

Kızılötesi Termal Görüntülemenin Yapay Zekâ Tabanlı Biyomedikal Uygulamalarına Bakış

Overview of Artificial Intelligence Based Biomedical Applications of Infrared Thermal Imaging

Saim ERVURAL*¹, Murat CEYLAN²

ÖZ

Kızılötesi termal görüntüleme, vücut sıcaklığı dağılımının ve değişiminin izlenmesine izin veren invazif olmayan, zararlı radyasyon içermeyen, temassız bir modalitedir. Periferik kan akışı, otonom sinir sistemi, vazokonstriksiyon / vazodilatasyon, iltihaplanma, terleme veya diğer süreçler hakkında fizyolojik bilgiler sağlama medikal alanda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Yapay zekâ alanında yaşanan gelişmeler medikal uygulamalarda da karşılık bulmuş ve makine öğrenimi metotları; karar verme, hastalık takibi, cerrahi planlama gibi birçok görev için kullanılabilir hâle gelmiştir. Termal verilerin yorumlanması için yapay zekâ yöntemlerinin kullanılması, bir tanı, tedavi planlama veya cerrahi değerlendirme senaryosunda doktorlara ikinci bir görüş sağlamak için etkin bir çözüm olabilir. Bu araştırmanın amacı: Literatür kaynaklarının incelenerek termal görüntülemenin medikal uygulamadaki sınıflandırma, karar verme gibi süreçlerde yapay zekâ yöntemlerinin işleyişlerini değerlendirmek ve literatür hakkında bilgi sunmaktır.

Anahtar kelimeler: Yapay zekâ, Sınıflandırma, Termografi, Kızılötesi termal görüntüleme, Biyomedikal karar verme.

ABSTRACT

Infrared thermal imaging is a non-invasive, harmless radiation-free non-contact modality that allows monitoring of body temperature distribution and change. Providing physiological information about peripheral blood flow, autonomic nervous system, vasoconstriction / vasodilation, inflammation, sweating or other processes has expanded its use in the medical field. Developments in the field of artificial intelligence have also found response in medical applications, and machine learning methods have become used for many tasks such as decision making, disease monitoring, and surgical planning. Using artificial intelligence methods to interpret thermal data can be an effective solution to provide doctors with a second opinion in a diagnosis, treatment planning or surgical evaluation scenario. The purpose of this research; To evaluate the functioning of artificial intelligence methods in medical applications such as classification and decision making of thermal imaging by examining the literature sources and to provide information about the literature.

Keywords: Artificial intelligence, Classification, Thermography, Infrared thermal imaging, Biomedical decision making.

Received/Geliş : 11.03.2021

Accepted/Kabul: 31.03.2021

Publication date: 15.04.2021

Saim ERVURAL

¹KTO Karatay Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği,
Konya, Türkiye

*saim.ervural@karatay.edu.tr

ORCID: 0000-0003-4104-1928

Murat CEYLAN

²Konya Teknik Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği,
Konya, Türkiye

ORCID:0000-0001-6503-9668

Giriş

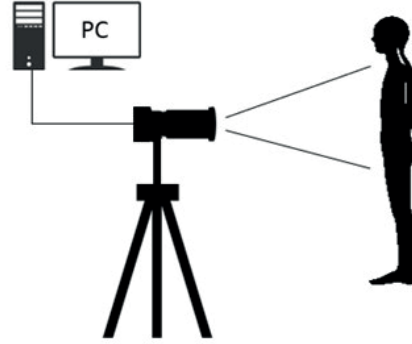
Mutlak sıfır noktası (-273,15 °C, 0 °K) üzerinde tüm nesnelere, sıcaklıklarına ve spektral emisivitelere bağlı olarak kızılötesi radyasyon yayma yeteneğine sahiptir [1]. Vücudun yaydığı radyasyon miktarı elektromanyetik spektrumun kızılötesi alanı içindedir ve dalga boyu 0,75-1000 mikrometre aralığındadır [2]. Deri emisivitesi, cilt sıcaklığını belirlemek için önemli bir unsurdur ve dalga boyuna bağlı olarak 0-1 arasında değerlenir [3]. İnsan derisinin emisivitesi 0,96-0,98 arasındadır bu nedenle neredeyse bir kara cisim gibi davranır [4]. Kara cisim, Planck Yasası'na göre gelen tüm enerjisi emen ve sürekli enerji yayan bir nesne olarak kabul edilir [5]. Bir kara cisim tarafından yayılan enerji, belirli bir sıcaklık için maksimum değerdedir [1]. Bu nedenle insan derisinin yayma gücü bir kara cismin yayma gücüne yakın olduğundan deriden yayılan kızılötesi radyasyon, termal görüntüleme kullanılarak doğrudan sıcaklık değerlerine dönüştürülebilir. Termal kameralar, kızılötesi enerjisi elektronik sinyallere dönüştürür; bu sinyaller iki boyutlu bir dizide düzenlenmiş pikseller olarak görüntülerle ifade edilir [6, 7]. Her piksel, görüntülenen bölgenin sıcaklık değerlerini temsil eder [2]. Termal kameralar tarafından üretilen görüntüler termogram olarak adlandırılır. Termogramların sıcaklık değerleri görsel olarak gri seviyede veya farklı renk paletlerinde görüntülenebilir. Böylece incelenen nesnenin yüzeyindeki sıcaklık dağılımının farklı renk tonlarıyla görsel olarak görülmesi sağlanır. Renklerin dağılımı, vücut yüzeyinden yayılan kızılötesi radyasyon miktarındaki azalma ya da artışı gösterir.

Medikal termografide termogramlar, kızılötesi radyasyonu yakalayan organların ve dokuların sıcaklık dağılımını ölçmek için kullanılır. Termal görüntüleme, insan vücudu cilt yüzeyinin geniş alanlarının kaydedilmesine ve haritalanmasına izin verir; böylelikle fizyolojik bozuklukların neden olduğu sıcaklık değişiklikleri hastaya herhangi bir rahatsızlık ve radyasyon hasarı vermeden tespit edilebilir [2]. Vücutta oluşan fizyolojik fonksiyon bozuklukları, sıcaklık artışlarına neden olur. Bu artışlar, kızılötesi görüntülerde sıcak noktalar veya asimetrik desenler olarak gösterilir. Sağlıklı bir insanda cilt sıcaklığının dağılımı kontralateral simetri gösterir. Belirli bir düzeyin üzerindeki asimetri ile sıcaklık dağılımı genellikle anormalliklerin güvenilir bir göstergesidir [8]. Bu nedenle, sağlıklı vücut termal olarak simetrik olduğundan, asimetrik sıcaklıklar görüntülerde kolayca tanımlanabilir. 50'li yılların ortalarından beri klinik pratikte ve vasküler, nörolojik, kas-iskelet sistemleri gibi çeşitli alanlardaki araştırmalarda kullanılmaktadır [9]. Süreç içerisinde tekniği standartlaştırmak ve sonuçlarını iyileştirmek için uluslararası kabul görmüş kılavuzlar geliştirilmiş ve termal tarama standartları oluşturulmuştur [10-13].

Medikal uygulamalarda kullanılan termal kameralar genellikle 3 - 5 µm orta dalga kızılötesi dalga boylarında ve 8 - 13 µm uzun dalga kızılötesi dalga boylarında çalışır. 5 - 7 µm arası atmosferdeki su buharı nedeniyle soğurulduğu için termal kameralar bu aralıkta tespit yapamazlar [1]. Kullanılacak kamera tipinin seçimi, incelenen nesnelere sıcaklık aralığı ile ilgilidir [14]. İnsan vücudunun yaydığı kızılötesi radyasyon 8-15 µm dalga boyu aralığında olup Planck Yasası'na göre, insanlarda yayılan kızılötesi radyasyonun yaklaşık %90' ı ise 9 - 10 µm dalga boyu aralığındadır [15]. Dolayısıyla medikal termal görüntüleme genellikle uzun dalga boylu termal kameralar tercih edilmektedir.

Bir yüzey tarafından yayılan kızılötesi radyasyon; nem, hava akışı ve ortam sıcaklığı gibi deneysel koşullara bağlıdır. Bu nedenle termografi deneylerinin, özellikle sıcaklık değişimlerinin birkaç derece içinde olduğu medikal uygulamalarda kontrollü ortamlarda yapılması mutlak bir zorunluluktur. Termografik görüntüleri karşılaştırmak için standart bir protokol izlenmelidir. Yayınlanan çalışmalar medikal uygulamalarda ancak belirli standartlara

uyulduğunda güvenilir sonuçlar üretebileceğini ortaya koymuştur [10-13]. Medikal termografi deneyi için tipik bir ölçüm kurulumu Şekil 1'de verilmiştir. Deneysel ortamın sıcaklığı ve nemi belirli sınırlar içinde tutulmalı ve ölçümde geometrik hataları en aza indirmek için kamera, gözlem yüzeyine dik olarak yerleştirilmelidir.



Şekil 1: Medikal termografi deneyi için tipik bir ölçüm kurulumu

Termografi deneyleri sırasında denekler rahat bir ortamda tutulmalıdır. Bir termografik inceleme sırasında hastaların görüntülenecek vücut bölümü, vazokonstriksiyonun cildin soğumasına neden olduğu ve altta yatan anormalliklerden kaynaklanan sıcak noktaların açıkça görünür hale getirildiği hafif bir termal stres üretmek için soğutulabilir [8]. Amal ve ark. muayene odasının sıcaklık ve neminin, deneklerin fizyolojisinin "titreme veya terleme durumu" girmeyecek şekilde kontrol edilmesi gerektiğini, akkor lamba veya direkt güneş ışığı gibi ikincil kızılötesi kaynaklardan arınmış olması gerektiğini bildirmiştir [16]. Deneklerin doğrudan güneş ışığına maruz kalmamaları ve termografi incelemelerinden hemen önce kozmetik, terlemeyi önleyici veya deodorant kullanmamaları önerilir. Deneklerin termal dengeye ulaşması için bir termal alışma süresi gerekmektedir [5].

| Araştırma | Yıl | Çalışma | Deney Koşulları | |
|------------------------------|------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | | Ortam Sıcaklığı °C | Alışma Süresi (dakika) |
| | 1997 | Yüksek riskli diyabetik ayak | 21±2 | 15 |
| | 1998 | Yüz teletermografisi | 21-23 | 15 |
| | 2002 | Çevresel dolaşım | 20 | 15 |
| | 2006 | Risk altındaki diyabetik ayaklar | 21±2 | 15-20 |
| | 2007 | Omuz sıkışma sendromu | 19-21 | 15 |
| | 2009 | Termoregülasyon | 24±2 | 10 |
| Bagavathiappan ve ark. [112] | 2010 | Diyabetik nöropati | 25 | 5 |

Tablo 1. Kızılötesi termal görüntüleme bazı araştırma grupları tarafından kullanılan deneysel koşullar.

Tablo 1'de kızılötesi termal görüntüleme çalışmalarında bazı araştırma grupları tarafından kullanılan deneysel koşullar verilmiştir.

Bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmelerin sağladığı daha düşük maliyetli-yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayarlar ve veri toplama süreçlerinin kolaylaşmış olması sayesinde yapay zekâ (YZ) alanında büyük ölçekli araştırma yapabilmek ekonomik açıdan mümkün hale gelebilmiştir. Yapay zekânın yükselişi medikal uygulamalarda da karşılık bulmuş ve karar verme, hastalık takibi, cerrahi planlama gibi birçok görev için kullanılabilir hâle gelmiştir. Bu araştırmanın amacı: PubMed, Scopus ve Web of Knowledge gibi literatür kaynaklarını inceleyerek termal görüntülemenin medikal uygulamalardaki sınıflandırma, karar verme gibi süreçlerde YZ yöntemlerinin işleyişlerini değerlendirmek ve literatür hakkında bilgi sunmaktır.

Kızılötesi radyasyon kavramı ilk olarak Frederick William Herschel tarafından ortaya atılmış ve Herschel prizmadan geçen güneş ışınlarının farklı sıcaklıklarda kırıldığı keşfini 1800 yılında yapmıştır. Kızılötesi görüntüleme üzerine ilk medikal çalışmalar, Lawson'ın [17] kadınlarda meme kanserini termal görüntüler kullanılarak, damarlanma ve asimetrik sıcak noktalar açısından incelemesi ile başlamıştır (1956). Bu çalışmada, memede kanserli bir dokudaki cilt sıcaklığının sağlıklı dokulara oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. 1960'lerden itibaren kızılötesi görüntülemenin medikal uygulamaları ağırlıklı olarak meme kanseri teşhisi üzerine yapılmıştır. Lloyd-Williams ve ark. [18] memedeki şişliklerin teşhisi üzerine termogramları kullanırken (1961), Gershen-Cohen ve ark. [19] (1965) ve Haberman [20] (1968) termal görüntüleme ile meme kanserinin tespiti üzerine çalışmışlardır.

Winsor ve Bendezu'nun periferik dolaşım bozuklukları [21] (1964), Skverski ve ark.nın [22] vasküler hastalıklar (1964), Albert ve ark.nın [23] ortopedik anomaliler (1964), Connel ve ark.nın [24] travma (1964), Boas'ın [25] romatizmal eklem iltihabı (1964), Lane'in [26] göğüs hastalıkları (1964), Sandrow ve ark.nın [27] diyabetik nöropati veya vasküler bozukluklar (1972), Ring ve Bacon'ın [4] Raynaud fenomeni (1977), Hartmann ve ark.nın [28] cilt hastalıkları (1981), Cole'un [29] yanık yaraları (1990), Soffin ve ark.nın [30] diş (1983), Steed'in [31] çene eklem patolojisi (1991), Herrick'in [32] karpal tünel sendromu (1987), Shatsova'nın [33] tiroit hastalıkları (1989) üzerine gerçekleştirdikleri uygulamalar termografinin medikal alanda kullanımının önemini vurgulamış ve literatüre derinlik kazandırmıştır.

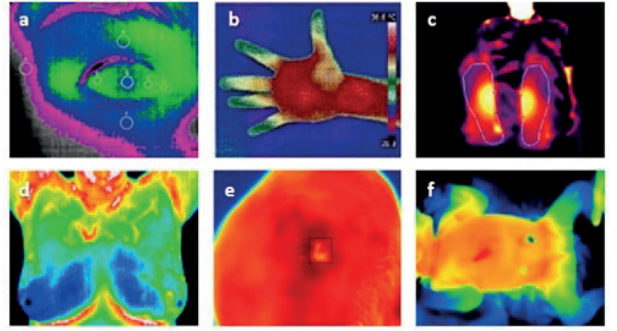
Medikal Termografide Yapay Zekâ Uygulamaları

Yapay zekâ kavramı makinelerle insanlar gibi düşünme, karar verme, karşılaştırma, analiz etme gibi birtakım fonksiyonların kazandırılmasıdır. Verilerin nasıl yorumlanacağını öğrenmek üzere biyolojik sinir ağlarını örnek olarak belirli fiziksel insan davranışlarını yapan robotlar gibi makinalara yön vermesi, veri hesaplaması, tıbbi teşhis gibi belirli bir uzmanlık alanı ile ilgili beşeri düşünme sürecinin benzeşimini yapan sistemleri yönetme becerisine sahip olması mümkündür [34].

Termal kameralar aracılığıyla elde edilen sıcaklık matrisleri, yani termogramlar, analiz edilen durum için anlamlı olan sıcaklık verilerini almak için görüntü işleme stratejileri gerektirir. Termogram verilerinden anlamlı bilgiler elde edilmesi, makine öğrenimi algoritmalarına dayanan YZ hesaplama yöntemlerinin uygulanmasıyla kolaylaştırılabilen zorlu ve zaman alıcı bir görevdir [35].

Bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmelerin sağladığı daha düşük maliyetli-yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayarlar ve veri toplama süreçlerinin kolaylaşmış olması sayesinde YZ alanında büyük ölçekli araştırma yapabilmek ekonomik açıdan mümkün hale gelebilmiştir.

Son yıllarda, termogram verileri, araştırmacılar tarafından YZ tabanlı sınıflandırıcıların hekimlere ikinci bir görüş vermesi için girdi özellikleri olarak uygulanmıştır. Medikal çalışmalarda kullanımı yaygınlaşan yapay zekâ algoritmalarından bazıları: Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makinesi (DVM), Naif Bayes (NB), k-En Yakın Komşu (K-NN), Lojistik Regresyon (LR), Karar Ağaçları (KA), Rastgele Orman (RO) ve Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulamalarda değerlendirme kriteri olarak genellikle doğruluk, duyarlılık ve özgülük ölçütleri kullanılmıştır.



Şekil 2. Kızılötesi termografinin çeşitli tıbbi uygulamaları: a) Oftalmopati hastalarda metilprednizolon nabız tedavisinin etkisinin takibi [104], b) Bilgisayar destekli tanı tabanlı el termal görüntü analizi [91], c) Diyabetik ayağın otomatik tespiti [61], d) Doku özelliklerini kullanarak meme kanseri tespiti [105], e) Cilt kanseri tespiti [106], f) Yapay zekâ teknikleri ile yenidoğanlarda hastalık teşhisi [74].

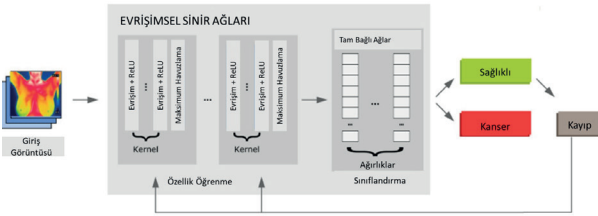
Şekil 2'de bazı medikal uygulama örnekleri gösterilmektedir. Anormal termal paternler kızılötesi termografi tekniği ile kolayca tanınabilir olduğundan, bu termal görüntülerden erken teşhis mümkündür. Termografik bulgular, olası korelasyonları değerlendirmek için genel olarak diğer klinik bulgularla karşılaştırılır. Sadece cilt yüzeylerinden yayılan doğal radyasyonu kaydetmesi ve zararlı radyasyon etkisinin olmaması uzun süreli ve tekrar tekrar kullanıma uygunluğu termografiyi medikal uygulamalarda zararsız ve invazif olmayan bir teknik olarak öne çıkarmaktadır. Geniş bir vücut yüzeyine odaklanarak eş zamanlı olarak farklı doku gruplarındaki sıcaklık değişimlerinin dinamik olarak izlenmesini sağlamaktadır. Bu başlık altında termografinin yapay zekâ tabanlı algoritmalarla birlikte kullanıldığı yaklaşımlar hakkında bilgiler verilmiştir.

Meme Kanseri

Meme kanseri, kadınlarda en sık görülen hastalıktır. Küresel kanser verileri meme kanserinin akciğer kanserinden sonra dünya çapında en ölümcül ikinci kanser türü olduğunu göstermektedir [36]. Yaşam tarzı faktörlerinin değişmesi, endüstrilerin hızlı büyümesi nedeniyle, kentleşme meme kanseri insidansında kademeli bir artışa neden olmuştur [37]. Meme kanserinin erken teşhisi, uygun tedaviyi sağlayarak kadınların hayatta kalma oranını artırmaktadır [37-39]. Termal görüntüleme ile meme asimetrisinin değerlendirilmesi ve uygun yapay zekâ tekniklerinin kullanımı erken teşhiste önemli bir rol oynamaktadır. Sathish ve ark. şekil özellikleri ve polinomial eğri uydurma kullanarak sağ ve sol memenin asimetri analizi için tam otomatik segmentasyon çalışması gerçekleştirmiş ve meme kanserinin saptanmasında DVM sınıflandırıcı kullanarak 40 normal ve 40 anormallik içeren 80 görüntüden oluşan bir set için %90 doğruluk değeri elde etmiştir [40]. Araujo ve ark. meme tümörlerini belirlemek için 60 normal, 66 iyi huylu tümör içeren, 38 kanser dokusu olan toplam 164 meme termogramı ile DVM kullanarak sınıflandırma yapmış ve %90'ın üzerinde doğruluk elde etmiştir [41]. Gogoi ve ark. meme anomalilerinin tespiti için termal yamaların tekil değere dayalı karakterizasyonu ve analizi üzerine çalışmıştır. DVM, K-NN, KA, YSA, RO, AdaBoost (AB) ve doğrusal diskriminant analizi (DDA) algoritmalarının vereceği sonuçlar incelenmiş ve DVM kullanıldığında %98 doğruluk elde etmiştir [38]. Gogoi ve ark. bir başka çalışmada asemptomatik popülasyonda erken meme kan-

seri risk tahmini için kızılötesi meme termografisinin etkinliğini değerlendirmiştir. DVM'yi radyal temel fonksiyon çekirdeği ile kullanarak tüm özellik setleri arasında istatistiksel olarak anlamlı özellikleri içeren özellik seti %83,22 ile en yüksek sınıflandırma doğruluğunu sağlamıştır [42].

ESA, bir görüntüyü diğerlerinden ayıran önemli özellikleri haritalamak için belirli öğrenilebilir ağırlıklar ve Bias değerleri atayarak giriş görüntülerini işleyen derin bir sinir ağı algoritmasıdır. Böylelikle sınıflandırma sonucu çıktı olarak gözlenebilir. Şekil 3, göğüs termogramlarından hasta-sağlıklı ayrımı yapan ESA'ların genel mimarisini göstermektedir [39].



Şekil 3. Meme kanseri sınıflandırma için örnek ESA mimarisini

ESA kullanarak meme kanseri tespitine yönelik çalışmalardan birinde Baffa ve Lattari %98 doğrulukla hasta-sağlıklı sınıflandırması sonucu elde etmiştir. Bu çalışmada, ESA mimarisini iki evrişim katmanı ve iki maksimum havuzlama katmanından oluşmaktadır. Çıktı katmanı, iki sınıfa sahip tam bağlı ağırlıklı katmandır. Sonuçlar Adam optimizasyon algoritması kullanılarak optimize edilmiştir [43]. Kızılötesi termografiye dayalı olarak meme kanserinin erken teşhisi için karşılaştırmalı olarak ESA performansını inceleyen Fernandez-Ovies ve Andres [44] ResNet18, ResNet34, ResNet50, ResNet152, VGG16 ve VGG19'un ESA mimarileri Fast.ai ve Pytorch kütüphanelerini kullanarak uygulamışlardır. Bu karşılaştırmanın sonucunda, ResNet50'nin %98,75 doğrulukla en iyi sınıflandırmayı sağladığı; ancak ResNet50'nin ResNet34'e kıyasla daha az kararlı olduğu ifade edilmiştir. Roslidar ve ark. meme kanseri sınıflandırması için termal görüntülemeye dayalı ince ayar ESA modellerine ilişkin bir çalışma ortaya koymuştur. Resnet101, Densenet210, MobilenetV2, ShufflenetV2 modellerini kullanarak gerçekleştirilen çalışmada %100 doğrulukla hasta-sağlıklı sınıflandırması elde edilmiştir [45]. Gomez ve ark. termal görüntüleri kullanarak meme kanseri teşhisi için ESA tabanlı bir metodoloji ortaya koymuştur. 38'i kanser 19'u sağlıklı olmak üzere 57 termal veri bulunan veri tabanı kullanarak, %92 doğrulukla sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda veri augmentasyonu, segmentasyon ve optimizasyon tekniklerinin etkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur [37]. Schaefer ve ark. termogramlardan çıkarılan, sol ve sağ meme alanları arasındaki farklılıkları ölçen bulanık kural tabanlı bir dizi istatistiksel özelliği kullanarak meme kanseri analizi gerçekleştirmiştir ve yaklaşık %80 doğruluk elde etmiştir [46]. Nicandro ve ark. Bayes ağı sınıflandırıcılarını kullanarak meme kanserinde termografinin tanısal etkisini gözlemlemiştir [47]. Etehadtavakol ve ark. 9 kötü huylu, 12 iyi huylu ve 11 normal vakadan oluşan bir veri seti ve AB sınıflandırıcı kullanarak %95 doğrulukla meme kanseri olgularını sınıflandırmayı başarmıştır [48]. Silva ve ark. meme kanseri riskini belirlemek için yeni bir dinamik meme termografisi analiz tekniği önermiştir. Bu bağlamda YSA, Bayes ağları ve KA sınıflandırma teknikleri uygulanmış ve %90,90 isabet oranı elde edilmiştir [49]. Wahab ve ark. YSA kullanarak çeşitli doku bileşimleri ile meme termografisinde tümör lokalizasyonu gerçekleştirmiştir [50]. Milosevic ve ark. anormal dokuyu normal dokudan ayırt etmedeki özellik kümesinin yeteneğini SVM, K-NN ve NB kullanılarak araştırmıştır. Sonuçlar, K-NN ile % 92,5 doğrulukla

sınıflandırıldığını göstermektedir [51]. Francis ve ark. Curvelet dönüşümü tabanlı özellik çıkarımı kullanarak termogramlardan meme anormalliğinin tespitini gerçekleştirmiştir [52]. Zadeh ve ark. termografi ile kanserli bölgenin kenarlarını ve çekirdeğini tespit etmek için tam otomatik bir yaklaşım sunmuştur [53]. Lashkari denetimli ve denetimsiz algoritmalar kullanılarak termogram görüntülerinden meme kanserinin tespit edilmesinde bulanık c-ortalama tekniğini kullanarak %88, AB sınıflandırıcısı ile %75 doğruluk elde etmiştir [54]. Raghavendra ve ark. ise 25 normal, 25 tümör içeren meme termogramı veri setiyle, yönlendirilmiş gradyan histogramları ve çekirdek lokalizasyonu kullanarak entegre bir meme kanseri tanı aracı geliştirmiştir. [55].

Diyabet ve Vasküler Bozukluklar

Diyabet hastalarının yaklaşık %50'si, en sık karşılaşılan sorun olan ayak komplikasyonları nedeniyle hastaneye kaldırılır [56]. Bu tür ayak komplikasyonlarının başlıca nedenleri, kan akışının azalması (vasküler bozukluk) ve duyu kaybıdır (nöropati). Hem vasküler bozukluk hem de diyabetik nöropati, cilt yüzey sıcaklığında değişikliklere neden olmakta, bu da kızılötesi termografiyi diyabetik nöropati veya vasküler bozuklukların teşhisi için uygun bir araç haline getirmektedir. Diyabetik ayağın sınıflandırılmasına yönelik çalışmalardan birinde Purnima ve ark. termal görüntüleri ön işleme ve segmentasyon uygulamış ve ardından dokusal özellikleri çıkarmıştır [57]. Diyabetik ayağı teşhis etmek için olasılıksal sinir ağı, K-NN ve DVM modellerini kullanarak performansları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar en başarılı sınıflandırmanın gerçekleştirildiği K-NN algoritmasının %95,66 doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Contreras ve ark. 3D morfolojik model spektrumuna ve göreceli konuma dayalı olarak oluşturulan özellik vektörleri, sistemin diyabetik olmayan (kontrol grubu) ve diyabetik grupları nicel olarak karakterize etmesine ve ayırt etmesine izin verdiğini ifade etmiştir. Bu amaçla sinir ağları ile lineer olmayan sınıflandırma kullanmış ve ortalama %94,33 sınıflandırma doğruluğu elde etmiştir [58]. Diyabetik ayak ülseri, uygun şekilde tedavi edilmezse amputasyona yol açabilen diyabetin ana komplikasyonlarından biridir. Alzubaidi ve ark. normal cilt (sağlıklı cilt) sınıfına karşı diyabetik ayak ülseri olan anormal cilt sınıfının otomatik sınıflandırılması için yeni bir ESA modeli (DFU_QUTNet) önermiştir. Modelin başarısını AlexNET, VGG16 ve GoogleNET modelleri ile karşılaştırıldığında %94,50 ile daha iyi F1 skoru ürettiği ortaya konulmuştur [59]. Diyabetik ayak ülseri üzerine yapılan bir başka çalışmada Cruz-Vega ve ark. otomatik segmentasyon ve özellik çıkarma yaptıktan sonra medikal görüntülerin sınıflandırılmasında sıklıkla kullanılan sınıflandırıcılardan ikisi olan DVM ve çok katmanlı algılayıcıları karşılaştırmıştır. Uygulamada kullanılan ayak termogramları ve segmente edilmiş versiyonları Şekil 4'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar DVM sınıflandırıcısının, %99,28 ile daha başarılı doğruluk değeri verdiğini göstermiştir. Çok katmanlı algılayıcılar kullanıldığında ise %97,85 doğruluk değeri elde edilmiştir [60]. Adam ve ark. entropi ve doku özelliklerini hesaplamak için sol, sağ ve bilateral ayak görüntülerini dekompoze ederek değerlendirmiştir ve en iyi performans K-NN yöntemi ile elde edilmiştir (Doğruluk: %93,16; Duyarlılık: %90,31; Özgüllük: %98,04) [61]. Gururajaro ve ark. diyabetik ayak sendromu teşhisi için ESA kullanarak analiz çalışması gerçekleştirmiş ve %91 doğrulukla diyabetik ayağı tespit etmiştir [62]. Samant ve Agarwal 338 denekten (180 diyabetik ve 158 diyabetik olmayan) oluşan bir grup üzerinde, iris görüntüleri ile RO algoritmasını kullanarak diyabetik ayak teşhisi gerçekleştirmiştir. Maksimum özgüllük ve duyarlılık sırasıyla %96,87 ve %98,8; doğruluk ise %89,63 olarak elde edilmiştir [63].



Şekil 4. Uygulamada kullanılan örnek görüntüler, (a) normal (kontrol grubu) ayak termogramı ve segmente edilmiş hali, (b) diyabetik ülserli ayak termogramı ve segmente edilmiş hali [60].

Cilt Hastalıkları

Sağlık öncelikleri belirlenirken, dermatolojik hastalıkları bazen yüksek mortaliteye neden olan hastalıklarla karşılaştırıldığında primer riskler arasında gösterilmemektedir. Ancak, cilt problemleri genellikle tropikal bölgelerdeki görülen en yaygın hastalıklardır ve bulaşıcı hastalıkların endemik olduğu bazı bölgelerde, baskın eksozpozisyon haline gelirler. Ölüm oranları genellikle diğer koşullardan daha düşük olsa da cilt rahatsızlıklarının, birçok ölümcül hastalığın öncül semptomlarından biri olabileceği düşünüldüğünde insanların etkili çarelere olan ihtiyaçları dikkate değerdir [64, 65]. İleri aşamada cilt kanserine yol açan dermatolojik hastalıklar izlenmeli ve erken tedavi edilmelidir. Cilt kanseri vakalarının sayısındaki artış, özellikle çocuk ve genç yetişkinlik yıllarında ultraviyole radyasyona aşırı maruz kalmaya bağlanmıştır [66]. Cilt hastalıklarında mevcut tanı yöntemleri biyopsi (pahalı, invazif) ve dermatoskopidir (deneyime bağlı); bu nedenle yeni objektif yöntemlere ihtiyaç vardır. Magalhaes ve ark.a göre neoplazmaların büyümesi kan akışından etkilenir ve bu da cilt sıcaklığını etkiler [65, 67]. Gerçekleştirdikleri çalışmada melanom ve melanositik nevüs lezyonlarının statik ve dinamik (soğutmalı) termal görüntüleri, cilt lezyon tiplerinin karakteristik termal parametrelerini elde etmek için analiz etmiş ve melanom/nevüs lezyonlarının ayrımının elde edilebilir olup olmadığını doğrulamak için farklı makine öğrenimi sınıflandırıcılarıyla test etmişlerdir. DVM ve statik değişkenlerden oluşan bir giriş vektörüne dayalı olarak her iki cilt türünün ayrımını %84,2'lik doğruluk ve %91,3'lik duyarlılık ile elde etmişlerdir [65]. Bauer ve ark., gelişmiş ülkelerde puberte sonrası kadınların %85 ile %98'inde görülen dermis, epidermis ve subkutan dokuların yaygın bir fizyolojik durumu olan selülitin farklı aşamalarının tahmini ve otomatik tanımlanması için YZ ve termografi tabanlı uygulamasını gerçekleştirmiştir. Uygulama sonucunda selülitin ilk aşamalarında %90, ortalamada ise %81 doğruluk %85 özgüllük değeri ortaya çıkmıştır [68].

Yenidoğan Hastalıkları

Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre doğumdan sonraki ilk 4 haftada (yenidoğan dönemi) ortalama ölüm oranı 1000'de 18'dir [69]. Bu nedenle, neonatal sağlık durumunun izlenmesi ve erken müdahalenin gerçekleştirilmesi önemli ölçüde önemlidir [70]. Günümüzde BT ve MR görüntüleme yenidoğan bebeklerde tanı amaçlı kullanılmaktadır [71]. Ancak görüntüleme sırasında yenidoğanlar kuvözden çıkarılıp görüntüleme cihazına transfer edilmesi ısı izolasyonlarını bozmaktadır [72]. Ek olarak, BT ve MR görüntüleme genellikle lokal yapıldığından, görüntülenmeyen alanlardaki anormallikler gözden kaçabilmektedir. Bebeklerin çoğu solunum desteklerine veya oksijen saturasyonunun ve nabızın gözlendiği sensörlere bağlı olduğundan kuvözlerden çıkarılması mümkün değildir. Tüm bu olası senaryolar temassız ve zararsız bir yöntem olan termal görüntülemeyi yenidoğan

hastalıklarının tespiti ve takibinde gerekli kılmaktadır. Literatürde yenidoğan termogramları ile hasta-sağlıklı sınıflandırmasının yanında spesifik olarak yüksek mortalite ve morbiditeye yol açan hastalıklar da YZ teknikleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Topalidou ve ark. yenidoğan hastalıklarının termal görüntüleme ile teşhis ve takibine yönelik çalışmaların incelendiği etkili bir literatür araştırması ortaya koymuştur [73].

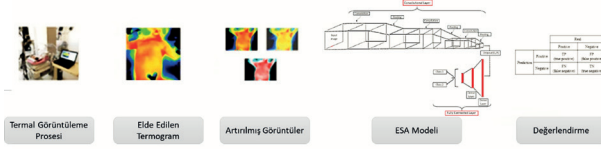
Şekil 5'te örnek bir yenidoğan termal görüntüleme prosesi, Şekil 6'da ise Ervural ve Ceylan tarafından sunulan ESA tabanlı sınırlı termal veri ile sınıflandırma çalışmasına ilişkin modelin blok gösterimi gösterilmiştir [74].



Şekil 5. Ölçüm kurulumu (a) yenidoğan, (b) kuvöz, (c) kızılötesi termal kamera (d) taşınabilir bilgisayar [74].

Yenidoğan hastalıklarının erken teşhis, takip ve tedavisine dayalı çalışmalardan birinde Herry ve ark. NEC (Nekrotizan Enterokolit) hastalığı tanısı için yüzeysel abdominal sıcaklıkları kullanan regresyon analizi yöntemini kullanarak sınıflandırma çalışması gerçekleştirmiştir [75]. NEC hastalığı bulunan 11 ve sağlıklı 48 yenidoğan görüntüsü kullanılarak %90 doğruluk değeri elde edilmiştir. Frize ve ark.a göre NEC'li bebeklerde yukarıdan aşağıya bölge sıcaklıkları önemli ölçüde farklılık gösterirken, sağlıklı bebeklerde bölge sıcaklıklarında önemli bir fark yoktur [76]. Yenidoğanda NEC hastalığını belirlemek için termal görüntüleme ile KA algoritmasına dayalı analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Üst ve alt karın arasındaki medyan sıcaklık farklılıklarının iki veri seti (20 sağlıklı ve 10 NEC hastalığı olan yenidoğan) kullanılarak sınıflandırmanın sonuçları, %90 +/-%12 özgüllük ve %78 +/-18% duyarlılık olarak hesaplanmıştır. Örnek ve ark. tarafından yayınlanan bir çalışma sıcaklık haritalarının kullanımının kırmızı-yeşil-mavi (RGB) görüntülere göre daha etkili olduğunu vurgulamıştır [77]. Örnek ve ark. başka bir çalışmada yenidoğan termal görüntüleri ve makine öğrenimini birleştirerek otomatik bir sağlıklı-hasta sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında 38 bebekten alınan 3800 görüntü veri artırma ile 30400'e çıkarılmış ve %99,58 doğruluk elde edilmiştir [78]. Örnek ve ark. tarafından 2020'de yayınlanan çalışmada ise termal haritalardan yerel ikili desen ve hızlı korelasyon tabanlı filtre yaklaşımları ile özellik seçme uygulaması, KA, YSA, LR ve RO algoritmaları ile hasta-sağlıklı sınıflandırması %92,5 doğruluk, %100 duyarlılık, %85 özgüllük ile yapılmıştır. Örnek ve Ceylan, VGG16 modeliyle transfer öğrenme uygulayarak %100 duyarlılık ve %94,7 özgüllük değerlerine [79] ve açıklanabilir derin öğrenme tabanlı çalışma ile %94,73 doğruluk değerine ulaşmışlardır [80]. Savasçi ve ark. 2019'da gerçekleştirdikleri sınıflandırma çalışmasında YSA ve çoklu çözünürlüklü analizi yöntemleri ile 38 yenidoğanın 190 görüntüsü üzerine %98,4 doğrulukla hasta-sağlıklı ayrımı yapmışlardır [81]. Ervural ve Ceylan sınırlı termal veri kullanarak yenidoğanda pulmoner anomalilerin belirlenmesine yöne-

lik ESA tabanlı bir metodoloji kullanmıştır. On altısı pulmoner hastalıkları, 18'i ise kalp ve abdominal bölge anomalisi olan 34 yenidoğanın görüntüsünün değerlendirildiği çalışmada %91 doğruluk %100 duyarlılık ve %86 özgüllük ile iki sınıf birbirinden ayrılmıştır [82].



Şekil 6. Sınırlı termal veri ile yenidoğanda pulmoner anomalilerin belirlenmesi [82].

Termoregülasyon Takibi

Termoregülasyon, canlıların yaşam fonksiyonlarını devam ettirebilmesi için vücut sıcaklığını çevredeki sıcaklık çok farklı olsa bile belirli sınırlar içinde tutma yeteneğidir. Yüzey sıcaklığı dağılımının dinamikleri yüzey tabakasındaki kan akışı, daha derin kan damarlarından ısı iletimi ve yüzeyden ter buharlaşması gibi bir dizi faktör tarafından yönetilir [83]. Termoregülasyon hem hayati fonksiyonların devamı hem de günlük konfor için çok önemlidir. Sıcak çarpmalarını önlemek, enfeksiyonların yayılmasını azaltmak, bağışıklık sistemi proteinlerinin metabolizmasını korumak gibi görevleri vardır [84].

Termografi, termoregülasyon süreçlerini izlemek için etkili bir araçtır. Alpar ve Kreicar el termografisinde düzensiz termoregülasyonun tespitinde bulanık c-ortalama tekniğini kullanmışlardır. Ellerde akut veya kronik vazospazm, parmaklara kan akışını azaltan aşırı vazokonstriksiyona neden olan önemli bir hastalıktır. Vasküler değişiklikler nedeniyle, ciddi vakalarda siyanoz ve renk değişikliğine de neden olabilir. Kan akışındaki azalma, termogramlar analiz edilerek termal görüntüleme ile teşhis edilebilir [85]. Çalışma sonucunda hafif vakalarda bile iskemi ve termoregülasyonu ortaya çıkaran etkin bir segmentasyon ortaya çıkmıştır.

Diğer Hastalıklar

Yapay zekâ tabanlı diğer uygulamalar bu başlık altında ele alınmıştır. Papez ve ark., YSA sınıflandırıcıları ve termal verilerle karpal tünel sendromu üzerine çalışmış ve %82,2'lik doğruluk ile sınıflandırmışlardır [86, 87]. Acharya ve ark. çalışmalarında kuru göz hastalığına odaklanmış ve tedavi izleme (doğruluk: % 99,88; duyarlılık: % 99,7; özgüllük: % 100) ile tanı (doğruluk: % 99,8; duyarlılık: % 99,8; özgüllük: % 99,8) için K-NN yaklaşımını kullanmışlardır [88, 89]. Romatoid artrit hastalığının varlığı ve daha iyi teşhis için belirli ilgi alanları üzerine Frize ve ark. çalışmalarında karar ağaçlarını kullanarak %96 duyarlılık ve %92 özgüllük hesaplamışlardır [90]. Umopathy ve ark. ise K-NN ile romatoid artrit tespitine yönelik çalışmada el termal görüntülerini kullanmış ve 30 sağlıklı, 30 hasta olmak üzere 60 denek ile %83 doğrulukla sınıflandırma gerçekleştirmiştir [91]. Kızılötesi termografi ve YZ algoritmalarının diğer uygulamaları arasında boyun zedelenmesi [92], sırt ağrısı [93], tiroid tümörleri [94], solunum [95], sarhoşluk durumu [96], egzersize bağlı yorgunluk [97], hipertansiyon [98], şizofreni [99], yanık yaraları [100], kardiyovasküler hastalıklar [101], hemodinamik şok [102] ve stres tanıma [103] yer almaktadır. Bu çalışmalarda YSA [92, 95, 97, 98, 103], DVM [93, 96, 97, 99], KA [94], RO [100, 102] ve NB [101] gibi sınıflandırma yöntemleri tercih edilmiştir.

Değerlendirme ve Sonuçlar

Araştırmacılar yoğun olarak DVM, YSA, ESA ve K-NN sınıflandırma algoritmalarını tercih etmektedir. Bazı çalışmalarda ise birden çok sınıflandırıcı birlikte kullanılmış ve karşılaştırmalı olarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Hâlihazırda yayınlanmış olan çok sayıda başarılı uygulama stratejisi ve Weka, Python ve Matlab gibi geliştirme ve hesaplama araçlarında önceden yazılmış algoritmaların mevcudiyeti bu seçimlerin bir gerekçesi olabilir. Araştırmaya göre, YZ kullanılarak kızılötesi termal görüntülemenin biyomedikal uygulamaları: Meme kanseri tespiti (20), diyabetik ve vasküler hastalıklar (7), cilt hastalıkları (3), yenidoğan hastalıkları (8), termoregülasyon analizi (1), karpal tünel sendromu (2), kuru göz hastalığı (2), romatoid artrit (2), boyun zedelenmesi (1), sırt ağrısı (1), tiroid anormallikleri (1), sarhoşluk durumu (1), egzersiz kaynaklı yorgunluk (1), solunum analizi (1), hipertansiyon (1), yanık yaraları (1), kardiyovasküler hastalıklar (1), hemodinamik şok (1), stres tanıma (1) ve şizofreni (1) şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Sınıflandırma uygulamalarının performansını ölçmek için genellikle duyarlılık, özgüllük ve doğruluk değerleri kullanılmıştır. Bu çalışmada incelenen literatürdeki birçok uygulamada sonuçları doğruluk, özgüllük ve duyarlılık değerlerinin hesaplanması ile karşılaştırılmıştır. Doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri sırasıyla (1), (2) ve (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

Doğru sınıflandırılan durumların, tüm durumlara oranı, doğruluk değerini ifade etmektedir.

$$\text{Doğruluk (\%)} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık (\%)} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (2)$$

$$\text{Özgüllük (\%)} = \frac{DN}{DN + YP} \quad (3)$$

Doğru pozitiflerin, doğru pozitif ve yanlış negatif sonuçların toplamına oranı duyarlılık, doğru negatif sonuçların, doğru negatif ve yanlış pozitif sonuçların toplamına oranı ise özgüllük değerlerini ifade etmektedir. Doğru pozitifler (DP), hasta etiketli bir durumun sınıflandırma algoritması tarafından hasta olarak sınıflandırılması. Doğru negatifler (DN), sağlıklı etiketli durumun sınıflandırma modeli tarafından sağlıklı olarak sınıflandırılması. Yanlış pozitifler (YP), hasta olarak etiketlenen bir sınıfın model tarafından sağlıklı olarak sınıflandırılması. Yanlış negatifler (YN), sağlıklı olarak etiketlenmiş hastalığın model tarafından hasta olarak sınıflandırılması olarak ifade edilir. Daha yüksek oranlar iyi bir YZ algoritmasının göstergesidir. Bununla birlikte, kötü sonuçlar çıkarmaktan kaçınmak için performans ölçütlerini tek tek değil bir bütün olarak incelemek büyük önem taşımaktadır.

Araştırma sonucunda incelenen çalışmalarda, medikal uygulama alanı, kullanılan sınıflandırma yöntemleri ve elde edilen doğruluk değerleri Tablo 2'de alfabetik sırayla verilmiştir.

Medikal Termografi ve Yapay Zekâ Tabanlı Uygulamaları

| Araştırma | Çalışma | En iyi sınıflayıcı | Doğruluk % |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------|------------|
| Acharya ve ark. [105] | Meme Kanseri | DVM | 88,1 |
| Acharya ve ark.[89] | Kuru Göz | DVM | 100 |
| Acharya ve ark. [88] | Kuru Göz | K-NN | 99,8 |
| Adam ve ark.[61] | Diyabetik Ayak | K-NN | 93,1 |
| Alzubaidi ve ark.[59] | Diyabetik Ayak | ESA | 94,5 |
| Araujo ve ark.[41] | Meme Kanseri | DVM | 94,8 |
| Baffa ve ark.[43] | Meme Kanseri | ESA | 98 |
| Cho ve ark. [103] | Stres Tanıma | YSA | 78,3 |
| Cruz-Vega ve ark.[60] | Diyabetik Ayak | YSA | 95,3 |
| Ervural ve ark.[82] | Yenidoğan Hastalıkları | ESA | 91 |
| Etehadtavakol ve ark.[48] | Meme Kanseri | AB | 95 |
| Fernandez-Ovies ve ark. [44] | Meme Kanseri | ESA | 98,75 |
| Francis ve ark.[52] | Meme Kanseri | DVM | 90,9 |
| Frize ve Ogungbemile [90] | Romatoid Artrit | KA | - |
| Frize ve ark. [76] | Yenidoğan, NEC | KA | - |
| Gogoi ve ark. [42] | Meme Kanseri | DVM | 98 |
| Gogoi ve ark. [38] | Meme Kanseri | DVM | 83,2 |
| Gopinath ve Prabu [94] | Tiroid Tümörleri | KA | 98 |
| Gururajarao ve ark. [62] | Diyabetik Ayak | YSA | 91 |
| Hernandez-Contreras ve ark. [58] | Diyabetik Ayak | YSA | 94,3 |
| Herry ve ark. [75] | Yenidoğan, NEC | REGRESYON ANALİZİ | 90 |
| Jayanthi ve Anburajan [101] | Kardiyovasküler Hastalık | NB | 90 |
| Jian ve ark. [99] | Şizofreni | DVM | 94,3 |
| Koukiou ve Anastassopoulos [96] | Sarhoşluk | DVM | 100 |
| Lashkari [54] | Meme Kanseri | AB | 87,4 |
| Lopez ve ark.[97] | Egzersize Bağlı Yorgunluk | ESA | 81,5 |
| Magalhes ve ark.[106] | Cilt Neoplazması | K-NN | 60 |
| Magalhes ve ark. [67] | Cilt Neoplazması | DVM | 84 |
| Magalhes ve ark.[65] | Cilt Neoplazması | DVM | 84,2 |
| Martinez-Jimenez ve ark.[100] | Yanık Yaraları | RO | 85,3 |
| Milosevic ve ark. [51] | Meme Kanseri | K-NN | 92 |
| Nagori ve ark. [102] | Hemodinamik Şok | RO | 73 |
| Nicandro ve ark.[47] | Meme Kanseri | NB | 71,8 |
| Örnek ve ark. [78] | Yenidoğan Hastalıkları | ESA | 99,5 |
| Örnek ve ark. [79] | Yenidoğan Hastalıkları | KA, YSA, LR, RO | 92,5 |
| Örnek ve ark. [80] | Yenidoğan Hastalıkları | ESA-VGG16 | 94,73 |
| Papez ve ark. [86] | Karpal Tünel Sendromu | YSA | 82,5 |
| Papez ve ark. [87] | Karpal Tünel Sendromu | YSA | 72,2 |
| Prochazka ve ark. [95] | Solunum | YSA | 100 |
| Raghavendra ve ark. [55] | Meme Kanseri | KA | 98 |
| Roslidar ve ark. [45] | Meme Kanseri | ESA | 100 |
| Samant ve Agarwal [63] | Diyabetik Ayak | RO | 89,6 |
| Sathish ve ark. [40] | Meme Kanseri | DVM | 90 |
| Savasci ve ark. [81] | Yenidoğan Hastalıkları | ANN | 98,4 |

Tablo 2. Kızılötesi termal görüntüleme alfabetik olarak sıralanan biyomedikal termal uygulamalar ve sırasıyla uygulanan temel sınıflandırıcı ile doğruluk değerleri

Kızılötesi termal görüntüleme son yıllarda medikal uygulamalarda kullanılıyor olmasına karşın henüz tetkik, tanı ve tedavide birincil modaliteler arasında gösterilmemektedir. Yapılan çalışmalar, bu teknolojinin YZ ile kullanımının etkinliğini kanıtlayarak da termografiden faydalanma bakımından keşfedilmemiş medikal alanlar oldukça fazladır. Bu durumun nedeni olarak termografi teknolojinin ilkelininin sağlık uzmanlarınınca bilinmemesi, laboratuvar altyapısının yaygın ölçekte olmaması gösterilebilir. Mevcut bilgi sistemlerine entegrasyonu ve gelişmiş teşhis araçlarının geliştirilmesini sağlayan standart bir görüntüleme dosyası formatının olmaması gibi bazı engeller öncelikli modaliteler arasına girmemesine neden olan bir diğer faktör olabilir. Sıcaklık hassasiyeti, yüksek uzaysal çözünürlüğünün yanı sıra tamamen temassız olması kızılötesi termal görüntülemenin zararsız bir görüntüleme metodu olduğunu kanıtlamaktadır. Yeni nesil kızılötesi algılayıcıların ortaya çıkmasıyla, kızılötesi termal görüntüleme, anormal sıcaklık modeli ölçümleri için daha doğru bir alternatif tıbbi teşhis aracı haline gelecektir. Termal görüntüler dijital olarak depolanabilir ve termal model hakkında fikir edinmek için çeşitli yazılım paketleri kullanılarak sonradan işlenebilir olması avantajlarından biridir. Raynaud fenomeni, yumuşak doku romatizması, kan basıncı, el-kol titreşim sendromu, periferik sinir kompresyonları, kompleks bölgesel ağrı sendromu, ateş taraması, eklem romatizması, diyaliz, kemoterapi değerlendirilmesi ve rehabilitasyon prosedürlerinin değerlendirilmesi gibi sorunlar termal görüntüleme ve YZ kullanımı ile büyük başarı sağlayabilecek uygulamalara örnek olarak verilebilir.

Kaynakça

- Rogalski, A. and Chrzanowski, K. Infrared devices and techniques. *Optoelectronics Review*, 2002. 10(2): p. 111-136.
- Sruthi, S. and Sasikala, M. A. low cost thermal imaging system for medical diagnostic applications. in 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). 2015. IEEE.
- Bouzida, N., Bendada, A. and Maldague, X.P. Visualization of body thermoregulation by infrared imaging. *Journal of Thermal Biology*, 2009. 34(3): p. 120-126.
- Ring, E. and Bacon, P. Quantitative thermographic assessment of inositol nicotinate therapy in Raynaud's phenomena. *Journal of International Medical Research*, 1977. 5(4): p. 217-222.
- Lahiri, B., et al. Medical applications of infrared thermography: a review. *Infrared Physics & Technology*, 2012. 55(4): p. 221-235.
- Hildebrandt, C., et al. The application of medical infrared thermography in sports medicine. An international perspective on topics in sports medicine and sports injury, 2012. 534.
- Knobel, R.B., Guenther, B.D. and Rice, H.E. Thermoregulation and thermography in neonatal physiology and disease. *Biological research for nursing*, 2011. 13(3): p. 274-282.
- Jones, B.F. A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine. *IEEE transactions on medical imaging*, 1998. 17(6): p. 1019-1027.
- Ring, E. and Ammer, K. Infrared thermal imaging in medicine. *Physiological measurement*, 2012. 33(3): p. R33.
- Technical reference for thermal imagers for human temperature screening. Part 1, Requirements and test methods. 2003: Singapore
- Technical reference for thermal imagers for human temperature screening. Part 2, SPRING Singapore. 2004, Standardisation Dept., SPRING Singapore: Singapore.
- Ammer, K., The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body. *Thermol Int*, 2008. 18(4): p. 125-44.
- Schwartz, R., et al. The american academy of thermology. Guidelines for neuromusculoskeletal thermography. *Thermol Int*, 2006. 16: p. 5-9.
- Govindarajan, J., A Case for Joint Development of IR Cameras in India. *Journal on Intelligent Electronic Systems*, 2007. 1(1).
- Steketee, J., Spectral emissivity of skin and pericardium. *Physics in Medicine & Biology*, 1973. 18(5): p. 686.
- Amalu, W., et al. Infrared imaging of the breast—An overview. *The Biomedical Engineering Handbook*, 3rd ed., Medical Devices and Systems. CRC Press, Baton Rouge, 2006.
- Lawson, R. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer. *Canadian Medical Association Journal*, 1956. 75(4): p. 309.
- Williams, K.L., Williams, F.L. and Handley, R. Infra-red thermometry in the diagnosis of breast disease. *The Lancet*, 1961. 278(7217): p. 1378-1381.
- Gershon-Cohen, J., Haberman-Brueschke, J. and Brueschke, E. Medical thermography: A summary of current status. *Radio-logic Clinics of North America*, 1965. 3(3): p. 403-431.
- Haberman, J.D. The present status of mammary thermography. *CA: a cancer journal for clinicians*, 1968. 18(6): p. 314-321.
- Winsor, T. and Bendezu, J. Thermography and the peripheral circulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964. 121(1): p. 135-156.
- Skversky, N.J., Herring, A.B. and Baron, R.C. Thermography in peripheral vascular diseases. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964. 121(1): p. 118-134.
- Albert, S., Glickman, M. and Kallish, M. Thermography in orthopedics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964. 121(1): p. 157-170.
- Connell Jr, J.F., Morgan, E. and Rousselot, L.M. Thermography in trauma. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964. 121(1): p. 171-176.
- Boas, N.F. Thermography in rheumatoid arthritis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964. 121(1): p. 223-234.
- Lane, W.Z., Thermography in diseases of the thorax. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964. 121(1): p. 190-208.
- Sandrow, R.E., et al. The use of thermography in the early diagnosis of neuropathic arthropathy in the feet of diabetics. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1972. 88: p. 31-33.
- Hartmann, M., Kunze, J. and Friedel, S. Telethermography in the diagnostics and management of malignant melanomas. *The journal of dermatologic surgery and oncology*, 1981. 7(3): p. 213-218.
- Cole, R.P., Jones, S. and Shakespeare, P. Thermographic assessment of hand burns. *Burns*, 1990. 16(1): p. 60-63.
- Soffin, C.B., et al. Thermography and oral inflammatory . *Oral surgery, oral medicine, oral pathology*, 1983. 56(3): p. 256-262.
- Steed, P.A., The utilization of contact liquid crystal thermography in the evaluation of temporomandibular dysfunction. *CRA-NIO*, 1991. 9(2): p. 120-128.
- Herrick, R.T. and Herrick, S.K. Thermography in the detection of carpal tunnel syndrome and other compressive neuropathies. *The Journal of hand surgery*, 1987. 12(5): p. 943-949.
- Shatsova, E. and Popov, V. The possibilities of infrared thermography in the diagnosis of thyroid pathology. *Problemy endokrinologii*, 1989. 35(2): p. 34-37.
- Nilsson, N.J. Principles of artificial intelligence. 2014: Morgan Kaufmann.
- Deo, R.C. Machine learning in medicine. *Circulation*, 2015. 132(20): p. 1920-1930.

36. Ng, E. and Sudharsan, N. Numerical computation as a tool to aid thermographic interpretation. *Journal of medical engineering & technology*, 2001. 25: p. 53-60.
37. Zuluaga-Gomez, J., et al. A CNN-based methodology for breast cancer diagnosis using thermal images. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 2020: p. 1-15.
38. Gogoi, U.R., et al. Singular value based characterization and analysis of thermal patches for early breast abnormality detection. *Australasian physical & engineering sciences in medicine*. 41(4): p. 861-879.
39. Roslidar, R., et al. A Review on Recent Progress in Thermal Imaging and Deep Learning Approaches for Breast Cancer Detection. *IEEE Access*, 2020. 8: p. 116176-116194.
40. Sathish, D., et al. Asymmetry analysis of breast thermograms using automated segmentation and texture features. *Signal, Image and Video Processing*, 2017. 11(4): p. 745-752.
41. Araujo, A.D.S., et al. Computer aided diagnosis for breast diseases based on infrared images. in *2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*. 2017. IEEE.
42. Gogoi, U.R., et al. Evaluating the efficiency of infrared breast thermography for early breast cancer risk prediction in asymptomatic population. *Infrared Physics & Technology*, 2019. 99: p. 201-211.
43. Baffa, M.d.F.O. and Lattari, L.G. Convolutional neural networks for static and dynamic breast infrared imaging classification. in *2018 31st SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. 2018. IEEE.
44. Fernández-Ovies, F.J., et al. Detection of breast cancer using infrared thermography and deep neural networks. in *International Work-Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. 2019. Springer.
45. Roslidar, R., et al. A study of fine-tuning CNN models based on thermal imaging for breast cancer classification. in *2019 IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (CyberneticsCom)*. 2019. IEEE.
46. Schaefer, G., Závisek, M. and Nakashima, T. Thermography based breast cancer analysis using statistical features and fuzzy classification. *Pattern recognition*, 2009. 42(6): p. 1133-1137.
47. Nicandro, C.-R., et al. Evaluation of the diagnostic power of thermography in breast cancer using bayesian network classifiers. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2013. 2013.
48. EtehadTavakol, M., et al. Breast cancer detection from thermal images using bispectral invariant features. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013. 69: p. 21-36.
49. Silva, L.F., et al. Thermal Signal Analysis for Breast Cancer Risk Verification. in *MedInfo*. 2015.
50. Wahab, A.A., et al. Tumor localization in breast thermography with various tissue compositions by using Artificial Neural Network. in *2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*. 2015. IEEE.
51. Milosevic, M., Jankovic, D. and Peulic, A. Thermography based breast cancer detection using texture features and minimum variance quantization. *EXCLI journal*, 2014. 13: p. 1204.
52. Francis, S.V., Sasikala, M. and Saranya, S. Detection of breast abnormality from thermograms using curvelet transform based feature extraction. *Journal of medical systems*, 2014. 38(4): p. 1-9.
53. Zadeh, H.G., et al. Segmenting breast cancerous regions in thermal images using fuzzy active contours. *EXCLI journal*, 2016. 15: p. 532.
54. Lashkari, A. Early Breast Cancer Detection in Thermogram Images using Supervised and Unsupervised Algorithms. *Middle East Journal of Cancer*, 2016. 7(3): p. 113-124.
55. Raghavendra, U., et al. An integrated index for breast cancer identification using histogram of oriented gradient and kernel locality preserving projection features extracted from thermograms. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2016. 13(2): p. 195-209.
56. Sims Jr, D.S., Cavanagh, P.R. and Ulbrecht, J.S. Risk factors in the diabetic foot: recognition and management. *Physical therapy*, 1988. 68(12): p. 1887-1902.
57. Purnima, S., et al. Automated Detection of Diabetic Foot Using Thermal Images by Neural Network Classifiers. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2017. 4(2348-9480): p. 5183-5188.
58. Hernandez-Contreras, D., et al. Automatic classification of thermal patterns in diabetic foot based on morphological pattern spectrum. *Infrared Physics & Technology*, 2015. 73: p. 149-157.
59. Alzubaidi, L., et al. DFU_QUTNet: diabetic foot ulcer classification using novel deep convolutional neural network. *Multimedia Tools and Applications*, 2020. 79(21): p. 15655-15677.
60. Cruz-Vega, I., et al. A comparison of intelligent classifiers of thermal patterns in diabetic foot. in *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2019. IEEE.
61. Adam, M., et al. Automated detection of diabetic foot with and without neuropathy using double density-dual tree-complex wavelet transform on foot thermograms. *Infrared Physics & Technology*, 2018. 92: p. 270-279.
62. Gururajao, S.B., et al. Infrared thermography and soft computing for diabetic foot assessment, in *Machine Learning in Bio-Signal Analysis and Diagnostic Imaging*. 2019, Elsevier. p. 73-97.
63. Samant, P. and Agarwal, R. Machine learning techniques for medical diagnosis of diabetes using iris images. *Computer methods and programs in biomedicine*, 2018. 157: p. 121-128.
64. Lupi, O., Tying, S.K. and McGinnis, M.R. Tropical dermatology: Fungal tropical diseases. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2005. 53(6): p. 931-951.
65. Magalhaes, C., et al. Distinguishing melanocytic nevi from melanomas using static and dynamic infrared thermal imaging. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 2019. 33(9): p. 1700-1705.
66. Linos, E., et al. Increasing burden of melanoma in the United States. *Journal of Investigative Dermatology*, 2009. 129(7): p. 1666-1674.
67. Magalhaes, C., Vardasca, R. and Mendes, J. Recent use of medical infrared thermography in skin neoplasms. *Skin Research and Technology*, 2018. 24(4): p. 587-591.
68. Bauer, J., et al. Non-contact thermal imaging as potential tool for personalized diagnosis and prevention of cellulite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018. 133(1): p. 571-578.
69. Organization, W.H. Newborn death and illness. 2020; Available from: https://www.who.int/pmnch/media/press_materials/fs/fs_newbornddeath_illness/en/.
70. Hug, L., et al. National, regional, and global levels and trends in neonatal mortality between 1990 and 2017, with scenario-based projections to 2030: a systematic analysis. *The Lancet Global Health*, 2019. 7(6): p. e710-e720.
71. Vyas, H.V., Greenberg, S.B. and Krishnamurthy, R. MR imaging and CT evaluation of congenital pulmonary vein abnormalities in neonates and infants. *Radiographics*, 2012. 32(1): p. 87-98.
72. Taylor, A.M. Cardiac imaging: MR or CT? Which to use when. *Pediatric radiology*, 2008. 38: p. 433.
73. Topalidou, A., et al. Thermal imaging applications in neonatal

- tal care: a scoping review. *BMC pregnancy and childbirth*, 2019. 19(1): p. 1-14.
74. Ervural, S., Ceylan, M. and Örnek, A.H. Yapay zekânın termal görüntüleme üzerine uygulamaları. *Türkiye Klinikleri Radyoloji*, 2020: p. 6-11.
75. Herry, C.L., Frize, M. and Bariciak, E. Assessment of abdominal skin temperature change in premature newborns with NEC compared to healthy controls. in *5th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*. 2011. Springer.
76. Frize, M., et al. Infrared Imaging and Classification of Neonates with Necrotising Enterocolitis. in *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering May 26-31, 2012, Beijing, China*. 2013. Springer.
77. Ornek, A.H., Ervural, S. and Ceylan, M. Determination of Correct Approaches in Evaluation of Thermograms, in *IX. UR-SI-TÜRKİYE 2018 BİLİMSEL KONGRESİ*. 2018, International Union of Radio Science: KTO Karatay Üniversitesi, Konya.
78. Ornek, A.H., Ceylan, M. and Ervural, S. Health status detection of neonates using infrared thermography and deep convolutional neural networks. *Infrared Physics & Technology*, 2019. 103: p. 103044.
79. Örnek, A.H. and Ceylan, M. Classification of Medical Thermograms using Transfer Learning. in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 2020. IEEE.
80. Örnek, A.H. and Ceylan, M. Explainable Features in Classification of Neonatal Thermograms. in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 2020. IEEE.
81. Savasci, D., et al. Classification of unhealthy and healthy neonates in neonatal intensive care units using medical thermography processing and artificial neural network, in *Classification Techniques for Medical Image Analysis and Computer Aided Diagnosis*. 2019, Elsevier. p. 1-29.
82. Ervural, S. and Ceylan, M. Detection of Pulmonary Abnormalities of Neonates Using Thermal Imaging and Convolutional Neural Network, in *Conference on Machine Intelligence in Medical Imaging*. 2020, Society for Imaging Informatics in Medicine: Online.
83. Gulyaev, Y.V., et al. Dynamical infrared thermography in humans. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1995. 14(6): p. 766-771.
84. Ogura, Y., et al. Elevation of body temperature is an essential factor for exercise-increased extracellular heat shock protein 72 level in rat plasma. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2008. 294(5): p. R1600-R1607.
85. Alpar, O. and Krejcar, O. Detection of irregular thermoregulation in hand thermography by fuzzy C-means. in *International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. 2018. Springer.
86. Papež, B.J., et al. Infrared thermography based on artificial intelligence as a screening method for carpal tunnel syndrome diagnosis. *Journal of International Medical Research*, 2009. 37(3): p. 779-790.
87. Papež, B.J., Palfy, M. and Turk, Z. Infrared thermography based on artificial intelligence for carpal tunnel syndrome diagnosis. *Journal of International Medical Research*, 2008. 36(6): p. 1363-1370.
88. Acharya, U.R., et al. Automated diagnosis of dry eye using infrared thermography images. *Infrared Physics & Technology*, 2015. 71: p. 263-271.
89. Acharya, U.R., et al. Diagnosis of response and non-response to dry eye treatment using infrared thermography images. *Infrared Physics & Technology*, 2014. 67: p. 497-503.
90. Frize, M. and Ogungbemile, A. Estimating rheumatoid arthritis activity with infrared image analysis. *Studies in health technology and informatics*, 2012. 180: p. 594-598.
91. Umopathy, S., Vasu, S. and Gupta, N. Computer aided diagnosis based hand thermal image analysis: a potential tool for the evaluation of rheumatoid arthritis. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2018. 38(4): p. 666-677.
92. Egbert, D.D., Kaburlasos, V.G. and Goodman, P.H. Neural network discrimination of subtle image patterns. in *1990 IJCNN International Joint Conference on Neural Networks*. 1990. IEEE.
93. Koprowski, R. Automatic analysis of the trunk thermal images from healthy subjects and patients with faulty posture. *Computers in biology and medicine*, 2015. 62: p. 110-118.
94. Gopinath, M. and Prabu, S. Classification of thyroid abnormalities on thermal image: a study and approach. *IIOABJ*, May, 2016: p. 41-57.
95. Procházka, A., et al. Breathing analysis using thermal and depth imaging camera video records. *Sensors*, 2017. 17(6): p. 1408.
96. Koukiou, G. and Anastassopoulos, V. Fusion of Dissimilar Features from Thermal Imaging for Improving Drunk Person Identification. *Int. J. Signal Process. Syst*, 2017. 5: p. 106-111.
97. Lopez, M.B., del-Blanco, C.R. and Garcia, N. Detecting exercise-induced fatigue using thermal imaging and deep learning. in *2017 Seventh International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*. 2017. IEEE.
98. Thiruvengadam, J. and Mariamichael, A. A preliminary study for the assessment of hypertension using static and dynamic IR thermograms. *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*, 2018. 63(2): p. 197-206.
99. Jian, B.L., et al. The facial expression of schizophrenic patients applied with infrared thermal facial image sequence. *BMC psychiatry*, 2017. 17(1): p. 1-7.
100. Martínez-Jiménez, M.A., et al. Development and validation of an algorithm to predict the treatment modality of burn wounds using thermographic scans: Prospective cohort study. *PloS one*, 2018. 13(11): p. e0206477.
101. Jayanthi, T. and Anburajan, M. Model-based computer-aided method for diagnosis of cardiovascular disease using IR thermogram. 2019.
102. Nagori, A., et al. Predicting hemodynamic shock from thermal images using machine learning. *Scientific reports*, 2019. 9(1): p. 1-9.
103. Cho, Y., Julier, S.J. and Bianchi-Berthouze, N. Instant stress: detection of perceived mental stress through smartphone photoplethysmography and thermal imaging. *JMIR mental health*, 2019. 6(4): p. e10140.
104. Chang, T.C., Hsiao, Y.L. and Liao, S.L. Application of digital infrared thermal imaging in determining inflammatory state and follow-up effect of methylprednisolone pulse therapy in patients with Graves' ophthalmopathy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2008. 246(1): p. 45-49.
105. Acharya, U.R., et al. Thermography based breast cancer detection using texture features and support vector machine. *Journal of medical systems*, 2012. 36(3): p. 1503-1510.
106. Magalhaes, C., Vardasca, R. and Mendes, J. Classifying Skin Neoplasms with Infrared Thermal Images. in *presented at the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2018)*. 2018.
107. Armstrong, D., et al. Infrared Dermal Thermometry for the High-Risk Diabetic Foot. *Physical therapy*, 1997. 77: p. 169-75; discussion 176.

Medikal Termografi ve Yapay Zekâ Tabanlı Uygulamaları

108. Gratt, B. and Anbar, M. Thermology and facial telethermography: Part II. Current and future clinical applications in dentistry. *Dentomaxillofacial Radiology*, 1998. 27(2): p. 68-74.
109. Hosaki, Y., et al. Non-invasive study for peripheral circulation in patients with diabetes mellitus. *岡大三朝分院研究報告*, 2002. 72: p. 31-37.
110. Sun, P.C., et al. Relationship of skin temperature to sympathetic dysfunction in diabetic at-risk feet. *Diabetes research and clinical practice*, 2006. 73(1): p. 41-46.
111. Park, J.Y., Hyun, J.K. and Seo, J.B. The effectiveness of digital infrared thermographic imaging in patients with shoulder impingement syndrome. *Journal of shoulder and elbow surgery*, 2007. 16(5): p. 548-554.
112. Bagavathiappan, S., et al. Correlation between plantar foot temperature and diabetic neuropathy: a case study by using an infrared thermal imaging technique. *Journal of diabetes science and technology*, 2010. 4(6): p. 1386-1392.