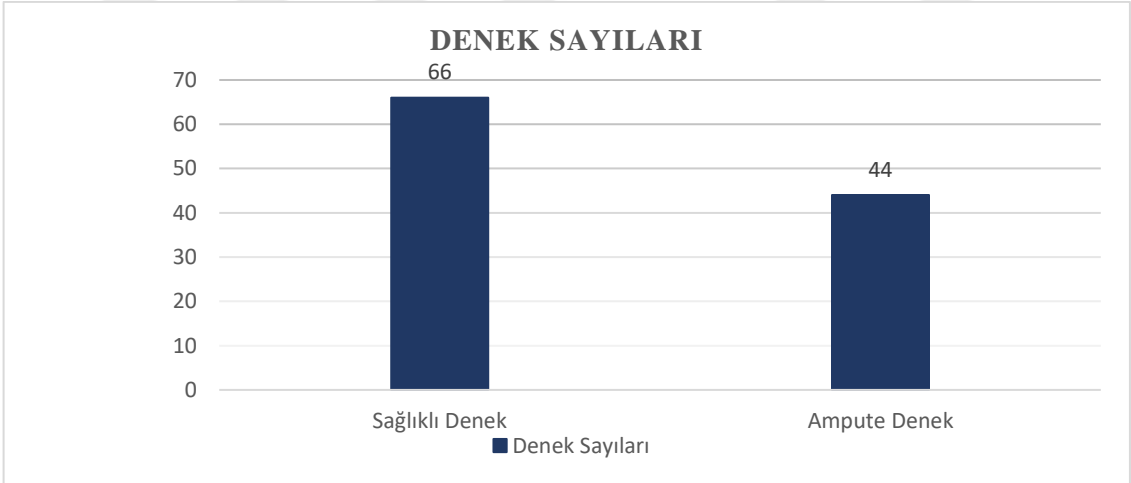
Şekil 26'te incelendiğinde araştırmaya dahil edilen araştırmalarda kullanılan dış iskeletlerin DoF sayılarının çoğunlukla 6 olduğu ve en fazla DoF derecesinin 15 olduğu görülmektedir. DoF sayıları arasındaki farkların olması kullanılan protezin üst ya da alt ekstremitelere olmasıyla değişebilir. Bunun nedeni üst ekstremitelere de ve alt ekstremitelere de bulunan eklemlerin görevleri ve hareketlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bir protez yapacağı göreve göre tek bir DoF derecesine de sahip olabilir 15 DoF derecesine de sahip olabilir.

Şekil 27'te kullanılan deneklerin araştırmalara dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 27: Kullanılan deneklerin araştırmalara dağılımı.

Şekil 27 incelendiğinde sağlıklı denekler araştırmalarda daha çok kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca M9, M13, M15, M17 araştırmaları hem sağlıklı hem de ampute denek kullanarak karşılaştırma yapmıştır. Araştırmaların bu şekilde karşılaştırma yaparak yapay zeka teknolojisini karşılaştırması araştırmacının daha sağlıklı sonuç vermesini sağlamaktadır.



Şekil 28: Araştırmalarda kullanılan deneklerin sayıları

Şekil 28 incelendiğinde araştırmalarda toplam 100 denek kullanıldığı görülmektedir. 66 sağlıklı denek, 44 tane ise ampute denek üzerinde yapay zeka teknolojisi test edilmiştir. Kullanılan bu teknolojilerin ampute hasta rehabilitasyonu üzerinde etkisini tam olarak anlamak için ampute hasta üzerinde daha çok araştırma yapılmalıdır.

Tablo 6: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi.

Kod	Yayımlandığı Yıl	Kullanılan Yapay Zeka Teknolojisi	Vücut Segmenti	DoF Sayısı	Denek	Sonuç
M1	2018	Beyin-Makine Arayüzü, Yapay Sinir Ağı	Üst Ekstremitel (el)	4	2 Sağlıklı Denek	Bu araştırma da non-invaziv BMI ile başparmağın adaptif kavraması ve doğru konumlandırılması, şekli ve yönü ne olursa olsun birçok nesnenin güvenli bir şekilde kavranmasını sağlamıştır (Kumarasinghe ve ark., 2018).
M2	2022	Beyin-Bilgisayar Arayüzü	Alt Ekstremitel (ayak)	1	2 Sağlıklı Denek	Bu araştırma da rehabilitasyon süresince denekler üzerinde yapılan teste deneklerden denek 1 için motor uygulama modunda %33,33 ve denek 2 için motor görüntüleme modunda %38,89 başarı puanları almışlardır. Buda kullanılan sistemin başarılı olduğunu göstermektedir (Yasin ve ark., 2022).
M3	2023	Makine Öğrenimi	Üst Ekstremitel (el)	4	1 Sağlıklı Denek	Zero Arm protezinin performans testleri umut verici sonuçlar verdi. Protezin çeşitli görevlerde ortalama %86,67'lik bir başarı oranı göstermesi, güvenilirliğini ve etkinliğini gösterdi. Ayrıca farklı nesne ve şekil türlerini sınıflandırmak için makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak bu başarıyı artırmıştır (Puma ve ark., 2023).
M4	2020	Beyin-Bilgisayar Arayüzü	Üst Ekstremitel	2	4 Transhumeral Ampute Denek	Önerilen yöntemin genel performansı, çok sınıflı MI görevlerinin, birkaç kanaldan gelen yapaylık içermeyen EEG sinyalleri kullanılarak güvenilir ve doğru bir şekilde karakterize edilebileceğini göstermiştir. Dolayısıyla önerilen yöntemler potansiyel bir kontrol yöntemi olabilir (Asogbon ve ark., 2020).

Tablo 7: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).

M5	2021	Beyin-Bilgisayar Arayüzü	Üst Ekstremitte	2	4 Transhumeral Ampute Denek	Bu çalışmanın sonucu, dirsek üstü amputasyonu olan hastalar için çoklu serbestlik dereceli rehabilitasyon cihazları için EEG paterni tanımaya dayalı etkili ve sağlam kontrol yöntemlerinin tasarımına bilgi sağlamaya yardımcı olabilir (Asogbon ve ark., 2021).
M6	2017	Beyin-Bilgisayar Arayüzü	Üst Ekstremitte	5	15 Sağlıklı Denek	Sistem, nörolojik engelli bireylerin günlük aktivitelerini gerçekleştirmeleri ve aynı zamanda mesleki ve teknik becerilerini geliştirmeleri için uygun bir araçtır (Gayathri ve ark., 2017).
M7	2017	Beyin-Bilgisayar Arayüzü	Alt Ekstremitte	2	Transfemoral Ampute 1 Denek	Deneğin performansı, yüzey saçlı deri EEG elektrotları kullanılarak alt ekstremitte protezinin BCI kontrolünün yapılabilirliğini desteklemektedir (Murphy ve ark., 2017).
M8	2021	Derin Öğrenme	Üst Ekstremitte (el)	5	1 Transradial Ampute	Ön deney sonuçları, sistemin çeşitli laboratuvar ve gerçek dünya ortamlarında bireysel parmak hareketlerinin sağlam, yüksek doğrulukta (%95-%99) ve düşük gecikmeli (50-120 ms) kontrolünü sağlama yeteneklerini göstermektedir. Önerilen sistem, gömülü yapay zekaya sahip yeni bir giyilebilir biyomedikal cihaz sınıfının temelini oluşturan klinik uygulamalarda derin sinir ağlarının konuşlandırılmasına öncülük etmeye yardımcı olur (Nguyen ve ark., 2021).
M9	2022	Beyin-Bilgisayar Arayüzü, Makine Öğrenimi	Alt Ekstremitte	2	8 Transfemoral Amputasyonlu Denek, 8 Sağlıklı Denek	Sağlıklı kişiler ile alt ekstremitte ampütasyonu olan kişiler arasında bu hareketlerin kod çözme performansı açısından anlamlı bir fark yoktur ($p = 0,99$). Bu sonuçlar alt ekstremitte protez kontrolü için BCI kullanımının uygulanabilirliğini göstermektedir ve kod çözme performansının iki grup arasındaki nöroplastisitenin neden olduğu farklardan etkilenmediğini göstermektedir (Dillen ve ark., 2022).

Tablo 8: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).

M10	2018	Beyin-Bilgisayar Arayüzü, Yapay Sinir Ağları	Üst Ekstremitte	2	5 Sağlıklı Denek	Sonuçlar, EEG sinyallerini kullanarak bir transhumeral protezin çoklu DoF hareketini kontrol etmek için önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır (Bandara ve ark., 2018).
M11	2022	Derin Öğrenme, Yapay Sinir Ağı	Üst Ekstremitte (el)	6	3 Transradial Ampute Denek	AI ajanının, ampute kişilerin protez elini bireysel parmak ve bilek hareketleriyle %97-98'e varan doğrulukla sezgisel olarak kontrol etmesini sağlamaktadır (Luu ve ark., 2022).
M12	2023	Derin Öğrenme, Yapay Sinir Ağı, Beyin- Bilgisayar Arayüzü	Üst Ekstremitte	3	1 Sağlıklı Denek	Bulgularımız, sinir ağlarının , özellik çıkarma ve öngörüü tek bir işlem hattında birleştiren benzersiz bir yaklaşım kullandığını gösteriyor. Ayrıca yaklaşımımızın düşük maliyetli olmasına rağmen son derece doğru ve işlevsel olduğu sonucuna varmaktadır (Kansal ve ark., 2023).
M13	2022	Derin Öğrenme	Üst Ekstremitte	6	2 El bileği dezartikülasyonlu Denek, 20 Sağlıklı Denek	Önerilen model, hem ampute olanlar hem de ampute olmayanlar dahil olmak üzere 18 el hareketinden oluşan kamuya açık Ninapro veri seti üzerinde test edildi. %88,7 oranında doğruluk elde etti ve bu da son teknolojiler arasında en iyisi olduğunu göstermektedir (Xie ve ark., 2022).
M14	2023	Makine Öğrenimi	Üst Ekstremitte	4	1 Transradial Amputasyonlu Denek	Artımlı makine öğrenimi tabanlı miyokontrol, üst ekstremitte amputesinin hünlerli bir el protezini güvenilir bir şekilde kontrol etmesini sağlarken önel olarak tatmin edici bir deneyim sağladı (Nowak ve ark., 2023).

Tablo 9: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).

M15	2023	Makine Öğrenimi	Üst Ekstremitte	1	5 Ampute Denek, 10 sağlıklı Denek	Yöntemimiz, ampute kişilerde fonksiyonel üst ekstremitte (UE) kullanımının ucuz ve objektif olarak ölçülmesi konusunda ümit vericidir ve bu yöntemin, UE rehabilitasyon tedavilerinin etkisinin değerlendirilmesinde kullanılması durumunu daha da ileriye taşır (Bochniewicz ve ark., 2023).
M16	2022	Yapay Sinir Ağı	Alt Ekstremitte	2	6 Transfemoral Amputasyonlu Denek	Uygulanan DNN modelinin transfemoral amputeler için kişiden bağımsız ve ayarlama gerektirmeyen protez bacak kontrolü için umut verici bir aday olduğunu göstermektedir (Kim ve ark., 2022).
M17	2022	Yapay Sinir Ağı	Üst Ekstremitte (el)	6	4 Sağlıklı Denek, 3 Ampute Denek	sEMG sinyallerine dayalı farklı kuvvet seviyelerine sahip jest sınıflandırma operasyon görevlerinin doğru bir şekilde tanınabildiğini ve protez ellerle gerçek zamanlı olarak rahat bir şekilde etkileşime girebildiğini göstermektedir. Amputelerin operasyon yeteneğini geliştirir ve kas yorgunluklarını giderir (Fang ve ark., 2022).
M18	2021	Yapay Sinir Ağı	Üst Ekstremitte	6	10 Sağlıklı Denek	Sonuç olarak, evrişimli bir sinir ağı ve ters kinematiğin uygulanmasıyla, 6-DOF'lu bir robot kolu, EEG kullanılarak zihinsel komutla doğrudan kontrol edilebilir. Dolayısıyla bu araştırma, felçli hastalar ve üst ekstremitte amputeleri gibi engelli kişilerin günlük yaşam görevlerini yerine getirmek için robotik bir kolu kontrol etmelerine olanak tanıyan çığır açıcı bir teknoloji sunmaktadır (Lim ve Quan, 2021).

Tablo 10: Nitel meta analizde kullanılan araştırmaların karşılaştırmasının özet gösterimi (devam).

M19

2020

Derin Öğrenme

Üst
Ekstremitte

15

1 Transradial
Amputasyonlu
Denek

Çalışmamız, modern nöroprotezler için yalnızca yetenekli elinkine yaklaşan doğala yakın düzeyde sağlam ve hünerli bir kontrol stratejisinin temelini oluşturmakla kalmıyor, aynı zamanda insan zihnini ve makineleri periferik sinir yolları aracılığıyla birbirine bağlamak için sezgisel bir kanalın temelini oluşturuyor (Nguyen ve ark., 2020).

M20

2021

Makine Öğrenimi

Üst
Ekstremitte

3

8 Ampute Denek

Eğitim, EMG modeli kalitesinde veya işlevsel kullanımda tutarlı bir iyileşmeye yol açmadı, ancak bazı katılımcılar bazı ölçümlerde ilerleme kaydetti. Gruplar arasında herhangi bir farklılık gözlenmedi. Katılımcılar, kendi protezlerini kullanarak, bu çalışmada kullanılan makine öğrenimi kontrollü protezlere kıyasla sürekli olarak daha iyi sonuçlar elde ettiler (Kristoffersen ve ark., 2021).

5. TARTIŞMA

Bir uzvun amputasyonu, travmatik yaralanma, yanık, periferik damar hastalığı, enfeksiyon vb. gibi çeşitli nedenlerle bir bacağın, kolun veya bu uzuvların bir kısmının kaybedilmesidir (Saini ve ark., 2023). Bu yüzden travmatik ekstremitte amputasyonu hastaların fonksiyonel ve psikolojik sağlığı açısından yıkıcı olabilir (Schultz ve ark., 2023). Ampute hastaların bu sorunlarını azaltmak için birçok tedavi ve rehabilitasyon yöntemi geliştirilmiştir. Son yıllarda bu alanda yapılan araştırmalar teknolojinin gelişmesiyle artmış ve amputasyonlu hastaların sosyal hayata katılımlarını artırmak için umut kaynağı olmuştur. Çünkü zihin kontrollü bir robotik protez; amputasyon, travma geçiren veya uzuv olmadan doğan hastaların tam ve eksiksiz hareket kabiliyetine sahip olmalarına olanak tanıyacaktır (Anisha ve ark., 2021).

Ampute hastalar için kullanılan yapay zeka tabanlı dış iskeletleri ve bu iskeletlerin rehabilitasyona etkisini araştırmayı amaçlayan bu araştırma bu alanda yapılan araştırmaların meta analizini yapmıştır. Bu araştırma için 2013-2023 yılları arasındaki makaleler incelenmiştir. Ayrıca bu meta analizi gerçekleştirebilmek için 4 veri tabanında literatür taraması yapılmıştır. Bunlar IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Scencedirect, PudMed, Scopus veri tabanlarıdır. Bu veri tabanlarından toplam da dahil edilme kriterlerini taşıyan 20 araştırmaya ulaşılmıştır. Bu araştırmaların anahtar kelimeleri ise ‘ampute hasta’, ‘ampute hasta rehabilitasyonu’, ‘yapay zeka’, ‘beyin bilgisayar arayüzü’, ‘makine öğrenimi’, ‘derin öğrenme’ ve ‘ yapay sinir ağı’ şeklindedir.

Araştırmanın bulguları arasında ampute rehabilitasyonunda kullanılan yapay zeka tabanlı dış iskeletlerin son yıllarda kullanımı gittikçe arttığı görülmektedir. Bunun nedeni beyin bilgisayar arayüzü, derin öğrenme, yapay sinir ağları gibi yapay zeka teknolojilerinin son yıllarda popüler olması ve buna bağlı geliştiği düşünülmektedir. Beyin araştırmalarındaki ilerlemeler, engelli hastalarla yapılan çalışmalar da dahil olmak üzere, beyin-bilgisayar arayüzleri aracılığıyla motor eksiklikleri aşmak için bir dizi umut verici fırsat ortaya çıkardı (Cohen ve ark., 2017). Yapılan bu meta analizde de ampute rehabilitasyonunda en fazla beyin-bilgisayar arayüzü kullanıldığı görülmüştür. Beyin-bilgisayar arayüzü hem bozulmuş motor fonksiyonun güçlendirilmesinde hem de felç iyileşmesi gibi rehabilitasyonda umut verici bir avantaj sunmaktadır (Yao ve ark., 2013).

Ancak bu alanın hızla genişlemesine rağmen BCI performansının nihai sınırlarının ne olduğu belirsizdir (Cohen ve ark., 2017).

Bu nitel meta analize dahil edilen araştırmalarda yapay zeka tabanlı dış iskeletlerde en az 1 en fazla 15 serbestlik derecesi (DoF) kullanıldığı tespit edilmiştir. Kullanılan dış iskeletlerde DoF sayısı arttıkça protezin hareket yeteneği artar. Örneğin insan eli, insan vücudundaki en karmaşık ve olağanüstü araçlardan biridir. 27 kemik ve 33 kasın ortak çalışmasıyla 22 Serbestlik Derecesi (DoF) sunar (Rehman ve ark., 2022) ama bu araştırmanın bulgularına göre el için yapılan dış iskeletler genellikle 1-6 DoF derecesi arasında değişmektedir. Bu yüzden protezlere yönelik geleneksel kontrol yaklaşımları, birden fazla serbestlik derecesini (DoF) aynı anda çalıştırırken başarısız oluyor, dolayısıyla günlük yaşam senaryolarında kullanılabilirliği sınırlanıyor (Egle ve ark., 2023). Sınıflandırıcılar, sinyal özelliklerini, bilinen serbestlik derecelerinin (DOF'ler) ayrı bir kümesinden (kategoriler) biriyle eşler, birden fazla DOF üzerinde kontrol sunar, ancak cihaz hareket hızı üzerinde orantılı kontrol veya birden fazla DOF üzerinde eşzamanlı kontrol sağlamaz (Williams ve ark., 2022). Dolayısıyla gelecekteki araştırmalarda ampute hastaların kaybettikleri motor fonksiyonlarının çoğunu yerine getirebilmeleri için sınıflandırıcıların yani makine öğrenimi, derin öğrenme, yapay sinir ağları ve bunların alt dallarının geliştirilmesi ve gelecekte bu alanda daha çok araştırma yapıp DoF derecesi daha yüksek yapay zeka tabanlı protezler üretilmesine ihtiyaç vardır.

Araştırmanın bir diğer bulgusu ise daha çok üst ekstremitte amputasyonu olan hastalar için yapay zeka destekli dış iskeletler kullanılarak araştırma yapılmıştır. Bunun nedenleri arasında üst ekstremitte amputasyonuna sahip hastaların daha fazla olması ve kullanılan teknolojilerin üst ekstremitte amputasyonlu hastalara daha uygun olmasına bağlı olabilir. Ek olarak üst ekstremitenin beyinde kapladığı motor alandan EGG sinyali almak alt ekstremiteye göre daha kolay olabilir. Bu da üst ekstremitte amputelerine EGG sinyali için daha fazla kanal kullanma fırsatı sunar. Bazı çalışmalar birden fazla kanalın kullanılmasının faydalı olduğunu göstermiş ve kanallar arttıkça ortalama sınıflandırma doğruluğunun da artacağını bulmuştur (Elbreki ve ark., 2022).

Birleşmiş Milletler'e (BM) göre dünya çapında insanların yaklaşık %10'unun (yaklaşık 650 milyon) engelli olduğu kaydedilmiştir; bu durum tam da nüfus artışı, tıptaki ilerlemeler ve yaşlanma süreci nedeniyle artmaktadır (Rodas ve Pérez, 2022). Bu nitel meta analizde kullanılan araştırmaların sonuçlarına baktığımızda ise kullanılan yapay

zeka teknolojilerinin rehabilitasyon sürecine hepsinin olumlu sonuçları olduğunu görmekteyiz. Amputasyonlu insan sayısı arttığı için ve bu yapay zeka teknolojisinin de olumlu dönüşleri olduğu için gelecekte bu alanda yapılan araştırmaları çoğaltıp teknolojiyi daha geliştirerek ampute hastaların günlük yaşam da karşılaştıkları zorlukları azaltabilmek mümkündür. Bu yüzden beyin-bilgisayar arayüzü, derin öğrenme, makine öğrenmesi gibi yapay zeka teknolojilerinin daha yaygın kullanılması önemlidir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda herhangi bir nedenle amputasyon cerrahisi geçiren ya da doğuştan uzvu olmayan insanlar için günlük yaşama katılımlarını artıran cihazların gelişmesinde yapay zeka teknolojileri kullanılmaktadır. Amputasyon rehabilitasyonunda da daha çok beyin-bilgisayar arayüzleri, makine öğrenmesi ve alt dalları kullanılmaktadır. Bu yapay zeka teknolojileri niyet kodunun çözülmesi ve istenilen hareketin dış iskelette ortaya çıkarılmasına dayanır. Bu meta analizde kullanılan araştırmalarda bu niyet kodunun çözülmesi, sınıflandırılması gibi çeşitli işlemlerden geçip dış iskelette istenilen hareketi ortaya çıkarma prensibine dayanan araştırmalar kullanılmıştır. Bu araştırmaların ortak sonucu ise amputasyonlu hastalarda kullanılan dış iskeletlerde yapay zeka teknolojisi güvenilir sonuçlar vermektedir. Ortaya çıkan bu sonuçta ise amputasyonlu hastalar için umut kaynağı olmuştur. Ayrıca yapay zeka teknolojilerinin, robotik sistemlerin ve rehabilitasyon yöntemlerinin giderek daha çok yaygınlaşması ve gelişmesiyle bugün tamamen işlevsel protez yani dış iskeletlere sahip olmamızın çok uzakta olmadığı görünmektedir.

Bu çalışmadan sonuçlara dayanarak ampute hastaların rehabilitasyon sürecinde yapay zeka teknolojilerini, yapay zeka tabanlı dış iskeletlerini aktif olarak kullanmalarını ve yapay zeka teknolojilerinin ampute hasta rehabilitasyonu üzerinde etkilerini daha iyi anlamak için gelecekte bu alanda daha çok araştırma yapılması önerilmektedir. Çünkü son yıllardaki ilerlemeci gelişmelere rağmen hala kaybedilen uzvun tam işlevini görebilecek dış iskelet üretilmemiştir. Ayrıca kontrol paradigmalarını ve rehabilitasyon etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için hem ampute denek üzerinde hem de sağlıklı denek üzerinde geniş bir popülasyona sahip daha fazla araştırmaya gerek vardır.

KAYNAKLAR

- Smita Nayak, Rajesh Kumar Das (2020). Application of Artificial Intelligence (AI) in Prosthetic and Orthotic Rehabilitation. *Service Robotics (17-37)*, London, United Kingdom, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93903>
- Pengyu Mu, Mingyu Dai, Xuenan Ma (2021). Application of Artificial Intelligence in Rehabilitation Assessment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1802.
- Ying Zhang, Hongmei Yu, Rui Dong, Xuan Ji, Fujun Li (2021). Application Prospect of Artificial Intelligence in Rehabilitation and Management of Myasthenia Gravis. *BioMed Research International*, 6.
- Manuel Andrés Vélez-Guerrero, Manuel Andrés Vélez-Guerrero, Stefano Mazzoleni (2021). Artificial Intelligence-Based Wearable Robotic Exoskeletons for Upper Limb Rehabilitation: A Review. *MDPI Journals*, 21(6), 2146.
- Zhouxiao Li, Konstantin Christoph Koban, Thilo Ludwig Schenck, Riccardo Enzo Giunta, Qingfeng Li, Yangbai Güneşi (2022). Artificial Intelligence in Dermatology Image Analysis: Current Developments and Future Trends. *J. Clin. Med.* 11(22), 6826.
- Anran Wang, Xiaolei Xiu, Shengyu Liu, Qing Qian, Sizhu Wu (2022). Characteristics of Artificial Intelligence Clinical Trials in the Field of Healthcare: A Cross-Sectional Study on ClinicalTrials.gov. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19(20), 13691.
- Kerstin Denecke, Claude R. Baudoin (2022). A Review of Artificial Intelligence and Robotics in Transformed Health Ecosystems. *Frontiers in Medicine*, 9.
- D, Kanchana, V, Vinothkumar., D, E. Samhithan. (2021). Gesture Controlled Robotic Hand Prosthesis for Upper Limb Amputee Rehabilitation. *2021 IEEE Bombay Section Signature Conference (IBSSC)*, 1-5.
- Constantin VD, Socea B, Gaspar BS, Epistatu D, Paunica I, Dumitriu AS, Paunica S, Silaghi A. Ekstremité amputasyonları; etiopatogenez, tanı ve multidisipliner terapötik yaklaşım, *J Mind Med Sci.*, 9(2):209-223.
- Grace R. Hunt, Sarah Hood, Lukas Gabert, Tommaso Lenzi, Member (2023). Effect of Increasing Assistance From a Powered Prosthesis on Weight-Bearing Symmetry, Effort, and Speed During Stand-Up in Individuals With Above-Knee Amputation. *Ieee Transactions On Neural Systems And Rehabilitation Engineering*, 31.
- A. Mounir Boudali; Peter J. Sinclair; Ian R. Manchester, Prediction of Smooth Gait Transitioning for Active Lower Limb Prosthetics, 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (01.07.2019),
- Nur Anis Jasmin Sufri; Muhammad Amir As'Ari; Lorenz Yong Jun Jie, Vision Based Grasp Type Selection in Hand Prosthesis Using Convolutional Neural Networks, 2nd International Conference on Intelligent Cybernetics Technology & Applications (ICICyTA) (08.02.2023)
- Muhammad Asif; Mohsin Islam Tiwana; Umar Shahbaz Khan; Waqar Shahid Qureshi, Javaid Iqbal, Nasir Rashid, Noman Naseer (2021). Advancements, Trends and Future Prospects of Lower Limb Prosthesis. *Journals & Magazines*, 9
- Kanishka Kumarage, Hirunaka Wickramarathna, Madhushan Vijesundaram, Mugilgeethan Vijendran, Neethan Rathnakumar, Tharsika Thanichaichelvan, Design and experimental validation of an optimized wrist powered 3D printed mechanical transmetacarpal prosthesis, 14th Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS) (13.04.2020).

- Xiaoli Guo, Zixuan Lin, Yuanyuan Lyu, Robin Bekrater-Bodmann; Herta Flor, Shanbao Tong (2017). The Effect of Prosthesis Use on Hand Mental Rotation After Unilateral Upper-Limb Amputation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25 (11).
- Mikkel Thøgersen and Laura Petrini, Removing own-limb visual feedback using mixed reality to simulate arm amputations, International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR) (14.08.2017)
- Nathanael Jarrassé; Caroline Nicol; Amélie Touillet; Florian Richer; Noel Martinet; Jean Paysant, Jozina Bernardina de Graaf (2017). Classification of Phantom Finger, Hand, Wrist, and Elbow Voluntary Gestures in Transhumeral Amputees With sEMG. *Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25 (1).
- Oluwarotimi Williams Samuel; Mojisola Grace Asogbon ; Yanjuan Geng; Ali H. Al-Timemy, Sandeep Pirbhulal, Ningji, Shixiong Chen, Peng Fang, Guanglin Li (2019), Intelligent EMG Pattern Recognition Control Method for Upper-Limb Multifunctional Prostheses: Advances, Current Challenges, and Future Prospects, *IEEE Access*, 7
- Dana Terrazas-Rodas and Joanna Carrión-Pérez. The Use of Invasive and Non-Invasive Electrodes in Novel Technology of Upper Limb Prostheses: A Current Review. 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) (23.08.2023)
- Yutaka Oouchida and Shin-Ichi Izumi, Imitation movement reduces the phantom limb pain caused by the abnormality of body schema, 2012 ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME) (23.08.2012)
- Hamed Hamid Muhammed ; Raghavendra Jammalamadaka, A new approach for rehabilitation and upper-limb prosthesis control using optomyography (OMG), 2016 1st International Conference on Biomedical Engineering (IBIOMED) (20.03.2017)
- Yuanyuan Lyu ; Xiaoli Guo ; Zhuo Wang ; Shanbao Tong, Resting-state EEG network change in alpha and beta bands after upper limb amputation, 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (18.10.2016)
- Hooman Shahsavari, Shahrzad Ghiyasvandian, Pegah Matourypour, Mohammad Reza Golestannejad (2022). Medical research council framework for designing and evaluating a re-integration into life care plan in patients following upper limb amputation in Iran: An interventional study. *Journal of Vascular Nursing*, 40; 2 (86-91).
- Linda Resnik, Mathew Borgia, Frantzy Acluche (2017). Timed activity performance in persons with upper limb amputation: A preliminary study. *Journal of Hand Therapy*, 30;4 (468-476).
- Elizabeth J. Ligthelm M, Susan C.D. Wright D (2014). Lived experience of persons with an amputation of the upper limb. *International Journal of Orthopaedic and Trauma Nursing*, 18; 2 (99-106)
- Albert Chen, Jun Yao, Todd Kuiken, Julius PA Dewald (2013). Cortical motor activity and reorganization following upper-limb amputation and subsequent targeted reinnervation. *NeuroImage: Clinical*, 3 (498-506).
- I. Khudetskyy, Yu. Antonova-Rafi, H. Melnyk, A. Bespalenko, Manufacturing technology of individual stump socket for prevention of re-amputation at prosthetics of lower extremities, 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (07.05.2020).
- Zunaed Kibria, Bhanu Prasad Kotamraju, Sesh Commuri, An Intelligent Control Approach for Reduction of Gait Asymmetry in Transfemoral Amputees, 2023 International Symposium on Medical Robotics (ISMR) (25.05.2023).
- Özlem Ülger, Tezel Yıldırım Şahan and Seher Erol Çelik (2018). A systematic literature review of physiotherapy and rehabilitation approaches to lower-limb amputation. *Physiotherapy Theory and Practice*, 34; 11 (821-834).

- Francisco Molina-Rueda, Cristian Navarro-Fernández, Alicia Cuesta-Gómez, Isabel M Alguacil-Diego, Alberto Molero-Sánchez, María Carratalá-Tejada (2019). Neuroplasticity Modifications Following a Lower-Limb Amputation: A Systematic Review. *PM&R*, 11; 12.
- MG Finco, Suhhyun Kim, Wayne Ngo, Rachel A. Menegaz (2022). A review of musculoskeletal adaptations in individuals following major lower-limb amputation. *J Musculoskelet Neuronal Interact.*, 22;2 (269–283).
- Mahmudül Hasan El İmam, Hasanat Alamgir, Nur Cihan Akhtar, Zahid Hüseyin, Rangila İslam, Muhammed Sohrab Hossain (2019). Characterisation of persons with lower limb amputation who attended a tertiary rehabilitation centre in Bangladesh. *Disability and Rehabilitation*, 42; 14 (1995-2001).
- Syeda Zainab Fatima (2023). Life of an amputee: predictors of quality of life after lower limb amputation. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 173 (329–333).
- Robert H Meier and Danielle Melton (2014). Ideal functional outcomes for amputation levels. *Phys Med Rehabil Clin N Am.*, 25;1 (199-212).
- Gull, M. A. Shaoping Bai and Thomas Bak (2020). A Review on Design of Upper Limb Exoskeletons. *Robotics*, 9; 16.
- Holtkamp, M. C. Relearning robot control: discovering muscle pairs of a humanlike robotic arm, Master Thesis. University of Groningen, 2009.
- Xinyao Tang, Xupeng Wang, Xiaomin Ji, Yawen Zhou, Jie Yang, Yuchen Wei, Wenjie Zhang (2022). A Wearable Lower Limb Exoskeleton: Reducing the Energy Cost of Human Movement. *Micromachines*, 13;6 (900).
- Chukwuemeka Ochieze, Soroush Zare, Ye Sun (2023). Wearable upper limb robotics for pervasive health: a review. *Progress in Biomedical Engineering*, 5;3.
- Francisco Molina-Rueda, Cristian Navarro-Fernández, Alicia Cuesta-Gómez, Isabel M Alguacil-Diego, Alberto Molero-Sánchez, María Carratalá-Tejada (2019). Neuroplasticity Modifications Following a Lower-Limb Amputation: A Systematic Review. *Wiley Onlinelibrary*, 11;12 (1326-1334).
- Niaam Kh. Al-Hayali, Jumaa S. Chiad, Somer M. Nacy, O. Hussein (2021). A Review of Passive and Quasi-Passive Lower Limb Exoskeletons for Gait Rehabilitation. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44;9 (436-447).
- Scheidt, C. V. Modelling and Optimization of Prosthetic Feet and Design of a Passive Printable Prosthetic, Master Thesis, The University Of Hull, 2019.
- Mihir Patel and Matthew Varacallo (2023). Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Arm Nerves. *StatPearls*, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov.proxy.uskudar.edu.tr/books/NBK547735/>
- Qiyang Su, Zhongcai Pei, Zhiyong Tang, Quan Liang (2022). Design and Analysis of a Lower Limb Loadbearing Exoskeleton. *Journals Actuators*, 11;10.
- Michael N. Brown, Beth S. Pearce, Andrea M. Trescot, Helen W. Karl (2016). Peripheral Nerve Entrapments, Springer. *Cham*, 819–831.
- Al-Haddad ve Coventry (2003). Major nerve blocks of the lower limb. *British Journal of Anaesthesia, CEPD Reviews*, 3;4.
- Christiane Kruppa, Sebastián Benner, Alexis Brinkemper, Mirko Aach, Christoph Reimertz, Thomas A. Schildhauer (2023). Neue Technologien und Robotik. *Die Unfallchirurgie*, 126 (9–18).

- Daisuke Ichimura, Ryo Amma, Genki Hisano, Hiroto Murata, Hiroaki Hobara (2022). Spatiotemporal gait patterns in individuals with unilateral transfemoral amputation: A hierarchical cluster analysis. *PLoS One.*, 17(12).
- Ahmad Farzad Faqiri, Noman Tasal, Mahboobullah Mutahar, Aminullah Bakhtyar (2023). Assistive Wearable Lower Limb Robots: A Review. *International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)*, 8;7 (01-10).
- Oluwagbenga Paul Idowu, Oluwaremilekun Adelopo, Ademola Enitan Ilesanmi, Xiangxin Li, Oluwarotimi Williams Samuel, Peng Fang, Guanglin Li (2021). Neuro-evolutionary approach for optimal selection of EEG channels in motor imagery based BCI application. *Biomedical Signal Processing and Control*, 68.
- Anant Jain and Lalan Kumar (2023). Subject-independent trajectory prediction using pre-movement EEG during grasp and lift task. *Biomedical Signal Processing and Control*, 86.
- Simon C.Williams, Hugo Layard Horsfall, Jonathan P. Funnell, John G. Hanrahan, Andreas T. Schaefer, William Muirhead1, Hani J.Marcus (2022). Neurosurgical Team Acceptability of Brain–Computer Interfaces: A Two-Stage International Cross-Sectional Survey. *World Neurosurgery*, 164; e884-e898.
- Chris Palmer (2022). Brain–Computer Interface Speaks Up. *Engineering*, 9 (3-5).
- Douglas P.Murphy, Ou Bai, Ashraf S. Gorgey, John Fox, William T. Lovegreen, Brian W. Burkhardt..., Ding-Yu Fei (2017). Electroencephalogram-Based Brain–Computer Interface and Lower-Limb Prosthesis Control: A Case Study. *Front. Neurol.*, 8.
- Marcia Bockbrader (2019). Upper limb sensorimotor restoration through brain–computer interface technology in tetraparesis. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 11 (85-101).
- Gauri Shanker Gupta, Prabhat Ranjan Tripathi, Shikhar Kumar, Subhojit Ghosh, Rakesh Kumar Sinha (2022). Prototype design for bidirectional control of stepper motor using features of brain signals and soft computing tools. *Biomedical Signal Processing and Control*, 71.
- Domenico Buongiorno, Giacomo Donato Cascarano, Irio De Feudis, Antonio Brunetti, Leonarda Carnimeo, Giovanni Dimauro, Vitoantonio Bevilacqua (2021). Deep learning for processing electromyographic signals: A taxonomy-based Survey. *Neurocomputing*, 452.
- Peiqi Kang, Jinxuan Li, Shuo Jiang, Peter B. Shull (2022). Reduce System Redundancy and Optimize Sensor Disposition for EMG–IMU Multimodal Fusion Human–Machine Interfaces With XAI. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72.
- Chollet, F. (2019). *Python ile Derin Öğrenme*. çev. Aksoy, B. (1.Baskı) Buzdağı Yayınevi.
- Öztemel, E. (2006). *Yapay Sinir Ağlar* (2.Baskı). İstanbul, Papatya Yayınevi.
- Sachin Kansal, Dhruv Garg, Aditya Upadhyay, Snehil Mittal, Guneet Singh Talwar (2023). DL-AMPUT-EEG: Design and development of the low-cost prosthesis for rehabilitation of upper limb amputees using deep-learning-based techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126.
- Olivier Barron, Maxime Raison, Guillaume Gaudet, Sofiane Achiche (2020). Recurrent Neural Network for electromyographic gesture recognition in transhumeral amputees. *Applied Soft Computing*, 96.
- Akhan Akbulut, Feray Gungor, Ela Tarakci, Muhammed Ali Aydin, Abdul Halim Zaim, Cagatay Catal (2022). Identification of phantom movements with an ensemble learning approach. *Computers in Biology and Medicine*, 150.
- Baao Xie, James Meng, Baihua Li, Andy Harland (2022). Biosignal-based transferable attention Bi-ConvGRU deep network for hand-gesture recognition towards online upper-limb prosthesis control. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 224.

- G. Di Pino, E. Guglielmelli, Başbakan Rossini (2009). Neuroplasticity in amputees: Main implications on bidirectional interfacing of cybernetic hand prostheses. *Progress in Neurobiology* içinde (cilt 88, sayı 2, 114-126ss). Erişim adresi: ScienceDirect.
- W.I. Schöllhorn (2004). Applications of artificial neural nets in clinical biomechanics. *Clinical Biomechanics* içinde (cilt 19, sayı 9, 876-898ss). Erişim adresi: ScienceDirect.
- Juan J. Huaroto, Etsel Suárez, Emir A. Vela (2020). Wearable mechatronic devices for upper-limb amputees. *Control Theory in Biomedical Engineering Applications in Physiology and Medical Robotics* (205-234ss). Erişim adresi: ScienceDirect.
- Vahid Noei and Heba Lakany (2022). Analysis of movement of an elbow joint with a wearable robotic exoskeleton Using OpenSim software, *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (11-15.07.2022).
- Momen Kamal Tageldeen, I. Elamvazuthi, N. Perumal (2016). Motion control for a multiple input rehabilitation wearable exoskeleton using fuzzy logic and PID, *2016 IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)* (22-24.04.2016).
- M. Nagarajapandian, T. Anitha, GK Raksha, S.Sabarisri, S. Sarmitha, V. Kanish, Monitoring of Prosthetic Leg during Rehabilitation using IoT, *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)* (23-25.08.2023).
- Chenyu Tang, Zhenyu Xu, Edoardo Occhipinti, Wentian Yi, Muzi Xu, Sanjeev Kumar... Luigi G. Occhipinti (2023). From brain to movement: Wearables-based motion intention prediction across the human nervous System. *Nano Energy*, 115.
- Mengting He, Yunfei Wu, Zixuan Li, Shijian Wang, Wenjie Li, WenZhou... Jianqing Wang, HMT: An EEG Signal Classification Method Based on CNN Architecture, *2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)* (19-21.05.2023).
- Saidatul Ardeenawatie Awang, Milletvekili Paulraj, Sazali Yaacob, Implementing eigen features methods/neural network for EEG signal analysis, *2013 7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)* (4-5.01.2013).
- Priyanka Mathur, Vijay Kumar Chakka, Vidhi Garg, Weighted Vector Visibility based Graph Signal Processing (WVV-GSP) for Neural Decoding of Motor Imagery EEG signals, *2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON)* (24-26.11.2022).
- Madiha Tariq, Pavel M. Trivailo, Milan Simic (2018). EEG-Based BCI Control Schemes for Lower-Limb Assistive-Robots. *Front. Hum. Neurosci.*, 12.
- Diu Khue Luu, Anh Tuan Nguyen, Ming Jiang, Markus W. Drealan, Jian Xu; Tong Wu... Zhi Yang (2022). Artificial Intelligence Enables Real-Time and Intuitive Control of Prostheses via Nerve Interface. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 69: 10.
- Dinçer, S. (2014). *Eğitim Bilimlerinde Uygulamalı Meta Analiz*. Pegem Akademi Yayıncılık, 2-25.
- Güneş, D. ve Erdem, R. (2022). Nitel araştırmaların analizi: Meta-sentez. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(Özel Sayı 2), 81-98.
- Jan Christina (2018). Meta-Synthesis Of Qualitative Studies: Background, Methodology And Applications. *NORDSCI Conference proceedings 2018*, 1.
- Kumral, E. (2014). *Klinik Nöropsikoloji Ve Nöropsikiyatrik Hastalıklar*. Ankara, Güneş Tıp Kitabevleri.
- Arifoğlu, Y. (2017). *Her Yönüyle Anatomi*. İstanbul, İstanbul Tıp Kitapevi.
- Ateş, A.C. (2021). *Siber Ansiklopedi: Siber Ortama Çok Disiplinli Bir Yaklaşım*. Ankara, Pegem Akademi.

- Suzuki, K. (2017). *Artificial Neural Networks – Architectures And Applications*. Hirvatis, InTech.
- Iqra Ashraf Kiyani ve Adeela Razaq (2022). A Comprehensive Review on Sentiment Perception Using Electroencephalography (EEG). *SN Computer Science* 3(3).
- Joohyun Kim, Miji Kim, Miran Jang, Junyeop Lee (2022). The Effect of Juingong Meditation on the Theta to Alpha Ratio in the Temporoparietal and Anterior Frontal EEG Recordings. *International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH)*, 19(3).
- Mahmud Elsayed, Kok Tatlı Sim, Şing Çan Tan. Effective Computational Techniques for Generating Electroencephalogram Data, *2020 International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE)* (23-24.12.2020).
- Vaishali Giridhari and Vidyasagar Joshi, Decomposition and Reconstruction of Signal for Identification of Eye Movement Artifacts (OA) in Electroencephalogram (EEG) by applying Wavelet Transform, *2020 International Conference on Smart Innovations in Design, Environment, Management, Planning and Computing (ICSIDEMPC)* (30-31.10.2020).
- Ivan Kurnia Laksono and Elly Matul İmah, Schizophrenia Detection Based on Electroencephalogram Using Support Vector Machine, *2021 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)* (2-4.08.2021).
- Bajaj, N. (2021). *Wavelets for EEG Analysis*. In *Wavelet Theory*. IntechOpen.
- Poggenpoel, M. ve Myburgh, C. P. H. (2008). A Meta-Synthesis of Completed Qualitative Research on Learners' Experience of Aggression in Secondary Schools in South Africa. *International Journal of Violence and School*, (8), 60-84.
- Terese Bondas and Elisabeth OC Salonu (2007). Challenges in approaching metasynthesis research. *Qual Health Res*, 17(1):113-21.
- Fatima Zohra KOUDDAD, Muhammed KOHILI, Arbia Chahrazad LAMARI, Eyüp AMİRİ. Indexing and Image Search by the Content According to the Biological Base of the Cognitive Processing of Information using a Neural Sensor. *2020 2nd International Conference on Mathematics and Information Technology (ICMIT)* (18-19.02.2020).
- Kaushalya Kumarasinghe, Mahonri Owen, Denise Taylor, Nikola Kasabov, Chi Kit. FaNeuRobot: A Framework for Robot and Prosthetics Control Using the NeuCube Spiking Neural Network Architecture and Finite Automata Theory. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (21-25.05.2018).
- Muhammad Yasin, Achmad Arifin, Muhammad Hilman Fatoni. Ankle Prosthesis With Brain Computer Interface Commands Based on Electroencephalograph for Transtibial Amputees. *2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (20-21.07.2022).
- Diego Ronaldo Cutipa-Puma, Cristian Giovanni Coaguila-Quispe, Pablo Raul Yanyachi (2023). A low-cost robotic hand prosthesis with apparent haptic sense controlled by electroencephalographic signals. *HardwareX*, 14.
- Mojisola Grace Asogbon, Oluwarotimi Williams Samuel, Xiangxin Li, Naifu Jiang, Naifu Jiang, Oluwagbenga Paul Idowu, Yanbing Jiang... Guanglin Li. A Robust Multi-Channel EEG Signals Preprocessing Method for Enhanced Upper Extremity Motor Imagery Decoding. *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (13-16.10.2020).
- Mojisola Grace Asogbon, Oluwarotimi Williams Samuel, Xiangxin Li, Naifu Jiang, Naifu Jiang, Oluwagbenga Paul Idowu, Yanbing Jiang... Guanglin Li. A Low-rank Spatiotemporal based EEG Multi-Artifacts Cancellation Method for Enhanced ConvNet-DL's Motor Imagery Characterization. *2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (01-05.11.2021).

- G Gayathri, Ganesha Udupa, G. J. Nair. Control of bionic arm using ICA-EEG. *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)* (06-07.07.2017).
- Douglas P. Murphy, Ou Bai, Ashraf S. Gorgey, John Fox, William T. Lovegreen, Brian W. Burkhardt... Ding-Yu Fei (2017). Electroencephalogram-Based Brain-Computer Interface and Lower-Limb Prosthesis Control: A Case Study. *Front. Neurol.*, 8.
- An Tuan Nguyen, Markus W Drealan, Diu Khue Luu, Ming Jiang, Jian Xu, Jonathan Cheng... Zhi Yang (2021). A Portable, Self-Contained Neuroprosthetic Hand with Deep Learning-Based Finger Control. *J Neural Eng.*, 11;18(5).
- Arnau Dillen, Elke Lathouwers, Aleksandar Miladinović, Uros Marusić, Fakhreddine Ghaffari, Olivier Romain... Kevin De Pauw (2022). A data-driven machine learning approach for brain-computer interfaces targeting lower limb neuroprosthetics. *Front. Hum. Neurosci.*, 16.
- DSV Bandara, Jumpei Arata, Kazuo Kiguchi (2018). Towards Control of a Transhumeral Prosthesis with EEG Signals. *Bioengineering*, 5(2), 26.
- Diu Khue Luu, Anh Tuan Nguyen, Ming Jiang, Markus W. Drealan, Jian Xu, Tong Wu... Zhi Yang (2022). Artificial Intelligence Enables Real-Time and Intuitive Control of Prostheses via Nerve Interface. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 69, 10 (3051 – 3063).
- Sachin Kansal, Dhruv Garg, Aditya Upadhyay, Snehil Mittal, Guneet Singh Talwar (2023). DL-AMPUT-EEG: Design and development of the low-cost prosthesis for rehabilitation of upper limb amputees using deep-learning-based techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126.
- Author links open overlay panel Bao Xie, James Meng, Baihua Li, Andy Harland (2022). Biosignal-based transferable attention Bi-ConvGRU deep network for hand-gesture recognition towards online upper-limb prosthesis control. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 224.
- Markus Nowak, Raoul M. Bongers, Corry K. van der Sluis, Alin Albu-Schäffer, Claudio Castellini (2023). Simultaneous assessment and training of an upper-limb amputee using incremental machine-learning-based myocontrol: a single-case experimental design. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20.
- Elaine M. Bochniewicz, Geoff Emmer, Alexander W. Dromerick, Jessica Barth, Peter S. Lum (2023). Measurement of Functional Use in Upper Extremity Prosthetic Devices Using Wearable Sensors and Machine Learning. *Sensors*, 23(6).
- Minjae Kim, Ann M. Simon, Levi J. Hargrove (2022). Seamless and intuitive control of a powered prosthetic leg using deep neural network for transfemoral amputees. *Wearable Technologies*, 3.
- Bin Fang, Chengyin Wang, Fuchun Güneş, Ziming Chen, Jianhua Shan, Huaping Liu... Wenyuan Liang (2022). Simultaneous sEMG Recognition of Gestures and Force Levels for Interaction With Prosthetic Hand. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30 (2426 – 2436).
- Zheng You Lim and Neo Yong Quan. Convolutional Neural Network Based Electroencephalogram Controlled Robotic Arm. *2021 IEEE International Conference on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS)* (26.06.2021).
- Anh Tuan Nguyen, Jian Xu, Ming Jiang, Diu Khue Luu, Tong Wu, Wing-kin Tam... Qi Zhao (2020). A bioelectric neural interface towards intuitive prosthetic control for amputees. *Journal of Neural Engineering*, 17,6.
- Morten B. Kristoffersen, Andreas W. Franzke, Raoul M. Bongers, Michael Wand, Alessio Murgia, Corry K. van der Sluis (2021). User training for machine learning controlled upper limb prostheses: a serious game approach. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18, 32.

- Uttam Chand Saini, Shubhankar Bu, Himanshu Bhayana, Mandeep Singh Dhillon, Aseem Mehra (2023). Longitudinal Experience and Determinants for Common Mental Health Problems, Phantom Limb and Functional Outcome in Lower Limb Amputees. *Indian Journal of Orthopaedics*, 57, 2040–2049.
- Blake Schultz , Hristiyan Fıstıgın , Nirmal Tejwani (2023). Updates on Residual Limb Management in Lower Extremity Amputation From Nerve to Bone. *Bull Hosp Jt Dis (2013)*, 81(4): 240-248.
- Ori Cohen, Dana Doron, Moşe Koppel, Rafael Malach, Doron Friedman. High performance in brain-computer interface control of an avatar using the missing hand representation in long term amputees. 2017 8th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (25-28.05.2017).
- M. Anisha, M. Sushmitha, S.Surekha, N. Vigneshwari, Ponmozhi Chezhiyan, C.Jim Elliot... SB Pooja. Exploration on Electroencephalogram Controlled Haptic Humanoid Arm for amputees. 2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC) (04-06.08.2021).
- Lin Yao, Xiaokang Shu, Jianjun Meng, Dingguo Zhang, Xinjun Sheng, Xiangyang Zhu. Enhanced motor imagery based brain-computer interface via unilateral wrist vibrotactile stimulation. 2013 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (06-08.11.2013).
- Fabio Egle, Dario Di Domenico, Andrea Marinelli, Nicolò Boccardo, Michele Canepa, Matteo Laffranchi... Claudio Castellini. Preliminary Assessment of Two Simultaneous and Proportional Myocontrol Methods for 3-DoFs Prostheses Using Incremental Learning. 2023 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) (24-28.09.2023).
- Mustafa Ür Rehman, Kamran Şah, İzhar Ul Haq, Hasan Hurşid. A Force Myography based HMI for Classification of Upper Extremity Gestures. 2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence (ICAI) (30-31.03.2022).
- Heather E.Williams, Ahmed W. Şehata, Michael R. Dawson, Erik Şeması, Jacqueline S. Hebert, Patrick M. Pilarski (2022). Recurrent Convolutional Neural Networks as an Approach to Position-Aware Myoelectric Prosthesis Control. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 69 (7), 2243 – 2255.
- Dana Terrazas-Rodas and Joanna Carrión-Pérez. Artificial Intelligence Techniques for Biosignal Pattern Recognition and Classification in Upper-Limb Prostheses: A Review. 2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoT&IS) (24-26.11.2022).
- AM Elbreki, Safa Ramazan, Faysal Muhammed, Khadija Alshari, Zakariya Rajab, B. Elhub. Practical Design of an Upper Prosthetic Limb Using Three Dimensional Printer with an Artificial Intelligence Based Controller. 2022 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS) (04-06.07.2022).
- Mehmet Celalettin Ergene and Akif Durdu. Robotic hand grasping of objects classified by using support vector machine and bag of visual words. 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP) (16-17.09.2017).
- Muhammed Osman Kadir, Muhammed Awais Han, Muzammal Hüseyin, İzhar ul Haq, Nizar Ahtar, Kmaran Şah. Design and Analysis of Knee Joint for Transfemoral Amputees. 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS) (28-30.04.2021).