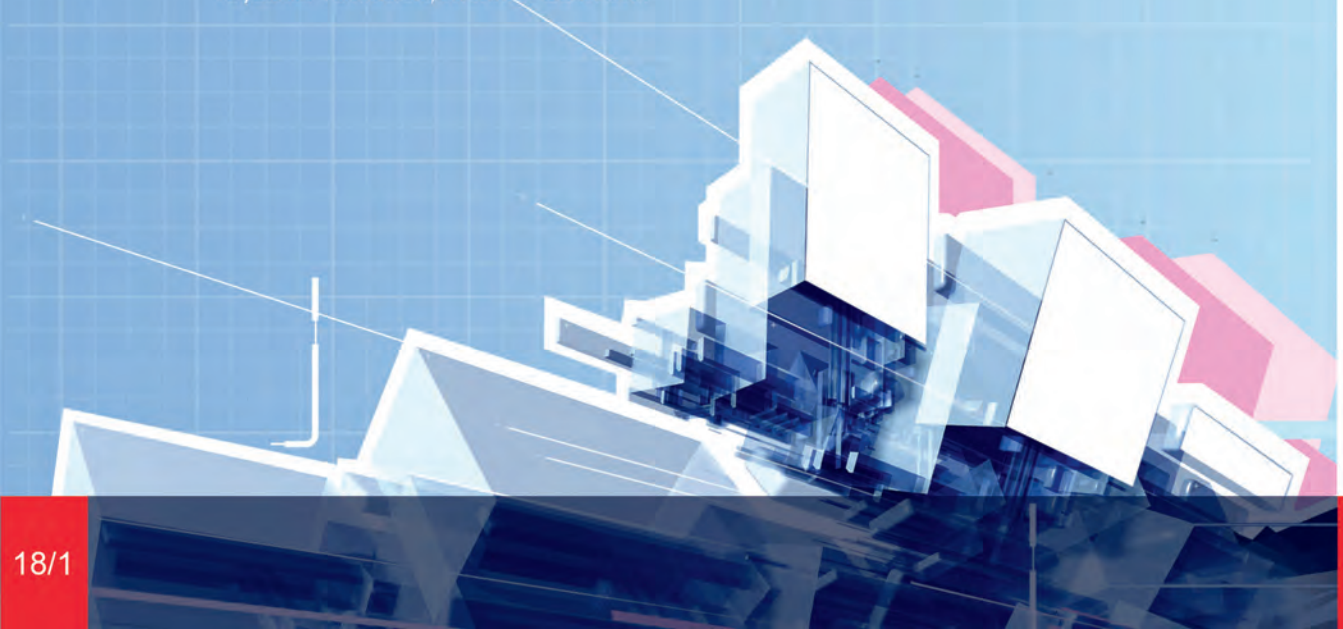
BBMD

BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ve MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

2025 Cilt:18 - Sayı:1



Adres:

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Darüşşafa Cad. 43L D:3 İstinye, Sarıyer-İstanbul

E-posta: AkademikBilisimvVakfi@gmail.vom

YAYIN KURULU

İÇİNDEKİLER

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Gizli Markov Modeli Kullanılarak Özbek Dilinde Sözcüklerin Nitelikleri ile Etiketlemesi

Tagging Words with Their Attributes in Uzbek Language Using the Hidden Markov Model

Botir Boltayevich ELOV
Alisher Navoiy nomidagi Toshkent Davlat O'zbek Tili va Adabiyoti Universiteti
Toshkent, Uzbekistan
elov@navoiy-uni.uz
ORCID: 0000-0001-5032-6648

Shahlo Mirdjonovna HAMROYEVA
Alisher Navoiy nomidagi Toshkent Davlat O'zbek Tili va Adabiyoti Universiteti
Toshkent, Uzbekistan
shaxlo.xamrayeva@navoiy-uni.uz
ORCID: 0000-0002-5429-4708

Zilola Yuldashevna XUSAINOVA
Alisher Navoiy nomidagi Toshkent Davlat O'zbek Tili va Adabiyoti Universiteti
Toshkent, Uzbekistan
xusainovazilola@navoiy-uni.uz
ORCID: 0000-0003-4357-7515

Öz

Markov modelleri, doğal dil işlemede en yaygın kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir. Markov zinciri ve gizli Markov modeli, dinamik sistemleri modellemek için kullanılan stokastik (rastlantısal) yöntemdir ve sistemin mevcut durumunu, önceki durumlara dayanarak tahmin eder. Markov modelleri *konuşma tanıma; konuşma sentezi; biçim bilimsel çözümleyici; makine çevirisi; el yazısını tanıma; sınıflandırma* gibi DDİ uygulamalarında kullanılabilecek karmaşık matematiksel yapılara sahiptir. *Tümcelerin oluşturulmasında doğru bir sözcük dizisi oluşturan Markov zinciri, DDİ çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bir tümcedeki Varlık Adlarını (NER: VAT) tanımlamak ve gizli Markov modeline dayalı Sözcükleri Nitelikleri ile Etiketlemek (SNE) için kullanılır. Markov modeline dayanarak, gizli etiketler derlemdeki etiketli sözcüklere göre tahmin edilir. Bu makale, Özbek dilinin etiketli derlemini temel alan bir Gizli Markov modeli kullanarak belirli bir tümcenin otomatik SNE etiketlemesine yönelik yöntemler ve algoritmaları sunmaktadır. Özbek dilinde eş anlamlı sözcüklerin bulunduğu ve metnin Sözcükleri Nitelikleri ile etiketlemesinde hangi sözcük kümesine ait olduğunun otomatik olarak belirlenmesi için Viterbi algoritmasının kullanılmasının iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Gizli Morkov modelinde Olasılık değerlerinin yayılımının belirlenmesi adımı önemlidir. Özbek dilinin bu özelliklerine göre metin etiketleme ve Sözcükleri Nitelikleri ile Etiketlemek (SNE) için Gizli Morkov modelinin kullanılması iyi sonuçlar vermektedir. Mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında Gizli Morkov modelinin kullanılması Özbekçe metinlerde Sözcükleri Nitelikleri ile Etiketlemek (SNE) %94'ü doğru çıktı ve Sözcükleri Nitelikleri ile Etiketlemek (SNE) iyileşme yüzdesi yükseldi.*

Anahtar Sözcükler: POS etiketleme, gizli Markov modeli, Markov zinciri, Gizli Markov Modelleri, Stokastik yöntemler, NLP, Kelime sınıfları, Eşsesli sözcük analizi, Geçiş olasılığı, Yayılma olasılığı, Viterbi algoritması.

Abstract

Markov models are one of the most widely used machine learning methods in natural language processing. Markov chain and hidden Markov model are stochastic (random) methods used to model dynamic systems and predict the current state of the system based on previous states. Markov chain, which creates a correct sequence of words in the creation of sentences, is widely used in NLP studies. It is also used to identify NERs in a phrase and for POS tagging based on hidden Markov model. Based on the Markov model, latent labels are predicted based on the labeled words in the language corpus. This article presents methods and algorithms for automatic POS tagging of a given phrase using a hidden Markov model based on a labeled corpus of the Uzbek language.

Keywords: POS tagging, hidden Markov model, Markov chain, Hidden Markov Models, Stochastic methods, NLP, Word classes, Homophone analysis, Transition probability, Propagation probability, Viterbi algorithm.

1.Giriş

Dil biliminin amacı, çevremizdeki sözlü ve yazılı konuşmalarda var olan dilsel özellikleri tanımlamak ve açıklamaktır. Öncelikle insanoğlunun bir diğer görevi de dilin edinimi,

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 02.04.2024 - 08.06.2024 – 24.02.2025
Makale türü: İnceleme

anlaşılması ve kullanılmasının bilişsel yönlerini açıklamak olsa da yine konu anlayışımız ile ilgilidir. Dilbilimin önemli görevlerinden biri de dilin dilsel yapısı üzerinden iletişimin nasıl gerçekleştiğini incelemektir. Bu görevi araştırmak için dilsel ifadeleri yöneten bir dizi kural bulunmaktadır.

Daha sonra istatistiksel dil modelleri oluşturulmuş ve DDİ'nin çeşitli alanlarında etkin bir şekilde kullanılmıştır. Uygulamada yararlı olmak, geçerli bir kuram geliştirmekle aynı şey olmasa da istatistiksel dil modellerin etkinliği özgün yaklaşımın geçerliliğini ortaya koymuştur [1].

DDİ çalışmalarında istatistiksel modelleme yöntemlerinden de yararlanılmaktadır. İstatistiksel yöntemler doğal olarak istatistiksel verilerden sonuç çıkarmaya çalışır. Bir olasılık dağılımı tarafından üretilen verileri kullanarak sonuç çıkarmaya çalışır. Makine öğrenmesi açısından Markov modeli, birçok DDİ aracı arasında önemli bir yer tutar. Doğal dil aslında, bağlam içinde anlam elde etmek için sözcük dizilerine dayanan olasılıksal bir yapıdır; dolayısıyla rastantısal modeller arasında Markov modellerinin kullanılmasına uygundur. Bu makale Markov modellerini DDİ çalışmalarına uygulamak için çeşitli çözümler sunmaktadır. Markov modelini anlamak için gerekli olan bazı rastgele, rastantısal ve belirgin süreçler hakkında temel bilgiler aşağıda sunulmuştur [2].

2. Genel bilgiler

2.1. Sözcük Türü Etiketlemesi

Markov Modeli (MM), bilinen olasılıkları analiz ederek gelecekte oluşacak bir şeyin olma olasılığını inceleyen bir yöntemdir. Doğal diller, bağlama uygun anlam elde etmek için sözcüklerin ve deyimlerin sırasına bağlı olan olasılıksal yapılar olarak kabul edilir ve Markov modeli gibi rastantısal modellerin kullanılması olanaklıdır.

Bir tümcedeki her sözcüğün (veya sözcük kümesinin) niteliğine göre etiketlenmesine SNE veya POS adı verilir. İfadeler, biçim bilimsel özellikler veya sözcük etiketleri SNE etiketi olarak işlenebilir. Çoğu durumda adlar, eylemler, önadlar ve benzer sözcük kümeleri SNE etiketi ile kullanılır. Küçük boyutlu dil derlemleri için SNE etiketlemesi insanlar tarafından yapılabilir. Ancak büyük boyutlu dil derleminde SNE etiketleme işlemi çok emek gerektirdiğinden günümüzde bu işlem otomatik yöntemlerle gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Şu anda, bir otomatik SNE etiketleyici geliştirmek için eğitim derlemi olarak kullanılacak küçük bir derlemde açıklamalar elle girilmeye çalışılmaktadır [3].

SNE etiketleri bir sözcük ve komşuları hakkında önemli bilgiler sağlar. SNE etiketleme veri toplama, ayrıştırma, metni seslendirme (TTS), veri çekme ve derlem çalışmalarında çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Ayrıca biçim bilimsel çözümleyici, söz dizimsel ayrıştırma, anlamsal ayrıştırma, çeviri ve diğer birçok yüksek düzey DDİ çalışması için bir ara (ilk) adım olarak kullanılmaktadır. Bu durum biçim bilimsel çözümleyici, etiketleme uygulamaları için önemli bir adım haline getirmektedir. Bu makale, Gizli Markov modelini kullanarak Özbekçe metinlerde biçim bilimsel çözümleyici ile etiketleme yöntemlerini tanıtmaktadır. Makale, DDİ'de metin işlemeye istatistik bir yaklaşım olarak Markov modellerine odaklanmaktadır. Çoğu DDİ araştırması, açıklama görevlerine bağımlılığı azaltmak için Markov modellerinin geliştirilmiş kullanımına sahip denetimli modeller kullanmaktadır.

Gizli Markov Modeli (GMM-HMM) gibi güçlü modeller, çok büyük miktarda eğitim verisi gerektirir ve bilinmeyen sözcüğü tanımlama sürecindeki doğruluğu düşüktür. Dünya dillerinin çoğu bu tür modellerin eğitiminde kullanılmak üzere hesaplamayı gerçekleştirmek için yeterli kaynağa (dil derlemleri) sahip değildir. Bu tür dillere yönelik DDİ uygulamaları geliştirme sürecinde pek çok bilinmeyen sözcük ile karşılaşılmaktadır. Bu durum modelin doğruluğunun düşük olmasına neden olmaktadır. Günümüzde doğruluğun arttırılması, küçük kaynaklı diller için önemli bir sorundur. Yazarlar tarafından Aralık 2022 itibarıyla geliştirilen Özbek dilinin etiketli eğitim derlemi 5.000.000.000'dan fazla tümce, yaklaşık 1.200.000 sözcük biçimi içermektedir ve makaledeki örnekler bu derlemden alınan tümcelerdir.

2.2. Gizli Markov Modeli

DDİ görevlerini çözmek için GMM kullanılabilir. GMM'ni incelemek için öncelikle Markov zincirini kısaca anımsamakta yarar vardır [8,9].

Markov zinciri, genellikle durumlar olarak bilinen rastgele değişken dizilerinin olasılıklarını temsil eden bir rastgele süreç modelidir. Her durum belirli bir kümeden değer alabilir. Yani mevcut durumun önceki durumuna bağlı olma olasılığı olarak anlaşılabilir. Bir dizi gözlemlenebilir olayın olasılığını hesaplamak gerektiğinde Markov zinciri kullanılır. Ancak çoğu durumda zincir gizli veya görünmezdir ve her durum, bizim için görülebilen her k gözlemden 1'ini rastgele üretir [10].

Durum, belirli bir zamanda belirli koşullar anlamına gelir. Bize $s_1,s_2,\ldots,s_n$ durumları için bir dizi değişken verilsin. Markov modelinin varsayımına göre:

$$(si = a \mid s1 \ldots si{-}1) = (si = a \mid si{-}1)$$

Markov zincirleri, bir olayın olasılığını, onu farklı bir duruma geçen veya önceki duruma dönen bir durum olarak ele alarak hesaplamak için kullanılır. Markov zincirinin temel açıklaması aşağıdaki Çizelge-1'de verilmiştir:

Çizelge-1. Markov Zincirinin Matematik Gösterimi

$Q = Q_1,Q_2, \ldots Q_n$	N olaydan oluşan bir grup
$A = a_{11},a_{12},\ldots a_{n1}\ldots a_{nn}$	A, her bir $\boldsymbol{aij - i}$ durumundan diğer bir **j** durumuna geçiş olasılığını temsil eden bir olasılık geçiş matrisidir. $\sum_{i=1}^{n} a_{ij} = 1, \quad \forall i$
$\pi = \pi_1, \pi_2,\ldots \pi_n$	S durumları için **başlangıç olasılık dağılımı.** π_i – Markov zincirinin belirli bir i durumunda başlama olasılığıdır. $\sum_{i=1}^{n} \pi_i = 1$

GMM, modellenen sistemin gizli veya gözlemlenmeyen

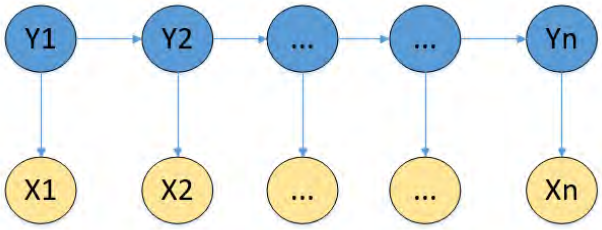
durumlara sahip bir Markov sürecinin analitik bir modelidir. GMM ilk olarak Baum ve Petrie tarafından geliştirilmiş ve ilk olarak DDİ'nin otomatik konuşma tanıma çalışmalarında kullanılmıştır. Jest tanıma, el yazısı tanıma, eşsesli çözümleme, tümce SNE etiketleme gibi makine öğrenimi ve örüntü tanıma gibi DDİ uygulamaları GMM modeline dayanmaktadır. GMM, olasılıksal modelimizde gözlemlenen veya görünen olaylar ve gizli olaylar hakkında akıl yürütmemize olanak tanımaktadır. GMM üç ana adıma dayalı olarak uygulanır: öğrenme, olasılık ve kod çözme:

Öğrenme: Bir dizi eğitim verisi verildiğinde GMM'nin parametrelerinin (özellikle eylem, geçiş ve yayılım olasılıklarının) belirlenmesi;

Olasılık: Eğitilmiş bir GMM'ne dayalı olarak verilen (gözlenen) değişkenler dizisinin olasılığının belirlenmesi;

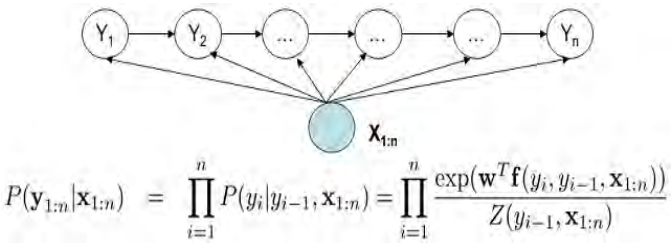
Kod çözme: Eğitilmiş bir GMM ve bir dizi gözlemlenen değişken göz önüne alındığında, gizli durumların olasılıksal bir dizisinin belirlenmesidir.

GMM'nde "*gizli*" sözcüğü, yalnızca sistem tarafından yayılan sinyallerin gözlemlenebileceği anlamına gelir ve kullanıcı durumlar arasındaki rastgele geçişi göremez.

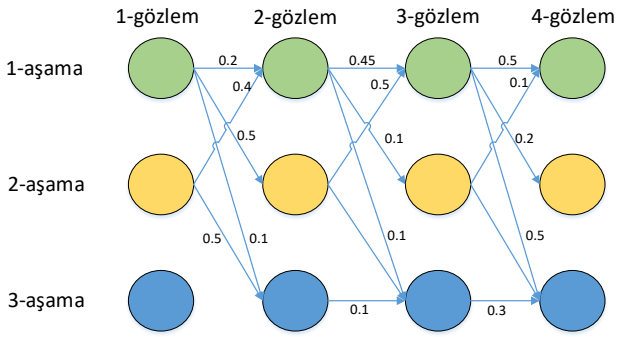


Şekil-1: Gizli Markov modeli

GMM etkili öğrenme algoritmaları ile güçlü bir istatistiksel temele sahiptir ve öğrenme süreci ham dizi verileri üzerinde gerçekleştirilir. Şekil-2'de gösterilen Maksimum Entropi Markov Modelleri (MEMM), komşu durumlar ile gözlemlenen toplam dizi arasındaki ilişkiyi dikkate alır. [14]. Şekil-3'te Markov modelinde gözlemler ve aşamalar gösterilmiştir.



Şekil-2: Maksimum Entropi Markov modelleri



Şekil-3: Markov modelinde gözlemler ve aşamalar

Markov modelleri, aşağıdaki DDİ uygulamalarında kullanılabilecek matematiksel yapılara sahiptir:

- *konuşma tanıma;*
- *konuşma sentezi;*
- *biçim bilimsel çözümleme;*
- *makine çevirisi;*
- *el yazısını tanıma;*
- *sıra sınıflandırması.*

Kullanıcı bir metni analiz ederken genellikle sözcük kümesine ilişkin etiketleri ayırt etmez, ancak sözcüklerin dizilişinden etiketler hakkında çıkarım yapar. Bu tür etiketler "*gizli*" olarak adlandırılır, çünkü onlar doğrudan izlenemezler [15]. Çizelge-2'de GMM'nin matematik açıklaması verilmiştir.

Çizelge-2. Gizli Markov Modelinin Matematiksel Açıklaması

$S = S_1,S_2,...S_n$	N vakadan oluşan bir grup
$A = a_{11},a_{12},...a_{n1}...a_{nn}$	*A*, her bir ***aij – i*** durumundan diğer bir **j** durumuna geçiş olasılığını temsil eden bir olasılık geçiş matrisidir. $\sum_{i=1}^{n} a_{ij} = 1, \quad \forall i$
$O = O_1,O_2,...O_t$	*T*, tamamı özel bir sözlükten (kaynak) alınmış bir gözlem (O) dizisidir. $V = V_1,V_2,...V_t$
$B = b_i(O_t)$	Tamamı $\mathbf{O_t}$ gözleminin *i* durumundan meydana gelme olasılığını temsil eden bir dizi gözlem olasılığı (yayılma olasılıkları denir).
$P = P_1,P_2,...P_n$	S durumları için **başlangıç olasılık dağılımı.** $\mathbf{P_i}$ – Markov zincirinin belirli bir *i* durumunda başlama olasılığı anlamına gelir. $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$

Bu makale, GMM'ni kullanarak Özbek tümcelerinin SNE etiketlemesine yönelik yöntemler sunmaktadır.

3. Kaynak Taraması

Markov modelleri DDİ'deki çeşitli sorunların çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek başına kullanılabildiği gibi farklı modellerle birleştirilerek de kullanılabilmektedir. Örneğin, GMM, konuşmaların incelenmesi veya diğer DDİ uygulamalarından dili tanımaya yönelik derin öğrenme ve

sinir ağı modellerini eğitmek için kullanılmaktadır [9].

S. Fawaz, GMM modelinde geçiş ve gözlem matrislerinin oluşturulması, veri dizisinin olasılığının hesaplanması, gizli durumların çıkarılması, GMM'nin profili gibi Markov zincirleri ve ile ilgili bazı yönleri analiz etmiştir.

K. Stratos ve M. Collins tarafından geliştirilen SNE etiketleme algoritması, Brownian kümeleme yöntemi ve Berg-Kirkpatrick logaritmik modeliyle karşılaştırılmaktadır. Araştırmacılar, ayrıca Markov zincirindeki gizli durumları otomatik olarak sözcükler ile eşleştiren bir model geliştirmişlerdir.

A. Kadim ve A. Lazrek, Arapça metinlerin nitelik etiketlemesi (POS) etiketlemesi için Hidden Markov koşut modelini kullanmışlardır. Ana GMM'e ek olarak düşük olasılıklı etiketler için kaynak görevi gören bir yardımcı model de kullanmışlardır. Ayrıca, her iki modeli eğitmek için Nemlar paralel Arapça derlemine dayalı dil bilgisi kurallarından yeni etiketler üretilmiştir. Yaklaşım, Java programlama dili araçları kullanılarak uygulanmış ve bunu değerlendirmek için çeşitli deneyler yapılmıştır.

J. Assunchao, P. Fernandes ve L. Lopez, düzgün tümceleri modellemek için ayrık zamanlı otomatik olarak oluşturulan Markov zincirlerini kullanarak sözcüklerin dil bilgisi sınıflarını tahmin etmek için yöntemler önermişlerdir. Bu yöntemin üstünlüğü hemen hemen her dil, lehçe veya jargon için etkili bir çözüm sunmasıdır.

D. Baishya ve R. Baruah, bir derleme sahip olmayan diller için Biçim Bilimsel Çözümleyici (BBÇ) ile etiketlemenin doğruluğunu arttırmak amacıyla rastantısal bir yöntem ve derin bir öğrenme modeli önermişlerdir. Araştırmaları, dilden bağımsız modellerde bilinmeyen sözcük doğruluğunu ve az miktarda eğitim verisiyle genel doğruluğu iyileştirmeye yönelik yöntemler sunmaktadır. Başlangıçta, eğitim örneklerinin bir parçası olan iki-gramlar ve üç-gramlar, Viterbi algoritması ve GMM kullanılarak bilinmeyen sözcüklerin etiketlenmesinin en yüksek olasılığını hesaplamak için kullanılmıştır. 10K'nın altındaki eğitim veri kümesiyle doğrulukta %12 ila %14'lük bir artış elde edilmiştir. Daha sonra çok az miktarda eğitim verisi ile çalışacak derin sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Bu sinir ağı, sözcük düzeyinde, karakter düzeyinde, karakter-iki-gram düzeyinde ve karakter-üç-gram düzeyinde gösterimlere dayalı olup, az miktarda eğitim verisi ile SNE etiketleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Hint dil ailesinden bir dil olan Odia için S. Pattnaik, A. Kumar ve S. Patnaik tarafından bir BBÇ temelli etiketleyici geliştirilmiştir. Etiketleyicinin geliştirilmesi, Viterbi algoritması ile iki-gram GMM'ni temel alıyor ve model, yaklaşık 0,2 milyon lokma büyüklüğünde turizm sektörüne ilişkin bir derlem üzerinde sınanmıştır. 3/1 eğitim-sınama oranıyla önerilen model, sınırlı eğitim boyutundan bağımsız olarak tatmin edici bir başarım göstermiştir.

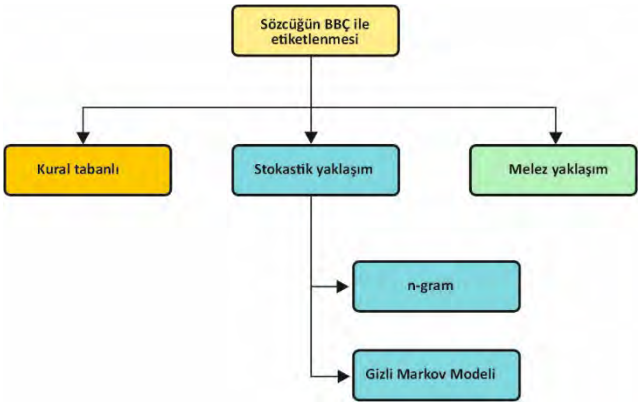
Güney Hint dili (Kannada) için makine öğrenmesi temelli bir SNE etiketleme sistemi S. Atmakuri, B. Shahi ve A. Rao tarafından önerilmiştir. Bu durumda SNE etiketlemeyi gerçekleştirmek için Koşullu Rastgele Alanlar (CRF) seçilir. CRF modeli, biçim bilimsel çözümleyici temelli etiketlemede sıra modelleme, nesne tanıma ve Gizli Markov modellerine karşıt olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada eğitim verileri olarak çok büyük üç dil derlemi kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ch. Alebachev, K. Hivot ve B. Tibebu gibi araştırmacılar, İngilizce Amharca, Afan Oromo, Tigrigna ve diğer diller için SNE etiketleyicileri geliştirip uygulamışlardır. SNE etiketleyicileri geliştirmek için GMM kullanılarak gazeteler (sosyal, ekonomik ve politik yönler dahil), ders kitapları, radyo programları ve bültenler gibi çeşitli kaynaklardan toplanan 1500 tümcelik bir derlem geliştirmişlerdir. Toplanan tümceler, dilbilimciler tarafından her sözcük elle etiketlenmiş ve deneyler aracılığıyla GMM kullanılarak eğitim verileri üzerinde eğitilmiştir. Deneyler, GMM'ne göre SNE etiketlemede %92,77 oranında doğruluk elde edildiğini göstermiştir.

Dim Lam Cing ve Khin Mar Soe tarafından Myanmar dili için Sinir Ağı ve GMM gibi istatistiksel yaklaşımlara dayanan ayrı sözcük bölütleyiciler ve POS etiketleyiciler geliştirilmiştir. Çalışmada Myanmar dilinin karmaşık bir biçim bilimsel yapısı olan sözcük dışında bulunma sorununun üstesinden gelmeye yönelik yöntemler sunulmaktadır.

4. Modern Yaklaşımlar

Konuşmanın etiketlemesi DDİ'de önemli bir araştırma alanıdır. Biçim bilimsel çözümleme işleminde tümcedeki her sözcüğün hangi ulama ilişkin olduğu etiketlenir. Adlar, eylemler, adıllar ve önadlar gibi biçim bilimsel çözümleme etiketleri sözcüklere eklenir ve bilgisayarların tümcelerin anlaşılmasına yardımcı olur. Aşağıdaki Şekil-4'te gösterildiği gibi biçim BBÇ kullanarak etiketleme ile ilgili olarak, uygulamaya yönelik farklı yaklaşımlar ve yöntemler vardır: kural tabanlı, rastantısal veya istatistiksel, melez [24]:



Şekil-4: SNE etiketleme yaklaşımları

Kurallara Dayalı Biçim Bilimsel Çözümleyici ile Etiketleme

Kural tabanlı bir yaklaşım, bir sözcüğü bir etiketle eşleştirmek için bir sözlük kullanır. Bu, veri kümesi açıklamaları veya sözlük oluşturma gibi büyük miktarda el emeği gerektirir. Örneğin, bir önad sözcüğünden sonra sıklıkla bir ad sözcüğü gelir. Bazı durumlarda anahtar sözcüğü tanımlamak için normal ifade şablonları kullanılır. Uzmanlar tarafından derlenen sözlüklerle desteklenen, bilgiye dayalı etiketleyiciler son derece doğru sonuçlar üretir. Ancak kural tabanlı SNE etiketlemenin uygulanmasında birtakım sınırlamalar vardır [24].

Rastantısal Yöntemleri Kullanarak BBÇ ile Etiketleme

Bu yöntemle etiketleme işlemi otomatik olarak gerçekleştirilir ve veri kodlama ve sözlük oluşturma gerektirmez. Bir sözcüğü etiketlemek için istatistik, sıklık ve olasılık ilişkilerinden yararlanılır. Etiketleme işleminde bir sözcüğün belirli bir etiketle ilişkilendirilme olasılığı veya ardışık sözcüklerin sıklığı belirlenir. Bu yaklaşımda olasılıklar, eğitim derlemindeki etiketli verilere dayanarak hesaplanır. Rastantısal olarak SNE etiketleme, n-gramlar veya gizli Markov modelleri kullanılarak gerçekleştirilir [25].

Üç yaygın n-gram türü vardır: uni-gram (tek sözcük), bi-gram (iki sözcük) ve tri-gram (üç sözcük). Aşağıdaki Çizelge-3'te "Bir kurgu kitabı okudum" tümcesine karşılık gelen n-gramlar listelenmiştir:

Çizelge-3: Tümceye uygun gelen n-gramlar

N-gramlar	Sözcük/sözcük örnekleri
Uni-gram	Men badiiy kitobni o'qidim
Bi-gram	Men badiiy badiiy kitobni kitobni o'qidim
Tri-gram	Men badiiy kitobni badiiy kitobni o'qidim

Bu yaklaşım, n-gram olasılığını hesaplamak için istatistiksel bir model kullanır ve belirtilen n-gramlara karşılık gelen bir etiket atar. Bir uni-gram sözcüğün olasılığı aşağıdaki denklemle belirlenir:

$$P(g_i \mid d_i) = \frac{freq(d_i|g_i)}{freq\,(d_i)} \quad (1)$$

Bigram sözünün olasılığı aşağıdaki denklemle belirlenir:

$$P(g_i \mid d_i) = P(d_i \mid g_i) * P(g_i \mid g_{i-1}) \quad (2)$$

Trigram sözünün olasılığı aşağıdaki denklemle belirlenir:

$$P(g_i \mid d_i) = P(d_i \mid g_i) * P(g_i \mid g_{i-2}, g_{i-1}) \quad (3)$$

Burada g bir etiket ve w bir sözcük dizisidir. Geçerli sözcüğün geçerli etikete göre olasılığını ve geçerli etiketin önceki etikete göre olasılığını ifade eder. BBÇ ile etiketlemede GMM, metindeki her sözcüğe karşılık gelen bir etiketle ilişkilendirir. POS etiketleri gizli durumlar olarak kabul edilir ve GMM derlemde gözlemlenen (etiketli) sözcüklere bağlı olarak etiketi tahmin etmeye çalışır. Aşağıdaki eşitliği sağlayacak şekilde tanımlamak gerekir:

$$\prod_{i=1}^{n} (d_i \mid g_i) * P(g_i \mid g_{i-1}) \quad (4)$$

Melez Yöntemlere Dayalı BBÇ ile Etiketleme

Melez bir yöntem, BBÇ ile etiketlemede kural tabanlı ve rastantısal yaklaşımları birleştirir. İlk adımda model istatistiksel yöntemler kullanılarak eğitilir. Daha sonra sonucun verimliliğini artırmak için kural tabanlı bir yaklaşım uygulanır [26].

3.1 POS (Sözcük Türü Etiketlemesi) Etiketleme Yöntemleri

Özbekçe metinlerin POS etiketlemesi için kullanılabilecek farklı yöntemler vardır:

Kurallara Dayalı BBÇ ile Etiketleme

Kural tabanlı POS etiketleme modelleri, bir dizi dil bilgisi kuralını kullanarak metindeki kelimelere POS etiketlerini atar. Bu dil bilgisi kurallarına genellikle bağlam çerçevesi kuralları denir. İşte bu tür kurallara örnekler:

"Belirsiz/bilinmeyen sözcük "-di" ekiyle bitiyorsa, eylem olarak işaretleyin."

Dönüşüm Tabanlı Etiketleme

Dönüşüm tabanlı yaklaşımlar, önceden insan tarafından tanımlanmış kuralların yanı sıra eğitim sırasında geliştirilen otomatik olarak uygulanan kuralları kullanır.

Derin Öğrenme Modelleri

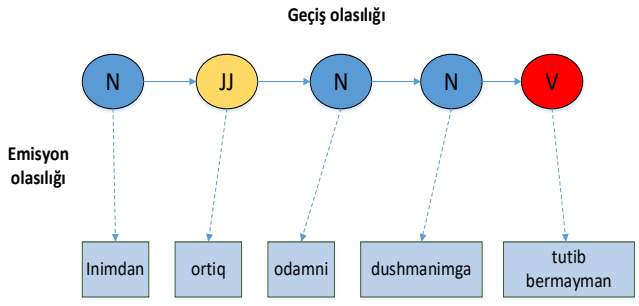
POS etiketleri için farklı derin öğrenme modelleri kullanılmaktadır. Örneğin Meta-BiLSTM modeli yaklaşık %97 doğruluk sağlamaktadır [27,28].

Rastantısal (olasılıksal) Etiketleme

Olasılıksal bir yaklaşım sıklık, olasılık veya istatistikleri içerir. En basit olasılıksal yaklaşım, eğitim verilerinde belirli bir sözcük için en sık kullanılan etiketi belirler ve bu bilgiyi o sözcüğü düz metin olarak etiketlemek için kullanır. Ancak bazı durumlarda bu yaklaşım dilin dil bilgisi kurallarına uymayan etiketler üretebilir. Böyle bir yaklaşım, bir tümce için farklı olası etiket dizilerinin olasılıklarını hesaplamak ve POS etiketlerini en yüksek olasılıkla diziden atamaktır. GMM POS etiketleme için olasılık temelli bir yaklaşımdır.

Gizli Markov Modeli ile SNE Etiketleme

GMM, rastantısal yöntemler kullanarak metinde BBÇ ile etiketlemeye yönelik bir modeldir. GMM konuşma, yazma, jest tanıma ve biyo-informatik gibi DDİ uygulamalarına uygulanabilir. Luis Serrano tarafından önerilen bir örneği ele alalım ve Gizli Markov Modeli kullanarak metin için uygun bir etiket dizisi seçelim [29,30]. Durum Şekil-5'te gösterilmiştir.



Şekil-5: Luis Serrano tarafından önerilen HMM yöntemi

Bu örnekte yalnızca adlar, kipler ve eylemlerden oluşan 3 SNE etiketi görülür. "*Doğa gelin gibi güzeldir*" tümcesi ad, nesne, ad ve önad olarak etiketlenerek bu dizinin geçiş olasılığını ve yayılma olasılığını hesaplamak gerekir.

Geçiş olasılığı belirli bir dizinin olasılığıdır; örneğin bir adın ardından bir ilgeç gelmesi, bir önadın ardından bir ilgeç

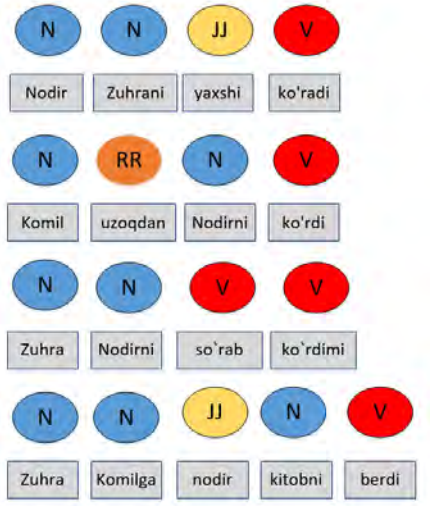
gelmesi ve bir önadın ardından bir adın gelmesi olasılığı. Bu tür olasılığa geçiş olasılığı denir. Belirli bir dizinin doğru olması için bu olasılık değerinin yüksek olması gerekir.

Şimdi "*tabiat*" sözcüğünün ad, "*gibi*" sözcüğünün ad, "*gelin*" sözcüğünün ad, "*serbezak*" sözcüğünün de önad olma olasılığını hesaplayalım. Bu olasılıklar dizisine emisyon (yayılma) olasılığı denir.

Yukarıdaki iki olasılığı aşağıdaki tümce kümesi için hesaplanmıştır:

1. **Nadir Zuhra'yı** seviyor.
2. **Kamil** uzaktan **Nadir'i** gördü.
3. **Zuhra Nadir'e** sordu mu?
4. **Zuhra** nadir kitabı Kamil'e verdi.

Nadir, **Zuhra** ve **Kamil**'in insan özel adları olduğuna dikkat edelim.



Şekil-6: SNE etiketlenen sözcükler

Yukarıdaki tümcelerde *Nadir* sözcüğü ad olarak üç kez ve önad olarak bir kez geçmektedir. Yayılım olasılığını hesaplamak için benzer şekilde bir hesaplama çizelgesi, aşağıda Çizelge-4'te oluşturulmuştur:

Çizelge-4: Verilen Tümcelere Karşılık Gelen Etiket Sıklıkları

Sözcükler	Ad	Önad	İlgeç	Eylem
Nodir	3	1	0	0
Zuhra	3	0	0	0
Komil	2	0	0	0
yaxshi	0	1	0	0
ko'radi/ko'rdi/ ko'rdimi	0	0	0	3
uzoqdan	0	0	1	0
so'rab	0	0	0	1
kitobni	1	0	0	0
berdi	0	0	0	1

Çizelge-4'teki değerler verilen dört tümceye ilişkin geçiş olasılık değerleridir. GMM, yukarıdaki tablolardan belirli bir tümce için uygun etiket sırasını nasıl belirlediği şöyle açıklanır: Yeni bir tümce alınıp Çizelge-5'te gösterildiği gibi yanlış etiketlerle işaretlenir.

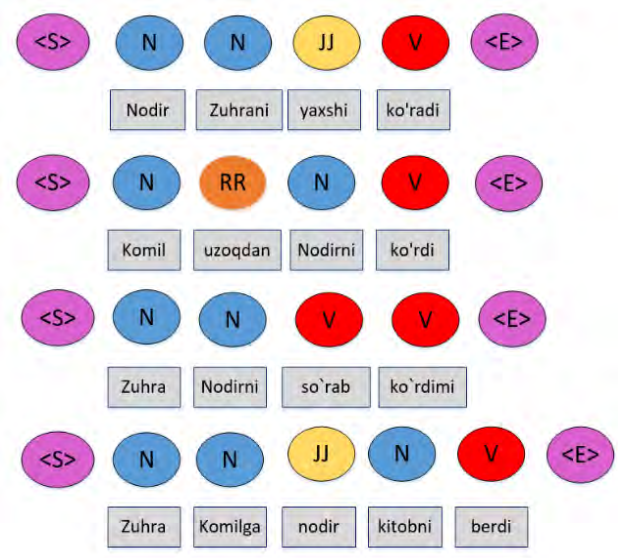
Çizelge-5: Yayılma Olasılığı Değerleri

Sözcük	Ad (N)	Önad (JJ)	İlgeç (RR)	Eylem (V)
Nodir	3/9	1/2	0	0
Zuhra	3/9	0	0	0
Komil	2/9	0	0	0
Yaxshi	0	1/2	0	0
ko'radi/ko'rdi/ ko'rdimi	0	0	0	3/5
Uzoqdan	0	0	1	0
so'radimi	0	0	0	1/5
Kitobni	1/9	0	0	0
Berdi	0	0	0	1/5

Çizelge- 4 ve Çizelge-5'deki değerlere dayanarak aşağıdaki sonuçlara varılır:

- ***Zuhra** sözcüğünün ad olma olasılığı = 3/9*
- ***Zuhra** sözcüğünün belirteç olma olasılığı = 0*
- ***Nodir** sözcüğünün ad olma olasılığı = 3/9*
- ***Nodir** sözcüğünün önad olma olasılığı = 1/2*

Kalan tüm olasılıklar da yukarıdaki yöntemle belirlenebilir. Bu emisyon olasılığıdır. Bir sonraki adımda geçiş olasılığını hesaplamak gerekir. Bu nedenle iki ek <S> ve <E> etiketi tanımladık. Aşağıdaki Şekil-7'te gösterildiği gibi, her cümlenin başına <S> ve sonuna <E> yerleştirilir:



Şekil-7: Sözcüğün biçim bilimsel sınıfına göre etiketlenmiş tümceler

Bir sonraki adımda etiket sayısını temsil eden Çizelge-6 oluşturulur:

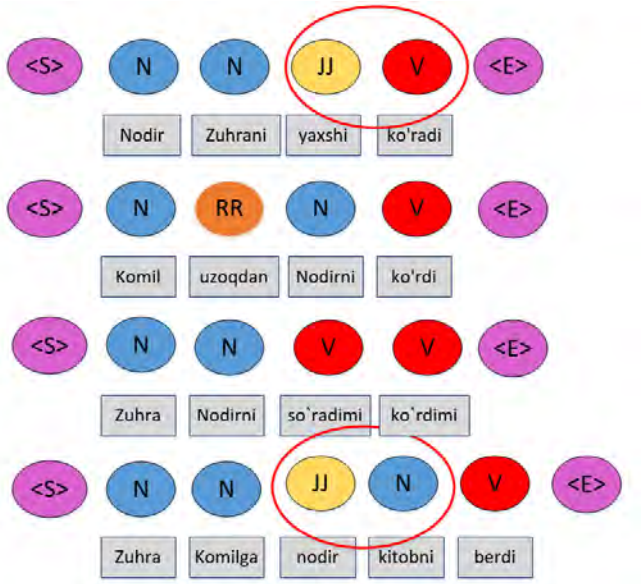
Çizelge-6: Sözcük Kümelerinin Ardışık Oluşum Olasılıkları

	N	JJ	RR	V	<E>
<S>	4	0	0	0	0
N	3	2	1	2	0
JJ	1	0	0	1	0
RR	1	0	0	0	0
V	0	0	0	1	4

Yukarıdaki Çizelge-6'da <S> etiketinin ardından N etiketinin dört kez geldiğini görüyoruz. Önad etiketi (JJ) İsim etiketinden

(N) sonra yalnızca 1 kez geçer. Bu nedenle ikinci yazı 1'e eşittir. Çizelgenin geri kalanı da aynı şekilde doldurulur.

Bir sonraki adımda çizelgenin satırındaki her terim dikkate alınan etiketin toplam sayısına bölüyoruz. Örneğin önad etiketinin (JJ) ardından 2 kez başka bir etiket gelir. Bu nedenle her bir öğe Şekil-8'de gösterildiği gibi bölünür:



Şekil-8: Sözcüğün biçim bilimsel kümesine göre etiketlenmiş tümceler.

Çizelge-7'de yayılma olasılık değerleri gösterilmiştir.

Çizelge-7: Geçiş Olasılık Değerleri

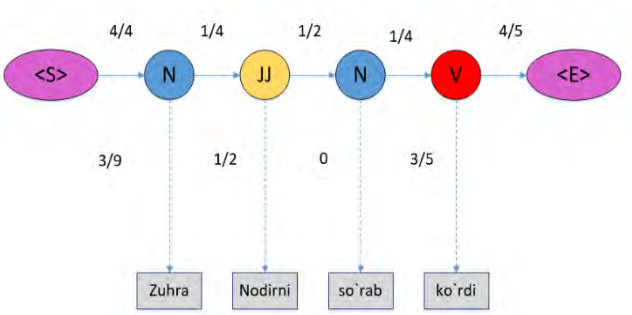
	N	JJ	RR	V	<E>
<S>	4/4	0	0	0	0
N	3/8	2/8	1/8	2/8	0
JJ	1/2	0	0	1/2	0
RR	1/2	0	0	0	0
V	0	0	0	1/5	4/5

Çizelge-7'deki değerler, verilen dört tümceye ilişkin geçiş olasılık değerleridir. GMM, Yukarıdaki çizelgelerden seçilen bir tümce için uygun etiket sırasının nasıl oluşturulacağını belirlemeye çalışır. Bu süreç şöyle açıklanır: İlk aşamada tümce yanlış olarak etiketlenir:

"*Zuhra Nadir'e sordu*" tümcesi (yanlış olarak) şöyle etiketlenir:

- *Zuhra – ad;*
- *Nodirni – önad;*
- *so'rab – ad;*
- *ko'rdi – eylem.*

Bir sonraki adımda bu dizinin doğru olma olasılığını şu şekilde hesaplıyoruz:

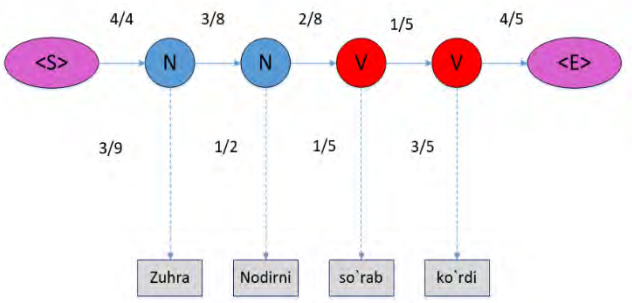


Şekil-9: Sözcük kümelerinin sırayla gelme olasılığı

Çizelge-7'de görüldüğü gibi önad etiketinin gelme olasılığı, ad (N) etiketinden sonra 1/4'tür. Ayrıca, *Zuhra* sözcüğünün Ad olma olasılığı da 3/9'dur. Aynı şekilde grafikteki her olasılık hesaplanır. Bu olasılıkların çarpımı dizinin doğru olma olasılığını belirler. Etiketler doğru olmadığından (biçimlendirilmediğinden) çarpan sıfırdır:

$$\frac{4}{4}\cdot\frac{3}{9}\cdot\frac{1}{4}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1}\cdot 0\cdot\frac{1}{4}\cdot\frac{3}{5}\cdot\frac{4}{5}=0$$

Verilen tümcedeki sözcükler doğru şekilde etiketlenmişse, aşağıda gösterildiği gibi sıfırdan büyük bir olasılık üretilir:

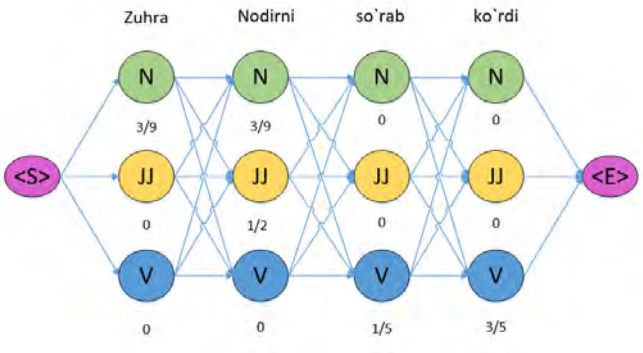


Şekil-10: Sözcük kümelerinin ardışık olarak ortaya çıkma olasılığı

Verilen tümcedeki sözcük sırasına karşılık gelen geçiş ve yayılma olasılık değerlerinin çarpımını hesaplanır:

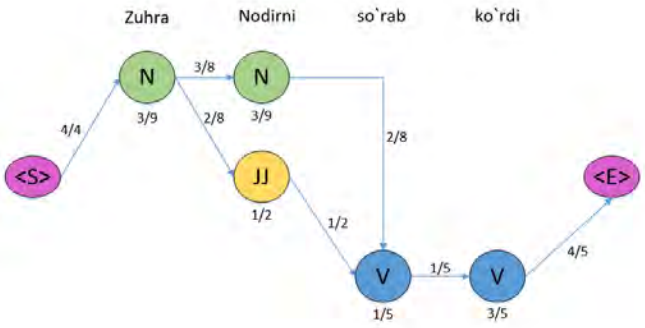
$$\frac{4}{4}\cdot\frac{3}{9}\cdot\frac{3}{8}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{8}\cdot\frac{1}{5}\cdot\frac{1}{5}\cdot\frac{3}{5}\cdot\frac{4}{5}=0.0003$$

Örneğin, bahsettiğimiz üç SNE etiketi göz önüne alındığında 16 farklı etiket kombinasyonu oluşturulabilir. Bu durumda 16 kombinasyonun tümünün olasılıklarını hesaplamak olanaklı görünmektedir. Ancak hedef daha büyük tümceleri tanımlamak olduğunda ve Penn Treebank projesindeki tüm SNE etiketleri dikkate alındığında olası kombinasyonların sayısı katlanarak artacak ve hedef olanaksız olacaktır. Bu 16 kombinasyonu yol olarak düşünüp ve grafiğin köşe ve kenarlarının her birine Şekil-11'de gösterildiği gibi geçiş ve yayılma olasılıklarını işaretleyelim.



Şekil-11: Belirli bir tümceyle eşleşen tüm SNE etiketlerinden oluşan (genel) bir grafik

Bir sonraki adımda grafiğin sıfır olasılığa sahip tüm köşe ve kenarları grafikten çıkarılmalıdır. Ayrıca, uç noktaya gitmeyen köşeler de kaldırılır. Böylece Şekil-12'deki sonuç elde edilir.



Şekil-12: Belirli bir tümceye karşılık gelen SNE etiketlerinin grafiği

Başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar yalnızca iki yol vardır ve her bir yola ilişkin olasılık şöyle hesaplanır:

$$< \mathbf{S} >\rightarrow \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V} \rightarrow < \mathbf{E} > = \frac{4}{4}\cdot\frac{3}{9}\cdot\frac{3}{8}\cdot\frac{3}{9}\cdot\frac{2}{8}\cdot\frac{1}{5}\cdot\frac{1}{5}\cdot\frac{3}{5}\cdot\frac{4}{5} = 0.0002$$

$$< \mathbf{S} >\rightarrow \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{JJ} \rightarrow \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V} \rightarrow < \mathbf{E} > = \frac{4}{4}\cdot\frac{3}{9}\cdot\frac{2}{8}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{5}\cdot\frac{1}{5}\cdot\frac{3}{5}\cdot\frac{4}{5} = 0.0004$$

Yukarıdaki hesaplamalarda ikinci sıranın gelme olasılığı çok daha yüksektir ve dolayısıyla GMM tümcelerdeki sözcüğü bu sıraya göre etiketler. Ama sonuç beklediğimiz gibi çıkmamıştır, yani "*Zühra Nadirni'yi gördü*" tümcesindeki "*Nadirni*" sözcüğü önad olarak etiketlenmiştir. Markov modelinin Viterbi algoritması kullanılarak optimize edilmesi istenilen sonucun elde edilmesini sağlayabilir. GMM algoritmasının sözde kodu aşağıda verilmiştir:

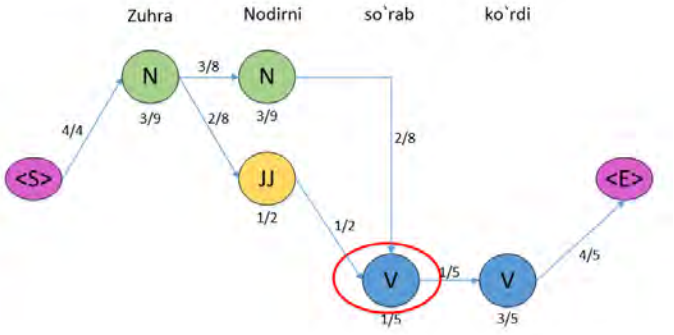
Yashirin Markov modeli algoritması

Initialize:
    $\sigma \leftarrow k \times N$ *array*
For s = 1 … k: $\sigma[1, s] \leftarrow \pi(s) Pr[O^1 | s]$
    X ← *k x N array*
Populate σ and X
    For i = 2 … *N*:
        For s = 1 … *k*:
            $xprev \leftarrow \underset{x}{\text{argmax}} \{\sigma[i\text{-}1, x] \Pr[x \rightarrow s]\}$
            X[*i*, *s*] ← *xprev*
            $\sigma[i, s] \leftarrow \sigma[i\text{ -}1, xprev] \Pr[x \rightarrow s] Pr[O^i | s]$
Reconstruct OptPath:
    $s \leftarrow \underset{x}{\text{argmax}}\{\sigma[N, x]\}$
Optpath ← *EmptyList*
    For j = *N* … 1:
        Optpath ← s :: *Optpath*
        if j > 1: *s* ← *X[j, s]*
Return OptPath

3.2 Viterbi Algoritmasını Kullanarak GMM Optimizasyonu (Eniyilemesi)

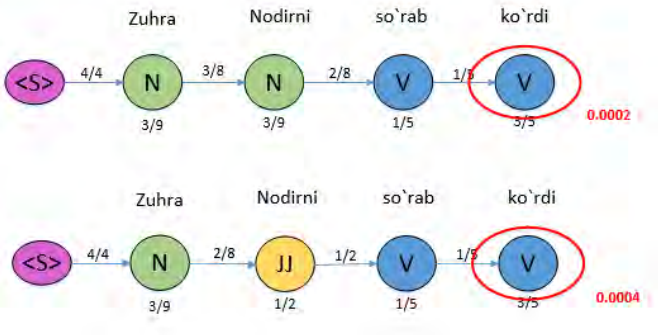
Viterbi algoritması, Viterbi yolu olarak adlandırılan ve gözlemlenen olay dizilerini, özellikle Markov veri kaynaklarını ve GMM kullanan bir dizi gizli durumu tanımlamak için dinamik bir programlama algoritmasıdır.

Yukarıdaki yorumlarda GMM en iyi duruma getirilmiş ve hesaplamalar 16'dan sadece ikiye indirilmiştir. Bir sonraki adımda, Viterbi algoritmasını kullanarak Gizli Markov modelinin daha da optimizasyonuna yönelik yöntemler sunulmaktadır. Daha önce kullandığımız örneği kullanarak Viterbi algoritması buna uygulanmıştır. Şekil-13.



Şekil-13: Viterbi algoritmasıyla uyumlu SNE etiketlerinin grafiği

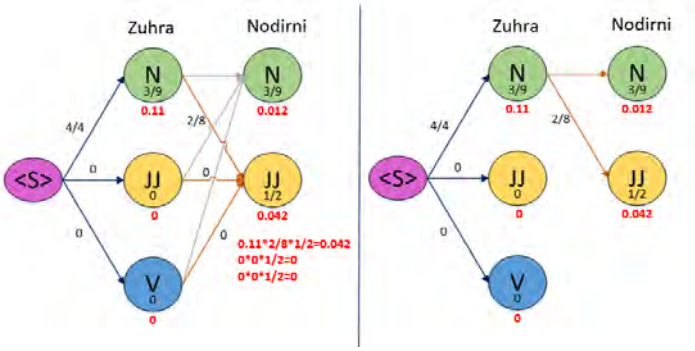
Şekil-13'teki örnekte, bölünmüş bir grafiğin tepe noktasını ele alınmaktadır. Şekil-14'te gösterildiği gibi bu zirveye giden iki yol vardır:



Şekil-14: Belirli bir tümceye karşılık gelen SNE etiketlerinden oluşan yollar

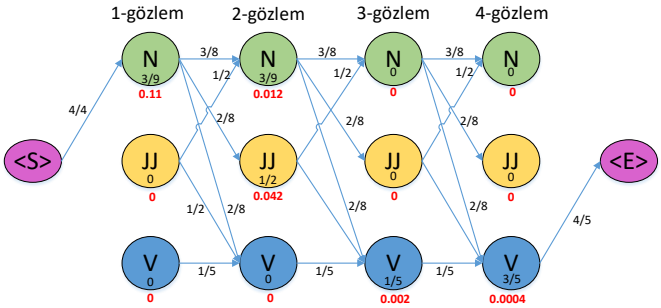
Bir sonraki adımda en düşük olasılığa sahip yol analiz edilir. Bu durum Şekil-15'te gösterildiği gibi grafikteki tüm durumlar için

aynı yöntem izlenir:



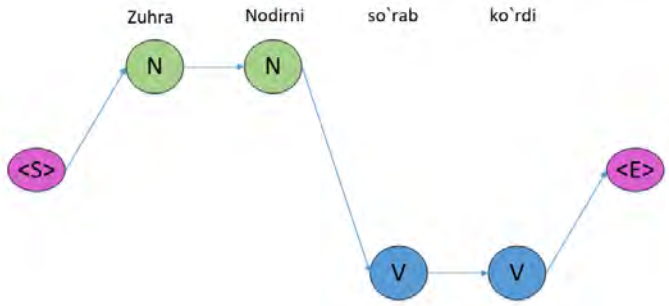
Şekil-15: SNE etiketlerinin grafik yollarının olasılık değerleri

Bir sonraki adımda grafiğin kenarına giden tüm yolların olasılıkları hesaplandıktan sonra olasılık değeri daha düşük olan kenarların veya yolun çıkarılması gerekir. Şekil-15'ten bazı köşelerin sıfır olasılığa sahip olduğu da görülebilmektedir. Grafiğin sonuna giden tüm yolların olasılıklarını hesapladıktan sonra Şekil-16'daki grafik oluşturulur.



Şekil-16: SNE etiketleri grafiğindeki yolların olasılık değerleri (genel)

En uygun yolu elde etmek için son üçte birlik kısımdan geriye doğru çalışırız, bu da bize aşağıda gösterilen yolu verir:



Şekil-17: Viterbi algoritmasına göre tanımlanan SNE etiketlerinin grafiği

Bu algoritma, iki yol sunan önceki yönteme kıyasla yalnızca bir yol döndürür. Dolayısıyla bu algoritma kullanılarak daha az hesaplama yapılır. Viterbi algoritması uygulandıktan sonra model tümce şu şekilde etiketlenir:

- *Zuhra – ad;*
- *Nodirni – ad;*
- *so'rab – eylem;*
- *ko'rdi – eylem.*

Bunlar geçerli etiketlerdir ve GMM'nin sözcüklere karşılık gelen SNE etiketleriyle başarılı bir şekilde etiketleyebildiği sonucuna varılabilir.

Sonuç ve Öneriler

GMM, bir olayın olasılığını analiz etmek için tasarlanmış grafiksel bir modeldir. Bu modelde kullanılan algoritmalar rastgele süreçleri incelemek ve çıkarmak için kullanılır. Bu çalışma aşağıdaki çalışmaları kapsamaktadır.

1. GMM ile Özbek dilinin etiketli ulusal derlemindeki gözlem verilerine dayanarak, verilen tümcelerin gizli hallere göre koşullu dağılımı belirlenebilir ve en yüksek olasılığa sahip değere göre sözcük etiketlemesi yapıldı.
2. GMM algoritmasının etkinliğini arttırmak için Viterbi algoritması kullanılarak gizli durumların sırasının Viterbi yolu şeklinde belirlendi.
3. Özbek dili derlemindeki 4 etiketli tümce örneği üzerinden, verilen tümcelerin otomatik etiketlenme işlemi birbirini izleyen adımlar esas alınarak gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları grafikler aracılığıyla sunulmuştur.
4. SNE etiketlemenin kalitesini artırmak için gözlem verilerinin (derlemdeki etiketli cümleler) miktarının artırılmasının gerektiği gösterilmiştir.
5. Özbek dili metinleri analizin kalitesi ve verimliliğini daha artırmak için Baum-Welch algoritması kullanıldı.

Kaynakça

[1] Rohman, Y. A., Kusumaningrum, R., *Twitter Storytelling Generator Using Latent Dirichlet Allocation And Hidden Markov Model POS-TAG (Part-Of-Speech Tagging)*. ICICOS 2019 - 3rd International Conference on Informatics and Computational Sciences: Accelerating Informatics and Computational Research for Smarter Society in The Era of Industry 4.0, Proceedings. https://doi.org/10.1109/ICICoS48119.2019.8982411, (2019).

[2] Muljono, U., Supriyanto, C., *Morphology Analysis For Hidden Markov Model Based Indonesian Part-of-Speech Tagger*. Proceedings - 2017 1st International Conference on Informatics and Computational Sciences, ICICoS 2017, 2018-January. https://doi.org/10.1109/ICICOS.2017.8276368, (2017).

[3] Xusainova, Z. Y. , *NLP: Tokenizatsiya, Stemming, Lemmatizatsiya Va Nutq Qismlarini Teglash. O'Zbek Amaliy Filologiyasi İstiqbollari / Respublika İlmiy-Amaliy Konferensiya To'Plami*. Elektron nashr / ebook. – Toshkent: ToshDO'TAU, 26.10.2022. 159-163 b.

[4] Baishya, D., Baruah, R., *Resource Languages with Improved Hidden Markov Model and Deep Learning*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(10). https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0121011, (2021).

[5] Pattnaik, S., Nayak, A. K., Patnaik, S., *A Semi-Supervised Learning Of HMM To Build A POS Tagger for a Low Resourced Language*. Journal of Information and Communication Convergence Engineering, 18(4). https://doi.org/10.6109/jicce.2020.18.4.207, (2020).

[6] Elov, B., Hamroyeva, Sh., Axmedova, X., *Methods for Creating a Morphological Analyzer*, 14th International Conference on Intellegent Human Computer Interaction, IHCI 2022, 19-23 October 2022, Tashkent. (2022).

[7] Assunção, J., Fernandes, P. Lopes, L., *Language Independent Pos-Tagging Using Automatically Generated Markov Chains*. Proceedings of the International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, SEKE, 2019-July. https://doi.org/10.18293/SEKE2019-097, (2019).

[8] Talarico, E., Leão, W., Grana, D., *Comparison of Recursive Neural Network and Markov Chain Models İn Facies Inversion*. Mathematical Geosciences, 53(3). https://doi.org/10.1007/s11004-020-09914-w, (2021).

[9] Myers, D. S., Wallin, L., Wikström, P., *An Introduction to Markov Chains and Their Applications Within Finance.* Mathematical Sciences-Chalmers University of Technology and University, (2017).

[10] Cahyani, D. E., Mustikaningtyas, W., *Indonesian Part of Speech Tagging Using Maximum Entropy Markov Model on Indonesian Manually Tagged Corpus.* IAES International Journal of Artificial Intelligence, 11(1). https://doi.org/10.11591/ijai.v11.i1.pp336-344 , (2022).

[11] Jurafsky, D., Martin, J., *Speech and Language Processing*. In Speech and Language Processing. (Vol. 3). (2014).

[12] Cing, D. L., Soe, K. M. , *Improving Accuracy of Parto-of-Speech (POS) Tagging Using Hidden Markov Model and Morphological Analysis For Myanmar Language.* International Journal of Electrical and Computer Engineering, 10(2). https://doi.org/10.11591/ijece.v10i2.pp2023-2030 , (2020).

[13] Kadim, A. Lazrek, A., *Parallel HMM-Based Approach for Arabic Part of Speech Tagging.* International Arab Journal of Information Technology, 15(2). (2018).

[14] Suleiman, D., Awajan, A., Etaiwi, W., *The Use of Hidden Markov Model in Natural ARABIC Language Processing: A Survey.* Procedia Computer Science, 113. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.363 , (2017).

[15] Kumar, A.. Katiyar, V., Kumar, P., *A Comparative Analysis of Pre-Processing Time in Summary Of Hindi Language Using Stanza and Spacy.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1110(1). https://doi.org/10.1088/1757-899x/1110/1/012019, (2021).

[16] Atmakuri, S., Shahi, B., Ashwath Rao, B., Muralikrishna, S. N. , *A Comparison of Features For POS Tagging in Kannada*. International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7(4). https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.14900 (2018).

[17] Chiche, A., Kadi, H., Bekele, T., *A Hidden Markov Model-Based Part of Speech Tagger for Shekki'noono Language*. International Journal of Computing, 2021(4). https://doi.org/10.47839/ijc.20.4.2448, (2021).

[18] Al-Anzi, S., A.Zeina, D., *Statistical Markovian Data Modeling for Natural Language Processing*. International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process, 7(1). https://doi.org/10.5121/ijdkp.2017.7103 , (2017).

[19] Kumawat, D., Jain, V., *POS Tagging Approaches: A Comparison.* International Journal of Computer Applications, 118(6). https://doi.org/10.5120/20752-3148, (2015).

[20] Jassim, A. K., Al-Bayaty, B. , *A Stochastic Approach to Identify POS in Iraqi National Song Using N-Iterative HMM Using Agile Approach.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1094(1). https://doi.org/10.1088/1757-899x/1094/1/012019, (2021).

[21] Hadni, M., Alaoui Ouatik, S., Lachkar, A., Meknassi, M., *Hybrid Part-of-Speech Tagger For Non-Vocalized Arabic Text.* International Journal on Natural Language Computing, 2(6). https://doi.org/10.5121/ijnlc.2013.2601, (2013).

[22] Bohnet, B., McDonald, R., Simões, G., Andor, D., Pitler, E., Maynez, J., *Morphosyntactic Tagging with a Meta-Bilstm Model Over Context Sensitive Token Encodings.* ACL 2018 - 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference (Long Papers), 1. https://doi.org/10.18653/v1/p18-1246, (2018).

[23] Khoe, Y. H., *Reproducing a Morphosyntactic Tagger With a Meta-Bilstm Model Over Context Sensitive Token Encodings.* LREC 2020 - 12th International Conference on Language Resources and Evaluation, Conference Proceedings. (2020).

[24] Elov, B., Axmedova, X., *Determining Homonymy Using Statistical Methods. Computational Models and Technologies*, Uzbekistan-Malaysia international conference, September 16-17th, 2022, Tashkent. (2022).

[25] Elov, B., Axmedova, X., *Business Process Modeling That Distinguishes Homonymy Within Three Parts Of Speechs in Uzbek Language.* 7th International Conference on Computer Science and Engieering, 14-16 September 2022, Turkey, (2022).

[26] Zucchini, W., MacDonald, I.L., Langrock, R. (2016). *Hidden Markov Models for Time Series:* An Introduction Using R, Second Edition (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/b20790

[27] Al-Anzi, F. ve AbuZeina, D., *A Survey of Markov Chain Models in Linguistics Applications.* 53-62. 10.5121/csit.2016.61305. (2016).

[28] Kadim, A. ve Lazrek, A., *Bidirectional HMM-based Arabic POS tagging.* International Journal of Speech Technology. 19. 10.1007/s10772-015-9303-7. (2016).

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Evrişimli Sinir Ağları Kullanılarak Epileptik Nöbet Tespiti: CHB-MIT Scalp EEG Veri Kümesi Üzerinde Çoklu Sınıflandırma

Epileptic Seizure Detection Using Convolutional Neural Networks: Multi-class Classification on the CHB-MIT Scalp EEG Dataset

Meltem KURT PEHLİVANOĞLU
Kocaeli Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Kocaeli, Türkiye
meltem.kurt@kocaeli.edu.tr
ORCID:0000-0002-7581-9390

Eren ÇALBAY
Kocaeli Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Kocaeli, Türkiye
calbayeren@gmail.com
ORCID:0009-0008-1034-7223

Ömer Emircan AYVAZ
Kocaeli Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Kocaeli, Türkiye
omereayvaz@gmail.com
ORCID:0009-0000-8254-7330

Yunus Emre KIRCI
Kocaeli Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Kocaeli, Türkiye
yunusemrekirci@gmail.com
ORCID:0009-0003-1546-1264

Öz

Epileptik nöbet tespiti, epilepsinin yönetimi ve tedavisinde kritik bir görevdir ve doğru ve etkili tanı araçlarının geliştirilmesini gerektirir. Bu çalışma, CHB-MIT Scalp EEG veri kümesinden yararlanarak, kafa derisi EEG kayıtlarından epileptik nöbetleri tespit etmek için Evrişimli Sinir Ağları (CNN) kullanan modeller sunar. Analiz sağlamlığını artırmak için, epilepsi teşhisi konmuş farklı sayıda denekle bu veri kümesinin birden fazla versiyonu oluşturulmuştur. Ek olarak, model performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için temel ve gelişmiş olarak adlandırılan iki tür etiketleme tekniği kullanılmıştır. Nöbet tespitindeki etkinlikleri belirlemek için özellikle ResNet50, ResNet101, VGG16, InceptionV3, Xception ve DenseNet121 olmak üzere CNN tabanlı modeller kullanılmıştır. Bu çalışma, CHB-MIT Scalp EEG veri kümesi özelinde üç-sınıf sınıflandırma problemini ele alan ilk çalışmadır. DenseNet121 modeli, %85,52'lik bir F1 skoru ile en yüksek performansı elde etmiştir.

Anahtar sözcükler: EEG, Epilepsi, Atak Tespiti, CNN, Derin Öğrenme

Abstract

The detection of epileptic seizures is a critical task in the management and treatment of epilepsy, requiring the development of accurate and effective diagnostic tools. This study presents models using Convolutional Neural Networks (CNN) to detect epileptic seizures from scalp EEG recordings, leveraging the CHB-MIT Scalp EEG dataset. To enhance the robustness of the analysis, multiple versions of this dataset were created with a different number of subjects diagnosed with epilepsy. Additionally, two types of labeling techniques, referred to as basic and advanced, were employed to evaluate their impact on model performance. CNN-based models, particularly ResNet50, ResNet101, VGG16, InceptionV3, Xception, and DenseNet121, were used to assess their effectiveness in seizure detection. This study is the first to address the three-class classification problem specifically with the CHB-MIT Scalp EEG dataset. The DenseNet121 model achieved the highest performance with an F1 score of 85.52%.

Keywords: EEG, Epilepsy, Seizure Detection, CNN, Deep learning

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 01.08.2024 - 17.09.2024 – 30.10.2024
Makale türü: Araştırma

1. Giriş

Epilepsi, dünya genelinde milyonlarca insanın yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen, tekrarlayan, kendiliğinden ortaya çıkan nöbetlerle karakterize kronik bir nörolojik bozukluktur. Epilepsi dünya çapında yaklaşık 50 milyon insanı etkileyerek en yaygın nörolojik hastalıklardan biri haline gelmiştir [1]. Epilepside nöbetler, beyindeki anormal elektriksel boşalmalardan kaynaklanarak çeşitli fiziksel ve davranışsal semptomlara yol açar. Nöbetlerin zamanında ve doğru bir şekilde tespiti, etkili yönetim ve tedavi için kritik olup, yaralanma riskini azaltmakta ve hasta sonuçlarını iyileştirmektedir [2].

Nöbet tespiti için geleneksel yöntemler genellikle tıbbi uzmanlar tarafından elektroensefalogram (EEG) kayıtları elle analiz edilir. Bu yöntemler etkili olsa da zaman alıcıdır, insan hatasına açıktır ve uzun süreli izleme için uygun olmayabilir. Son yıllarda, makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerindeki ilerlemeler, epileptik nöbetlerin tespiti ve sınıflandırılmasının otomatikleştirilmesi için yeni yollar açmıştır.

Bu çalışmada, epileptik nöbet sınıflandırması için CHB-MIT Scalp EEG veri kümesi [3] kullanılmıştır. CHB-MIT veri kümesi, pediatrik hastalardan alınan ve inatçı nöbetler yaşayan bireylerin EEG kayıtlarını içerir. Bu çalışmada kaynaklardaki diğer çalışmalardan farklı olarak; CHB-MIT veri kümesinde yer alan farklı sayıdaki (8/12/20) hasta verileriyle çalışılmış olup, oluşturulan veri kümeleri üzerinde bu çalışmada önerilen "gelişmiş" ve "temel etiketlendirme" yöntemleri kullanılarak üç-sınıf sınıflandırma (nöbet öncesi/nöbet sırası/nöbet olmayan) gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma problemi için ResNet50, ResNet101, VGG16, InceptionV3, Xception ve DenseNet121 modelleri kullanılmıştır. CHB-MIT veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen çoklu sınıflandırma (üç-sınıf sınıflandırma) ve etiketleme yaklaşımları kaynaklarda yer almayıp, bu çalışma ile ilk kez kazandırılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaları içeren kaynak kodları GitHub üzerinde [4] erişime açık olarak sunulmuştur.

1.2 Organizasyon

Çalışmanın ikinci bölümünde kaynaklarda yer alan ve CHB-MIT veri kümesi üzerinde epilepsi tespiti yapan çalışmalar verilmiştir. Üçüncü bölümde ise bu çalışmada önerilen tespit modeli kapsamlı olarak sunulmuştur. Dördüncü bölümde çalışmada gerçekleştirilen deneysel sonuçlar verilmiş olup, son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ileriki çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar

Kaynaklarda makine öğrenmesi ve derin öğrenme temelli, EEG sinyalleri üzerinden epileptik nöbet tespiti amaçlı birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar arasında özellikle CHB-MIT veri kümesini kullanan çalışmalar ele alınmış olup ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Esmaeilpour ve ark. 2024 yılındaki çalışmalarında [5], çok katmanlı CNN (Convolutional Neural Network-Konvolüsyonel Nöron Ağı) tabanlı ikili sınıflandırma modeli ile nöbet olmayan/nöbet öncesi dönem tespitini amaçlamışlardır. Çalışmada, CHB-MIT veri kümesinde yer alan 20 hasta kullanılmıştır. Veriler üzerinde bazı ön işleme adımları uygulanmıştır, bunlar; 30 saniyelik örtüşmeyen bölütleme (segmentleme), frekans-zaman analizi için Fourier dönüşümü ve sinyallerin gürültüden arınması için 50-60 Hz bant geçiren filtrelemedir. Çalışmada en yüksek duyarlık oranı %90,76 olarak elde edilmiştir.

Georgis-Yap ve ark. 2024 yılındaki çalışmalarında [6], denetimli nöbet tahmin yöntemlerinin nöbet öncesi dönemi tespit etmekte zorlanmasına değinerek denetimsiz nöbet tahmin yöntemleri önermişlerdir. CNN, CNN-LSTM ve TCN olmak üzere üç farklı model üzerinde eğitim gerçekleştirerek nöbet olmayan/nöbet öncesi dönemi tespit etmeyi amaçlamışlardır. STFT (Short Time Fourier Transform - Kısa Süreli Fourier Dönüşümü) ile EEG sinyal verilerini zaman-frekans alanına dönüştürmüşlerdir. Veriler üzerinde değişken segment boyutları (5-10-15-30-60 sn) ve nöbet öncesi dönem aralıkları (30-60-120 dk) olarak belirlemişlerdir. Modeller CHB-MIT veri kümesinde bulunan 23 hasta özelinde uygulanmış ve keskinlik-duyarlılık eğrisi (0.104 ile 1.000) arasında elde edilmiştir.

Xia ve ark. 2024 yılındaki çalışmalarında [7], nöbetinin tahminini gerçekleştirmek amacıyla nöbet olmayan/nöbet öncesi dönem ayrımını yapabilen melez bir LSTM-Transformer modeli önermişlerdir. Çalışmalarında CHB-MIT veri kümesinde bulunan 15 hastayı ve verilerde ortak olan 18 kanalı kullanmışlardır. Ham veriyi 30 saniyelik örtüşmeyen bölütlere bölmüşlerdir. Hat gürültüsünü kaldırmak amacıyla 57-63 Hz ve 117-123 Hz aralığındaki değerleri filtrelemişlerdir. STFT kullanarak EEG sinyallerinden zaman-frekans özelliklerini çıkarmışlardır. Geliştirilen en iyi modelde her bir hasta özelinde %99,75 duyarlık oranı elde edilmiştir.

Singh ve Malhotra 2022 yılındaki çalışmalarında [8], çok kanallı EEG sinyallerini kullanarak LSTM tabanlı model kullanarak epilepsi nöbet tahmin modeli geliştirmişlerdir. Tahmin modeli, CHB-MIT veri kümesinde nöbet olmayan/nöbet öncesi dönemleri ikili sınıflandırmayı hedefler. Ön işlemede filtreleme olarak Butterworth ile düşük ve yüksek kesme frekansı uygulanmış sinyaller gürültüden arındırılmıştır. EEG segmentasyon yöntem ile sinyal verilerini 5 ile 50 saniye arasında değişen çerçevelere bölmüşlerdir. Hızlı Fourier Dönüşümü kullanarak kanalların daha iyi yorumlanabilmesi için 5 frekans bandına ayrılmasını sağlamışlardır. Bir ve iki katmanlı LSTM (1L-LSTM, 2L-LSTM) modeli kullanılmıştır. Geliştirdikleri iki farklı LSTM modelini veri kümesinde bulunan 23 farklı hasta için uygulayarak elde ettikleri doğruluk ve F1-skorları 1L-LSTM modeli için sırasıyla; %97,34 ve %97,20, 2L-LSTM modeli için; %98,14 ve %98,23'tür.

Aslam ve ark. 2022 yılındaki çalışmalarında [9], EEG verilerini kullanarak nöbet öncesi dönemi dikkate alan ve hastaya özel nöbet tahmini yapmayı amaçlamışlardır. Özellik çıkarımı için CNN modeli, sınıflandırma için LSTM modelleri kullanılmıştır. Ön işleme adımında sinyal verilerine hat gürültüsü ve yüksek geçiş filtresi uygulamışlardır. CHB-MIT veri kümesinde yer alan verileri 30 saniyelik bölütlere bölmüşlerdir. Nöbet öncesi

verileri artırmak amacıyla bölütlerin yarısı örtüşecek şekilde ayrılmıştır. STFT kullanılarak zaman-frekans alanına dönüşüm yapılarak spektrogramlar elde edilmiştir. Spektrogramlar CNN modeline girdi olarak verilerek özellik çıkartımı gerçekleştirmişlerdir. LSTM modelini elde edilen özelliklerle besleyerek nöbet olmayan ve nöbet öncesi dönemleri sınıflandırmışlardır. Önerdikleri yöntem ile elde edilen en iyi doğruluk ve duyarlık oranları sırasıyla %94 ve %93,8'dir.

Jemal ve ark. 2022 yılındaki çalışmalarında [10], EEG verilerini FBCSP (Filter Bank Common Spatial Pattern- Filtre Bankası Ortak Uzamsal Desen) değerler dizisine [11] dayandırarak ilgili sinyal özelliklerini çözmek ve görselleştirmek için kullanılan bant geçiş ve uzamsal filtrelere benzer konvolüsyonel katmanlara sahip çok katmanlı CNN önermişlerdir. Nöbet olmayan ve nöbet öncesi dönem ayrımı sağlayarak erken nöbet teşhisi sağlayabilen CNN tabanlı ikili sınıflandırma modeli önermişlerdir. Modelde hasta özeli ve çapraz hasta (cross subject) tahminleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen en başarılı nöron ağı modeli ile CHB-MIT veri kümesindeki 23 hasta özelinde ortalama F1-sonucu ve duyarlık ölçüleri için sırasıyla; %91,9 ve %96,1, çapraz hasta için ise aynı ölçülerle sırasıyla; %65,84 ve %67,17 başarımları elde edilmiştir.

Xu ve ark. 2022 yılındaki çalışmalarında [12], EEG verileri üzerinde tek ve çoklu kanallarla çalışarak epilepsi nöbeti öncesi tahmini amaçlamışlardır. CHB-MIT veri kümesinde bulunan hastaların hepsinde ortak elektrot yerleştirmeleri bulunmadığı için sadece ortak olanlardan 7 hastayı kullanmışlardır. Veri manipülasyonu için DCWGAN'ı kullanarak çok kanallı EEG sinyallerini sentezleyip yapay veri örnekleri oluşturmuşlardır. Elde edilen verilerle nöbet öncesi ve nöbet olmayan durum arasındaki ikili sınıflandırmayı sağlayacak olan çok katmanlı CNN modeli oluşturmuşlardır. Önerilen en iyi CNN modelini her bir hasta özelinde uygulamışlardır. Ortalama olarak en iyi doğruluk oranını veri manipülasyonu yapılan ve yapılmayan denemeler olmak üzere 4 farklı doğruluk sonucunu sırasıyla; %73,0, %76,8, %77,8 ve %78,0 olarak elde etmişlerdir.

Yukarıda verilen güncel kaynak çalışmaları değerlendirildiğinde; bazı çalışmaların CHB-MIT veri kümesindeki tüm hastaları kullanmadığı, bazılarının ise hasta özeline ait çalışmalar yaptığı görülmüştür. Ayrıca kaynak yayınlarda yer alan bu çalışmaların tamamı sadece ikili sınıflandırma gerçekleştiren modellerin tasarımı üzerinedir. Bu çalışmada literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak; CHB-MIT veri kümesinde yer alan farklı sayıdaki (8/12/20) hasta verileriyle çalışılmış olup, veri kümeleri üzerinde yine bu çalışmada önerilen "gelişmiş" ve "temel etiketlendirme" yöntemleri ile üçlü sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. CHB-MIT veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen üçlü sınıflandırma ve yeni etiketleme yaklaşımları literatürde yer almayıp, bu çalışma ile ilk kez literatüre kazandırılmıştır.

3. Önerilen Epilepsi Tespit Modelleri

Bu çalışma kapsamında CHB-MIT veri kümesinde yer alan hastalar kullanılarak farklı epilepsi tespit modelleri önerilmiştir. Modellere ait ayrıntılı bilgiler aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

3.1 Veri Kümesi

Bu çalışmada, CHB-MIT veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümesine ait kapsamlı bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Boston Çocuk Hastanesi'nde toplanan veriler, zorlu nöbetleri olan pediatrik hastaların EEG kayıtlarından oluşmaktadır. Nöbetlerini karakterize etmek ve cerrahi müdahaleye adaylıklarını değerlendirmek amacıyla, nöbet önleyici ilacın kesilmesinden sonra hastalar birkaç güne kadar izlenmiştir. Kayıtlar 23 vaka halinde gruplandırılmış ve 22 denekten toplanmıştır (5 erkek, yaşları 3-22; 17 kadın, yaşları 1,5-19). Her vaka (chb01, chb02, vb.) tek bir hastadan 9 ila 42 arasında sürekli .edf dosyası içermektedir. Tüm sinyaller 16 bit çözünürlükte saniyede 256 örnekle örneklenmiştir. Dosyaların büyük bir kısmı 23 EEG sinyali içerir (birkaç durumda 24 veya 26). Bu kayıtlar için Uluslararası 10-20 EEG elektrot konumları ve isimlendirme sistemi kullanılmıştır.

Çizelge 1'de CHB-MIT veri kümesinde yer alan hastalara ait ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Çizelge-1: CHB-MIT Veri Kümesi [13]

Hasta ID	Cinsiyet	Yaş	Toplam Nöbet Sayısı	Kanal Sayısı (Min-Max)	Toplam Kayıt Süresi (saat:dk:sn)
chb01	K	11	7	(23)	40:33:08
chb02	E	11	3	(23)	35:15:59
chb03	K	14	7	(23)	38:00:06
chb04	E	22	4	(23)	156:03:54
chb05	K	7	5	(23)	39:00:10
chb06	K	1.5	10	(23)	66:44:06
chb07	K	14.5	3	(23)	67:03:08
chb08	E	3.5	5	(23)	20:00:23
chb09	K	10	4	(23-24)	67:52:18
chb10	E	3	7	(23)	50:01:24
chb11	K	12	3	(23)	34:47:37
chb12	K	2	27	(23-24)	20:41:40
chb13	K	3	12	(18-23)	33:00:00
chb14	K	9	8	(23)	26:00:00
chb15	E	16	20	(26-33)	40:00:36
chb16	K	17	10	(18-23)	19:00:00
chb17	K	12	3	(18-23)	21:00:24
chb18	K	18	6	(18-23)	35:38:05
chb19	K	19	3	(18-23)	29:55:46
chb20	K	6	8	(23)	27:36:06
chb21	K	13	4	(23)	32:49:49
chb22	K	9	3	(23)	31:00:11
chb23	K	6	7	(23)	26:33:30
chb24	-	-	16	(23)	21:17:47

Bu çalışma kapsamında orijinal veri kümesi üç farklı şekilde ele alınmıştır: İlk versiyonda 8, ikinci versiyonda 12, üçüncü versiyonda ise 20 hasta ile çalışılmıştır. Bu veri kümesi versiyonlarına ait bilgiler Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge-2: Çalışma Kapsamında Oluşturulan Alt Veri Kümesi Çeşitleri

Veri Kümesi Versiyon	Hasta ID	Toplam Nöbet Sayısı	Kanal Sayısı	Toplam Nöbet Süresi (sn)
Versiyon1 (8 hasta)	chb01	7	23	442
	chb03	6	23	502
	chb05	1	23	557
	chb08	4	23	729
	chb18	6	23	317
	chb19	3	23	236
	chb21	3	23	143
	chb22	3	23	207
Versiyon2 (12 hasta)	chb01	7	23	442
	chb03	6	23	502
	chb05	1	23	557
	chb08	4	23	729
	chb10	7	23	437
	chb11	3	23	816
	chb17	3	23	293
	chb18	6	23	317
	chb19	3	23	236
	chb21	3	23	143
	chb22	3	23	207
	chb24	9	23	339
Versiyon3 (20 hasta)	chb01	7	23	442
	chb02	3	23	171
	chb03	6	23	502
	chb05	5	23	592
	chb07	3	23	325
	chb08	4	23	729
	chb09	2	23	126
	chb10	7	23	437
	chb11	3	23	816
	chb13	5	23	215
	chb14	6	23	127
	chb15	8	23	1309
	chb17	3	23	293
	chb18	6	23	317
	chb19	3	23	236
	chb20	4	23	141
	chb21	3	23	143
	chb22	3	23	207
	chb23	1	23	113
	chb24	9	23	339

3.2 Veri Önişleme

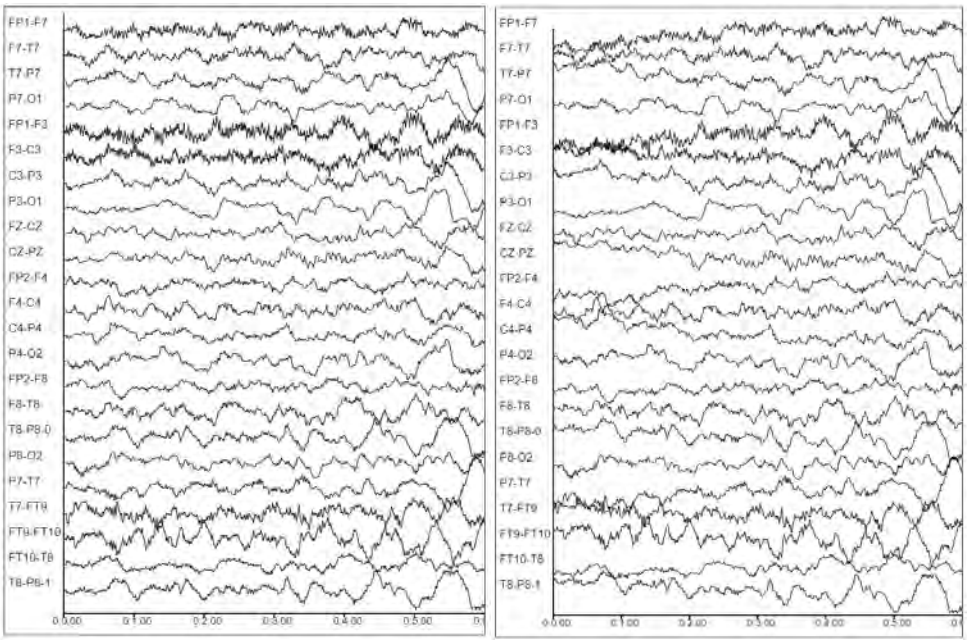
Çalışma kapsamında kullanılan veri önişleme adımları aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.2.1 Spektrogram Görüntülerinin Elde Edilmesi

Bu çalışma kapsamında kullanılan model girdileri için EEG sinyallerinin dönüştürülmüş spektrogram görüntüleri kullanılmıştır. Bu görüntüler oluşturulurken sırasıyla aşağıdaki alt adımlar uygulanmıştır:

- Adım 1: EEG sinyallerinde yer alan gürültülerin Butterworth filtresi [14] ile temizlenmesi,
- Adım 2: Veri kümesinde hasta kayıtlarında yer alan 23 kanalın her biri için ayrı ayrı FFT (Fast Fourier transform-Hızlı Fourier Dönüşümü) [15] uygulanması ve sonrasında her kanal için ayrı ayrı spektrogram görüntülerinin oluşturulması,
- Adım 3: Oluşturulan spektrogramların üst üste eklenerek tek bir görüntü haline getirilmesi.

Adım 1'de EEG sinyallerinde yer alan gürültüler temizlenirken, Butterworth filtresinde yüksek frekans 50 Hz, düşük frekans ise 1 Hz seçilmiştir. Şekil-1'de veri kümesinde yer alan chb12 isimli hastanın 11. kaydındaki sinyalin Butterworth filtresinden (yüksek 50 Hz, düşük 1 Hz) geçirilmiş hali verilmiştir.



Şekil-1: Butterworth filtresi uygulanmış örnek sinyal görüntüsü (chb12 hastası 11. kayıt)

Temizlenmiş sinyalleri içeren kayıtların model girdileri 23 kanal içermektedir. Bu 23 kanalın her biri beynin farklı bir bölgesinden gelen 23 sinyalin zamana göre yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Adım 2'de bu kayıtlardan görüntü elde edilmesi için her görüntünün kapsayacağı alan 4 saniyelik pencere olarak belirlenmiştir. Bu 4 saniyelik pencereler birer saniye kaydırılarak ardışık pencere görüntüleri oluşturulmuştur. Her bir kayıt parçasına ait bu görüntülere ait spektrogramlar FFT dönüşümü kullanılarak oluşturulmuştur.

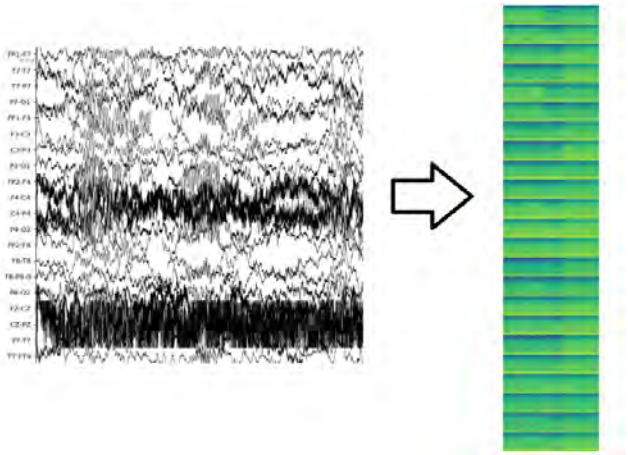
FFT dönüşümü, sinyalleri zaman alanından frekans alanına dönüştürmek için sisteme uygulanır. FFT dönüşüm formülü Denklem (1)'de verilmiştir:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j(\frac{2\pi}{N})kn} \quad (1)$$

Burada $X[k]$ frekans alanındaki ayrık sinyali, $x[n]$ ise zaman alanındaki ayrık sinyali temsil etmektedir.

Tek bir FFT işlemi, 1 boyutlu bir frekans spektrumu ortaya çıkarırken, art arda gerçekleştirilen FFT uygulamaları sinyalin zaman-frekans çözümlemesini yaparak 2 boyutlu bir spektrogram görüntüsü oluşturur. Bu sayede sinyalin frekans içeriği zamanla nasıl değiştiği görselleştirilebilir.

Adım 3'de ise; Adım 2'de oluşturulan bu spektrogram görüntüleri veri kümesindeki kayıtlarda bulunan kanalların sırasına göre alt alta ekleme yapılarak birleştirilmiştir. Bu işlemle, model eğitiminde 23 spektrogram görüntüsünün tamamının tek bir görüntü olarak modele verilmesi sağlanmıştır. Şekil-2'de chb06 numaralı hastanın 4. saat kaydına ait örnek spektrogram görüntüsü görülmektedir.



Şekil-2: Sinyallerden elde edilen spektrogram görüntülerinin birleştirilmesi (chb06 hastasının 4. saat kaydına ait bir spektrogram)

3.2.2 Spektrogram Görüntülerinin Etiketlendirilmesi

Çalışma kapsamında elde edilen spektrogram görüntüleri etiketlenirken, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, iki farklı etiketleme yöntemi ele alınmıştır:

- Temel etiketleme,
- Gelişmiş etiketleme

Temel etiketleme yönteminde; nöbetten önceki 20 dakika "*nöbet öncesi*", nöbetin geçirildiği dakikalar "*nöbet sırası*", diğer kalan dakikalar ise "nöbet olmayan" durum olarak etiketlenmiştir.

Gelişmiş etiketlemede ise; nöbetten önceki 20 dakikayı içeren ve temel etiketlemede kaba olarak "nöbet öncesi" dönemi temsil eden her bir spektrogram görüntüsü "Doğrusallık, Ortalama, Tepe Noktaları, Nöbetten Önceki 5 Dakika" özelliklerine göre detaylı olarak değerlendirilir. Böylece nöbetten önceki 20 dakika içinde yer alan tüm spektrogram görüntülerini "nöbet öncesi" durum olarak etiketlemek yerine; daha incelikli hesaplamalarla gerçekten nöbet geçirilmeden önceki dönemin hesaplanıp etiketlenmesine odaklanılmıştır. İnce hesaplamalar sonucunda bulunan ilgili dönemler "nöbet öncesi" olarak etiketlenirken bu 20 dakikalık alanın içinde kalan diğer alanlar "nöbet olmayan" durum olarak etiketlenmiştir. Sonrasında; temel etiketlemedeki gibi nöbetin geçirildiği dakikalar "nöbet sırası", nöbet sırasından sonra kalan dakikalar ise "nöbet olmayan" durum olarak etiketlenmiştir.

Gelişmiş etiketleme için ele alınan özelliklere ait detaylı bilgiler aşağıdaki alt başlıklar verilmiştir.

3.2.2.1 Doğrusallık

EEG sinyal verilerinde "*nöbet sırasını*" temsil eden bölümlerde doğrusallık diğer bölümlere göre daha azdır. Epilepsi nöbeti sırasında elektrik deşarj sayısı olağandan fazla olması sinyal hareketliliğini arttırarak doğrusallığın azalmasına yol açmaktadır. "*nöbet öncesi*" dönemde ise doğrusallık azalmaktadır. Çalışma kapsamında ilgili spektrogram bölümü etiketlenirken aynı bölümün sinyal verileri üzerinde doğrusallık oranı çıkarılmıştır.

Doğrusallık hesaplamasında ilk adımda Welch [16] yöntemi ile sinyallerin güç spektral yoğunluğu hesaplanır. Güç spektral yoğunluğu hesaplaması formülü Denklem (2)'de verilmiştir.

$$PSD_i(f) = \frac{1}{\Delta f . M} |FFT\{x_i(t) . w_i(t)\}|^2 \quad (2)$$

İkinci adımda elde edilen güç spektral yoğunlukları için Shannon Entropisi [17] hesaplaması yapılır. Hesaplama sonucunda ilgili verinin rastgeleliği ve belirsizliği ölçülerek oran elde edilir. Shannon Entropisi hesaplamasının formülü Denklem (3)'de verilmiştir.

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i) . log\, p(x_i) \quad (3)$$

Her bir spektrogram görüntüsü için elde edilen bu oranlara 0 ila 1 arasında normalizasyon uygulanmıştır. Normalizasyon sonucunda elde edilen doğrusallık oranı %80 (0,8)'den az olan bölümler "nöbet öncesi" dönem olarak etiketlendirilmiştir.

3.2.2.2 Ortalama

Çalışma kapsamında kullanılan veri kümesinde EEG sinyal verileri gerilim (volt) cinsinden verilmiştir. Her bir spektrogramın elde edildiği bölümün sinyal aralıkları 4 saniyede toplam 512 Hz örneklemeye (nokta sinyal verisi) sahiptir. Her bir nokta sinyal verisinin de artı/eksi gerilim değeri bulunmaktadır. Bu çalışmada önerilen ortalama yönteminde nöbet durumundan önceki 20 dakikada bulunan gerilim değerlerinin mutlak değer cinsinden ortalaması alınarak elde edilen bu değer genel ortalama değer olarak

belirlenmektedir. Her bir spektrogram bölümünün sinyal aralıklarında bulunan 512 gerilim değerinin ortalaması alınıp genel ortalama değeri ile karşılaştırılmaktadır. Eğer ilgili sinyal aralığından elde edilen ortalama gerilim değeri; genel ortalamadan yüksek bir değere sahipse "*nöbet öncesi*" durumunu temsil etmesine karar verilmektedir.

3.2.2.3 Tepe Noktaları

Tepe noktaları bir sinyalin olağandan mutlak yükseklikte gerilim değerine ulaşması durumunda adlandırılan noktalardır. EEG sinyallerinde anormal aktiviteleri sinyallerin ani tepe noktalarını görmesiyle bağdaştırılabilir. Tepe noktalarının arka arkaya olan sıklığı hem doğrusallıktan uzak olduğunu hem de anormal aktivitenin olduğunu göstermektedir. Nöbet döneminde anormal aktiviteler fazla iken, nöbet öncesi dönemlerde de anormal aktiviteler sonucunda ani yükselişler ile tepe noktaları elde edilebilmektedir. Nöbetten önceki dakikalarda tepe noktalarının sıklığı nöbetin geleceğini ifade edebilir. Bu çalışmada önerilen tepe noktaları yönteminde; her bir spektrogramın ilgili sinyal aralıklarında arka arkaya tekrarlayan (10 değer) tepe noktaları var ise "*nöbet öncesi*" dönem olarak değerlendirilir.

3.2.2.4 Nöbetten Önceki 5 Dakika

Çalışma kapmasında kaynak yayınlarda bulunan bazı çalışmalar [18, 19] SPH (Seizure Prediction Horizon - Atak Tahmin Dönem) "nöbet öncesi" dönem ile "nöbet sırası" arasında bulunan bir ara dönem olarak tanımlamışlardır. Bu çalışmada; SPH ara dönemi kat sayısı (ağırlığı) arttırılarak nöbet döneminin tahmininin artırılması hedeflenmiştir. Önerilen son 5 dakika yönteminde, nöbet döneminden önceki 5 dakikanın "nöbet öncesi" dönem olarak etiketlenmesi için ağırlık değeri verilmiştir. Verilen ağırlık değeri, diğer 3 özellik (doğrusallık, ortalama, tepe noktaları) ile ilişkilendirilerek ilgili spektrogram bölümünün "nöbet öncesi" veya "nöbet olmayan" durum olarak etiketlenmesi sağlanır. İlişkilendirme ile ilgili diğer özelliklerin etiketleme için gereken eşik değerleri bu özellikte belirlenen sabit bir ağırlık değerine göre güncellenir. Çalışma süresince sabit ağırlık değeri (0,2-%20) olarak belirlenmiş olup ilgili veri kümesine dayanarak verilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında CHB-MIT veri kümesi üzerinde üçlü sınıflandırma modelleri kurulmuş olup sınıflandırma etiketleri "nöbet öncesi/nöbet sırası/nöbet olmayan" olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında önerilen temel ve gelişmiş etiketleme yöntemleri kullanılarak bu etiketleme yöntemlerinin başarımları gözlemlenmiştir.

Spektrogram görüntüleri ve etiketlerinden oluşturulan farklı versiyonlardaki veri kümeleri (Bknz. Çizelge-2) için ResNet50, ResNet101, VGG16, InceptionV3, Xception ve DenseNet121 ana modelleri kullanılmıştır. Modeller kurulurken aynı zamanda ezberleme probleminin yaşanmaması için ana model mimarilerine basit ek model CNN mimarileri (Conv2D-64, Conv2D-128, Conv2D-256) eklenerek farklı boyutlarda, farklı epoch ve batch büyüklüğü verilerek model eğitimleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında her bir modele ait elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge-3'de verilmiştir. Temel etiketleme modeli kaba kaldığından Çizelge-3'den de görüleceği gibi, Versiyon2 ve Versiyon3 veri kümelerinde sadece gelişmiş etiketleme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında Çizelge-3'de verilen her bir model için kullanılan hiper parametre özellikleri Çizelge-4'de kapsamlı olarak sunulmuştur.

Çizelge-3'den de görüleceği gibi; F1-sonuç, kesinlik, duyarlık ve doğruluk ölçüleri için sırasıyla %85,52, %85,88, %85,33, %84,87 değerleri ile en başarılı model, Versiyon3 veri kümesi üzerinde gelişmiş etiketleme yöntemi kullanılarak oluşturulan DenseNet121 (+Conv2D-64, Conv2D-128, Conv2D-256) modeli olmuştur. DenseNet daha az parametre ve hesaplama gerektirirken nesne tanıma görevlerinde geliştirilen son modellere göre daha verimli çalışır [20]. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında kullanılan diğer modeller arasında; ek model yapısı ile desteklenmesi ve gelişmiş etiketleme yönteminin de katkısı ile DenseNet121 modelinin en iyi başarımı üretmesi beklenen bir durumdur.

Kaynak yayınlarda CHB-MIT veri kümesi üzerinde ikili sınıflandırma problemine odaklanan model başarımları; bu çalışmada önerilen üçlü sınıflandırma model başarımlarına oranla daha yüksek olduğu açıktır. Ancak üçlü sınıflandırma problemi ikili sınıflandırma problemine göre çok daha zorlu bir problemdir. Üçlü sınıflandırma probleminde ikili sınıflandırmadan farklı olarak; özellikle "nöbet olmayan" ve "nöbet öncesi" dönemlere ait spektrogram görüntüleri birbirine çok benzerdir. Bu benzerliğin temel nedeni; "nöbet öncesi" dönemde "nöbet sırası" döneme göre sinyallerdeki pik sayısı ve şiddeti daha azdır. Bu da "nöbet öncesi" dönem ile "nöbet olmayan" dönem sinyallerinin birbirine benzemesine/karışmasına yol açar. Bu da ikili sınıflandırma problemine oranla üçlü sınıflandırma probleminin çok daha zorlu bir problem olduğunu kanıtlar. Bu nedenle bu çalışma kapsamında ilk kez önerilen üçlü sınıflandırma sonuçları değerlidir.

5. Sonuç ve İleriki Çalışmalar

Bu çalışmada CHB-MIT veri kümesi üzerinde daha önce kaynaklarda çalışılmamış bir problem olan üç sınıf sınıflandırma (nöbet öncesi/nöbet sırası/nöbet olmayan) problemi üzerine çalışılmıştır. Çalışma kapsamında ana veri kümesi üzerinden oluşturulan versiyon veri kümeleri ve iki farklı etiketleme yöntemiyle farklı sınıflandırma modelleri kullanılarak model başarımları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde en başarılı model olan DenseNet121 (+Conv2D-64, Conv2D-128, Conv2D-256) modeli F1-skor, kesinlik, hassasiyet ve doğruluk skorları sırasıyla %85,52, %85,88, %85,33, %84,87 elde edilmiştir.

İleriki çalışmalarda çoklu sınıflandırmalar için sadece etikete bağlı olmamakla beraber farklı derin öğrenme modellerinin kullanımıyla beraber daha yüksek başarım oranlarına sahip modellerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Çizelge-3: CHB-MIT Veri Kümesi Üzerinde Ön İşleme Sonrası Elde Edilen Görüntüler Üzerinde Üç-Sınıf Sınıflandırma (Nöbet Öncesi/Nöbet Sırası/Nöbet Olmayan) Model Başarımları

Ana Model	Ek Model Yapısı	Etiket	Veri Kümesi Versiyon	Başarım Metrikleri			
				F-Skor (F1)	Kesinlik (Precision)	Hassasiyet (Recall)	Doğruluk (Accuracy)
ResNet50	Conv2D-64 Conv2D-64	Temel	Versiyon1	%79.83	%80.30	%79.55	%78.97
ResNet101	Conv2D-64 Conv2D-128	Temel	Versiyon1	%81.32	%81.91	%80.95	%80.74
ResNet101	Conv2D-128 Conv2D-64	Gelişmiş	Versiyon2	%82.90	%83.24	%82.67	%81.88
VGG16	Conv2D-64 Conv2D-128	Gelişmiş	Versiyon2	%76.27	%77.20	%75.70	%75.16
ResNet101	Conv2D-64 Conv2D-256	Gelişmiş	Versiyon3	%82.98	%83.18	%82.89	%83.03
InceptionV3	Conv2D-64 Conv2D-128 Conv2D-256	Gelişmiş	Versiyon3	%84.63	%84.88	%84.70	%84.55
Xception	Conv2D-64 Conv2D-128 Conv2D-256	Gelişmiş	Versiyon3	%81.47	%81.73	%81.45	%80.52
DenseNet121	**Conv2D-64 Conv2D-128 Conv2D-256**	**Gelişmiş**	**Versiyon3**	**%85.52**	**%85.88**	**%85.33**	**%84.87**

Çizelge-4: Her Bir Model İçin Kullanılan Hiper Parametreler

Ana Model	Ek Model Yapısı	Hiper Parametreler
ResNet50	Conv2D-64 Conv2D-64	Epoch = 25, Batch Büyüklüğü = 8, Öğrenme Oranı = 0.001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
ResNet101	Conv2D-128 Conv2D-64	Epoch = 20, Batch Büyüklüğü = 8, Öğrenme Oranı = 0.001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
ResNet101	Conv2D-128 Conv2D-64	Epoch = 50, Batch Büyüklüğü = 16, Öğrenme Oranı = 0.005, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
VGG16	Conv2D-64 Conv2D-128	Epoch = 40, Batch Büyüklüğü = 16, Öğrenme Oranı = 0.001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
ResNet101	Conv2D-64 Conv2d-256	Epoch = 25, Batch Büyüklüğü = 8, Öğrenme Oranı = 0.001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
InceptionV3	Conv2D-64 Conv2D-128	Epoch = 40, Batch Büyüklüğü = 16,

	Conv2D-256	Öğrenme Oranı = 0.001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
Xception	Conv2D-64 Conv2D-128 Conv2D-256	Epoch = 40, Batch Büyüklüğü = 16, Öğrenme Oranı = 0,001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax
DenseNet121	**Conv2D-64 Conv2D-128 Conv2D-256**	**Epoch = 40, Batch Büyüklüğü = 8 , Öğrenme Oranı = 0,001, Optimizasyon Fonksiyonu = Adam, Aktivasyon Fonksiyonu = Relu/Softmax**

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012327866 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

[1] WHO. World Health Organization: epilepsy: epidemiology, aetiology and prognosis, WHO factsheet, 2001.

[2] Fisher, R. S., Boas, W. V. E., Blume, W., Elger, C., Genton, P., Lee, P., & Engel Jr, J. Epileptic seizures and epilepsy: definitions proposed by the International League Against Epilepsy (ILAE) and the International Bureau for Epilepsy (IBE), Epilepsia, 2015, 46.4, pp. 470-472.

[3] Shoeb, A. H. Application of machine learning to epileptic seizure onset detection and treatment (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology), 2009.

[4] CHB-MIT-Scalp-EEG-Seizure-Classification, https://github.com/erencalbay/CHB-MIT-Scalp-EEG-Seizure-Classification, Erişim Tarihi: 31.07.2024.

[5] Esmaeilpour, A., Tabarestani, S. S., & Niazi, A. Deep learning-based seizure prediction using EEG signals: A comparative analysis of classification methods on the CHB-MIT dataset, Engineering Reports, 2024, e12918.

[6] Georgis-Yap, Z., Popovic, M. R., & Khan, S. S. Supervised and Unsupervised Deep Learning Approaches for EEG Seizure Prediction. Journal of Healthcare Informatics Research, 2024, pp. 1-27.

[7] Xia, L., Wang, R., Ye, H., Jiang, B., Li, G., Ma, C., & Gao, Z. Hybrid LSTM-Transformer model for the prediction of epileptic seizure using scalp EEG. IEEE Sensors Journal. 2024.

[8] Singh, K., & Malhotra, J. Two-layer LSTM network-based prediction of epileptic seizures using EEG spectral features. Complex & Intelligent Systems, 2022, pp. 2405-2418

[9] Aslam, M. H., Usman, S. M., Khalid, S., Anwar, A., Alroobaea, R., Hussain, S., ... & Yasin, A. Classification of EEG signals for prediction of epileptic seizures. Applied Sciences, 12(14), 2022, pp. 7251.

[10] Jemal, Imene, et al. An interpretable deep learning classifier for epileptic seizure prediction using EEG data, IEEE Access 10, 2022, pp. 60141-60150.

[11] Ang, Kai Keng, et al. Filter bank common spatial pattern (FBCSP) in brain-computer interface, 2008 IEEE international joint conference on neural networks (IEEE world congress on computational intelligence) IEEE, 2008.

[12] Xu, Yankun, Jie Yang, and Mohamad Sawan. Multichannel synthetic preictal EEG signals to enhance the prediction of epileptic seizures. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 69.11, 2022, pp. 3516-3525.

[13] Jumaah, Mahmood A., Ammar Ibrahim Shihab, and Akeel Abdulkareem Farhan. Epileptic Seizures Detection Using DCT-II and KNN Classifier in Long-Term EEG Signals. Iraqi Journal of Science, 2020, pp. 2687-2694.

[14] Butterworth, S. On the theory of filter amplifiers. Wireless Engineer, 7(6), 1930, pp. 536-541.

[15] Duhamel, P., & Vetterli, M. Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art. Signal processing, 19(4), 1990, 259-299.

[16] Barbe, K., Pintelon, R., & Schoukens, J. Welch method revisited: nonparametric power spectrum estimation via circular overlap. IEEE Transactions on signal processing, 58(2), 2009, pp. 553-565.

[17] Lin, J. Divergence measures based on the Shannon entropy. IEEE Transactions on Information theory, 37(1), 1991, pp. 145-151.

[18] Jiang, X., Liu, X., Liu, Y., Wang, Q., Li, B., & Zhang, L. Epileptic seizures detection and the analysis of optimal seizure prediction horizon based on frequency and phase analysis. Frontiers in Neuroscience, 17, 2023, 1191683.

[19] Shokouh Alaei, H., Khalilzadeh, M. A., & Gorji, A. Optimal selection of SOP and SPH using fuzzy inference system for on-line epileptic seizure prediction based on EEG phase synchronization. Australasian physical & engineering sciences in medicine, 42, 2019, pp. 1049-1068.

[20] Huang, G., Liu, Z., Pleiss, G., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. Convolutional networks with dense connectivity. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 44(12), 2019, pp. 8704-8716.

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Tıbbi Görüntü Bölütleme için MMIAU-Net Mimarisi Önerisi

Proposed Mixed Modified Inception and Self Attention U-Net for Medical Image Segmentation: MMIAU-Net

Müberra Nur AKÇAMAN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği
Çanakkale, Türkiye
mnakcaman@comu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-6428-3826

Tolga ENSARİ
Arkansas Tech University
Dept of Engineering and Computing Sciences
Russellville, USA
tensari@atu.edu
ORCID: 0000-0003-0896-3058

Ahmet SERTBAŞ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Bilgisayar Mühendisliği
İstanbul, Türkiye
asertbas@iuc.edu.tr
ORCID: 0000-0001-8166-1211

Öz

Derin öğrenme; başta tıbbi görüntü bölütleme olmak üzere birçok alanda başarılı sonuçlar elde eden bir yapay zeka yöntemidir. İnsan sağlığı için hayati önem taşıyan medikal görüntülerde, hassas analiz yapılarak kesin sonuçlara varılması mühimdir. Derin öğrenme yöntemleri yüksek hesaplama karmaşıklığı sayesinde gözden kaçabilecek en küçük hastalık detayını bile yakalayabilmektedir. U-Net derin öğrenme modeli bu alandaki yüksek başarısından dolayı en popüler mimaridir. Ancak bölütlemedeki doğruluk değerleri her veri kümesinde farklı sonuçlar verdiğinden başarımının iyileştirilmesine her daim ihtiyaç vardır. Kapsamlı karşılaştırma yapabilmek için bu çalışmada, herkesin erişimine açık olan PH^2, BOWL 2018 ve CVC-ClinicDB tıbbi veri kümeleri kullanılmıştır. U-Net, U-Net++, Attention U-Net, Residual U-Net, Residual Attention U-Net, TransUNet, Swin-Unet ve bu çalışma için modifiye edilen Self Attention U-Net ve MMIAU-Net (Mixed Modified Inception and Self Attention U-Net) ile eğitimler yapılmıştır. Analizler sonucunda önerilen modelin daha az parametre kullanarak daha yüksek başarımlara ulaştığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Derin öğrenme, U-Net, Bölütleme, Tıbbi görüntü işleme, Bilgisayar görü

Abstract

Deep learning is an artificial intelligence method that achieves successful results in many areas, especially medical image segmentation. It is crucial to reach definitive conclusions by performing precise analysis of medical images, which are vital for human health. Thanks to their maximum computational complexity, deep learning methods can capture even the smallest disease detail that may be overlooked. U-Net deep learning model is the most popular architecture due to its high success in this field. However, since the accuracy values in segmentation give different results in each dataset, there is always a need to improve its performance. In order to make a comprehensive comparison, three independent medical datasets were used in this study: PH^2, BOWL 2018, CVC-ClinicDB, which are publicly accessible. U-Net, U-Net++, Attention U-Net, Residual U-Net, Residual Attention U-Net, TransUNet, Swin-Unet, and also with Self Attention U-Net and MMIAU-Net (Mixed Modified Inception and Self Attention U-Net), which were modified for this study. After the analysis, it was seen that the proposed model MMIAU-Net reached higher performances by using fewer parameters.

Keywords: Deep learning, U-Net, Segmentation, Medical image processing, Computer vision

1. Giriş

Hastalıkların tespiti için tıbbi cihazlardan elde edilen görüntüler doktorlar, radyologlar gibi uzmanlar tarafından incelenmekte ve onların vereceği kararlara göre tedavi süreci başlamaktadır. Ancak her ne kadar küçük bir ihtimal bile olsa insanlar tarafından verilen kararların yanlış çıkma ihtimali mümkündür. Günümüzde, medikal alanda hastalıkları teşhisleri için kullanılan; bilgisayarlı tomografi (CT), pozitron emisyon tomografisi (PET), ultrason (US), manyetik rezonans görüntüleme (MRI), röntgen, vb. gibi birçok tıbbi görüntüleme yöntemleri vardır [1]. Bir radyolog için bu tür karmaşık taramaları incelemek zaman kaybına sebep olabilmektedir. Bu sebeple derin öğrenme algoritmaları bu karışıklığı engeller ve teşhis yöntemlerine kolaylık sağlayarak hız kazandırır [1, 2].

Son yıllarda çokça kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri büyük ve karmaşık veri kümeleri için yeterli olmamaktadır. Bu ihtiyaçtan dolayı makine öğrenmesinin bir alt dalı olan derin öğrenme medikal alanda kullanılmaya başlanmıştır. Derin öğrenme algoritmaları sayesinde görüntülerden bölütleme

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 22.08.2024 - 10.10.2024 – 29.10.2024
Makale türü: Araştırma

işlemi çoğu zaman başarılı bir şekilde yapılarak; mevcut hastalıkların tedavisi veyahut muhtemel hastalıkların erken teşhisi için kullanılmaktadır [3].

Tıbbi görüntülerde bölütleme çalışmaları 2015 yılında Ronneberger ve ark. tarafından önerilen U-Net mimarisinden sonra oldukça hız kazanmıştır [4]. Bu mimarinin günümüzde her türlü alanda başarılı bölütleme yapmasından dolayı birçok araştırmacı da bu tasarımın üzerinden değişiklikler yaparak yeni modeller üretmektedirler.

U-Net mimarisi bir çeşit evrişimli sinir ağıdır (Convolutional Neural Networks, CNN). Ancak geleneksel CNN'lerden farklı olarak ResNet [5] te kullanılan atlamalı bağlantılar (skip connections) kullanılmaktadır. Bu sayede bölütleme görevlerinin de üstesinden gelmektedir.

U-Net mimarileri atlamalı bağlantılar ile her ne kadar güzel sonuçlara ulaşsa da konvolüsyon işlemleri bazı lokal ve global olan özellikleri başarılı bir şekilde öğrenme yeteneklerini kısıtlamaktadır [6]. Transformatör ağları, veriler üzerindeki global bağımlılığı hesaplayabilmek için özdikkat mekanizmasını kullanmaktadır. Bu sebeple, transformer ağları [7] U-Net mimarisinde kullanılmasıyla birlikte U-Net mimarisi, lokal ve global özelliklerin çıkarılması yeteneğine de sahip olmaktadır. Bu sayede, aynı transformatör yapısı görüntü verileri üzerinde kullanılarak bilgisayarlı görü uygulamalarından olan semantik bölütleme, görüntü sınıflandırma, nesne algılama gibi işlemleri de başarıyla gerçekleştirebilen Vision Transformer (ViT) [8] geliştirildi [9]. VİT, eş zamanlı bir şekilde Multihead Self-Attention (MSA) kullanarak uzun vadeli bağımlılıkların yakalanmasına olanak sağlamaktadır [10].

Birçok görüntü işleme algoritması evrişim işlemlerinde sabit boyutlu filtreler kullanmaktadır. Modellerde kullanılabilecek doğru filtre boyutunu bulmak zaman açısından sıkıntılı olabilir. Sabit boyutlu filtrelerin kullanılması benzer boyutlu görüntüler için uygundur. Ancak analizlerde kullanılan veriler genellikle farklı boyutlardadır. Buna çözüm olarak ya hesaplama karmaşıklığına sahip olan daha derin ağlar kullanılmalıdır ya da farklı boyutlardaki evrişim filtrelerinin paralel olarak kullanılması olarak bilinen inception modülleri kullanılmalıdır [11, 12].

Çalışmanın ana katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bu makale en güncel U-net tabanlı mimarilerin karşılaştırmalı analizini sunmayı amaçlamıştır.
- Tıbbi veri kümelerinde yapılan bölütleme başarımı arttırırken, parametre sayısını azaltan yeni bir ağ mimarisi MMIAU-Net önerilmektedir.
- Modelin genel bölütleme başarısını ölçmek amacıyla farklı biyomedikal alanlara ait üç veri kümesi kullanılmıştır.
- U-Net tabanlı mimariler ile karşılaştırıldığında, önerilen MMIAU-Net modelinin iyi bir başarım sergilediği görülmüş ve görüntü bölütleme için alternatif en iyi yöntem olabileceğini gösterilmiştir.
- Önerilen model; doğruluk, IoU, dice katsayısı, duyarlılık ve özgüllük gibi çeşitli değerlendirme metrikleri ile analiz edilmiştir.
- Bu çalışmanın, tıbbi görüntülerde derin öğrenme yöntemlerinin kullanımını konu alan çalışmalara katkı sağlayacak bir kaynak olması hedeflenmiştir.

Makale dört ana bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, kullanılan veri kümeleri ve modeller ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde elde edilen deneysel bulgular özetlenmiştir. Son olarak dördüncü bölümde ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

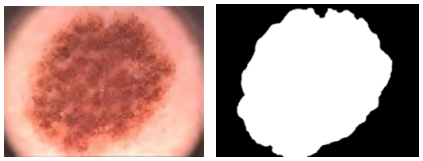
2. Materyal ve Yöntem

2.1 Veri Kümeleri

Bu çalışmada, herkesin erişimine açık olan PH^2, Bowl ve CVC-ClinicDB olmak üzere üç adet tıbbi veri kümesi kullanılmıştır. Veriler derin öğrenme dünyasında özellikle büyük ses getiren bölütleme mimariler için tercih edilen veri kümeleri arasından seçilmiştir.

2.1.1 PH^2

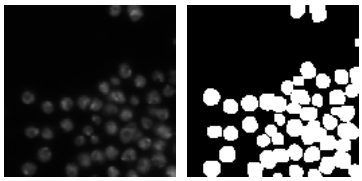
PH^2 veri seti [13] Portekiz Pedro Hispano Hastanesi tarafından oluşturulan, 200 adet cilt lezyon görüntüsü içeren verilerdir. Görüntüler 8 bit RGB 768x560 piksel çözünürlüğüne sahiptir. Şekil 1'de veri kümesine ait bir örnek ve bu örneğe ait orijinal maske görüntüsü verilmiştir.



Şekil- 1: PH^2 Orijinal görüntü ve lezyona karşılık gelen maske

2.1.2 Data Science Bowl

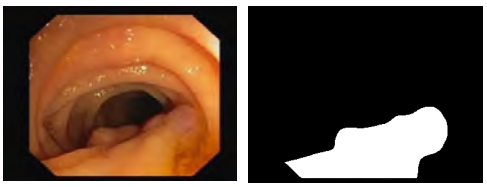
Data Science Bowl 2018 yarışmasında kullanılan hücre çekirdek bölütleme veri kümesi [14] 670 adet görüntüden oluşmaktadır. Çekirdek, tüm yaşam fonksiyonlarını kontrol eden DNA, RNA ve genleri içerir dolayısıyla çekirdekte saptanan herhangi bir bozulma kalp hastalığı, Alzheimer, kanser gibi çeşitli hastalıklara yol açmaktadır [15]. Bu veri kümesine ait bir örnek ve bu örneğe ait maske görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil- 2: Bowl 2018 Orijinal görüntü ve ona karşılık gelen maske

2.1.3 CVC-ClinicDB

CVC-ClinicDB veri seti [16] 2015 yılında yapılan polip algılama yarışmasında kullanılan kolonoskopi videolarından elde edilen bir veri setidir. Bu veri kümesi 384x288 boyutlarındaki 612 adet görüntüden oluşmaktadır. Maske görüntüleri, siyah arka plan üzerinde gösterilen beyaz polipler şeklinde oluşturulmuştur. Şekil 3'te veri kümesine ait bir örnek ve bu örneğe ait orijinal maske görüntüsü verilmiştir.



Şekil- 3: CVC-ClinicDB kolonoskopi görüntüsü ve polipe karşılık gelen maske

2.2 Derin Öğrenme Modelleri

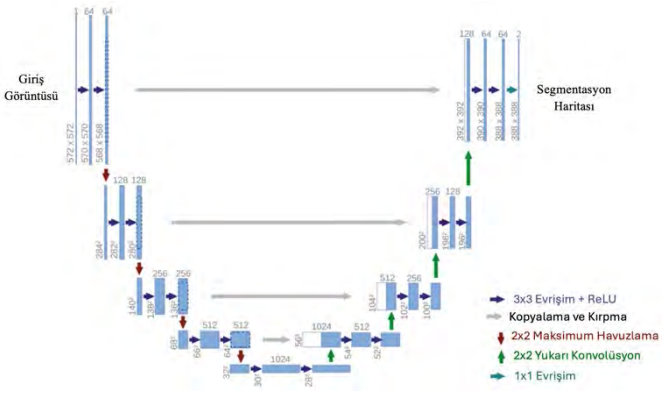
2.2.1 U-Net

U-Net [4], görüntü bölütlemesi için tasarlanmış bir evrişimli sinir ağı mimarisidir. Bu model bölütleme görevlerinde genellikle yüksek başarı ile çalıştığı için son yıllarda biyomedikal alanında sıklıkla kullanılmaktadır.

U-net ağlarında tamamen bağlı katman yoktur. Evrişim katmanları kullanılmaktadır, ayrıca her evrişim katmanında ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. U-net mimarisindeki katmanlar bir bütün olarak düşünülürse U harfini çağrıştırmaktadır. Bu sebeple ismini görüntüsünden almaktadır. Mimaride sol tarafta kodlayıcı, sağ tarafta ise kod çözücü kısmı bulunmaktadır.

Daralan yol diye de bilinen kodlayıcı, normal bir evrişimli ağ mimarisine benzemektedir. Orijinal U-Net mimarisinde ilk adım olarak verilen giriş görüntüsüne 3x3 boyutunda 64 adet filtre ile konvolüsyon yapılmasıyla başlar. Bunun yanında U-Net mimarisinde, kodlayıcı 4 adet bloktan oluşur. Bu bloklar iki tane ardışık 3x3 konvolüsyon katmanı, bir aktivasyon fonksiyonu ve bir 2x2 boyutlu maksimum havuzlama (max pooling) işleminden oluşmaktadır. Her bir adımda öznitelik kanallarının sayısı iki katına çıkmaktadır. Kodlayıcının amacı bölütleme yapabilmek için görüntünün içeriğini öğrenebilmektir.

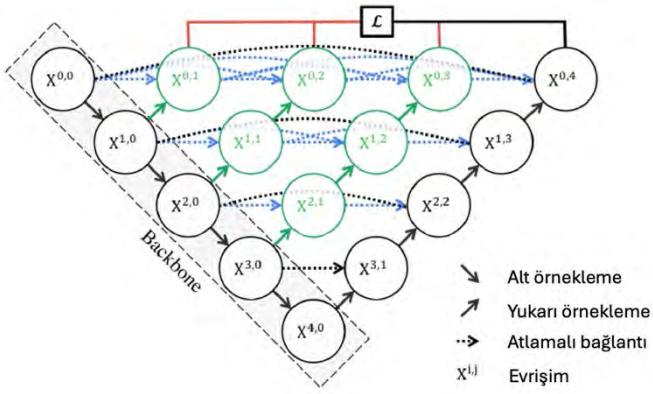
Geniş yol (expansive path) diye bilinen kod çözücü kısmı ise görüntüyü eski boyutlarına getirerek çözünürlüğünde artmasını amaçlamaktadır. Ayrıca atlama bağlantıları sayesinde kodlayıcı kısmından bağlamsal bilgileri de almaktadır. Bu kısım da 4 bloktan oluşmaktadır. Bu bloklar bir 2x2 yukarı konvolüsyon (up-conv) katmanı, öznitelik haritası, iki ardışık 3x3 konvolüsyon katmanı ve aktivasyon fonksiyonundan oluşmaktadır. En son katmanda ise, 64 bileşenli özellik vektörünü istenilen sayıdaki sınıfa eşleyebilmek 1x1 konvolüsyon işlemi uygulanmaktadır. Orijinal U-Net mimarisi toplamda 23 evrişim katmanına sahiptir. Mimari basit bir yapıya sahip olduğu için parametre sayısı azdır ve diğer algoritmalara göre eğitim süresi oldukça kısa sürmektedir. Bu mimarideki en büyük detay katmanların hem kendisiyle hem de karşı katmanla evrişim halinde olmasındadır. Mimarideki kullanılan atlamalı bağlantılara, bölütlenmiş görüntülerde çok küçük nesneler için bile olsa hangi noktalara daha çok odaklanması gerektiği hakkında bilgi verilmektedir. U-Net'e ait mimari Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil- 4: U-Net Mimarisi [4]

2.2.2 U-Net++

U-Net++ [17], bölütleme doğruluğunu artırmak amacıyla atlamalı bağlantı fikrini bir adım daha ileriye taşıyarak, kodlayıcı ve kod çözücü arasına semantik boşluğu dolduracak şekilde yoğun blok ve evrişim katmanları ekleyen bir derin öğrenme mimarisidir. Bu mimaride omurga kısmı olarak bilinen kodlayıcı kısmı görüntüdeki önemli özellikleri çıkaran yapıyı temsil etmektedir ve genellikle önceden eğitilmiş bir ağdan yararlanır. U-Net++ modelindeki ara katmanlar sayesinde farklı katmanlardan elde edilen özellikler daha detaylı bir şekilde aktarılmış olur ve görüntüdeki en küçük ayrıntılar bile yüksek doğruluk oranıyla elde edilir. Böylece iki katmanların arasındaki anlamsal bilgi kaybı en aza indirgenmiştir. Şekil 5'te bu mimarinin yapısı sunulmuştur.



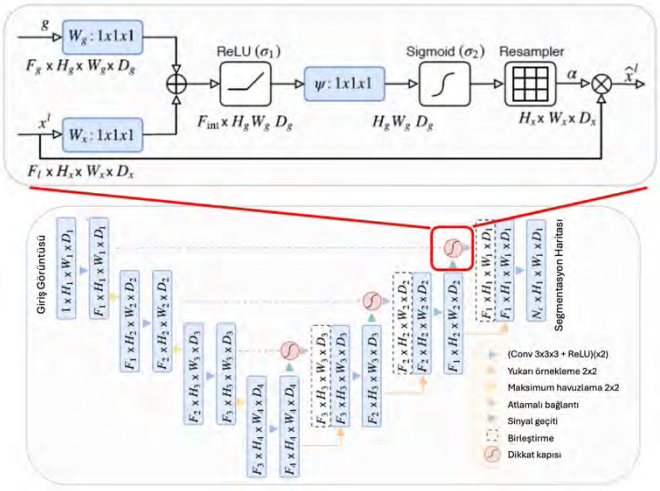
Şekil- 5: U-Net++ Mimarisi [17]

2.2.3 Dikkat U-Net

Dikkat U-Net [18], son yıllarda doğal dil işlemede kullanılan dikkat mekanizmasını atlamalı bağlantılarda kullanmaktadır. Kod çözücüdeki her bir katman, aynı seviyedeki kodlayıcı kısmından gelen özelliklerin geçmesi gereken bir dikkat kapısına sahiptir. Her katmandan sonra bu dikkat kapılarının sürekli kullanılması, modelde aşırı hesaplama karmaşıklığına sebep olmadan, bölütleme başarımını önemli ölçüde artırır [11].

Dikkat kapılarına atlamalı bağlantı ile gelen x vektörü ile kod çözücünün bir alt katmanından gelen g vektörü ilk önce 1x1 evrişim katmanından geçmektedir. Sonra ise sırasıyla ReLU aktivasyon fonksiyonu, 1x1 evrişim katmanı ve çıktıyı 0 ile 1 arasında bir değere sınırlayan sigmoid katmanından

geçmektedir. Elde edilen çıktı vektörü ile kod çözücü kısımdan gelen vektör çarpılarak görüntüdeki hedeflenen bölgelere dikkat edilmesi sağlanır. Mimarinin yapısı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil- 6: Dikkat U-Net Mimarisi [18]

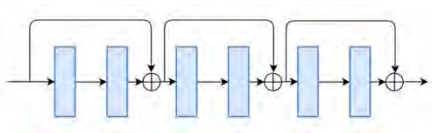
Mimaride belirtilen F, H, W, ve D terimleri özellik haritası boyutlarını belirtmek için kullanılmıştır. F; özellik haritası kanallarının sayısını ifade etmektedir. Her bir özellik haritası ise, girdideki belirli bir özelliği temsil eden filtre ile ilişkilidir. H_i, W_i ve D_i sırasıyla U-Net mimarisinin i. katmanındaki özellik haritasının yüksekliğini, genişliğini ve derinliğini belirtmektedir. Katmanlarda bu terimlerin çarpılması ile özellik haritasının toplam boyutu hesaplanmaktadır.

Bu mimari kullandığı bu mekanizma sayesinde karmaşık içeriğe sahip görüntülerde bile hedeflenen bölgenin daha hassas bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır.

2.2.4 Artık U-Net

Artık bağlantılı U-Net olarak bilinen bu mimari ResNet mimarisine dayanmaktadır. Adından da anlaşılacağı üzere bu ağ önceki katmanlardan elde edilenlerin bir sonraki katmanlarda veri akışına dahil edilmesiyle oluşmaktadır [19]. Ağdaki her blokta, birinci evrişim katmanının girişi, bir atlama bağlantısı kullanılarak ikinci evrişim katmanının çıkışına eklenir. Bu bağlantılar, U-Net mimarisindeki kodlayıcı ve kod çözücü yollarında alt örnekleme veya üst örnekleme yapılmadan önce uygulanmaktadır [11].

Bir mimariye gerektiğinden fazla katman eklendikçe kaybolan gradyan sorunu (vanishing gradient problem) ortaya çıkabilir. Bu ağ yapısında ise bilgiler doğrudan katmanlara artık bağlantılar sayesinde aktarıldığından sorun çıkması mümkün oldukça önlenmektedir [20]. ResNet bloklarının dizaynı Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil- 7: Artık bağlantılı üç ResNet bloğu[19]

2.2.5 Dikkat Artık U-Net

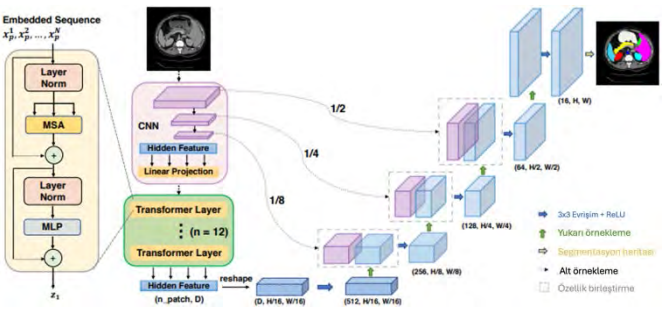
Bu model, yüksek başarım elde edebilmek için Artık U-Net ile dikkat mekanizmasını beraber kullanmaktadır. Bilindiği üzere, U-Net ağında mekânsal bilgiler kodlayıcıdan kod çözücü kısmına atlama bağlantıları sayesinde geçmektedir. Ancak bu işlem esnasında hatalı/gereksiz bilgilerde karşıya taşınabilir. Buna çözüm olabilmesi adına dikkat mekanizması atlama bağlantılarına eklenmiştir [20]. Ayrıca bu mimariye eklenilen residual (artık) bloklar, önceki katmanlardan gelen bilgileri sonraki katmanlara eksiksiz taşıyarak derin ağların bile hatasız ve verimli bir şekilde eğitilmesine olanak tanımış olur.

2.2.6 TransUnet

TransUnet [21], kodlayıcı kısmında transformatör kullanan ilk Transformer-CNN melez modelidir [22]. Orijinal TransUnet mimarisi 12 adet transformatör katmanından oluşmaktadır. Bir transformatör katmanında; normalizasyon katmanı (Layer Norm), MSA (Multiple Sequence Alignment), normalizasyon katmanı ve MLP (Multi Layer Perceptron) bulunmaktadır.

Mimaride, ilk önce yerleşik bir dizi olarak tanımlanan görüntü parçaları belirli bir sıraya göre işlenir ve her birine pozisyon bilgisi eklenerek MSA yapısına gönderilir. MSA mekanizması, bir görüntü verisindeki piksellerin diğer tüm piksellerle olan bağımlılıklarını hesaplayarak global bağlamsal bilgi oluşturur. Bu da uzun vadeli bağımlılıkları daha iyi analiz etmesini ve başarımını arttırmasını sağlar [23]. MLP ise çok katmanlı yapısı sayesinde özellik vektörlerini (pikselleri) daha detaylı işlemek için kullanılır. Onlara doğrusal dönüşümler ve ReLU gibi aktivasyon işlemleri uygulayarak piksellerdeki karmaşık bilgilerin öğrenilmesini sağlar.

TransUnet, düşük seviyeli özelliklerin önemine dikkat çektiği için tıbbi görüntüleme uygulamalarında da oldukça tercih edilmekte ve başarılı sonuçlar vermektedir [24]. Ancak, çok sayıda katman ve mekanizma içerdiğinden modelin karmaşıklığı yüksektir ve görüntü bölütlerinin eğitilmesi çok zaman alabilmektedir. TransUnet mimarisi Şekil 8'da gösterildiği gibidir.



Şekil- 8: TransUnet Mimarisi [21]

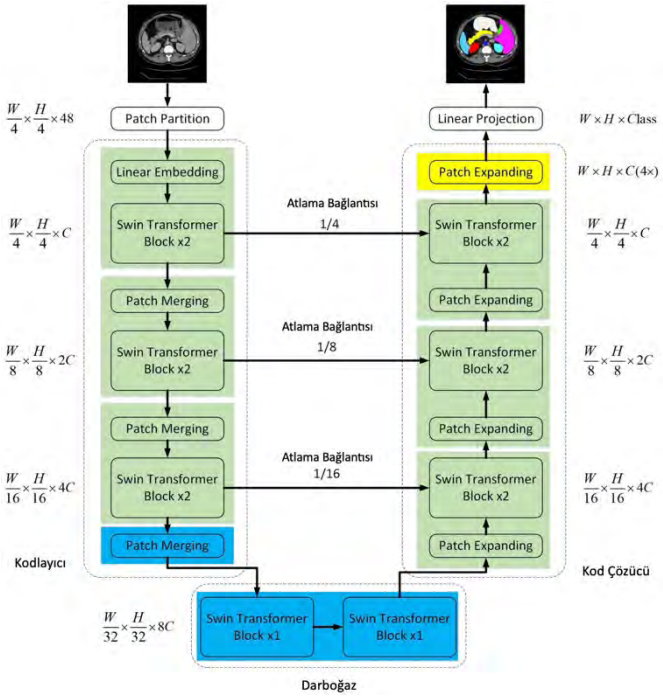
2.2.7 Swin-Unet

Swin-Unet [25] CNN kullanmayan tamamen transformatör kullanan ilk modeldir. Swin transformatör (Swin Transformer), normal transformatörün tek boyutlu dizisini iki boyutlu görüntü bloklarına genişletir. Mimaride özdikkat mekanizması ile beraber pencereleri kaydırma mekanizması da kullanılmaktadır. Swin-Unet, dikkat hesaplamalarını sadece mevcut bölgenin etrafındaki küçük alanlarla sınırlayarak çalışır. Bu sayede konumsal bilgiyi daha iyi korur

ve mimarinin verimli bir şekilde çalışmasını sağlayarak başarımını arttırır [23]. Model ilk aşamada parça bölme işlemi ile görüntüyü küçük parçalara ayırır ve ardından her bir parçanın özelliklerinin daha yüksek boyutlu bir uzaya yerleştirilmesini yani doğrusal yerleştirmeyi sağlar. Dönüştürülen bu parça birimleri, hiyerarşik özellik temsilleri oluşturmak için birkaç Swin Transformatör bloğundan ve parça birleştirme katmanından geçmektedir.

U-Net mimarisindeki gibi bu tasarımda da kodlayıcı ve çözücü arasında atlama bağlantıları vardır. Bu mimarideki bağlantılar kodlayıcıdaki Swin Transformatör bloğundan kod çözücü Swin Transformatöre gitmektedir. Parça birleştirme katmanının aksine, kod çözücüdeki parça genişletme katmanı özel olarak yukarı örnekleme işlemini gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Son olarak, gömülü olan diziler, farklı boyutlarda ifade edilmek üzere doğrusal projeksiyon işlemi ile dönüştürülür.

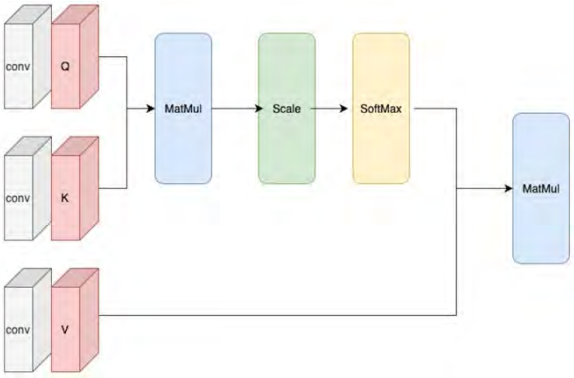
Swin-Unet modeli, tıbbi görüntülerden bölütleme yaparken SOTA (state-of-the-art, en gelişkin modeller) başarım elde etmek için swin transformatörünün güçlü yönlerinden yararlanmaktadır [26]. Swin-Unet mimarisi Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil- 9: Swin-Unet Mimarisi [25]

2.2.8 Özdikkat U-Net

Bu mimaride bölütleme için U-Net modeline dayalı bir mimari oluşturulmuş ve veri kümeleri üzerinde denenmiştir. Değiştirilmiş bu özdikkat U-Net modeli kodlayıcı, kod çözücü ve bir adet özdikkat modülüne sahiptir. Mimaride, özdikkat ile özellik haritası çıkartılmaya çalışılmıştır. Özdikkatta kullanılan sorgu, anahtar ve değerleri bir önceki katmandan gelen evrişim işleminin çıktısıdır. Özdikkat modülünden sonra elde edilen özellikler ise yukarı örnekleme blokları tarafından kullanılarak çalışmanın amacına uygun olarak görüntünün yeniden oluşturulmasını sağlamıştır. Şekil 10'da özdikkat mimarisi verilmiştir.



Şekil- 10: Self Attention Mimarisi

2.2.9 Önerilen MMIAU-Net (Mixed Modified Inception and Self Attention U-Net) Mimarisi

2014 yılında GoogleNet tarafından duyurulan inception yapısı, ağın genişliğini ve derinliğini arttırırken, işlem karmaşıklığını arttırmadığı gözlemlenmiştir [27]. Inception modüllerindeki genişleme işlemi, evrişim katmanlarındaki 1x1, 3x3, 5x5 gibi farklı boyutlardaki filtrelerin ayrıca 3x3 maksimum havuzlama işleminin paralel bir şekilde uygulanmasıyla yapılmaktadır. Burada amaç katman olarak derinleşmektense genişleme fikrine dayanmaktadır.

Bu çalışmada önerilen MMIAU-Net yapısında kullanılan inception ağ modüllerinde ilk önce 1x1'lik evrişim işlemi sonra 3x1 ya da 5x1 evrişim işlemlerini ve bunları takiben 1x3 ve 1x5 evrişim işlemleri ve maksimum havuzlama katmanları kullanılmıştır.

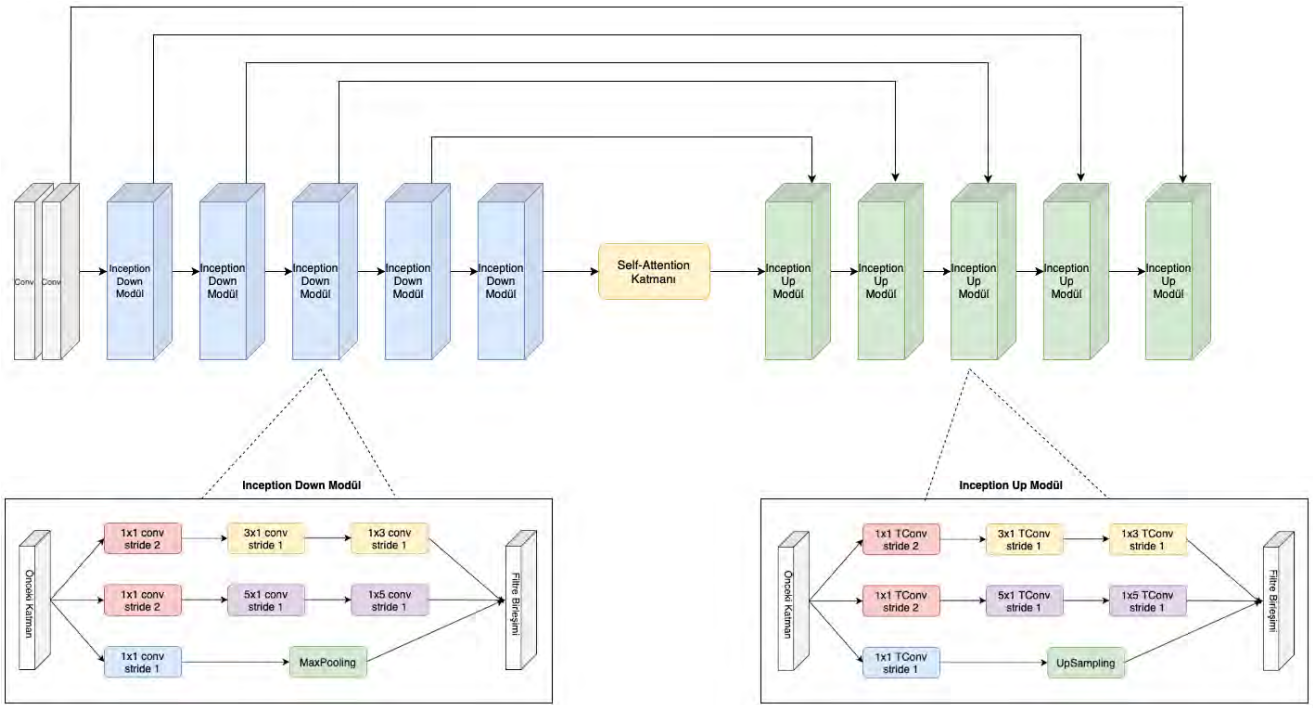
$$Q = XW^Q,\ K = XW^K,\quad V = XW^V \tag{1}$$

$$softmax(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^{N} e^{z_j}} \tag{2}$$

$$Y = Self\ Attention(Q,K,V) = softmax(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}})V \tag{3}$$

Önerilen modelde kodlayıcı ve kod çözücü katmanları arasında Self Attention metodu kullanılmıştır. Self Attention metodunda öncelikle X, bir önceki katmanın çıktı matrisi ve W^Q, W^K ve W^V eğitilebilir ağırlık matrisleri olmak üzere Q Sorgu, K Anahtar ve V Değer katmanları Eşitlik 1'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. d_k her bir self dikkat katmanının iç boyutu olmak üzere; Q, K, V katmanları ile N elemanlı z vektörü için Eşitlik 2'deki gibi tanımlanan softmax fonksiyonu kullanılarak Eşitlik 3'de ki gibi self attention metodu uygulanmaktadır.

Bu model, diğer U-Net tabanlı mimarilere göre hem daha iyi sonuç vermiştir hem de daha az parametre gerektirdiği için oldukça hızlı çalışmaktadır. Bu modeli geliştirmeden önce diğer bölütleme modelleri detaylıca incelenmiş karşılaştırılmış ve self attention ile beraber inception modülünün yapılarının yüksek doğrulukla bölütleme yaptığı gözlemlendiğinden, U-Net mimarisine bu iki yapı eklenmiştir. Oluşturulan bu ağ, inception down modülleri, inception up modülleri ve self attention katmanı olmak üzere üç ana bileşenden meydana gelmektedir. Bu çalışma için oluşturulan ağın yapısı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil- 11: MMIAU-Net Mimarisi

2.3 Değerlendirme Metrikleri

Bu çalışmada, model başarımının değerlendirilebilmesi için doğruluk, birleşim kesişimi (Intersection over Union-IoU), dice benzerlik katsayısı (dice coefficient), duyarlılık (sensitivity) ve özgüllük (specificity) olmak üzere altı adet metrik kullanılmıştır. Bu metrikler dört parametrenin çeşitli kombinasyonlarının bir araya gelmesinden oluşmaktadır; TP, gerçek pozitiflerin sayısını, FP, yanlış pozitiflerin sayısını, FN, yanlış negatifleri ve TN gerçek negatifleri temsil etmektedir. Metriklerin formülleri aşağıya eklenmiştir:

$$Dogruluk = \frac{TN + TP}{TN + TP + FP + FN} \tag{4}$$

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \tag{5}$$

$$Dice = \frac{2 * TP}{(2 * TP) + FP + FN} \tag{6}$$

$$Duyarlilik = \frac{TP}{TP + FN} \tag{7}$$

$$Ozgulluk = \frac{TN}{TN + FP} \tag{8}$$

Modelin eğitimi esnasında kayıp fonksiyonu olarak dice loss kullanılmıştır. Bu kayıp fonksiyonu, verilen maske ile tahmin edilen maske arasındaki örtüşmeyi hesaplamaktadır.

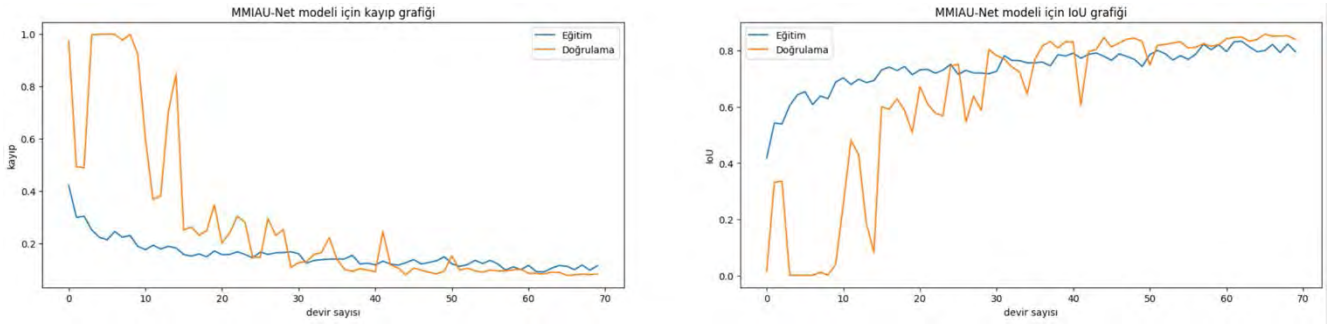
3. Deneyler ve Bulgular

Deneysel çalışmalar Google Colab Pro platformunda T4 GPU ile Python programlama dili üzerinde Keras kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Transformatör yapıları için Colab yeterli gelmemiş bu yüzden de TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarımlı ve Grid Hesaplama Merkezi'nden (Truba kaynaklarından) faydalanılmıştır.

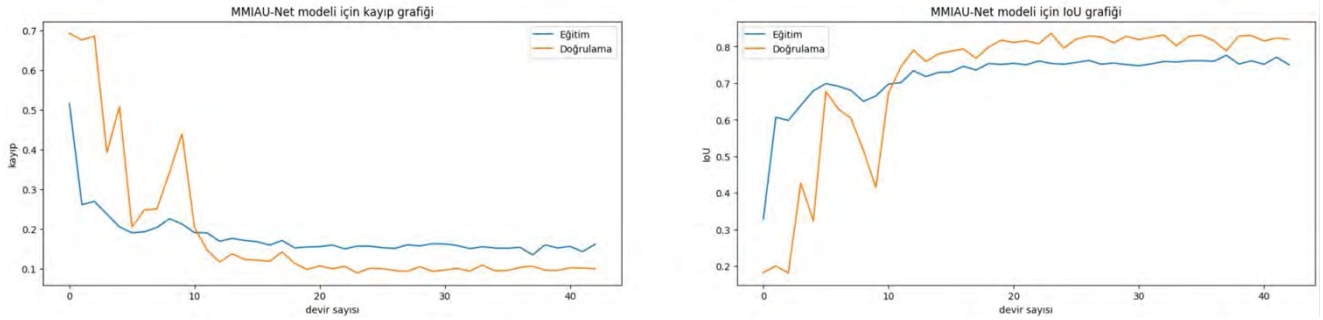
Eğitim veri kümesindeki muhtemel aşırı öğrenme problemini önlemek ve test veri setine daha iyi bir genelleme sağlamak amacıyla rastgele döndürme, çevirme gibi basit veri arttırımı (data augmentation) işlemleri uygulanmıştır. Model eğitilmeden önce her bir veri kümesinin boyutları farklıdır. Doğru bir karşılaştırma yapabilmek için tüm görüntüler 256x256 piksel çözünürlüğünde yeniden boyutlandırılmıştır. Oluşturulan mimarilerde, veri kümelerine uygulanan önişlemlerden sonra görüntüler rastgele %70 eğitim, %20 doğrulama ve %10 test olmak üzere üçe ayrılmıştır.

Hiper parametrelerin seçimi oldukça uzun bir süreç gerektirmektedir. Mevcut çalışmada üç ayrı veri seti ve dokuz farklı mimari kullanıldığından, denenen kombinasyonlar arasından en optimal değerler seçilmiştir. Modellerin eğitim esnasında aynı anda işlediği veri paket sayısını ifade eden batch boyutu 8 olarak belirlenmiştir. Eğitim esnasında tüm algoritmalarda maksimum 150 devir sayısı (epoch) kullanılmıştır. Optimizasyon algoritması olarak gradient tabanlı bir algoritma olan Adam optimizasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Transformatör yapısı içeren modeller ile CVC-ClinicDB veri setinde eğitilen modeller için öğrenme oranı 1e-4, diğer tüm mimariler için 1e-2 tercih edilmiştir.

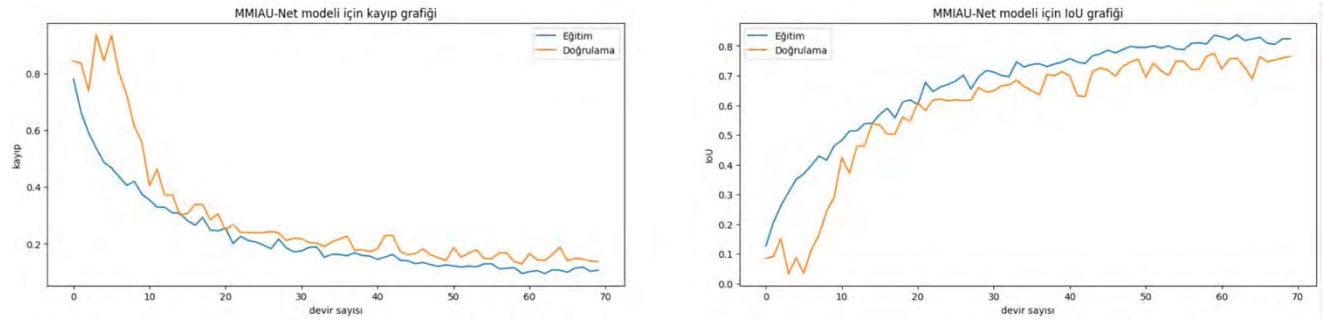
Ayrıca modellerin eğitim sürecinde Kerasa ait olan EarlyStopping ve ReduceLROnPlateau yöntemleri kullanılmıştır. EarlyStopping, modelin olası bir aşırı öğrenmeye yakalanmasını engelleyen bir yöntemdir. Eğitim süresince modelin başarımını izler, eğer model belirtilen epok boyunca herhangi bir ilerleme göstermiyorsa eğitim durdurulur ve modelin en başarılı sonuçları aldığı andaki değerler kaydedilir. ReduceLROnPlateau ise seçtiğimiz öğrenme oranını dinamik bir şekilde azaltarak daha iyi sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Kullanılan modellerde bu fonksiyonda, minimum öğrenme oranı alt sınırı 1e-6 olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil- 12: MMIAU-Net modelinin PH^2 verileri için kayıp ve IoU grafiği



Şekil- 13: MMIAU-Net modelinin BOWL 2018 verileri için kayıp ve IoU grafiği



Şekil- 14: MMIAU-Net modelinin CVC-ClinicDB verileri için kayıp ve IoU grafiği

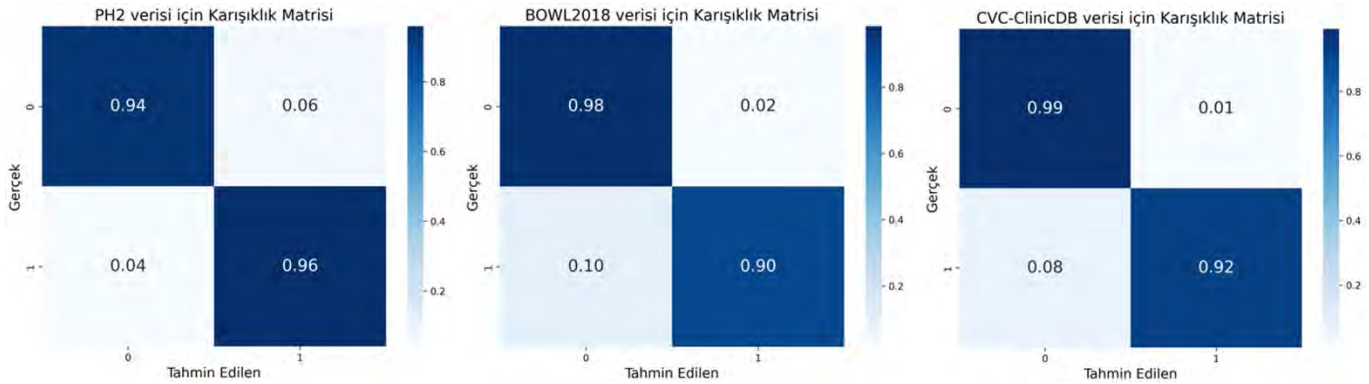
Önerilen modelin, PH^2 veri kümesinde eğitilmesi sonucu elde edilen hem hata hem de IoU başarım metriği grafiği incelendiğinde eğitim ve validasyon sonuçlarının 20. adımdan sonra aynı doğrultuda gittiği gözlemlenmiştir (Şekil 12). Bu da önerilen modelin ezberleme yapmadığını ve eğitim işleminin başarılı olduğunu göstermektedir. Eğitimin 60. ile 70. adımları arasında önerilen modelin hem hatasının azalmaması hem de IoU başarısının artmaması öğrenmenin bittiğini göstermektedir. Bu sebeple eğitim 70. adımda keras çerçevesinin eğitimi erken durdurma betiğince durdurulmuş olunup olası bir ezberleme senaryosunun önüne geçilmesi sağlanmıştır.

Şekil 13'te Bowl 2018 veri kümesinde eğitilen öneri modelinin kayıp ve IoU grafikleri verilmiştir. Grafiklere göre eğitimin başlangıcından itibaren devir sayısı yükseldikçe IoU oranı artarken kayıp değeri azalmaktadır. Yaklaşık 42. devir sayısında eğitimin tamamlandığı görülmektedir.

CVC-ClinicDB 2018 veri kümesinde eğitilen öneri modelinin kayıp ve IoU grafiği Şekil 14'te verilmiştir. Modelin kayıp grafiğinde hem eğitim hem de doğrulama eğrilerinin sıfıra yaklaşmış olması modelin hem eğitim hem de doğrulama verileri üzerinde yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Eğitimin 50. devir sayısından sonra model sabit bir şekilde yüzdesini koruyarak çalışmasını bitirmiştir.

Bu grafikler önerilen modelin başarımını analiz edebilmek ve eğitimin ilerlemesini takip edebilmek adına önemlidir. Üç veri kümesinde de eğitilen modelin ezberleme yapmadığı ve genellemeyi başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği görülmektedir.

Modellerin başarımının ayrıntılı olarak değerlendirilmesinde karmaşıklık matrisleri de önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, önerilen modelin veri kümeleri ile eğitimi sonucunda elde edilen sonuçlar kullanılarak normalize edilmiş şekilde hesaplanan karışıklık matrisleri Şekil 15'te verilmiştir. X ekseni tahmin edilen sınıfları gösterirken Y ekseni ise gerçek sınıfları göstermektedir. 0 arka plan 1 ise elde edilen bölütleme maskesini ifade etmektedir. Bu veriler doğrultusunda önerilen modelin veri kümeleri ile eğitiminde ezberleme gözükmemekte ve PH^2, Bowl 2018 ve CVC-ClinicDB veri kümelerinin hepsinde maske değerlerini doğru bir şekilde oluşturabildiği görülmektedir.



Şekil- 15: MMIAU-Net modeli Karışıklık matrisleri

Çizelge-1: PH² veri kümesi için elde edilen sonuçlar

Metot	Doğruluk	IoU	Dice Katsayısı	Duyarlılık	Özgüllük
U-Net	0,9608	0,8875	0,9402	0,9171	**0,9849**
U-Net++	0,9624	0,8893	0,9414	0,9420	0,9731
Attention U-Net	0,9584	0,8824	0,9374	0,9359	0,9710
Residual U-Net	0,9546	0,8707	0,9308	**0,9657**	0,9507
Attention Residual U-Net	0,9610	0,8858	0,9394	0,9467	0,9689
TransUNet	0,9325	0,8304	0,9059	0,9102	0,9665
Swin-Unet	0,9452	0,8597	0,9238	0,9247	0,9672
Self Attention U-Net	0,9442	0,8391	0,9123	0,9309	0,9459
MMIAU-Net	**0,9664**	**0,9018**	**0,9483**	0,9444	0,9763

Çizelge-2: BOWL 2018 veri kümesi için elde edilen sonuçlar

Metot	Doğruluk	IoU	Dice Katsayısı	Duyarlılık	Özgüllük
U-Net	0,9573	0,7901	0,8824	0,9013	0,9696
U-Net++	0,9549	0,7653	0,8668	0,8449	0,9793
Attention U-Net	0,9641	0,8190	0,9002	0,9080	0,9764
Residual U-Net	0,9647	0,8184	0,8999	0,8787	**0,9835**
Attention Residual U-Net	0,9573	0,7844	0,8787	0,8518	0,9808
TransUNet	0,9570	0,8006	0,8850	0,9251	0,9593
Swin-Unet	0,8431	0,6801	0,7758	**0,9499**	0,7946
Self Attention U-Net	0,9630	0,8165	0,8985	0,9172	0,9728
MMIAU-Net	**0,9664**	**0,8323**	**0,9082**	0,9283	0,9749

Çizelge-3: CVC-CLINICDB veri kümesi için elde edilen sonuçlar

Metot	Doğruluk	IoU	Dice Katsayısı	Duyarlılık	Özgüllük
U-Net	0,9861	0,8505	0,9177	0,9320	0,9912
U-Net++	0,9858	0,8475	0,9161	0,9302	0,9908
Attention U-Net	0,9750	0,7543	0,8579	0,8801	0,9842
Residual U-Net	0,9662	0,6771	0,8060	0,8250	0,9800
Attention Residual U-Net	0,9836	0,8244	0,9026	0,8873	**0,9928**
TransUNet	0,9637	0,6598	0,7856	0,8592	0,9736
Swin-Unet	0,9445	0,5263	0,6741	0,7312	0,9641
Self Attention U-Net	0,9849	0,8278	0,9053	0,9188	0,9907
MMIAU-Net	**0,9874**	**0,8605**	**0,9241**	**0,9322**	0,9925

Çalışmada kullanılan üç ayrı veri kümesinde eğitilen tüm modellerin deneysel sonuçları Çizelge 1, Çizelge 2 ve Çizelge 3'te sunulmuştur. Çizelgelerden anlaşılacağı üzere kullanılan mimariler genellikle birbirlerine yakın ve başarılı bölütlemeler elde etmişlerdir. MMIAU-Net mimarisinde IoU metriği; PH² verileri için **0,9018**, Data Science Bowl 2018 verileri için

0,8323 ve CVC-ClinicDB verileri için ise **0,8605** değeri ile diğer tüm modellere göre daha iyi başarım elde etmiştir.

Çizelge 4'te bu çalışma için kullanılan tüm modellerin toplam parametre sayısı gösterilmektedir. Oluşturulan yeni model **8,80 milyon parametre** ile en az işlem yüküne sahiptir. Önerilen modelin daha az parametreye sahip olması eğitim ve test sürelerini kısaltarak modelin verimliliğini arttırmaktadır. Böylece büyük veri kümeleri ve kısıtlı donanım kaynağına sahip olan cihazlarla çalışırken işlem kapasitesi ve bellek kullanımı açısından önemli kazançlar sağlanmış olur. Ayrıca parametre sayısının az olması aşırı öğrenme riskini düşürerek, yeni verilere karşı daha kararlı bir başarım göstermesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge-4: Metotlar ve Parametre Sayıları

Metot	Parametre Sayısı
U-Net	31,05 M
U-Net++	19,46 M
Attention U-Net	37,33 M
Residual U-Net	33,15 M
Residual Attention U-Net	39,09 M
TransUnet	98,50 M
Swin-Unet	9,36 M
Self Attention U-Net	9,96 M
MMIAU-Net	**8,80 M**

Şekil 16'da modellerin rastgele seçilen test verileri üzerindeki bölütleme sonuçları gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere çalışılan modeller bölütlenmek istenen bölgeleri yüksek doğruluklarla elde etmektedir.

4. Tartışma

Bu çalışmada önerilen modelin, 2020-2024 yılları arasındaki U-Net temelli en gelişkin modellerle başarı metrikleri açısından karşılaştırması Çizelge 5'te sunulmaktadır. Oluşturulan çizelge bu makale kapsamında kullanılan veri kümelerine göre sıralanmıştır.

kapısı, uzamsal dikkat ve kanal dikkati mekanizmaları ile hedeflenen cilt lezyonlarına daha fazla odaklanabilmeyi ve küçük ayrıntıları daha doğru bir şekilde yakalamayı hedeflemişlerdir. ISIC-2016, ISIC-2017 ve PH^2 veri kümelerini kullanarak eğittikleri bu model test sürecinde PH^2 veri kümesinde %84 Jaccard indeksi ve %91 F1 skorları elde etmiştir.

FAT-Net, Wu ve arkadaşları [29] tarafından otomatik cilt lezyonu bölütleme için geliştirilen bir transformatör ağıdır. Transformatör yapısı self attention mekanizması sayesinde global bağlam bilgilerini etkili bir şekilde analiz eder ve lezyonları daha doğru bir şekilde belirler. Model PH^2 veri kümesi üzerinde yaptığı testlerinde %89 IoU ve %94 dice katsayısı değerine ulaşmıştır.

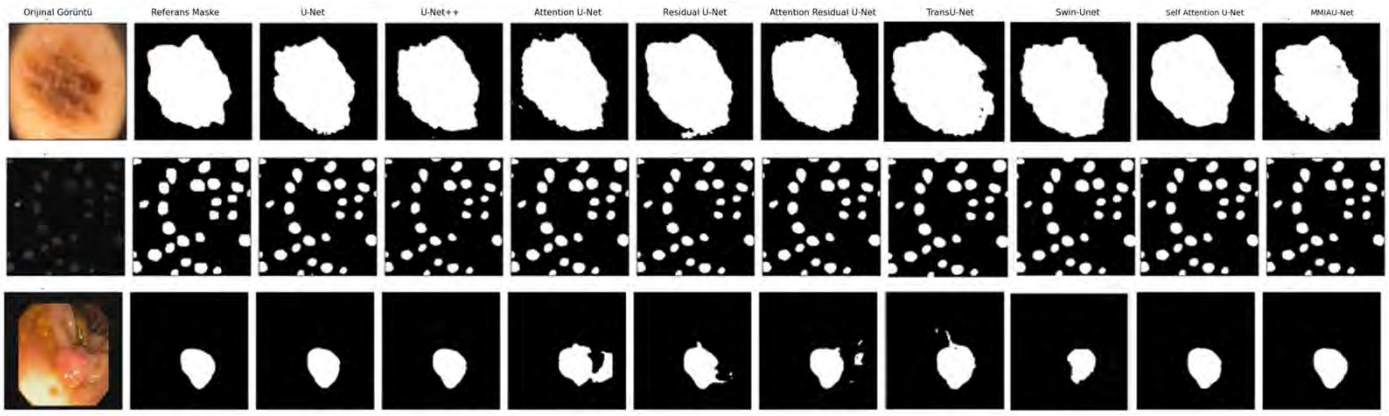
Zhang ve arkadaşları [30] oluşturdukları APT-Net modeli ile, farklı ölçeklerdeki görüntü özelliklerini birleştirmek için adaptif kodlama ve çok ölçekli özellik haritalarını aynı anda işleyebilecek çift yollu paralel kod çözücü yapılarına sahiptir. Deneylerde model %89 IoU ve %94 dice katsayısı sonuçlarını elde etmiştir.

Hu ve arkadaşları [31] da deri lezyonu bölütleme için Attention Synergy Network (AS-Net) modelini geliştirmiştir. AS-Net hedeflediği kısımların konumsal ve ayırt edici bilgilerini doğru bir şekilde elde etmek için modelin çözücü kısmında uzamsal ve kanal isminde iki farklı dikkat yolu kullanmaktadır. Model %88 Jaccard indeksi ve %93 dice katsayısı sonuçlarına ulaşmıştır.

GSCEU-Net, Hao ve arkadaşları [32] tarafından düşük hesaplama maliyetiyle beraber yüksek bölütleme başarısı sağlayan hafifletilmiş bir model olarak sunulmuştur. PH^2 test veri kümesiyle %84 IoU ve %91 dice katsayısı elde etmişlerdir.

Olimov ve arkadaşları [33] biyomedikal görüntü bölütleme hızlı bir şekilde yapabilen FU-Net (Fast Unet) modelini sunmuşlardır. Bu model U-Net modelinde elde edilen başarımı arttırabilmek adına darboğaz konvolüsyon katmanları kullanmaktadır. Model eğitim için kullandığı iki veri kümesinden biri olan PH^2 veri kümesi için %45 IoU ve %90 dice katsayısı elde etmişlerdir.

Roy ve arkadaşları [34] mikroskopi görüntülerinde çekirdek



Şekil- 16: Tahmin edilen maske görüntüleri

Tong ve arkadaşları [28], cilt lezyonlarının bölütleme için ASCU-Net modelini geliştirmişlerdir. Modele ekledikleri dikkat bölütleme için iki aşamalı bir model olan Nuclei-Net modelini geliştirmiştir. Bölütlemenin ilk aşamasında kolay kısımlar için

Mask Region-Based-CNN (Mask-RCNN), daha karmaşık olan çekirdeklerin üst üste binen kısımları için işaretçi kontrollü su-seddi algoritmaları (marker-controlled watershed algorithms) kullanmışlardır. Böylece iki yöntemi de kullanarak bölütlemeyi yüksek doğruluk oranıyla elde etmeyi hedeflemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda Nuclei-Net Bowl 2018 test veri kümesinde %88 dice katsayısı elde etmiştir.

OAU-Net (Outlined Attention U-network) modeli, Song ve arkadaşları [35] tarafından bypass dallanma stratejisi (bypass branching strategy) kullanılarak hem yüzeysel hem de detaylı özellikleri algılayabilmek için tasarlanmıştır. Mimari de kodlayıcı olarak artık evrişim (residual convolution) ve res2convolution kullanılmıştır. Ayrıca atlamalı bağlantı kısımlarına da kontur filtresi ve attention modülü eklenmiştir. Modelin başarısı %82 Jaccard indeksi ve %90 dice katsayısı olarak ölçülmüştür.

Ibtehaz ve Rahman [36] MultiResUnet modelini, U-Net'in kodlayıcı ile kod çözücü arasında özellik aktarım aşamalarında bazı uyumsuzlukların olduğunu düşündükleri için önermişlerdir. Modele özellik haritalarının daha homojen hale gelebilmesi için 'Res yolları' eklenmiştir. Ayrıca inception bloklarından esinlenerek oluşturdukları 'MultiRes' blokları çok çözünürlüklü analiz yeteneğini arttırmak için kullanılmıştır. Başarı metriği olarak Jaccard indeksi kullanarak %82 elde etmişlerdir.

Double Attention Res-U-Net, Chenarlogh ve arkadaşları [37] tarafından farklı tıbbi görüntüleme sistemlerinde bölütlemeyi kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir. Model beş özel bloklu kodlayıcı ve kod çözücü modülleri içeren iki adet ağdan oluşturulmuştur. Bu ağlar, uzamsal bilgileri korumak için modifiye edilmiş Residual yapıları içermektedir. Ayrıca farklı ölçeklerdeki bilgileri yakalayabilmek için dikkat kapıları kullanmışlardır. Modelin başarısı %75 Jaccard indeksi ve %87 dice katsayısı olarak ölçülmüştür.

Cai ve arkadaşları [38] tam konvolüsyonel ağlara dayalı olan çoğu bölütleme yönteminin, uzamsal ve bağlamsal bilgilerin kaybına sebep olduğunu belirtmiş ve bu sorunu çözmek için RAAU-Net modelini tanıtmışlardır. RAAU-Net; ResNet-18 modelini özellik çıkarıcı olarak kullanan bir kodlayıcı, çoklu algılama amacını taşıyan bir modül ve kod çözücü olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. CVC-ClinicDB veri kümesinde %78 IoU ve %87 dice katsayısı elde etmişlerdir.

Jiang ve arkadaşları [39] tarafından geliştirilen LV-UNet modeli (a lightweight and vanilla model) özellikle mobil tıbbi cihazlarda kullanılabilir sade bir mimari sunmayı hedeflemiştir. Bu yüzden de düşük işlem gücüne sahip olması ile bilinen MobileNetv3-Large modelinden yararlanmışlardır. Modelin başarısı %85 IoU ve %91 dice katsayısı olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5'teki sonuçlar karşılaştırıldığında; önerilen modelin, literatürdeki diğer modellere göre başarı metriklerinde daha üstün bir başarım sergilediği gözlemlenmiştir.

5. Sonuç

Tıbbi görüntü analizinde kullanılan en popüler yöntem derin öğrenme algoritmalarıdır. Ancak, bir derin öğrenme modelinin tüm veri kümeleri için yüksek doğruluk oranına sahip bölütleme yapma garantisi yoktur. Bu yüzden çalışılacak her veri seti için başarılı sonuçlar elde etmek isteniyorsa bu model üzerinde detaylı analizler yapılarak doğru önişleme adımları uygulanmalı ve hiper parametreler dikkatlice seçilmelidir.

Son yıllarda başarısından dolayı çokça kullanılan U-Net mimarisi, hedef kısımların bölütlenmesi için kullanılan birçok modelin geliştirilmesinde öncü rolündedir. Bu bağlamda mevcut çalışmada, U-net varyantı mimarilerden bazıları, popüler veri kümelerinden olan PH^2, BOWL 2018 ve CVC-ClinicDB kullanılarak eğitilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapılan analizlerin sonunda biyomedikal görüntüleme bölütlemede kullanılabilecek yeni bir derin öğrenme yöntemi de önerilmiştir. Bulgular, bu çalışma kapsamında önerilen MMIAU-Net mimarisinin PH^2 veri kümesi için **%90 IoU**, **%94 dice benzerlik katsayısı**, Bowl2018 veri kümesi için **%83 IoU**, **%90 dice benzerlik katsayısı** ve CVC-ClinicDB veri kümesi için **%86 IoU**, **%92 dice benzerlik katsayısı** ve **8,80M** parametre sayısı ile diğer tüm U-Net tabanlı mimarilere göre daha az parametre kullanarak daha iyi bir başarım sergilediğini göstermektedir. Önerilen özgün mimari kullanılarak elde edilen sonuçlar ile modelin güvenilirliği ve üstünlüğü ortaya koyulmuş ve gerçek tıbbi problemlere uygun bir yöntem olabileceği gösterilmiştir.

Çizelge-5: Literatürdeki aynı veri kümelerinden birini kullanan en gelişkin modeller ile önerilen model karşılaştırması

Veri Kümesi	Yayın	Yıl	Metot	Başarı Değeri
PH²	Tong ve ark. [28]	2021	ASCU-Net	%84 Jaccard indeksi %91 F1
	Wu ve ark.[29]	2022	FAT-Net	%89 IoU %94 Dice katsayısı
	Zhang ve ark. [30]	2022	APT-Net	%89 IoU %94 Dice katsayısı
	Hu ve ark. [31]	2022	AS-Net	%88 Jaccard indeksi %93 Dice katsayısı
	Hao ve ark. [32]	2023	GSCEU-Net	%84 IoU %91 Dice katsayısı
	Önerilen Model	**2024**	**MMIAU-Net**	**%90 IoU** **%95 Dice katsayısı**
Data Science Bowl	Olimov ve ark. [33]	2021	FU-Net	%45 IoU %90 Dice katsayısı
	Roy ve ark. [34]	2023	Nuclei-Net	%88 Dice katsayısı
	Song ve ark. [35]	2023	OAU-net	%82 Jaccard indeksi %90 Dice katsayısı
	Önerilen Model	**2024**	**MMIAU-Net**	**%83 IoU** **%91 Dice katsayısı**
CVC-ClinicDB	Ibtehaz ve Rahman [36]	2020	MultiResUNet	%82 Jaccard indeksi
	Chenarlogh ve ark. [37]	2022	Double Attention Res-U-Net	%75 Jaccard indeksi %83 Dice katsayısı
	Cai ve ark. [38]	2024	RAAU-Net	%78 IoU %87 Dice katsayısı
	Jiang ve ark. [39]	2024	LV-UNet	%85 IoU %91 Dice katsayısı
	Önerilen Model	**2024**	**MMIAU-Net**	**%86 IoU** **%92 Dice katsayısı**

Kaynakça

[1] Punn, N. S., Agarwal, S. *Modality specific U-Net variants for biomedical image segmentation: a survey*, Artificial Intelligence Review, 2022.

[2] Elnakib, A., Gimel'farb, G., Suri, J. S., El-Baz, A. *Medical Image Segmentation: A Brief Survey*, 2011.

[3] Eker, A. G., Duru, N. *Medikal Görüntü İşlemede Derin Öğrenme Uygulamaları,* Acta Infologıca, vol. 5, no. 2, pp. 459-474, 2021.

[4] Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention(MICCAI), 2015.

[5] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. Deep Residual Learning for Image Recognition, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2016, pp. 770–778.

[6] Liu, S., Zhuang, Z., Zheng, Y., Kolmanič, S. *A VAN-Based Multi-Scale Cross-Attention Mechanism for Skin Lesion Segmentation Network*, IEEE Access, · 2023.

[7] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., Polosukhin, I. *Attention Is All You Need.* NIPS, 2017.

[8] Dosovitskiy A., Beyer L. , Kolesnikov A. , Weissenborn D. , Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. *An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale,* arXiv:2010.11929, 2021.

[9] Chitty-Venkata, K. T., Emani, M., Vishwanath, V., Somani, A. K. *Neural Architecture Search for Transformers: A Survey*, IEEE Access, 2022.

[10] Wu, H., Chen, S., Chen, G., Wang, W., Lei, B., and Wen, Z. FAT-Net: Feature Adaptive Transformers for Automated Skin Lesion Segmentation, Medical Image Analysis, 2022.

[11] Siddique, N., Paheding, S., Elkin, C. P., Devabhaktuni, V. *U-Net and Its Variants for Medical Image Segmentation: A Review of Theory and Applications*, IEEE Access, vol. 9, pp. 82031-82057, 2021.

[12] Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. *Going deeper with convolutions.* IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), Jun. 2015, pp. 1–9.

[13] Mendonça, T., Ferreira, P. M., Marques, J. S., Marçal, A. R. S., Rozeira, J. *PH² - a dermoscopic image database for research and benchmarking.* 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, Japan, 2013.

[14] Caicedo, J. C., Goodman, A., Karhohs, K. W., Cimini, B. A., Ackerman, J., Haghighi, M., Heng, C., Becker, T., Doan, M., McQuin, C., Rohban, M., Singh, S., and Carpenter, A. E. *Nucleus segmentation across imaging experiments: the 2018 data science bowl*. Nature Methods, 16, 2019, pp. 1247–1253.

[15] Yadavendra, and Chand, S. *Semantic segmentation of human cell nucleus using deep U-Net and other versions of U-Net models*. School of Computer and Systems Sciences, Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India, 2022.

[16] Bernal, J., Sánchez, F. J., Fernández-Esparrach, G., Gil, D., Rodríguez, C., Vilariño, F. *WM-DOVA maps for accurate polyp highlighting in colonoscopy: Validation vs. saliency maps from physicians*. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2015.

[17] Zhou, Z., Siddiquee, M. M. R., Tajbakhsh, N., Liang, J. *UNet++: Redesigning Skip Connections to Exploit Multiscale Features in Image Segmentation*, IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019.

[18] Oktay, O., Schlemper, J., Le Folgoc, L., Lee, M., Heinrich, M., Misawa, K., Mori, K., McDonagh, S., Hammerla, N. Y., Kainz, B., Glocker, B., Rueckert, D., *Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas*, 1st Conference on Medical Imaging with Deep Learning (MIDL 2018), 2018.

[19] Hatipoğlu, N., Bilgin, G. *Histopatolojik Görüntülerin U-Net Tabanlı Modeller Kullanılarak Bölütlenmesi*, Medical Technologies Congress (TIPTEKNO) 2021.

[20] Sariturk, B., Seker, D. Z. A *Residual-Inception U-Net (RIU-Net) Approach and Comparisons with U-Shaped CNN and Transformer Models for Building Segmentation from High-Resolution Satellite Images*, Sensors, 2022.

[21] Chen, J., Lu, Y., Yu, Q., Luo, X., Adeli, E., Wang, Y., Lu, L., Yuille, A. L., Zhou, Y. *TransUNet: Transformers Make Strong Encoders for Medical Image Segmentation.* 2021.

[22] Tragakis, A., Kaul, C., Murray-Smith, R., Husmeier, D. *The Fully Convolutional Transformer for Medical Image Segmentation*. IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2023.

[23] Yao, W., Bai, J., Liao, W., Chen, Y., Liu, M., Xie, Y. *From CNN to Transformer: A Review of Medical Image Segmentation Models,* Journal of Imaging Informatics in Medicine,2023.

[24] Faria, F. T. J., Moin, M. B., Debnath, P., Fahim, A. I., Shah, F. M. *Explainable Convolutional Neural Networks for Retinal Fundus Classification and Cutting-Edge Segmentation Models for Retinal Blood Vessels from Fundus Images*, 2024.

[25] Cao, H., Wang, Y., Chen, J., Jiang, D., Zhang, X., Tian, Q., Wang, M. *Swin-Unet: Unet-like Pure Transformer for Medical Image Segmentation*. 2021.

[26] Armand, T. P. T., Bhattacharjee, S., Kim, H. C., Choi, H. K. *Transformers Effectiveness in Medical Image Segmentation: A Comparative Analysis of UNet-based Architectures*, ICAIIC 2024

[27] Nurhopipah, A., Murdiyanto, A. W., Astuti, T. *A Pair of Inception Blocks in U-Net Architecture for Lung Segmentation,* IEEE 5th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), 2021.

[28] Tong X., Wei J., Sun B., Su S., Zuo Z., Wu P. *ASCU-NET: Attention Gate, Spatial and Channel Attention U-Net for Skin Lesion Segmentation.* Diagnostics, 2021, pp. 11-29.

[29] Wu H., Chen S., Chen G., Wang W., Lei B., Wen Z. *FAT-Net: Feature adaptive transformers for automated skin lesion segmentation*. Medical Image Analysis, 2022, pp. 76.

[30] Zhang N., Yu L., Zhang D., Wu W., Tian S., Kang X. *APT-Net: Adaptive encoding and parallel decoding transformer for medical image segmentation*. Computers in Biology and Medicine, 2022, pp. 151.

[31] Hu K., Lu J., Lee D., Xiong D., Chen Z. *AS-Net: Attention Synergy Network for skin lesion segmentation*. Expert Systems with Applications, 2022, pp. 1238-1259.

[32] Hao S., Wu H., Jiang Y., Ji Z., Zhao L., Liu L., Ganchev I. *GSCEU-Net: An end-to-end lightweight skin lesion segmentation model with feature fusion based on U-Net enhancements*. Information, 2023, pp. 14-23.

[33] Olimov B., Sanjar K., Din S., Ahmad A., Paul A., Kim J. *FU-Net: fast biomedical image segmentation model based on bottleneck convolution layers*. Multimedia Systems, 2021, pp. 1-14.

[34] Roy K., Saha S., Banik D., Bhattacharjee D. *Nuclei-Net: A multi-stage fusion model for nuclei segmentation in microscopy images*. Innovations in Systems and Software Engineering, 2023, pp. 1-8.

[35] Song H., Wang Y., Zeng S., Guo X., Li Z. *OAU-net: Outlined Attention U-net for biomedical image segmentation.* Biomedical Signal Processing and Control, 2023, pp. 79.

[36] Ibtehaz N., Rahman M. *MultiResUNet: Rethinking the U-Net architecture for multimodal biomedical image segmentation.* Neural networks, 2020, pp. 74-87.

[37] Chenarlogh A.V., Shabanzadeh A., Oghli G.M., Sirjani N., Moghadam F.S., Akhavan A., Tarzamni K.M. *Clinical target segmentation using a novel deep neural network: double attention Res-U-Net.* Scientific Reports, 2022, pp. 12.

[38] Cai S., Xiao Y.i Wang Y. *Two-dimensional medical image segmentation based on U-shaped structure.* International Journal of Imaging Systems and Technology, 2024, pp. 34.

[39] Jiang J., Wang M., Tian H., Cheng L., Liu Y. *LV-UNet: A Lightweight and Vanilla Model for Medical Image Segmentation.* arXiv preprint arXiv, 2024, pp. 2048.

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Antik Duvar Resimlerinin Sanal Onarımı Hakkında Bir İnceleme

A Review About Virtual Restoration of Ancient Murals

Bilgin YAZLIK
Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Merkez / Nevşehir / Türkiye
bilginyazlik@nevsehir.edu.tr
0000-0002-8172-3192

Öz

Antik duvar resimleri bize geçmişte onları yaratan insanların tarihi, kültürü ve sanatı hakkında paha biçilmez bilgiler sağlar. Ancak hasarlı duvar resimleri onlardan elde edebileceğimiz bilgiyi sınırlar, bu nedenle mümkünse antik duvar resimlerinin onarılması gereklidir. Duvar resimleri taşınmaz kültürel varlıkları olduğundan, yerinde onarılması gerekir. Fiziksel onarım riskli bir işlemdir ve onarımda yapılacak bir hata bin yıllık bir duvar resmine geri dönülemez zararlar verebilir. Günümüzde bilgisayar tabanlı hesaplama yeteneklerinin artmasıyla görüntü işleme tekniklerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bugün dijital görüntü işleme tekniklerinin desteğiyle antik duvar resimlerinin sanal onarımı yapılabilmektedir. Sanal onarım sayesinde, orijinal duvar resmine fiziki hiçbir müdahalede bulunulmadan onarım ön izlemesi ve onarım sanatçılarına rehberlik yapılabilmektedir. Bu sayede fiziksel onarım süreci daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Görüntü işleme teknikleri, antik duvar resimlerinin dijital arşivlenmesinde, soluk duvar resimlerindeki ayrıntıların ve renklerin belirginleştirilmesinde, yıpranmış duvar resimlerinde eksik kısımların tamamlanmasında, üst üste binen motiflerin analizinde, resim yüzeyindeki çatlakların giderilmesinde ve boyamada kullanılan malzemelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu derlemede antik duvar resimlerinin sanal onarımında kullanılan dijital görüntü işleme teknikleri ele alınmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Sanal onarım, antik duvar resimleri, resim tamamlama, resim iyileştirme.

Abstract

Ancient murals provide us invaluable information about the history, culture and art of the people who painted them in the past. But damaged murals limit our knowledge so if it is possible restoration of the ancient mural is mandatory. Since these murals are immovable cultural heritages, they need to be restored in situ. Physical restoration is a high-risk process, and a restoration mistake can irreversibly damage a thousand-year-old mural. Nowadays, thanks to the increasing computational capabilities, significant advancements have been achieved in image processing techniques. Today, virtual restoration of ancient murals could be done with the support of digital image processing techniques. Thanks to virtual restoration, restoration preview and guidance for the restoration artists can be performed without any intervention to the original mural. In this way, the physical restoration process can be carried out more accurately. Image processing techniques are used in digital archiving of ancient murals, enhancement of details and color in faded murals, inpainting missing parts of faint murals, analyzing superimposed motifs, removing cracks, and identifying the materials used for painting. In this review, digital image processing techniques used in the virtual restoration of ancient murals are discussed.

Keywords: Virtual restoration, ancient murals, inpainting, enhancement.

1. Giriş

Dijital görüntü işleme teknikleri, laboratuvara taşınması olanaksız olan antik duvar resimleri üzerinde çalışırken çok faydalıdır. Araştırmacılar, duvar resimlerinin yüzeyinde hasar oluşma riskini en aza indiren yeni onarım yöntemleri geliştirmektedirler. Bu yöntemler sıvama, saydan bir ortam üzerine çizim yapma, tebeşirleme ve kalıplama yöntemlerini içermektedir. Ancak bu yöntemler hasarı en aza indirmesine

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 29.09.2024 - 28.10.2024 – 02.11.2024
Makale türü: İnceleme

karşın, yine de paha biçilmez eserler fiziksel temasla analiz edilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisinin yardımıyla, antik duvar resimleri, fiziksel temas gerektirmeden analiz edilebilmektedir. [1] sayılı çalışmada, antik duvar resimlerinin derinlemesine analizi için kızılötesi ile dijital görüntüleme tekniğinden yararlanılmıştır. Kızılötesi spektrum, fotoğrafın keskinliğini azaltır, bu nedenle ticari dijital kameralar kızılötesi spektrumu engelleyecek şekilde tasarlanmışlardır. Ancak, kızılötesi spektrumun kullanımıyla bazı soluk görüntüleri iyileştirmek mümkündür. [1]'e göre, karbon bazlı mürekkepler kızılötesi ışıkta daha belirgin görünürken, liken, yosun ve diğer canlı malzemeler kızılötesi ışık altında floresan ışık yayar. Kızılötesi ışıkta kırmızı pigmentler daha az görünür ancak siyah, kahverengi, gri ve mavimsi pigmentler daha belirgin görünür.

Duvar resimleri, yağlı boya tablolar gibi antik sanat eserleri çoğunlukla zamana dayalı çatlaklar, renk değişimi, fiziksel hasar, yüzeyde biyolojik türlerin büyümesi gibi yaşlanma problemlerine sahiptirler. [2]'de eski Çin resimlerinin dijital onarımı için hasar tespiti ve boyama yöntemi önerisi araştırılmıştır. Sonuçlar, en yakın komşuya dayalı dijital onarım tekniklerinin yardımıyla hasarlı duvar resimlerinin dijital olarak onarımının mümkün olduğunu göstermektedir.

Hasarlı antik duvar resimlerinin geleneksel yöntemlerle onarılmasının geri döndürülemez olduğu bilinmektedir. Onarımdan önce, daha az hatalı bir onarım işlemi için dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımı ile dijital onarım yapmak mümkündür. Bu ön işlem, nihai onarım için bir kılavuz olarak kullanılabilir. [3]'de, dijital görüntü işleme tabanlı tekniklerin, geleneksel yağlı boya onarım işlemine kıyasla yağlı boya onarımının kalitesini artırabileceği gösterilmiştir.

Antik duvar resimlerinin onarımı çok önemlidir ve bazen eserin geri döndürülemez deformasyonu nedeniyle zarar verici olabilir. Antik duvar resimlerinde çatlak, renk deformasyonu ve fiziksel deformasyon (bazı alanların eksikliği gibi) sorunları görülebilmektedir. Bu makalede [4], görüntü onarımı için üç uygulama gerçekleştirilmiştir: çatlak onarımı, renk onarımı ve kavisli yüzeylerdeki kısmi görüntülerin mozaiklenmesi.

Fiziksel hasarlar veya çevresel etkiler duvar resimlerinin kalitesini düşürebilir. Dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla duvar resimlerinin orijinal görünümü benzetilebilmektedir. [5]'de beş farklı dijital renk onarım tekniği sunulmuştur: örnek ortalama eşleştirme, doğrusal yaklaşım, yinelemeli en yakın nokta yaklaşımı, beyaz nokta dönüşümü, RBF (Radyal Taban Fonksiyonu) yaklaşımı. Sonuçlar tatmin edici iyileştirmelerin elde edilebileceğini göstermektedir.

Duvar resimleri Kapadokya bölgesinde de yaygın olarak bulunmaktadır. Bu duvar resimlerinin neredeyse tamamı erken Hristiyanlık dönemine aittir. Bölgedeki antik duvar resimleri zamanla bozulma ve yok olma sorunlarıyla karşı karşıya kalmıştır. Sorunlar arasında su kaynaklı bozulmalar, vandalizm, ateş kaynaklı is, liken veya mantar gelişmesi gibi çeşitli biyolojik sorunlar yer almaktadır [6]. Aşındırıcı etkiler kaya üzerindeki eserin görünümünü zamanla bozar. Bu sorunlar resimleri aşındırır ve antik duvar resimlerinin büyük bölümünü incelemek ve kaydetmek mümkün olmaz. Bu durum, paha biçilemez eserlerin "belirsiz" içerikli olarak arşivlenmesine neden olur. Dijital görüntü işleme teknikleri, sanat tarihçileri ve arkeologlar tarafından kaya oyma yapılardaki duvar resimlerini incelemek, iyileştirmek ve daha iyi anlamak için kullanılmaktadır.

Erken Hristiyanlığa ait antik duvar resimleri paha biçilmez resimlerdir. Kapadokya'da kayalara oyulmuş mağaralarda bunlardan binlercesi bulunmaktadır ve hemen hemen hepsi korunmasız ve doğal aşınmaya karşı savunmasızdır. Doğal aşınma etkileri sonucunda bu paha biçilmez duvar resimlerinde zamanla renk bozulması, çatlaklar, eklenen ekstra katmanlar meydana gelmektedir. Duvar resimlerini onarmak ve korumak, geçmişten bize taşıdığı mesaj ile ne anlattığını anlamak ve geleceğe taşımak için önemlidir. Fiziksel onarım süreci geri döndürülemez bir süreçtir, zaman ve emek gerektirir. Onarım sürecinden önce onarıcılara yardımcı olmak için görüntü işleme tekniklerini kullanmak mümkündür. Görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla onarımdan önce onarıcı, renk değişimi, çatlak, bozukluk bilgilerine göre onarım sürecini tasarlayabilir [7].

2. Antik Duvar Resimleri İçin Sanal Onarım Yöntemleri

Sanal onarım işleminde, klasik yöntemlerle elde edilen dijital görüntüler üzerinde ilk adım olarak sınıflandırma, bölütleme ve etiketleme yöntemleri kullanılarak görüntü onarıma hazır hale getirilmektedir. Ardından komşu piksellerden yola çıkarak ya da benzer duvar resimleri ile eğitilmiş yapay sinir ağlarından yararlanarak renk iyileştirmesi veya doku sentezi işlemi yapılmakta ve hasarlı alana uygulanmaktadır. Burada sentezlenen yeni dokular bilgisayarlı görü yardımı ile elde edilen bir tahmin edilen dokudan ibarettir ve başarımı seçilen metotlara bağımlıdır.

Antik duvar resimlerini sanal olarak onarmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yıpranmış duvar resminin eksik parçaları sanal görüntü tamamlama yöntemi kullanılarak tespit edilebilmekte ve bu yöntem için yapay zekâ desteği de kullanılabilmektedir. Duvar resminin soluk olduğu durumlarda renk zenginleştirme ve detay zenginleştirme işlemleri uygulanabilmektedir. Duvar resimlerindeki çatlaklar görüntü işleme teknikleriyle tespit edilebilmekte ve bu çatlaklar sanal olarak onarılabilmektedir. Sanal onarım yöntemleri Şekil-1'de gösterilmiştir.

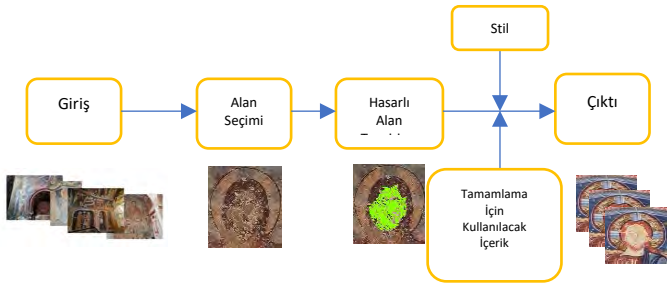
Şekil-1: Sanal Onarım Yöntemleri

2.1 Antik Duvar Resimlerindeki Eksik Parçaların Dijital Yöntemlerle Tamamlanması

Zamanla çatlamış veya fiziksel olarak hasar görmüş paha biçilmez antik duvar resimleri görüntü tamamlama yöntemi

ile tahribatsız bir şekilde tamamlanabilmektedir. Eksik alanların tamamlanması oldukça ilginç bir alandır.

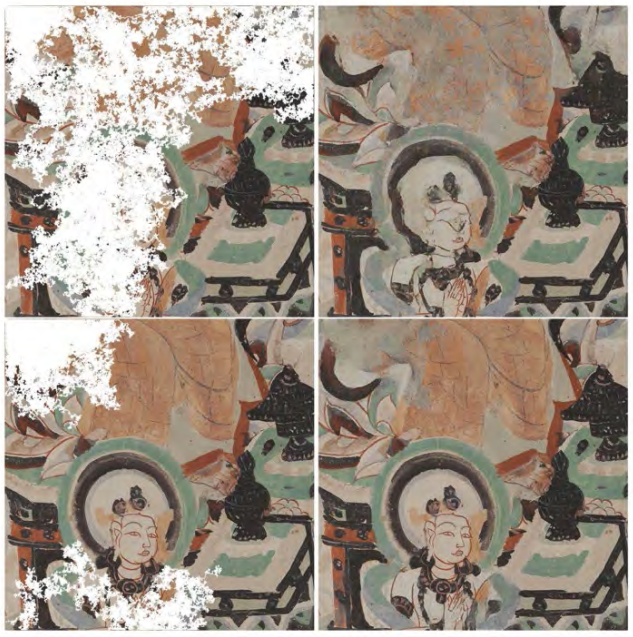
Şekil-2'de tipik bir hasarlı duvar resmi için görüntü tamamlama ile dijital onarım işleminin temel kuramı gösterilmektedir. Görüntü tamamlama işlemlerinde genellikle hasarlı resmin belirli bir alanı seçilerek onarım yapılır. Bunun için görüntüyü bölütleme gerekmektedir. Görüntü bölütleme, kenar birleşimlerini algılayarak ve bunları bölerek onarılacak bölgeyi tamamlar, böylece görüntü bilgisi yanlış şekilde yayılmaz. Daha sora hasarlı duvar resmindeki hasarlı bölgeler etiketlenir. Etiketlenen alanların en doğru şekilde tamamlanabilmeleri için derin öğrenme teknolojileri kullanılmaktadır. Bunun için ağ binlerce benzer duvar resmi ile eğitilir. Ağa daha sonra eksik parça verilerek tamamlaması istenir. İyi eğitilmiş ağlar, başarılı sonuçlar üretmektedirler [8].



Şekil-2: Tipik bir görüntü tamamlama ile dijital onarım süreci

[9]'da üretken çatışmacı ağ kullanan yeni bir algoritma geliştirilmiş ve görüntü tamamlama için kullanılmıştır. Kontrollü deney sonuçları başarılı olmuştur ve Şekil-3'te gösterilmektedir. Şekilde iki farklı tür bozulma içeren görselde resim tamamlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Üstteki resimde şeklin yüz kısmı yapay olarak bozulmuş iken alttaki resimde daha az miktarda ve kritik öneme sahip olmayan alanlarda yapay bozulmalar mevcuttur. Çalışmada ele alınan resim tamamlama yöntemi her iki tür bozulma için denenmiştir. Görsellerin sağ tarafında yer alan onarılmış görüntüler incelendiğinde uygulamanın ayrıntılı iyileştirme konusunda yetersiz kaldığı, yüz ayrıntılarında istenen düzeyde iyileştirme sağlayamadığı görülmektedir. Yüz tamamlama konusu halen görüntü tamamlama çalışmaları kapsamında zorlu bir görevdir.

Antik duvar resimleri, arkeologların ve sanat tarihçilerinin tarihi ve sanatı daha iyi anlamalarına yardımcı olan değerli bir kültürel mirastır. Ne yazık ki, antik duvar resimlerinin çoğu çatlama, bozulma ve dökülme nedeniyle tahrip olmuştur. Özellikle Kapadokya bölgesinde, fresklerin dökülmesi antik duvar resimlerinde en sık görülen hasar sorunlarından biridir. Mekanik ve yaşa bağlı pullanmalar, fresklerin yüzey veya alt katmanlarındaki boşluklarda ortaya çıkabilmektedir. [10]'da derin evrişimli sinir ağı (CNN) kullanan yeni bir görüntü tamamlama sistemi sunulmuştur. Sistem, onarılmış antik resmin fiziksel bir onarımdan sonra nasıl görünebileceğini göstermeye yardımcı olabilecek yama önerileri sunma yeteneğine sahiptir.



Şekil-3: Farklı bozulma simülasyonları altında aynı sahne için önerilen görüntü tamamlama yönteminin [9] sonuçları. Soldaki görüntülerde iki farklı bozulma simülasyonu bulunmaktadır. Sağ tarafta, önerilen yöntemin sonucu gösterilmektedir.

Kayaların yüzeyinde bulunan antik duvar resimlerinin çoğu zamanla büyük ölçekli dökülmelere maruz kalmakta ve bunun ötesinde, görüntülerin bazı kısımları tahrip olmaktadır. Bu durumlarda, antik görüntünün yeniden boyanması sanatçılar için zorlu bir görevdir. Resimlerdeki eksik alanların doldurulması, modern dijital görüntü işleme teknikleriyle de yapılabilmektedir. [11]'da büyük sürekli boşlukların tamamlanması için Kalan Toplama Modülü (RGM) ve Yarı U-Net görüntü çeviri mimarisi kullanılmıştır. [11]'da benzer resimlerle eğitilen sinir ağları kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. [12]'de, derin öğrenmeye dayalı görüntü yeniden boyama yöntemleri incelenmiştir. [12]'e göre, yüksek çözünürlüklü görüntüleri yeniden boyamak hala zorlu bir işlemdir.

[13]'de renk kontrastı geliştirme ve boşluk dokusu sentezi kullanan yeni bir teknik, antik duvar resimlerinin sanal onarımı için kullanılmıştır. Doygunluk ve doygunluk gidermeye dayalı renk kontrastı geliştirme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Markov Rastgele Alan (MRF) modelini kullanan yeni bir yama yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar Şekil 4'te gösterilmektedir, önerilen yöntem başarılı yamalama sonuçları sergilemiştir. Üstte yer alan deforme olmuş görsel altta yer alan görselde görüldüğü üzere sanal olarak onarılmıştır. Onarım için öncelikle bozulmuş alanlar tespit edilmiş, daha sonra bu alanlara komşu alanlardaki pikseller analiz edilmiş ve daha sonra bozulmuş alan ile en uyumlu şekilde yeni doku Markov Rastgele Alan (MRF) yöntemi kullanılarak sentezlenmiş ve bölgeye yamalanmıştır. Önerilen yöntem komşu beneklerden yama üretmeye uygun olan karmaşık olmayan yama görevlerinde başarılı olmuştur.

(a)

(b)

Şekil-4: Görüntü yamalama yönteminin sonuçları. (a) Orijinal Görüntü (b) Yama uygulanmış görüntü [13].

Antik duvar resimlerindeki eksik alanların tamamlanması özellikle ayrıntılı ve karmaşık çizimlerde son derece zorlu bir görevdir. Genel bölgesel özellik çıkarma ve yapısal bilgi rehberliği kullanılarak geliştirilen sanal onarım ağı [14]'de karmaşık içerikli eksik parçalı duvar resimlerinde resim tamamlama amacıyla kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları literatürde bilinen en iyi yöntemlerle kıyaslanmıştır. Bunun için benzetilmiş bozulmalar ile gerçek bozulmalar araştırmaya konu edilmiştir. Hem nesnel hem de öznel analiz sonuçlarına göre çalışma başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Görüntü tamamlama yöntemi ile antik duvar resimlerinin iyileştirilmesinde ortaya çıkan sonucun başarımını ölçmek için [15]'de yenilikçi bir yaklaşım olarak referanssız bir nesnel analiz yöntemi olan hasar analiz oranı yöntemi kullanılmıştır. Bunun için hasar görmüş olan duvar resimlerinin, sanal onarım öncesi hasar görmüş bölgeleri işaretlenmiş, daha sonra tutarlı transfer yöntemi ile görüntüde tamamlama yapılmıştır. Son olarak sonuç görüntüsü ile sanal onarım öncesi görüntü karşılıklı olarak analize tabii tutulmuş ve hasar oranındaki değişim incelenmiştir. Örneğin seçili bir görseldeki sanal onarım öncesi bozulma oranı başlangıçta 0,35 olarak ölçülmüşken resim tamamlama sonrası bu oran 0,08'e kadar düşmüştür [15]. Sonuçlar hem çalışmada kullanılan tamamlama yönteminin başarılı olduğunu göstermiş hem de hasar oranındaki değişimin resim tamamlama çalışmalarında bir kalite analiz yöntemi olarak kullanılabileceğine dair bulgular vermiştir.

Değiştirilmiş U-Net mimarisi [16]'de hasarlı duvar resimlerinin tamamlanması için kullanılmıştır. Araştırmada otomatik hasar tanımlama ve otomatik tamamlama yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Toplamda 245 adet temiz ve 42 adet hasarlı görsel araştırmaya konu edilmiştir. Öznel analiz sonuçlarına göre araştırma resim tamamlama konusunda başarılı sonuçlar üretmiştir.

Çekişmeli kenar öğrenimi tabanlı duvar resmi onarım tekniği [17]'da ele alınmıştır. Çalışmada sınır üretim ağı ve resim tamamlama ağı birlikte kullanılmıştır. Toplamda 239 adet antik duvar resmi ile sinir ağı eğitilmiştir. Çalışmanın iyileştirilmiş sonuç görselleri tepe işaret/gürültü oranı (PSNR)'de %1,3 ve yapısal benzerlik indeksi (SSIM)'de %1,43 artış elde etmiştir.

Yenilikçi bir çekişmeli üretici ağ tabanlı sanal onarım yöntemi [18]'de antik duvar resimlerinin onarımı için kullanılmıştır. Çalışmada düzenlenmiş U-Net mimarisi ve milyonlarca ImageNet görseli ile eğitilmiş ön eğitimli kalıntı ağlar kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları PSNR, ortalama karesel hata (MSE) ve SSIM parametreleri açısından incelenmiştir, elde edilen bulgulara göre çalışma tüm parametrelere göre başarılı iyileştirme sonuçları elde etmiştir.

Görüntü tamamlama çalışmalarında yapay sinir ağının eğitimi için sıklıkla kullanılan veri setleri Çizelge-1'de sunulmuştur.

Çizelge-1: Görüntü Tamamlamada Sıklıkla Kullanılan Veri Setleri

Veri Seti	Yayıncı
ImageNet [19]	Stanford Üniversitesi
Places2 [20]	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
CelebA [21]	Hong Kong Chinese Üniversitesi
Paris Street View [22]	Carnegie Mellon Üniversitesi, Google
CMP façade [23]	Çek Teknik Üniversitesi
DTD [24]	Oxford Üniversitesi

2.2 Renk İyileştirme ve Ayrıntı Artırma

ImageJ, Java tabanlı görüntü işleme programıdır ve DStretch, ImageJ için özel olarak geliştirilmiş bir eklentidir. DStretch, özellikle soluk kaya resim sanatı görüntüleri ve antik duvar resimlerinin görüntü ve renk kalitesini artırmak için tasarlanmıştır. DStretch'in akademik amaçlar için yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. DStretch, kaya resim sanatı görüntülerinin kaydedilmesinde başarılıdır [25]. [26]'de DStretch farklı kaya resim sanatı görüntüleri için sınanmış, programın başarımı araştırılmış ve diğer görüntü geliştirme programlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, DStretch'in fiyat/fayda oranı açısından en iyisi olduğunu göstermektedir.

(a)

(b)

(c)

Şekil-5: DStretch'in başarımı (a) Orijinal kaya görüntüsü (b) Kullanıcı tarafından oluşturulan renk uzayında (LDS) Dekorelasyon yapılması (c) Kırmızı renk geliştirilmiş görüntü [25].

Şekil 5'te DStretch ile iyileştirilmiş kaya sanatı motifleri gösterilmektedir. Şekil 5.a'da orijinal ve işlem görmemiş görsel yer almakta iken, Şekil 5.b'de DStretch için özel olarak geliştirilmiş olan LDS renk uzayında ilişkisizleştirilmiş görsel yer almaktadır. DStretch tekniği, görüntünün renklerine Karhunen-Loeve dönüşümünün uygulanmasından oluşur. Bu, renklerin kovaryans (veya isteğe göre korelasyon) matrisini köşegenleştirir. Daha sonra her bir rengin kontrastı, renk farklılıklarını eşitleyecek şekilde genişletilir. Bu noktada renkler birbiriyle ilişkili değildir ve renk uzayını doldurur. Son olarak ters dönüşüm, renkleri orijinalin yaklaşık değerine geri döndürmek için kullanılır. Görüntü RGB(Mavi, Yeşil, Kırmızı)'den LDS renk uzayına dönüştürülür, hesaplama ve dönüşüm gerçekleştirilir ve daha sonra renkler dijital görüntüye yazılmadan önce tekrar RGB'ye dönüştürülür [25]. Nihai olarak Şekil 5.a'da çıplak gözle görülemeyen detaylar Şekil 5.c'de kırmızı ile vurgulanarak gösterilmiştir.

Günümüzde neredeyse tüm antik duvar resimleri zamana bağlı fiziksel aşınmalar nedeniyle solmuş ve hasar görmüştür. Analizden önce bunları görünür hale getirmek önemlidir. Bu amaçla Photoshop kullanılabilmektedir. Adobe Photoshop™ solmuş duvar resimlerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır [27]. Makalede Lab (Renk modeli, L: Işık, a: Kırmızı/Yeşil Değeri, b: Mavi/Sarı değeri) ve CMYK (Renk modeli, Cyan, Magenta, Yellow, Key kelimelerinin baş harflerinden oluşmuştur) gibi farklı renk uzayları ve farklı renk kanalları incelenmiştir. Sonuçlar, Photoshop yardımıyla duvar resimleri üzerinde dijital görüntü işlemenin başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

[28]'de Photoshop ve DStretch yazılımları antik duvar resimlerini analiz etmek için kullanılmıştır. Dijital görüntü işleme teknikleri, çıplak gözle görülmesi zor olan soluk görüntülerin ayrıntılarını belirginleştirmede yararlı olmuştur. Sonuçlar hem Photoshop hem de DStretch'in soluk antik duvar resimlerinin ayrıntılarını iyileştirmede büyük yeteneklere sahip olduğunu göstermektedir.

Duvar resimlerinin görselliğini görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla geliştirmek mümkündür. [29]'de, Temel Bileşenler Analizi, K-ortalamaları ve İlişkisizleştirici Germe teknikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, duvar resimlerini geliştirmek için tek bir çözüm olmadığı, her tekniğin farklı sonuçlar sağladığı belirlenmiştir. Şekil 6.a'da ham kaya görüntüsü yer almaktadır. Şekil 6.b'de "Tek Bir Bileşenden Seçici Değer Yoğunlaştırması" (SIVC) yöntemi ile iyileştirilmiş görüntü bulunmaktadır. Burada ham görüntüde çıplak gözle iyi seçilemeyen çeşitli hayvan şekilleri turuncuya yakın bir renk ile görülmektedir. Nihai olarak Şekil 6.c'de renk eşleştirmesi değiştirilmiş ve gürültüsü giderilmiş görsel bulunmaktadır. Nihai görselde açıkça çıplak gözle çok zor görülen şekiller kırmızı olarak görülebilir hale gelmiştir.

(a)

(b)

(c)

Şekil-6: (a) Kaya sanatının orto-görüntüsü (b) Önerilen Algoritmanın uygulanması (c) Sınıflandırma ve atama süreciyle elde edilen görüntü [29].

Derin öğrenme algoritmalarının antik duvar resimlerinin renk onarımı için başarılı sonuçlar ürettiği bilinmektedir. [8]'da derin öğrenme algoritmalarından olan DenseNet algoritması duvar resminin soluk renklerinin onarılması için kullanılmıştır. Araştırmada 60 adet duvar resmi eğitim için kullanılmıştır.

Araştırma sonuçları SegNet, Deeplab ve ResNet algoritmalarının sonuçları, yapısal benzerlik indeksi (SSIM) ve zamansal verimlilik parametreleri açısından kıyaslanmıştır. DenseNet %44,62 daha hızlı sonuç üretirken benzerlik indeksi açısından da %1,289 ile en iyi sonucu elde etmiştir.

Antik duvar resimlerinin yıllar içerisinde maruz kaldığı bir diğer etki ise duman isidir. İs nedeniyle duvar resimlerinde kararmalar oluşmaktadır. İs tabakasını mükemmel bir biçimde temizleyecek bir onarım aracı bulunmamaktadır. Ancak görüntü işleme tabanlı yaklaşımlar isli duvar resimlerinin üzerindeki siyah katmanı kaldırma konusunda başarılı sonuçlar üretmektedir. Araştırmacılar [30]'da isli duvar resimlerinin sanal onarımı için hiperspektral görüntülerden ve ikiz renk zayıflatma yönteminden yararlanmışlardır. Bunun için öncelikle hiperspektral veri kümesinden yansıma verileri (R) oluşturulmuştur.

$$R = \frac{R_{ham} - R_{karanlık}}{R_{beyaz} - R_{karanlık}} x99\% \quad (1)$$

Burada R yansımayı, R_{ham} hiperspektral veri setini, $R_{karanlık}$ karanlık veri setini, R_{beyaz} ise %99 yansıtma değerine sahip standart yansıtıcı bileşeni ifade etmektedir. Çalışmanın nesnel analizi için ortalama gradyan, varyans ve entropi yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma literatürdeki benzer çalışmalardan yüksek başarım sergilemiştir ve isli duvar resimlerinin üzerindeki kararmış tabakanın giderilmesinde görece başarılı olmuştur [30].

Hiperspektral görüntüleme teknolojisi sayesinde duvar resimleri herhangi bir tahribata maruz kalmadan analiz ve dijital olarak onarabilmektedir. [31]'de hiperspektral görüntüleme yardımı ile aralığı 377,45 nm ila 1033,10 nm arasında değişen toplam 18 adet hiperspektral görüntü kullanılarak görüntü iyileştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada pigment analizi, Retinex destekli sanal onarım adımları uygulanmıştır. Çalışmanın öznel analizi başarılı sonuçlar gösterirken, literatürdeki diğer çalışmalar ile öznel bir kıyaslama yapılmamış olması bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır.

Sinir ağları, [32]'de duvar resimlerinin renklerinin iyileştirilmesi konusunda kullanılmıştır. Çalışmada derin öğrenme teknolojilerinden geri dönüşebilir artık ağ (RRN) kullanılmıştır. Öncelikle çalışmaya konu olan renkleri solmuş duvar resmi için yapısal ve dokusal benzerlik değeri oluşturulmakta, daha sonra duvar resmi veri tabanında bu resme yapısal ve dokusal anlamda en çok benzeyen daha iyi durumdaki görsel seçilmektedir. Ardından iyi durumdaki görselden yararlanarak soluk renkli görsel geri dönüşebilir artık ağ yardımı ile renk açısından iyileştirilmektedir. Çalışma sonucunda elde edilen iyileştirilmiş görüntü yapısal benzerlik indeksi (SSIM), özellik benzerlik indeksi (FSIM) ve algıya dayalı görsel kalite değerlendiricisi (PIQE) parametreleri ile incelenmiştir, çalışma üç parametre için ortalama %8,47 oranında iyileşme sağlamıştır.

2.3 Duvar Resimlerindeki Çatlakların Sanal Onarımı

Antik duvar resimlerinin çoğunda çatlak sorunu söz konusudur. Antik duvar resimlerinin görünür katmanı zamanla çatlar. Bu çatlakları tespit etmek ve onarmak için dijital görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. [33]'de resimlerin çatlak onarımı için yeni bir yöntem sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen tekniğin (yerel minimumları tespit etme ve silindir şapka dönüşümünü kullanma) resimlerin çatlaklarını tespit etme ve onarma konusunda başarılı olduğunu göstermektedir.

Kaya çatlaklarının analizi, oluşum nedenini belirleme ve çatlakların yönünü analiz etme gibi önemli konular hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Kaya çatlaklarının haritalanması, kaya mühendisliği uygulamaları için olmazsa olmazdır. Kaya çatlaklarını dijital görüntü işleme teknikleriyle izlemek mümkündür ve başarılı sonuçlar üretir [34]. Kırık haritaları sayesinde kaya mekaniği ve jeoloji hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Kaya çatlaklarını analiz etmek için kenar tespiti ve kümeleme yöntemleri kullanılmaktadır. [35]'de destek vektör makinesi (SVM) yardımıyla kaya kırığı tespiti için yeni bir metodoloji sunulmuştur, sonuçlar metodolojinin çatlak tespitinde yetenekli olduğunu göstermektedir.

Antik duvar resimlerinin uzun yıllar içerisinde yüzeyinde çok sayıda çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların bir kısmı doğal nedenlerle bir kısmı da vandalizm sonucu meydana gelmektedir. Çiziklerin bilgisayarlı görü ile tespit edilmesi ve onarılması zorlu bir görevdir, zira duvar resminin yapısında bulunan düz çizgiler ile sonradan oluşan çizgiler birbirine kolaylıklar karışmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için [36]'da yazarlar hiperspektral görüntülemeden yararlanmışlardır. Çalışmada, hiperspektral görüntüye sırayla; yansıma düzeltme işlemi, temel bileşen analizi ve yüksek geçiren filtre yardımı ile veri iyileştirme işlemi, daha sonra sanal onarım öncesi "*otsu sınıflandırması*" yardımı ile maskeleme işlemi gerçekleştirilmekte, nihai olarak yenilikçi bir örnekleme tabanlı bölgesel görsel tamamlama metodu ile sanal onarım uygulanmaktadır. Çalışmanın sanal onarım başarımının nesnel analizi için kök ortalama karesel hata (RMSE) ve tepe işaret-gürültü oranı (PSNR) yöntemleri kullanılmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - f(x_i))^2} \quad (2)$$

$$PSNR = 20log_{10}\frac{255}{RMSE} \quad (3)$$

Burada Y_i ifadesi onarılmış görselin piksel değerini, $f(x_i)$ ise orijinal simüle edilmiş görselin benek değerini ifade etmekte, N ise gözlem sayısını belirtmektedir. Çalışma hem RMSE hem de PSNR verileri açısından literatürde bilinen başarılı çalışmalardan üstün başarım sergilemiştir [36].

Kapadokya bölgesinde çok sayıda kaya oyma mağara bulunmaktadır. Bu mağaraların bir kısmı Roma döneminde kilise olarak kullanılmıştır. Bu yapıların oyulduğu tüfler zamanla yıpranmakta ve parçalanmaktadır. Yapıdaki çatlaklar bazen yapının tamamen çökeceğinin habercisi olabilmektedir. Bu çatlakların incelenmesi, olası bir çökme durumunda yapıların korunması ve insanların zarar görmesini önlemek için koruma planlarının geliştirilmesi açısından önemlidir. [37]'de Kapadokya bölgesinde kayaların çatlaması ve yıpranması konusu detaylıca incelenmiştir.

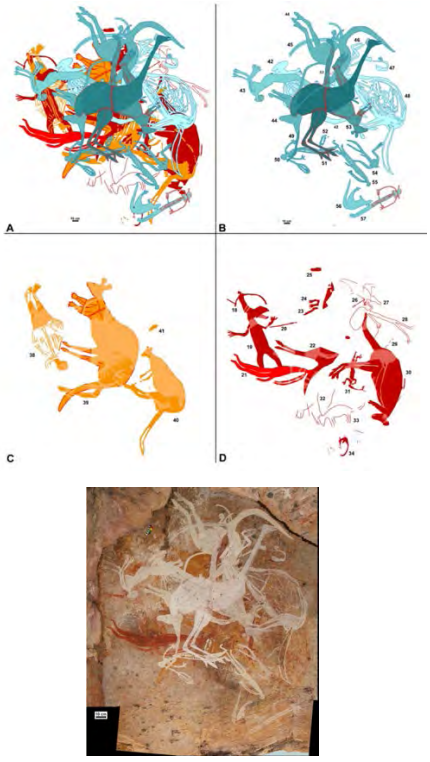
Kapadokya bölgesinde erken Hıristiyanlık dönemine ait çok sayıda antik duvar resmi bulunmaktadır. Dönemin antik sanatçıları tarafından kaya oyma mağaraların iç duvarlarına çizilen duvar resimleri, zamanın yıkıcı tahribatına uğramış önemli kültürel miraslar arasında yer almaktadır. Fresklerde zamanla çatlaklar ve fiziksel darbelerden kaynaklanan büyük ölçekli tahribatlar bulunmaktadır. Fresklerin fiziksel olarak onarılması geri döndürülemez bir işlemdir. Bu işlemden önce, dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla ön bir görüntü geliştirme yapılabilmektedir. [38]'de 1432 tarihli antik bir yağlıboya tabloda üst katmandaki çatlaklar belirlemiş, bu çatlaklar mümkün olduğunca doğru bir şekilde dijital olarak boyanmış ve son olarak sanal olarak onarılmıştır. Fırça darbelerini tablonun yüzeyindeki yaşlanma çatlaklarından ayırt etmek önemlidir, çünkü genellikle dijital görüntüleme teknikleri bu çatlakların tespitinde karışıklığa yol açabilmektedir. Duvar resimlerinde yüzey çatlaklarının tam olarak tespiti zorlu bir işlemdir. Bu makalede [38], çatlak tespit sürecini en doğru şekilde gerçekleştirmek ve fırça darbelerini çatlaklardan ayırmak için HSV (Hue, saturation, value) renk uzayı kullanılmış, ardından sıra istatistikleri filtrelemesi kullanılarak boyanmıştır. Ayrıca, evrişimli sinir ağlarının (CNN) boyama çatlaklarının tespiti için kullanılabileceği ve sonuçların başarılı olduğu bilinmektedir [39].

3. Sanal Onarım Öncesi Dijital Görüntü İşleme Teknikleri

Bazı durumlarda sanal onarımdan önce antik duvar resimlerinin hazırlanması gerekir. Bu hazırlık ve analiz sürecinde dijital görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. Sağlanan ön hazırlık desteğiyle daha verimli bir sanal onarım süreci gerçekleştirilebilmektedir. Üst üste bindirilmiş motiflerden oluşan duvar resimleri katmanlara ayrılarak analiz edilebilmektedir. UV (ultraviyole) görüntüleme yardımıyla boyamada kullanılan boyaların biyolojik bozulma kaynakları tespit edilebilmekte ve malzeme analizi yapılabilmektedir. Antik duvar resimleri bilgisayarlar kullanılarak arşivlenebilmektedir.

3.1 Üst Üste Binen Motiflerin Birbirinden İzole Edilmesi

Üst üste bindirilmiş motiflerin analizi, kaya resim sanatında zorlu bir araştırma alanıdır. Antik sanatçılar zaman içerisinde motiflerini önceki motiflerin görünür yüzeylerine çizmişlerdir. Dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla, üst üste bindirilmiş katmanlardaki motifler analiz edilebilmektedir. Bu makalede [40], Adobe Photoshop®'un D-Stretch ve PTGUI® (Panorama Araçları Grafik Kullanıcı Arayüzü) eklentisi, soluk duvar resimlerini görünür hale getirmek, herhangi bir tek motifi izole etmek ve üst üste bindirilmiş görüntüleri analiz etmek için kullanılmıştır. Önerilen yöntem, üst üste bindirilmiş motiflerin izolasyonunda başarılı bir başarım göstermiştir. Sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7.a'da yer alan DStretch ve PTGUI kullanılarak üretilmiş fotomozaik, Şekil 7.e'de yer alan ham fotoğraftan elde edilmiştir. Bu mozaikte farklı katmanlardaki resimler farklı renkler ile vurgulanmıştır. Ardından Photoshop programı yardımı ile farklı katmanlardaki motifler ayrı katmanlar halinde izole edilmiştir (Şekil 7.b, Şekil 7.c, Şekil 7.d). Orijinal görselde üst üste binmiş oldukları için analizi ve yorumlanması zor olan görseller dijital görüntü işleme programları yardımı ile izole edilmişlerdir.

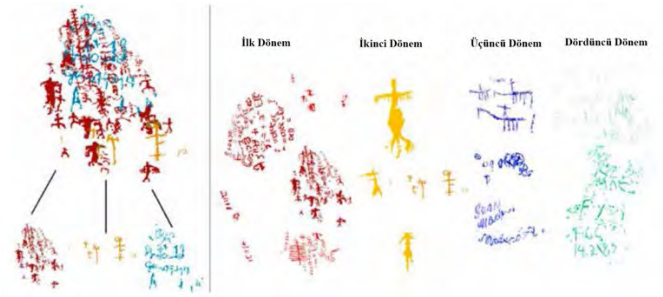


Şekil-7: D-Stretch ve PTGUI eklentilerinin sonuçları. A: Tam kompozisyon (Fotomozaik) B: Mavi renkli şekil katmanı C: Sarı renkli şekil katmanı D: Kırmızı renkli şekil katmanı E: Ham fotoğraf [40].

Fotogrametri, makro fotoğrafçılık ve dijitalleştirilmiş duvar resimlerinin korelasyonsuzlaştırma uygulamalarının birleşimi, paleolitik kaya sanatının görsel analizinde iyi bir başarım göstermektedir [41]. Dijital görüntü işleme teknikleri, büyük ve hareketsiz kaya yüzeyleri üzerine dekore edilmiş antik duvar resimlerinin mikro analizlerinde (tarihleme, karakterizasyon, topografya, bağlam) kullanılmaktadır. Bu yeni tekniklerin kullanımı, araştırmacıların üst üste bindirilmiş veya solmuş duvar resimlerinde bulunan yeni figürleri keşfetmelerine yardımcı olmaktadır.

Görüntü işleme teknikleri kaya oyma motiflerin analizi için de kullanılmaktadır. [42]'de araştırmacılar üst üste binmiş kaya motiflerinin analizi için Photoshop desteği ile DStretch aracını kullanmışlardır. Araştırmada normalde duvar resimleri için kullanılan DStretch'in Photoshop yardımı ile kaya oyma motifleri de analiz edebileceği gösterilmiştir. Çalışmada elde

edilen neticelere göre kaya üzerine üst üste binecek şekilde çizilen motifler yapıldıkları döneme göre sınıflandırılabilmekte iken önerilen teknik sayesinde bugüne kadar çıplak gözle görülemeyen toplam 14 adet yeni kaya oyma figür tespit edilmiştir. Şekil 8'de araştırma kapsamında gerçekleştirilen bir sonuç görseli yer almaktadır. Görselde farklı zamansal yıpranma etkilerine maruz kalmış figürler farklı renkler ile belirtilmiştir. Sıcak renkler daha yakın dönemi ifade ederken soğuklar daha uzak dönemi belirtmektedir.



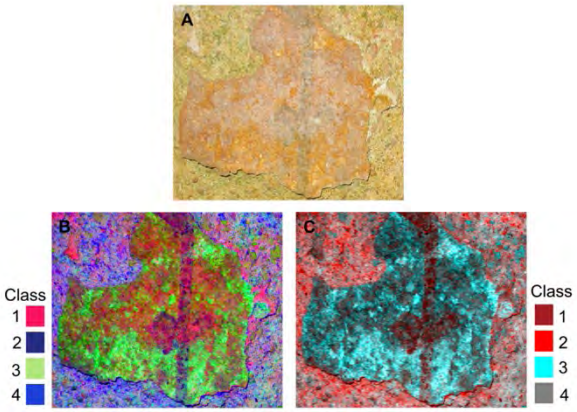
Şekil-8: Solda üst üste binecek şekilde çizilmiş kaya oyma motiflerin [42] sayılı çalışma kapsamında bilgisayarda işlenmiş ve renklendirilmiş hali görünmektedir. Sağda ise farklı zaman dönemlerinde çizilmiş figürler birbirinden ayrılarak gösterilmiştir.

Bilgisayarların hesaplama gücü son zamanlarda artmıştır. Artan hesaplama gücünün de yardımıyla bilgisayarlar görüntü işleme tekniklerinde oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir. Günümüzde özellikle antik duvar resimleri üzerinde çalışan araştırmacılar sıklıkla dijital görüntü işleme tekniklerinden yararlanmaktadır. Dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla kaya üzerindeki görüntü en ince ayrıntısına kadar incelenebilmektedir. Kontrast değiştirme, farklı renk kanalları üzerinde çalışma, kenarları algılama ve görüntüleri üst üste bindirme gibi birçok farklı tekniğin yardımıyla antik duvar resimlerine ilişkin anlayışımız artmaktadır. Dijital görüntü işleme teknikleri temassız analizlerdir ve bu paha biçilmez antik duvar resimleri üzerinde çalıştığımızda daha önemli hale gelmektedir. [43]'de Selva Pascuala'da (Cuenca, İspanya) bir boğaya ait Paleolitik mağara sanatı motifi dijital görüntü işleme teknikleriyle iyileştirilmiş ve izole edilmiştir.

3.2 Antik Duvar Resimlerinde Biyolojik Bozulma Analizi

Biyolojik bozulmanın kaya yüzeylerinde geri döndürülemez hasar etkileri söz konusudur. Biyolojik bozulma antik duvar resimlerinin yok olmasına yol açabilir. Kapadokya bölgesinde likenler kayaların biyolojik bozulmasında kilit rol oynamaktadır. [44]'de, Kapadokya bölgesinde kayadan oyulmuş bir kilise olan Üzümlü Kilisesi, liken kaynaklı biyolojik bozulma açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı likenlerin kaya ile etkileşime girdiğini ve likenlerin varlığının şiddetli fiziksel ve kimyasal bozulmaya yol açtığını göstermektedir.

Kaya resim sanatının biyolojik olarak bozulması, özellikle Kapadokya bölgesinde yaygın bir sanat deformasyonu sorunudur. Bu makalede [45], antik duvar resimlerinin biyolojik olarak bozulması bir laboratuvar modeli ile simüle edilmiştir. Model Roma duvar resimlerine uygulanmıştır. Sonuçlar, dijital görüntü işleme tekniklerinin sanatın biyolojik olarak bozulmuş katmanının arkasındaki ayrıntıları tespit edebileceğini göstermektedir. Dijital görüntü işleme tekniklerinin temassız yapısı nedeniyle, tarihi duvar resimlerinin koruma süreci için çok önemlidir, en iyi stratejiyi seçmek için bu teknikleri korumadan önce kullanmak gerekmektedir. Şekil 9.a'da önerilen yöntemin uygulandığı ham görsel yer almaktadır. Şeklin ortasında çıplak gözle net görülemeyen bir figür bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu işlenmemiş görsele daha sonra ultraviyole ve gün ışığı uygulanarak elde edilen görseller aracılığı ile ana bileşen analizi (PCA) uygulanmıştır. Azınlık PC bantlarıyla (PC2 ve PC3) karşılık gelenler) işlenmiş sahte renkli görüntülerin kullanımı sayesinde görsel üzerindeki bileşenlerin tespiti yapılmaktadır [45]. Resimdeki sıva kalıntıları, betonlaşmalar ya da boyalar ayırt edilebilmektedir.



Şekil-9: [45]'de önerilen dijital görüntü analiz yönteminin sonuçları (A) Orijinal RGB görüntüsü. (B) Sahte renkli görüntü (PC1, PC2, PC3). Sınıflar: [1] Betonlaşma, [2] Yeşil Roma boyası, [3] Sıva, [4] Fototrofik bakteri kaynaklı biyofilm. (C) Sahte renkli görüntü (PC3, PC2, PC2). Sınıflar: [1] Yeşil Roma boyası, [2] Fototrofik bakteri kaynaklı biyofilm, [3] Sıva, [4] Betonlaşma.

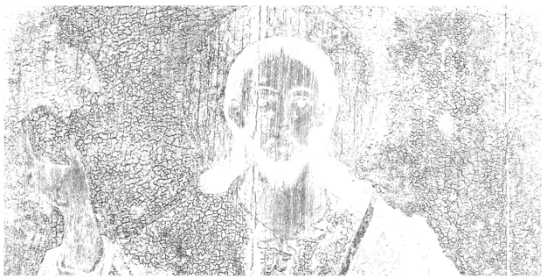
3.3 Antik Duvar Resimlerinde Kullanılan Boyama Malzemelerinin Analizi

Antik duvar resimlerinde kullanılan tarih öncesi boyalarda hangi tür malzemelerin kullanıldığını belirlemek için PIXE analizi kullanılmaktadır [46]. Çalışmanın sonuçları, homosapiens'in boya üretimi için doğal kaynakları çok iyi kullandığını göstermektedir.

Antik duvar resimlerinin analizi için dijital görüntü işleme tekniklerinin kullanılması önemlidir, bu süreç bize duvar resimlerinin yaşlanma deformasyonu hakkında çok yararlı bilgiler sağlayabilmektedir, örneğin yüzeydeki çatlak çizgileri koruma geçmişi hakkında bilgi vermekte veya bağlayıcı ortam ve pigmentler boyama tekniği hakkında bilgi vermektedir [47]. Çatlak haritasının iyi bir örneği Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 10.a'da Ressam Teodor Kracun tarafından resmedilmiş yağlı boya tablo yer almaktadır. Tablonun görsel muayenesinde boya tabakasında çeşitli yaşlanma bulguları tespit edilmektedir: ince yaşlanma çatlakları, geniş kuruma çatlakları, boya tabakasının farklı boyutlardaki kayıpları, rötuşlanmış alanlar ve onarım sırasında yüzeyin homojen görünümünü korumak için onarıcılar tarafından boyanmış sahte çatlaklar. Şekil 10.b'de bu resmin çatlak haritası dijital görüntü işleme teknikleri yardımı ile oluşturulmuştur ve daha ileri analizler için

kullanılmaktadır. Çatlak çizgilerinin deseni, yönü, genişliği, şekli ve yoğunluğu, o dönemin sanat üretimi ve resmin koruma geçmişi hakkındaki bilgiler verir. Örneğin protein bağlayıcısı içerikli boyalar daha ince ve kare şeklinde yaşlanma çatlaklarına yol açarken, boyadaki yağ bağlayıcısı geniş kuruma çatlaklarına yol açmaktadır.

(a)

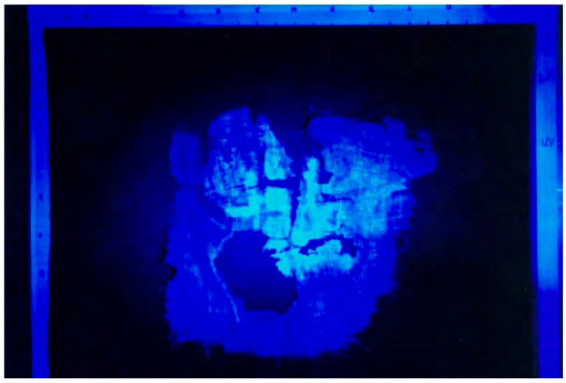


(b)

Şekil-10: (a) Ressam Teodor Kracun tarafından çizilmiş İsa Mesih yağlı boya resmine ait orijinal görüntü (b) [47]'de önerilen yöntemle orijinal görsel üzerinde tespit edilen çatlak haritası

Arkeolojik tekstiller araştırmacılar için oldukça değerli ürünlerdir. Bu tekstil ürünlerinin üretim sırasında ve sonrasında renklendirildiği bilinmektedir. Tekstil ve duvar resimlerinin renklendirilmesinde kullanılan kimyasallar çeşitli tekniklerle belirlenebilmektedir. Yansıyan UV tabanlı fotoğrafçılıkta, tamamen karanlık bir ortamda yüzeyden yansıyan UV ışığı yüzeyden yansıtılarak fotoğraflanmaktadır. Kızılötesi fotoğrafçılıkta ise kızılötesi ışık yüzeye yansıtılmaktadır. Biyolojik maddeler, mineraller ve bazı sanatçı pigmentleri kızılötesi ışık altında yansımaktadır [48]. [49]'da arkeolojik tekstiller gün ışığı ve ultraviyole yansıma yöntemleri ile analiz edilmiş ve uygulanan yöntemlerin sonuçları incelenmiştir. Yansıma yönteminin sonucu Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekil 11.a'da orijinal görüntü yer alırken Şekil 11.b'de ultraviyole ışık altında daha parlak yansıma yapan alanlar antik bir motif içermektedir. Işığın yansıma ve emilimindeki farklılıklar, bu alanlardaki farklı kimyasal bileşenlere işaret etmektedir. Böylece kumaş üzerine uygulanan renkli desenin farklı yönleri ortaya çıkarılmaktadır. Bu desenlere dayanarak, örnekleme yapılabilmektedir. Kumaş yüzeyindeki bozulmalar, rastgele ve her yerde bulunan dağılımına rağmen önerilen yöntemle kolayca tanımlanabilmektedir [49].

(a)



(b)

Şekil-11: (a) Ohio'daki Seip Höyüğü'nden tarih öncesi bir tekstil parçası, gün ışığı altında (b) Ultraviyole yansıma görüntüsü [49].

3.4 Antik Duvar Resimlerinin Analizi ve Arşivlenmesi

Antik duvar resimlerinin maruz kaldığı bozulmaların temassız bir biçimde analiz edilmesi duvar resimlerinin tahribatsız muayenesi açısından önemli bir çalışma alanı olarak ortaya çıkmaktadır. [50]'de araştırmacılar akustik emisyon teknolojisinden yararlanarak antik duvar resimlerindeki bozulmaların çatlama ya da dökülme sınıflarından hangisinde yer aldığını evrişimsel sinir ağları yardımı ile %95 oranında doğru tespit etmişlerdir. Gerçek zamanlı ve tahribatsız olarak çalışan sistemde yansıyan ses dalgaları dalgacık dönüşümleri yardımı ile zaman ve frekans bileşenlerine ayrılmaktadır. Çalışmanın dezavantajı ise literatürde var olan benzer çalışmalar ile yeterli karşılaştırmanın bütçesel nedenlerle yapılamamış olmasıdır.

Zamanla yıpranan duvar resimlerinde oluşan çatlakların tespiti için bilgisayarlı görü yöntemleri kullanılmaktadır. [51]'de çatlak tespitinin görüntü işleme yardımı ile otomatik bir şekilde gerçekleştirilmesi için optik darbeli termografi yöntemi ile sinir ağları yöntemi birleştirilerek bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Isıl görüntüleme sayesinde çıplak gözle görülemeyen detaylar tespit edilmektedir. Çalışmada toplam 90 görselden istifade edilmiştir. Araştırmacılar CNN mimarilerinden biri olan U-Net'in örtüşen alanlarda meydana getirdiği gerekli olmayan eğitim verilerini minimize etmek için kendi önerdikleri odaklanmış U-Net mimarisini kullanmışlardır. Çalışma sonucu elde edilen çatlak haritaları literatürdeki başarılı metotlar ile kıyaslanmıştır. Nihai sonuç

olarak elde edilen çatlak haritaları benzerlerinden daha keskin ve gürültüsüzdür. Optik darbeli termografi yöntemi her ne kadar başarılı sonuçlar üretmişse de duvar resimleri üzerinde tahribat oluşturma riski bulunmaktadır [50], [51].

Kaya yüzeylerine yapılmış antik duvar resimlerini arşivlemenin modern yollarından biri onları fotoğraflamaktır [52]. Bu işlem çoklu spektral görüntüleme teknikleriyle de gerçekleştirilebilmektedir. [53]'de Brigham Young Üniversitesi tarafından geliştirilen çoklu spektral görüntüleme sistemi, Golondrinas Kaya Resimlerinde (Guatemala) bulunan duvar resimlerinde kullanılmıştır. Çoklu spektral görüntüleme, temassız koruma yöntemi olması ve çıplak gözle görülemeyecek kadar soluk olan ayrıntıları başarılı bir şekilde geliştirmesi gibi yetenekleriyle oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir.

Antik duvar resimlerinin zamanın yıkıcı etkileriyle sürekli olarak bozulması araştırmacılar ve arkeologlar için önemli bir engeldir. Bilgisayar alanındaki son teknolojik gelişmelerin yardımıyla, duvar resimleri kolayca bilgisayara kaydedilebilmekte ve dijital olarak iyileştirilebilmektedir. [54]'de NE Queensland'daki Torres Boğazı bölgesinden antik duvar resimleri dijital olarak kaydedilmiş ve iyileştirilmiştir. [55]'de antik duvar resimlerinde farklı görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, [55]'de herhangi bir dijital teknik işleminden önce insan gözünü daha uyumlu hale getirmek için duvar resimlerinin taslak olarak çizilmesi önerilmektedir.

Müzeler genellikle envanterlerinde antik resimler bulundurmaktadırlar. Bu resimler zamanla deforme olabilmektedir. Dijital görüntüleme, müzelerin resimleri dijital olarak arşivlemesi, gelecekteki deformasyon analizleri ve onarımlar için çok önemli bir araçtır. Görüntülerin arşivlenmesi ve sunumu için geliştirilen görsel sanatlar sistemi (VASARI) projesi, müzeler için dijital bir görüntüleme sistemidir [56]. VASARI, doğrudan müze resimlerinden 20.000x20.000 piksel görüntüler üretmektedir. VASARI proje görüntüleri, resimlerin zaman içindeki değişikliklerini izlemek, onarım sürecine yardımcı olmak için kullanılmaktadır.

M.Ö. 1650'ye tarihlenen ve yaygın olarak bozulmalara sahip görüntülere görüntü kümelemesi ve desen analizi [57]'de uygulanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin görüntüleri kümelemek ve tarama konularında iyi bir başarıma sahip olduğunu ve ayrıca ilk çizimleri benzetme konusunda iyi bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Sanal onarım sonuçlarının gözlemcilere daha verimli bir şekilde sunulabilmesi için, bu makalede [58] mobil cihazlar üzerinde çalışan bir artırılmış gerçeklik uygulaması önerilmiştir. Uygulama sayesinde, gözlemciler antik duvar resimlerini gerçek zamanlı olarak ve resimlerin bulundukları yerde ellerindeki mobil cihazlar sayesinde sanal olarak iyileştirilmiş bir şekilde gözlemleyebilmektedirler. Çalışma işlemsel yük verimliliği nedeniyle duvar resminin tamamına değil sadece belirli bir alanının iyileştirilmesine odaklanmıştır. Çalışmanın nesnel analizi PSNR ile gerçekleştirilmiştir. Parametreler, insan gözlemleri ile uyumlu olacak şekilde başarılı neticeler üretmiştir ve çalışmanın bölgesel iyileştirme yaklaşımının daha verimli olduğunu doğrulamıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada antik duvar resimlerinin sanal onarımı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Antik duvar resimleri içerdikleri paha biçilemez bilgi sayesinde taşınma kültür varlıkları olarak kabul edilmektedirler. Duvarlar resimlerinin oldukları yerde muhafaza edilmelerinin gerekiyor olması onarılmasını zorlaştırmaktadır. Üstelik duvar resimleri üzerinde gerçekleştirilen onarım işlemleri geri döndürülemez işlemler oldukları için hatalı onarım gibi önemli bir risk içermektedirler. Gelişen bilgisayarlı görü teknolojileri sayesinde antik duvar resimleri dijital ortamda onarılabilmektedir. Sanal onarım ile antik duvar resimlerinde herhangi bir tahribata yol açmadan içerdikleri değerli bilgiye erişmek mümkün olabilmekte ve onarım öncesinde onarıcılara rehberlik edilmektedir.

Bu çalışmada incelenen çalışmaların kullandıkları sanal onarım yöntemleri Çizelge-2'de ve sanal onarım için kullandıkları metotlar/teknolojiler Çizelge 3'te özetlenmiştir:

Çizelge-2: Kullandıkları Sanal Onarım Yöntemlerine Göre Çalışmalar

Kullanılan Sanal Onarım Yöntemi	Kaynaklar
Arşivleme (Veri Seti Hazırlama)	[1], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58]
Hasarlı Görüntü Analizi ve Hasar Tespiti	[2], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51]
Eksik Görüntü Tamamlama	[2], [3], [9], [10], [11], [13], [14], [15], [16], [17], [18]
Çatlakların Doldurulması	[4], [33], [34], [35], [38]
Renk İyileştirme ve Detay Artırma	[4], [5], [6], [25], [26], [27], [28], [29], [8], [30], [31], [32]
Çatlakların Haritalanması	[36], [38], [39], [51]
Üst Üste Binen Motiflerin Birbirinden İzole Edilmesi	[40], [41], [42], [43]

Çizelge-3: Çalışmalarda Kullanılan Yöntem/Teknoloji Sınıflandırması

Sanal Onarım İçin Kullanılan Metot/Teknoloji	Kaynaklar
En Yakın Komşuya Dayalı Doku Sentezi	[2], [3], [4], [13], [15]
Üretken Çatışmacı Ağ (GAN)	[9], [17], [18]
Evrişimli Sinir Ağı (CNN)	[10], [14], [39], [50]
U-Net	[11], [16], [51]
DStretch ve Photoshop ile Temel Renk İyileştirmeleri, Renk Uzayı Dönüşümleri	[6], [25], [26], [27], [28], [29], [42]
DenseNet	[8]
Hiperspektral Görüntüleme	[30], [31], [36], [53]
Retinex	[31]
RRN	[32]
Ultraviyole Yansıma	[45], [48], [49]

Dijital görüntü işleme tekniklerinin de yardımıyla antik duvar resimlerinin eksik bölgeleri sanal boyama yöntemleri ile başarıyla tamamlanabilmekte, duvar resimlerindeki çatlaklar analiz edilerek sanal olarak başarıyla onarılabilmektedir. Duvar resimlerinde üst üste binen motifler ve kullanılan

boyama malzemeleri başarılı bir şekilde analiz edilebilmektedir. Solmuş duvar resimlerindeki detaylar görünür hale getirilebilmekte, renkler iyileştirilebilmekte ve bilgisayarlar yardımıyla bu değerli kültürel miraslar dijital ortamda arşivlenebilmektedir.

Duvar resimlerinin maruz kaldığı tahribat çeşitlerinin belirlenmesi veya görünür/görünmez çatlakların tespiti için akustik emisyon teknolojisi[50], optik darbeli termografi yöntemi[51] ve hiperspektral görüntülemeden istifade edilmektedir. Bu yöntemler her ne kadar tahribatsız yöntemler olarak bilinse de optik darbeli termografi yöntemi yüksek güç kullanımı durumunda duvar resmine zarar verebilmektedir. Hiperspektral görüntüleme aynı zamanda sanal onarım ve görüntü iyileştirme çalışmalarında da kullanılmaktadır [30], [31], [36]. Resimde görünür aralıkta tespit edilemeyen detaylar bu teknik sayesinde tespit edilebilmektedir. Özellikle resim üzerindeki is tabakasının yalıtılmasında hiperspektral görüntülerden yararlanılmaktadır.

Özellikle resim tamamlama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sanal onarım işlemlerinde derin öğrenme teknikleri ve yapay sinir ağları kullanılmaktadır [14], [16], [18], [8], [32], [50]. Bu çalışmalarda genel olarak bir bütün halinde duvar resminin tamamının yamalanması yerine bölgesel yamalama stratejisi kullanılmaktadır. Resmin bir bütün olarak tamamlandığı çalışmalarda yeterli başarıya ulaşılamamıştır. Resmin tamamlanacak dar bir bölgesi seçilmekte ve bu alandaki eksik kısımlar tespit edilmektedir. Daha sonra orijinal görsele benzer görseller ile eğitilmiş ağlar yardımı ile eksik parçalar kestirilmekte ya da komşu pikseller analiz edilerek eksik parçalar sentezlenmektedir. Resim tamamlama yöntemleri henüz yüz gibi detaylı bölgelerin tamamlanmasında yeterli başarıya ulaşmış değillerdir, resmin karmaşık olmayan bölümlerini ise yeterli düzeyde tamamlayabilmektedirler.

Sanal onarım işlemi sonuçlarının başarımı için nesnel ve öznel analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Öznel analiz için işlem yapılmamış görseller, işlem sonrası görseller ve literatürde iyi bilinen yöntemler ile iyileştirilmiş görseller bir arada sunulmakta ve okuyucunun görsel değerlendirmesine sunulmaktadır. Bu değerlendirme yöntemi kişiden kişiye değişebileceği için karşıt olarak nesnel değerlendirme araçları da kullanılmaktadır. Literatürde sıklıkla PSNR, RMSE, SSIM, FSIM parametreleri sanal onarım kalitesini ölçmek için kullanılmaktadır.

Yapay zekanın desteklediği sanal onarım üzerine yeni araştırmalar özellikle resim tamamlama konusunda başarılı sonuçlar üretmeye başlamıştır. Sanal onarım üzerine yapılan başarılı çalışmalar, bu değerli yöntemin antik duvar resimlerinin onarımı için çok kullanışlı bir araç haline geldiğini göstermektedir. Özellikle büyük ölçekli resimlerde bir bütün olarak eksik parça tamamlama, figürlerin yüz ve el gibi detaylı bölgelerinde hassas tamamlama, is ile kararmış resimlerde is tabakasının orijinal renkleri koruyarak kaldırılması konularında derin öğrenme tekniklerinin de yardımı ile yenilikçi çözümler geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

Kaynakça

[1] Fredlund, G. ve Sundstrom, L. "Digital infra-red photography for recording painted rock art", *Antiquity*, c. 81, sy 313, ss. 733-742, 2007, doi: 10.1017/S0003598X00095697.

[2] Zeng Y. ve YGong, Y. "Nearest Neighbor based Digital Restoration of Damaged Ancient Chinese Paintings", içinde *2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Kas. 2018, ss. 1-5. doi: 10.1109/ICDSP.2018.8631553.

[3] Jiang, D., Li, P, ve Xie, H. "Research into Digital Oil Painting Restoration Algorithm Based on Image Acquisition Technology", içinde *2022 International Conference on 3D Immersion, Interaction and Multi-sensory Experiences (ICDIIME)*, Madrid, Spain: IEEE, Haz. 2022, ss. 65-68. doi: 10.1109/ICDIIME56946.2022.00022.

[4] Nikolaidis N. ve Pitas, I. "Digital image processing in painting restoration and archiving", içinde *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No.01CH37205)*, Eki. 2001, ss. 586-589 c.1. doi: 10.1109/ICIP.2001.959084.

[5] Pappas M. ve Pitas, I. "Digital color restoration of old paintings", *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, c. 9, ss. 291-4, Şub. 2000, doi: 10.1109/83.821745.

[6] David, B. Brayer, J., Mcniven, I. ve Watchman, A. L. , "Why digital enhancement of rock paintings works: Rescaling and saturating colours", *Antiquity*, c. 75, ss. 781-792, Ara. 2015, doi: 10.1017/S0003598X00089286.

[7] Barni, M., Pelagotti, A. ve Piva, A., "Image processing for the analysis and conservation of paintings: opportunities and challenges", *IEEE Signal Processing Magazine*, c. 22, sy 5, ss. 141-144, Eyl. 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1511835.

[8] Xu W. ve Fu, Y., "Deep learning algorithm in ancient relics image colour restoration technology", *Multimed Tools Appl*, c. 82, sy 15, ss. 23119-23150, Haz. 2023, doi: 10.1007/s11042-022-14108-z.

[9] Ciortan, I. M. George, S. ve Hardeberg, J. Y. , "Colour-Balanced Edge-Guided , Digital Inpainting: Applications on Artworks", *Sensors*, c. 21, sy 6, Art. sy 6, Oca. 2021, doi: 10.3390/s21062091.

[10] Zeng, Y., Gong, Y. ve Zeng, X. "Controllable digital restoration of ancient paintings using convolutional neural network and nearest neighbor", *Pattern Recognition Letters*, c. 133, ss. 158-164, May. 2020, doi: 10.1016/j.patrec.2020.02.033.

[11] Xiao, Q. Li, G. ve Chen, Q. "Image inpainting network for filling large missing regions using residual gather", *Expert Systems with Applications*, c. 183, s. 115381, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115381.

[12] Qin, Z., Zeng, Q. Zong, Y. ve Xu, F. "Image inpainting based on deep learning: A review", *Displays*, c. 69, s. 102028, Eyl. 2021, doi: 10.1016/j.displa.2021.102028.

[13] Pei, S. C., Zeng, Y. C. ve Chang, C. H. "Virtual restoration of ancient Chinese paintings using color contrast enhancement and lacuna texture synthesis", *IEEE Transactions on Image Processing*, c. 13, sy 3, ss. 416-429, Mar. 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.821347.

[14] Ge, H. , Yu, Y. ve Zhang, L. "A virtual restoration network of ancient murals via global–local feature extraction and structural information guidance", *Herit Sci*, c. 11, sy 1, s. 264, Ara. 2023, doi: 10.1186/s40494-023-01109-w.

[15] Tint W. ve Tin, M. M. "Digital Restoration of Ancient Murals: Assessing the Efficacy of Coherent Transport Inpainting with Damage Ratio Analysis", içinde *2024 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA)*, Mar. 2024, ss. 1-8. doi: 10.1109/ICCA62361.2024.10532855.

[16] Singh, U., Maiti, S., Saini, A. ve Dhiraj, "Ancient Indian Murals Digital Restoration through Image InPainting", içinde *2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Mar. 2023, ss. 635-640. doi: 10.1109/SPIN57001.2023.10116111.

[17] Yan, Y. , Zhang, R., He, H. Lei, T., Zhang, X. ve Jiang, C. "Image Restoration Technology of Tang Dynasty Tomb Murals Using Adversarial Edge Learning", *J. Comput. Cult. Herit.*, c. 17, sy 3, s. 52:1-52:11, Eyl. 2024, doi: 10.1145/3674984.

[18] Kumar P. ve Gupta, V. "Restoration of damaged artworks based on a generative adversarial network", *Multimed Tools Appl*, c. 82, sy 26, ss. 40967-40985, Kas. 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15222-2.

[19] Russakovsky *ve ark.*. O., "ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge", *International Journal of Computer Vision*, c. 115, sy 3, ss. 211-252, Ara. 2015, doi: 10.1007/s11263-015-0816-y.

[20] Zhou, B., Lapedriza, A., Khosla, A., Oliva, A. ve Torralba, A. "Places: A 10 Million Image Database for Scene Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, c. 40, sy 6, ss. 1452-1464, Haz. 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2723009.

[21] Liu, Z., Luo, P., Wang, X. ve Tang, X. "Deep Learning Face Attributes in the Wild", içinde *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Ara. 2015, ss. 3730-3738. doi: 10.1109/ICCV.2015.425.

[22] Doersch, C., Singh, S., Gupta, A., Sivic, J. ve Efros, A. A. "What makes Paris look like Paris?", *ACM Trans. Graph.*, c. 31, sy 4, Tem. 2012, doi: 10.1145/2185520.2185597.

[23] Tylecek R. ve Sára, R. "patt Pattern Templates for Recognition of Objects with Regular Structure", içinde *Pattern Recognition: 35th German Conference, GCPR 2013, Saarbrücken, Germany, September 3-6, 2013. Proceedings*, Springer, 2013, ss. 364-374. doi: 10.1007/978-3-642-40602-7_39.

[24] Cimpoi, M., Maji, S., Kokkinos, I., Mohamed, S. ve Vedaldi, A. "Describing Textures in the Wild", içinde *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Haz. 2014, ss. 3606-3613. doi: 10.1109/CVPR.2014.461.

[25] Harman, J. "Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images", program adı: American Rock Art Research Association Annual Meeting, May. 2005. Erişim: 21 Şubat 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html

[26] Le Quellec, J.-L., Duquesnoy, F. ve Defrasne, C. "Digital image enhancement with DStretch®: Is complexity always necessary for efficiency?", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, c. 2, sy 2, ss. 55-67, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.daach.2015.01.003.

[27] Mark R. ve Billo, E. "Application of Digital Image Enhancement in Rock Art Recording", *American Indian Rock Art*, c. 28, 2002.

[28] Defrasne, C. "Digital image enhancement for recording rupestrian engravings: applications to an alpine rockshelter", *Journal of Archaeological Science*, c. 50, ss. 31-38, Eki. 2014, doi: 10.1016/j.jas.2014.06.010.

[29] Cerrillo Cuenca E. ve Sepúlveda, M. "An assessment of methods for the digital enhancement of rock paintings: the rock art from the precordillera of Arica (Chile) as a case study", *Journal of Archaeological Science*, c. 55, ss. 197-208, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.jas.2015.01.006.

[30] Sun, P., Hou, M., Lyu, S., Wang, W., Shaker, A. ve Li, S. "Virtual cleaning of sooty murals in ancient temples using twice colour attenuation prior", *Computers & Graphics*, c. 120, s. 103924, May. 2024, doi: 10.1016/j.cag.2024.103924.

[31] Gao, Z., Du, M., Cao, N., Hou, M., Wang, W. ve Lyu, S. "Application of hyperspectral imaging technology to digitally protect murals in the Qutan temple", *Heritage Science*, c. 11, sy 1, s. 8, Oca. 2023, doi: 10.1186/s40494-022-00847-7.

[32] Xu Z. ve Geng, C. "Color restoration of mural images based on a reversible neural network: leveraging reversible residual networks for structure and texture preservation", *Herit Sci*, c. 12, sy 1, s. 351, Eki. 2024, doi: 10.1186/s40494-024-01471-3.

[33] Giakoumis I. ve Pitas, I. "Digital Restoration of Painting Cracks", program adı: IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May. 1998, ss. 269-272 c.4. doi: 10.1109/ISCAS.1998.698812.

[34] Wang, W. "An edge based segmentation algorithm for rock fracture tracing", içinde *International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV'05)*, Tem. 2005, ss. 43-48. doi: 10.1109/CGIV.2005.16.

[35] Wang, W., Liao, H. ve Huang, Y. "Rock fracture tracing based on image processing and SVM", *Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)*, Ağu. 2007, ss. 632-635. doi: 10.1109/ICNC.2007.643.

[36] Qiao, K., Hou, M., Lyu, S. ve Li, L. "Extraction and restoration of scratched murals based on hyperspectral imaging—a case study of murals in the East Wall of the sixth grotto of Yungang Grottoes, Datong, China", *Herit Sci*, c. 12, sy 1, s. 123, Nis. 2024, doi: 10.1186/s40494-024-01215-3.

[37] Tuncay, E. "Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in the Cappadocia region (Turkey)", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, c. 46, sy 8, ss. 1253-1266, Ara. 2009, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.01.011.

[38] Cornelis B. ve ark, "Crack detection and inpainting for virtual restoration of paintings: The case of the Ghent Altarpiece", *Signal Processing*, c. 93, sy 3, ss. 605-619, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.sigpro.2012.07.022.

[39] Sizyakin R. ark. "Crack Detection in Paintings Using Convolutional Neural Networks", *IEEE Access*, c. 8, ss. 74535-74552, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988856.

[40] Gunn, R., Ogleby, C., Lee, D. ve Whear, R. L. "A method to visually rationalise superimposed pigment motifs", *Rock Art Research*, c. 27, ss. 131-136, Kas. 2010.

[41] Robert, E. Petrognani, S. ve Lesvignes, E. "Applications of digital photography in the study of Paleolithic cave art", *Journal of Archaeological Science: Reports*, c. 10, ss. 847-858, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.jasrep.2016.07.026.

[42] Pedro Javier Sosa, A. "Image analysis and treatment for the detection of petroglyphs and their superimpositions: Rediscovering rock art in the Balos Ravine, Gran Canaria Island", *Rock Art Research: The Journal of the Australian Rock Art Research Association (AURA)*, c. 40, sy 2, ss. 121-130, Kas. 2023, doi: 10.3316/informit.308401586511910.

[43] Clogg, P., Díaz-Andreu, M. ve Larkman, B. "Digital Image Processing and the Recording of Rock Art", *Journal of Archaeological Science*, c. 27, sy 9, ss. 837-843, Eyl. 2000, doi: 10.1006/jasc.1999.0522.

[44] Casanova Municchia, A., Bartoli, F., Taniguchi, Y., Giordani, P. ve Caneva, G. "Evaluation of the biodeterioration activity of lichens in the Cave Church of Üzümlü (Cappadocia, Turkey)", *International Biodeterioration & Biodegradation*, c. 127, ss. 160-169, Şub. 2018, doi: 10.1016/j.ibiod.2017.11.023.

[45] Rogerio Candelera, M. A., Jurado, V., Laiz, L. ve Saiz Jimenez, C. "Laboratory and in situ assays of digital image analysis based protocols for biodeteriorated rock and mural paintings recording", *Journal of Archaeological Science*, c. 38, sy 10, ss. 2571-2578, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.jas.2011.04.020.

[46] Menu M. ve Walter, P. "Prehistoric cave painting PIXE analysis for the identification of paint 'pots'", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, c. 64, sy 1, ss. 547-

552, Şub. 1992, doi: 10.1016/0168-583X(92)95531-U.
[47] Crkvenjakov, D. K. “Image Processing and the Analysis of Paintings—The Case of Serbian Baroque Icons”, *IEEE BITS the Information Theory Magazine*, c. 2, sy 1, ss. 122-123, Eki. 2022, doi: 10.1109/MBITS.2022.3187947.
[48] Bridgman, C. F. ve Gibson, H. L. “Infrared Luminescence in the Photographic Examination of Paintings and Other Art Objects”, *Studies in Conservation*, c. 8, sy 3, ss. 77-83, 1963, doi: 10.2307/1505133.
[49] Baldia C. M. ve Jakes, K. A. “Photographic methods to detect colourants in archaeological textiles”, *Journal of Archaeological Science*, c. 34, sy 4, ss. 519-525, Nis. 2007, doi: 10.1016/j.jas.2006.06.010.
[50] Shi, N., Yang, L., He, P., Li, Y., Wang, M. ve Zhao, H. “Research and realization of mural painting disease recognition methods”, içinde *2024 4th International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, Tem. 2024, ss. 623-630. doi: 10.1109/ISCTIS63324.2024.10698926.
[51] Cui J. ve ark. “Attention-enhanced U-Net for automatic crack detection in ancient murals using optical pulsed thermography”, *Journal of Cultural Heritage*, c. 70, ss. 111-119, Kas. 2024, doi: 10.1016/j.culher.2024.08.015.
[52] Lesvignes E. ve ark., “Using Digital Techniques to Document Prehistoric Rock Art: First Approaches on the Engraved Panels of the Paris Basin Shelters”, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, c. 15, s. e00122, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.daach.2019.e00122.
[53] Robinson E. ve Ware, G. “Multi-spectral Imaging of La Casa de las Golondrinas Rock Paintings”, 2000. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.famsi.org/reports/99052/99052Robinson01.pdf
[54] Brady, L. M. “Documenting and Analyzing Rock, Paintings from Torres Strait, NE Australia, with Digital Photography and Computer Image Enhancement”, *Journal of Field Archaeology*, c. 31, sy 4, ss. 363-379, Oca. 2006, doi: 10.1179/009346906791071837.
[55] Brady L. M. ve Gunn, R. G. “Digital Enhancement of Deteriorated and Superimposed Pigment Art: Methods and Case Studies”, içinde *A Companion to Rock Art*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, ss. 625-643. doi: 10.1002/9781118253892.ch35.
[56] Martinez, K., Cupitt, J., Saunders, D. ve Pillay, R. “Ten years of art imaging research”, *Proceedings of the IEEE*, c. 90, sy 1, ss. 28-41, Oca. 2002, doi: 10.1109/5.982403.
[57] Papaodysseus, C., Exarhos, M., Panagopoulos, M., Rousopoulos, P., Triantafillou, C. ve Panagopoulos, T. “Image and Pattern Analysis of 1650 B.C. Wall Paintings and Reconstruction”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, c. 38, sy 4, ss. 958-965, Tem. 2008, doi: 10.1109/TSMCA.2008.923078.
[58] Xu, H., Zhang, Y. ve Zhang, J. “Frescoes restoration via virtual-real fusion: Method and practice”, *Journal of Cultural Heritage*, c. 66, ss. 68-75, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.culher.2023.11.001.

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Ortak Türk Abecesi ve Ses Yapısının Doğal Dil İşleme Uygulamaları Üzerindeki Etkisi: Keşifsel bir Derleme ve Gelecek Yönelimler

Common Turkic Alphabet and the Impact of Phonetic Structure on Natural Language Processing Applications: An Exploratory Review and Future Directions

Kadir TOHMA
İskenderun Teknik Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Hatay, Türkiye
kadir.tohma@iste.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2631-7810

Halil İbrahim OKUR
İskenderun Teknik Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Hatay, Türkiye
hibrahim.okur@iste.edu.tr
ORCID: 0000-0003-0339-4626

Öz

Ses analiz, konuşma sırasında seslerin nasıl üretildiğini ve sözcüklerin seslerle nasıl ilişkilendirildiğini inceleyen Doğal Dil İşleme konusunun bir dalıdır. Bilgisayarların bu süreci anlayıp değerlendirebilmesi hem sesin oluşum mekanizmasını hem de dillerin sözcüksel, söz dizimsel ve anlamsal yönlerini dikkate almayı gerektirdiğinden oldukça zorlu bir çalışmadır. Tarihsel kökleri yüzyıllar öncesine uzansa da son yıllarda araştırmacılar dünya çapında konuşulan çeşitli dilleri ele alarak ses analizi daha geniş bir bakış açısıyla değerlendirmiştir. Ses ve ses biliminin en büyük güçlüklerinden biri, dili tanıma ve işleme süreçlerinde (örneğin konuşma tanıma ve konuşma sentezi) tutarlı sonuçlar elde etmektir. Bu çalışmada, ses ve ses bilimi kavramlarının tanımlarına değinilirken, farklı araştırmacıların benimsediği yöntemler incelenmektedir. Ek olarak, Ortak Türk Abecesinin potansiyel ses etkileri tartışılarak bu abece hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, yazı-söyleyiş uyumunu ölçmek için yeni algoritmaların veya ölçünlerin geliştirilmesine yönelik öneriler ve gelecekte izlenebilecek yönelimler de vurgulanmaktadır.

Anahtar sözcükler: Doğal Dil İşleme, Ses Analizi, Ses Analiz, Ortak Türk Abecesi, Yazım-ses Uyumu

Abstract

Phonetic analysis is a branch of Natural Language Processing that examines how sounds are produced during speech and how words are related to these sounds. Because computers must understand both the mechanism of sound formation and the lexical, syntactic, and semantic aspects of languages, this is a highly demanding task. Although its historical roots date back centuries, in recent years researchers have adopted a broader perspective on phonetic analysis by focusing on various languages spoken worldwide. One of the greatest challenges in phonetics and phonology is achieving consistent results in tasks involving language recognition and processing (such as speech recognition and speech synthesis). In this study, the definitions of phonetics and phonology are addressed, and the methods employed by different researchers are examined. Additionally, the potential phonetic impacts of the Common Turkic Alphabet are discussed, providing detailed information about this alphabet. Furthermore, proposals for new algorithms or metrics to measure writing-pronunciation alignment and future directions in this field are highlighted.

Keywords: Natural Language Processing, Phonetic Analysis, Common Turkic Alphabet, Orthography-Phonology Correspondence

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 17.01.2025 - 13.02.2025 – 12.03.2025
Makale türü: Derleme

1. Giriş

Dil bilimi, dillerin ses özelliklerini ve bu seslerin nasıl üretildiğini, iletildiğini ve algılandığını inceleyen bir bilim dalıdır [1]. Dilin temel bileşenlerinden biri olarak ses, yazı sistemleriyle kurduğu ilişki nedeniyle iletişimde kritik bir rol oynar. Yazı sistemleri, dillerin ses özelliklerini yansıtma becerilerinde farklılık gösterir ve bu durum, dil öğrenme, öğretme ile teknolojik uygulamaları doğrudan etkiler [2][3].

Tarih boyunca, dillerin ses yapılarını daha iyi yansıtmak amacıyla çeşitli abece reformları ve yazı sistemleri geliştirilmiştir. Örneğin, Türkiye'de 1928'de gerçekleştirilen Abece Reformu, Türkçenin ses özelliklerini daha doğru yansıtmak ve okuryazarlık oranını artırmak için Latin abecesini benimsemiştir [4]. Benzer şekilde, başka diller de ses uyumunu geliştirmek için yazı sistemi değişiklikleri ve reformlar uygulamıştır [5].

Yazım-ses uyumu, bir dilin yazılı biçimi ile ses bilgisel özellikleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan temel bir dil bilimi kavramıdır. Bu, bir dilin yazım (ortografik) ve ses (fonolojik) yapıları arasındaki tutarlılık ve düzenliliği belirleyen kurallar bütününü içerir [6]. Yazım-ses uyumunun yüksek olduğu dillerde yazılı sözcüklerin sözlenişi öngörülebilirdir. Böyle dillerde, her bir harf genellikle tek bir sese karşılık gelir ve bu tutarlılık, sözcüğün farklı biçimleri boyunca korunur. Türkçe gibi bu uyumu yüksek olan diller, okuryazarlığı kolaylaştırırken metin analizi ve Doğal Dil İşleme (DDİ) gibi alanlarda önemli avantajlar sağlar [7].

Buna karşılık, yazım-ses uyumu düşük olan dillerde, aynı harf farklı bağlamlarda farklı sesleri temsil edebilir ya da tek bir sesi birden fazla harf karşılayabilir. Örneğin İngilizcede, bir sözcüğün yazımını bilmek, söylenişini doğru tahmin etmek için yeterli değildir [8]. "Though" ve "through" gibi sözcükler, yazılışları benzer olduğu hâlde oldukça farklı şekillerde söylenirler. Bu tür uyumsuzluklar, dil öğrenenler açısından ek zorluklar oluşturur ve DDİ uygulamalarında ek işlem yüküne neden olur.

Yazım-ses uyumu, aynı zamanda bir dilin ses zenginliğini ne ölçüde yansıtabileceğini de belirler. Bir dilin ses sisteminin yazılı olarak doğru biçimde kaydedilmesi, hem öğrenme-öğretme sürecini kolaylaştırır hem de teknik uygulamaların daha verimli işlemesine olanak tanır [9]. Doğru bir uyum, konuşma tanıma, metinden konuşma üretimi (text to speech - TTS) ve duygu analizi gibi DDİ görevlerinin başarımını artırır. Ayrıca, uyumu yüksek olan diller, yazılı metinleri ses yapısına uygun şekilde temsil ettikleri için otomatik dil işleme sistemlerinde daha iyi sonuçlar elde edebilir.

Bu açıdan bakıldığında, yazım-ses uyumu hem dil bilimsel hem de teknolojik açıdan kritik öneme sahiptir. Uyumu yüksek dillerin öğrenilmesi ve öğretilmesi daha kolayken, uyumu düşük dillerin işlenmesi ve analiz edilmesi için daha karmaşık algoritmalar geliştirmek gerekir [10]. Dahası, yazı sistemlerinin ses doğruluğunu artırmaya yönelik çalışmalar, iletişim verimliliğini iyileştirmek ve dijitalleşme süreçlerine katkıda bulunmak amacıyla abece reformlarında ve yazı sistemlerinin evriminde önemli bir rol oynar.

Günümüzde özellikle DDİ alanında dijital teknolojilerin ilerlemesi, yazım-ses uyumunun önemini artırmıştır. İnsan dilini bilgisayarların anlayıp işleyebilmesine odaklanan DDİ, metin analizi, konuşma tanıma, makine çevirisi ve duygu analizi gibi uygulamalarda başarımı artırmak için büyük ölçüde yazı sistemlerinin ses doğruluğuna dayanır [11]. Yazım-ses uyumu, yazılı sözcüklerin söylenişinin ne derece öngörülebilir olduğunu ifade eder. Uyumu yüksek dillerde yazılı sözcüklerin söylenişleri daha kolay tahmin edilebilir ve bu durum DDİ modellerinin başarımını iyileştirir [12].

Farklı yazı sistemleri, çeşitli işleme varsayımlarını zorunlu kılar. Örneğin, Çince, metinden konuşma üretiminde alt-sözcüksel temsillere sahip değildir; ancak İngilizcede bu dönüşümler daha belirgindir. Bu farklılıklar, DDİ modellerinin başarısını doğrudan etkiler [13]. Ses simgelerinin anlamla kurduğu simgesellik de dil işleme süreçlerini etkileyebilir; örneğin, yüksek uyarım (arousal) değeri olan sesbirimler (fonemler), dil görevlerinde daha hızlı tepki süreleriyle ilişkilendirilir [14].

Yazım-ses uyumunun yüksek olduğu Türkçe gibi dillerde, otomatik konuşma tanıma (Automatic Speech Recognition - ASR) sistemleri genellikle daha başarılı sonuçlar verir; çünkü yazılı biçim, söyleyişi öngörmek için yeterli bilgiyi sunar. Örneğin, TTS ya da konuşmayı tanıma, Türkçe açısından görece daha basittir [15]. Buna karşın, "though" ve "through" gibi sözcüklerin yazım ve söylenişi arasındaki belirgin farklılıklar sergilediği İngilizcede uyum düşük olduğundan, ek işlem basamakları gerekir ve bu durum DDİ uygulamalarının doğruluğunu düşürebilir [16]. Ayrıca, uyumu yüksek dillerde biçimbilimsel analiz ve kök çıkarma gibi görevler daha az karmaşıktır. Örneğin, bir sözcüğün kökünün belirlenmesi Türkçede İngilizceye kıyasla daha kolaydır [17]. Yine de Türkçede genel olarak uyum yüksek olsa da bazı istisnalar ve söyleyiş çeşitliliği DDİ sistemleri için ek zorluklar yaratır [18].

Ortak Türk Abecesi, Türk dillerinin ses çeşitliliğini daha iyi yansıtarak yazım-ses uyumunu güçlendirmek amacıyla önerilen bir yazı sistemidir [19]. X, Ə, Q, Ñ VE Û gibi harfleri bünyesinde barındıran bu abece, Türk dillerindeki sesleri daha doğru biçimde temsil etmeyi hedefler [20]. Söz konusu abeceye geçiş, Türk dillerinin dijitalleşmesine ve DDİ uygulamalarına önemli katkılar sunabilir. Ortak Türk Abecesine yönelimin temel gerekçeleri arasında, Türk dilleri arasındaki iletişimi güçlendirmek, kültürel ve dilsel birliği pekiştirmek, eğitim ve bilimsel işbirliğini artırmak ve dijital çağın gereksinimlerini karşılamak yer alır.

Tarihsel olarak, Türk dilleri farklı abeceler kullanmış ve bu durum, ortak kökenli diller arasında dahi iletişim zorluklarına yol açmıştır. Birleştirilmiş bir abece, yazılı iletişimi kolaylaştırmayı, karşılıklı anlayışı geliştirmeyi ve Türk dünyası içinde kültürel ve dilsel bağları güçlendirmeyi amaçlar. Bu adımın, ortak bir kimliği ve aidiyet duygusunu pekiştirerek Türk halkları arasında işbirliği ve dayanışmayı artırması beklenmektedir. Ayrıca, farklı abecelerin kullanımı, eğitim materyallerinin ve bilimsel çalışmaların paylaşımını karmaşıklaştırır. Ortak bir abece, eğitim kaynaklarının ve bilimsel araştırmaların daha yaygın biçimde dolaşıma girmesini sağlayarak bilgi paylaşımı ve ortak projeleri teşvik

edebilir. Dijital çağda ise farklı abecelerin varlığı, bilgi teknolojileri ve dijital platformlarla bütünleşme sürecini zorlaştırmaktadır. Ortak bir abece dijital içeriğin oluşturulması, paylaşılması ve işlenmesi süreçlerini basitleştirerek Türk dillerinin dijital dünyada daha etkin temsilini olanaklı kılar.

Türk dilleri arasında yazım-ses uyumunu artırmak, ses çeşitliliği doğru biçimde yansıtmak ve DDİ uygulamaları için tutarlı bir dilsel yapı oluşturmak, yenilikçi ölçüm yöntemleri ve modelleme yaklaşımları gerektirir. Yazılı dilin ses özelliklerini eksiksiz biçimde yansıtmak hem dilbilimsel analiz hem de teknolojik uygulamalar açısından hayati önemdedir. Ortak bir abecenin benimsenmesi, yazıyla söyleyiş arasındaki ilişkinin sistematik bir biçimde değerlendirilebilmesini sağlayarak Türk dillerinin dijitalleşmesine ve DDİ'ye entegrasyonuna önemli katkılarda bulunabilir. Dolayısıyla, yazım-ses uyumunu analiz edecek ve dilsel dönüşüm süreçlerini destekleyecek araçların geliştirilmesi zorunlu bir gereksinim olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmanın temel amacı, ses yapının yazı sistemleri ve dijital teknolojiler üzerindeki etkisini bütüncül bir şekilde ele almaktır. Ortak Türk Abecesi bağlamında, ses yapıların yazıya doğru biçimde aktarılmasının Türk dillerinin modernizasyonu ve dijitalleşmesine yapabileceği olası katkılar incelenmektedir. Ayrıca, abece reformlarının tarihsel süreçleri, Ortak Türk Abecesinin özellikleri ve bu reformların DDİ uygulamaları açısından sonuçları ayrıntılı biçimde tartışılmaktadır. Çalışma hem dil bilimsel hem de teknolojik gelişmeler bakımından yazım-ses uyumunun önemini vurgulamakta ve gelecek araştırmalarla DDİ uygulamalarına yönelik öneriler sunmaktadır.

2. Ortak Türk Abecesi

Türk dillerinin Latin abecesine geçiş süreci, 20. yüzyılın başlarında modernleşme, uluslararası standartlara uyum ve ortak bir yazım sisteminin oluşturulması çabalarının bir parçası olarak başlamıştır. Özellikle 1990'larda yeni bağımsızlığını kazanan Türk cumhuriyetlerinin Latin temelli abeceleri benimsemesiyle bu süreç hız kazanmıştır. Türk Konseyi gibi etkinliklerde alınan kararlar ile Türk Devletleri Teşkilatı (TDT), Türk Akademisi ve Türk Dil Kurumu gibi kurumların katkıları, Türk dillerinin yazım sistemlerinde ortak bir ölçüne oluşturulmasına yönelik girişimleri daha da desteklemiştir.

Bu çerçevede, Ortak Türk Abecesi, çeşitli Türk dillerinin paylaştığı ses öğeleri yansıtarak yazılı iletişimde daha fazla tutarlılık sağlamayı amaçlayan sistematik bir yaklaşımı temsil etmektedir [19]. Bu doğrultuda, Türk dillerinin ses zenginliğini karşılayan bazı harfler, günümüzde farklı Türk dillerinde kullanımda olan biçimleriyle ortak bir sisteme entegre edilmiştir. Örneğin, Ortak Türk Abecesine "k"nin kalın biçimi için "q", gırtlaksı "h" sesi için "x", genizsi "n" için "ñ", öne ve açık "e" sesi için "ə" ve uzatmalı "u" sesi için "û" gibi harfler katılmıştır.

Bu yaklaşım, yazım-ses uyumunu güçlendirerek yazılı iletişimi kolaylaştırmakta ve Türk dünyası genelinde dilsel bağları sağlamlaştırmaktadır. Böylece Ortak Türk Abecesi, ortak değerlerin, kültürel mirasın ve entelektüel birikimin yazı yoluyla daha etkili bir biçimde aktarılmasına katkıda bulunmaktadır.

Common Turkic Alphabet

	IPA	ST
Aa	[ɑ]	[ɑ]
Bb	[b]	[b]
Cc	[ʤ]	[ǯ]
Çç	[ʧ]	[č]
Dd	[d]	[d]
Ee	[e]	[e]
Əə (Ää)	[æ]	[ä]
Ff	[f]	[f]
Gg	[g]	[g]
Ğğ	[ɯ]	[ɣ]
Hh	[h]	[h]
Xx	[χ]	[x]

	IPA	ST
Iı	[ɯ]	[y]
İi	[i]	[i]
Jj	[ʒ]	[ž]
Kk	[k]	[k]
Qq	[q]	[q]
Ll	[l]	[l]
Mm	[m]	[m]
Nn	[n]	[n]
Ññ	[ŋ]	[ŋ]
Oo	[o]	[o]
Öö	[œ]	[ö]
Pp	[p]	[p]

	IPA	ST
Rr	[r]	[r]
Ss	[s]	[s]
Şş	[ʃ]	[š]
Tt	[t]	[t]
Uu	[u]	[u]
Üü	[ʊ]	[ū]
Üü	[ʏ]	[ü]
Vv	[v]	[v]
Yy	[j]	[j]
Zz	[z]	[z]

* IPA: International Phonetic Alphabet
* ST: International Phonetic Transcription based on Latin scripts, adopted by the Editorial Board of the Sovetskaya Tyurkologiya (1974)

Şekil-1: Uzlaşılan 34 harfli Ortak Türk Abecesi

2024 yılında Azerbaycan'ın başkenti Bakü'de düzenlenen Türk Dünyası Ortak Abece Komisyonu toplantısında, Türk Devletleri Teşkilatına (TDT) üye devletlerin temsilcileri, 34 harfli Ortak Türk Abecesi (Şekil-1) önerisi üzerinde uzlaşılmıştır. Bu öneri, Türk dünyasındaki farklı lehçeler ve dilsel gereksinimler dikkate alınarak hazırlanmış; böylece Türk dillerinin ses zenginliğini daha doğru yansıtmayı hedefleyen kapsayıcı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu doğrultuda, mevcut Türk abecesindeki 29 harfe ek olarak x, ə, q, ñ ve û harfleri, Türk dillerinin kendine özgü ses özelliklerini yazıya daha etkili şekilde aktarmak amacıyla eklenmiştir.

Şekil-1'de, üzerinde anlaşmaya varılan 34 harfli Ortak Türk Abecesi, çizelge düzeninde sistematik olarak sunulmaktadır. Bu abecenin kullanımında uzlaşmaya varan ülkeler arasında Türkiye, Azerbaycan, Kazakistan, Kırgızistan, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti ve Özbekistan bulunmaktadır. Sistem, yalnızca ortak bir yazı ölçününü oluşturmayı ve Türk dilleri arasındaki ses tutarlılığı artırmayı değil, aynı zamanda dilsel bütünleşmeyi de güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Böylece yazılı iletişimde daha tutarlı bir yapı ortaya konurken, Türk dünyası içinde kültürel bağların da pekişmesine katkı sağlanmaktadır.

2.1 Türk Dillerinde x, ə, q, ñ, û Harflerinin Ses Uyum ve Ölçünleşme Süreci

Ortak Türk Abecesine x, ə, q, ñ ve û harflerinin eklenmesi, Türk dillerinin ses zenginliğini daha doğru yansıtmak ve bu diller arasındaki yazı birliğini güçlendirmek amacını taşımaktadır. Söz konusu harfler, farklı Türk dillerinde günümüzde kullanılan sesleri tek bir ölçünlü abece sistemi içinde bütünleştirmektedir.

Q harfi, Türkçede bulunmayan ancak Kazakça ve Kırgızca gibi dillerde sıklıkla karşılaşılan kalın "K" sesini ifade etmektedir [21]. Özellikle kalın ünlülerle kullanıldığında belirgin bir ayrım yaratır. Örneğin Kazakçada Qazaq (Kazak) ve Kırgızcada Qırğız (Kırgız) sözcükleri, bu harfin sağladığı doğru yazımı yansıtır. Benzer şekilde X harfi, Azerbaycan Türkçesi ve Türkmencedeki gırtlaksı "H" sesine karşılık gelmektedir [22]. Arapçadan

alınma sözcüklerde sıkça görülen bu ses, Azerbaycan Türkçesinde Xəbər (“Haber”), Türkmencede ise Xyzmat (“Hizmet”) sözcüklerinde yer alır.

Ñ harfi, Türk dillerinde farklı biçimlerde görülen genizsi “N” sesini temsil eder. Tatarcada Ñ, Türkmencede Ň, Özbekçede “ng” şeklinde yazılır; Kiril kökenli abecelerde ise bu sesi “ң” harfi gösterir. Teñri (Tengri) ve Teñiz (Tengiz) gibi sözcüklerde açıkça görülen bu genizsi ses, Azerbaycan Türkçesi ve Türkçede söyleyişde korunmakla birlikte yazıda gösterilmemektedir [19]. Ortak Türk Abecesine Ñ’nin eklenmesiyle bu sesin yazılı biçimde de korunması amaçlanmaktadır.

Son olarak Û harfi, Türk dillerindeki uzun ünlüleri göstermek için kullanılarak yazılı ve sözlü biçimler arasındaki uyumu artırır [20].

Bu harflerin tek bir abece içinde bütünleştirilmesi, Türk dillerinin ses yapısının daha doğru temsilini sağlar ve yazıdaki tutarlılığı güçlendirir. Böylece ölçünleştirme, iletişimi daha anlaşılır hâle getirirken Türk dillerinin sahip olduğu dilsel çeşitliliği de korur.

2.2. Ortak Türk Abecesinin Doğal Dil İşleme (DDİ) Çalışmalarındaki Önemi

Türk abecesine x, ə, q, ñ ve û harflerinin eklenmesiyle oluşturulan Ortak Türk Abecesi, DDİ çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadır. Metin ve ses verilerini işleyerek analiz eden, yorumlayan ve dönüştüren DDİ uygulamaları, bir dilin ses yapısının yazıya eksiksiz ve doğru biçimde aktarılmasına dayalı olarak kesin sonuçlar üretir. Örneğin, Q harfinin kalın “K” sesini ayırt edebilmesi, sesli yardımcılar, konuşma tanıma ve metinden ses üretme (text-to-speech) gibi uygulamaların doğruluğunu artırabilir. Benzer şekilde, gırtlaksı “H” sesini temsil eden X harfi, konuşma verisinin metne dönüştürülmesi sırasında oluşabilecek hataları en aza indirir.

Bu harflerin kullanımı, Türk dillerindeki yazım-ses uyumunu güçlendirerek DDİ algoritmalarının hem eğitme hem de sınama aşamalarında tutarlı ve güvenilir kalmasını sağlar. Örneğin, Q, X ve Ñ gibi harflerin açıkça tanımlanması, çok dilli dil modellerinin Türk dillerini daha iyi işlemesine yardımcı olur. Böylece farklı ses yapılara doğru şekilde uyum sağlayan dil modelleri, konuşma sentezi ve analiz uygulamalarının etkinliğini yükseltir.

Dijitalleşme ve otomasyon çağında, iyi yapılandırılmış bir abece, DDİ sistemlerinin başarımını artırmakla kalmaz; aynı zamanda Türk dillerindeki kullanım alanlarını da genişletir. Örneğin, Q ve X gibi harflerin doğru tanımlanması, makine çevirisi uygulamalarında daha doğal ve akıcı çeviriler yapılmasına olanak verir. Aynı şekilde, Û harfinin uzun ünlü olarak belirlenmesi, sözcüklerin anlamını yorumlama ve anlam çıkarma süreçlerinde kritik bir rol oynar.

3. Önceki Çalışmalar ve Güncel Eğilimler

Ses bilimi dillerin seslerini ve yapısal özelliklerini inceleyen bir alandır ve DDİ'de giderek daha kritik bir rol oynamaktadır. Metin işleme, konuşma tanıma, yazım düzeltme ve söyleyiş değerlendirme gibi uygulamalarda yüksek doğruluk için ses bilginin doğru kullanımı önemlidir. Özellikle ses yapıları çeşitli olan Türk dilleri gibi dillerde, bu özelliklerin doğru modellenmesi DDİ uygulamalarının başarısı açısından kritik öneme sahiptir.

Ses yapıların DDİ sistemlerine etkisi, özellikle konuşma ve dil tanıma ile ses tabanlı analizlerde belirgindir. Araştırmalar, ses ve akustik özelliklerin entegrasyonunun sistem başarımını ve doğruluğunu artırdığını göstermektedir [23-25].

Konuşma tanıma sistemlerinde “Ayırt Edici Ses Özellikler”in (Distinctive Phonetic Features – DPF) rolü, öne çıkan bir araştırma alanıdır. Seddiq ve ark. [23], konuşma sinyallerinde DPF’lerin soyut düzeyde tanımlanmasının, DDİ sistemlerinin başarısını artırdığını vurgulamaktadır. DPF’leri modellemek için derin sinir ağları (Deep Neural Networks – DNN) kullanıldığında, geleneksel çok katmanlı algılayıcı (Multilayer Perceptron – MLP) modellerine kıyasla daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşıldığı, dolayısıyla derin öğrenme tekniklerinin ses özelliklerin işlenmesindeki etkinliğini gösterdiği belirtilmektedir.

Dil tanıma sistemlerinde de ses yapıların kullanılması, doğruluğu ve verimliliği yükseltmektedir. Kukanov ve ark. [25], konuşma dilinin ses özelliklerini daha etkili biçimde modellemek amacıyla derin öğrenme çerçevesinde yeni bir eğitim şeması önermiştir. Bu çalışma, daha düşük boyutlu evrensel ses özelliklerin belirlenmesini kolaylaştırarak dil tanıma sistemlerinin başarımını artırmaktadır.

Ses yapılar, diller arası transliterasyon (bir yazı sisteminden başka bir yazı sistemine aktarım) süreçlerinde de önemli bir rol oynar ve DDİ araçlarının geliştirilmesine katkıda bulunur. Nair ve ark. [26], İngilizceden Hint dillerine transliterasyon yapılırken ses transkripsiyonun önemini vurgulayarak, ses yapıların diller arası seslerin korunmasında yardımcı olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, farklı dil aileleri arasında köprü kurarak DDİ uygulamalarının çok dilli yeteneklerini desteklemektedir.

Ses eşleştirme algoritmaları, sözcükler arasındaki ses benzerliklerini belirlemek için çeşitli yöntemler sunar. SoundEx, NYSIIS, Daitch-Mokotoff, Metaphone ve Polyphone gibi algoritmalar sözcükleri ses benzerliklerine göre karşılaştırırken, Levenshtein, Jaro ve N-gramlar gibi algoritmalar sözcükler arasındaki mesafeleri ölçer [27]. Bu algoritmaların her biri, farklı dillere özgü üstünlüklere ve sınırlamalara sahiptir ve çoğu zaman ilgili dilin ses kurallarına uyarlanması gerekir.

Örneğin, Yunanca için geliştirilen SoundExGR algoritması, Yunancanın ses kurallarını dikkate alarak yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır [28]. Benzer biçimde, Standard Malay için oluşturulan bir ses transkripsiyon sistemi, dilin yazım ve ses kurallarını dikkate alarak metni ses birimlere etkin biçimde dönüştürür ve böylelikle Malaycanın ses yapısını daha iyi temsil eder [29].

Küçük kaynağa sahip ve azınlık dilleri için dil özelinde ses algoritmalar geliştirmek özellikle büyük önem taşır. Örneğin, Brezilya Portekizcesi için tasarlanmış ve Aeiouadô olarak adlandırılan karma bir yazıdan-sese dönüştürücü (grapheme-

to-phoneme converter), elle hazırlanmış transkripsiyon kurallarını Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları (Classification and Regression Trees – CART) ile birleştirerek fonem transkripsiyonları oluşturur [30]. Bu tür araçlar, yazım hatalarını düzeltme, ses açıdan zengin cümleleri tespit etme ve otomatik söyleyiş değerlendirmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

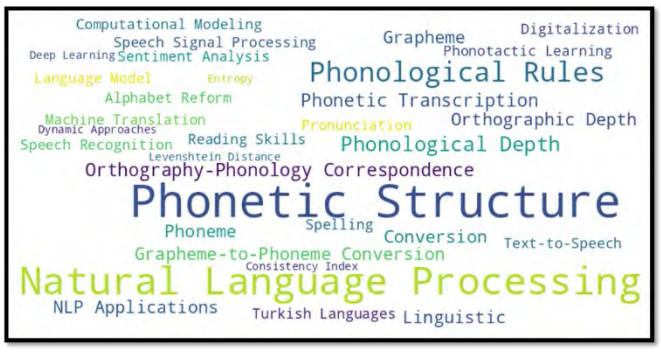
Çok dilli ASR modelleri, birden çok dilin ses temsilini öğrenerek daha evrensel ses temsiller oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu modeller, hedef dil(ler)e ilişkin ek eğitim verileri ile hata oranlarını önemli ölçüde düşürür ve düşük kaynaklı dillerde umut vaat eden sonuçlar elde eder [31]. Bu yaklaşım, ses temsillerin yeterli şekilde kullanılmasını sağlayarak, yetersiz temsil edilen dillerdeki DDİ uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunur.

Doğal sınıflar üzerinden tanımlanan ses süreçlerinin analizine, dil özelinde ve rastgele ögeleri de içerecek biçimde yaklaşılabilir. Kontrast tespiti (contrast detection) gibi yöntemler, dil özelinde doğal sınıfları belirlemek için kullanılır [32]. Bu yöntemler, ses ve ses sınıflarının tanımlanmasında etkili bir yol sunarak hem kuramsal hem de uygulamalı dilbilim araştırmalarına katkı sağlar.

Ses bilgisinin DDİ'de geniş ölçüde kullanılması, yalnızca teknolojik gelişmelere yön vermekle kalmaz, aynı zamanda farklı dillerin ses yapılarına ilişkin anlayışımızı güçlendirir ve bu bilgiyi daha etkin araçlara dönüştürür. Özelleşmiş algoritmalar ve çok dilli ses temsiller geliştirmek, DDİ araçlarının doğruluğunu ve verimliliğini artırarak dil teknolojilerinde yeni ufuklar açar.

Ses yapıları akustik özelliklerle bütünleştirmek de DDİ sistemlerinin başarımını daha üst seviyeye taşır. Huang ve ark. [24], akustik olayların DDİ yöntemleriyle birleştirilmesinin, özellikle konuşmaya dayalı depresyon tespiti gibi paralinguistik sınıflandırma görevlerinde önemli üstünlükler sağladığını göstermiştir. Bu yaklaşım, konuşma sinyallerinin yalnızca dil bilimsel içeriği değil, aynı zamanda duygusal ve psikolojik durumları da yansıtan zengin bir bilgi kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil-2, bu çalışmada incelenen kaynaklardaki temel konuları ve sıkça kullanılan kavramları görsel olarak temsil etmektedir. Bu kelime bulutu, çalışmaların temel odak alanlarını kavramsal bir çerçeve içinde özetlemektedir.



Şekil-2: Çalışmada İncelenen Makalelerin Kavramsal Kelime Bulutu

Dil özelinde geliştirilen ses algoritmaları, çok dilli ses temsilleri ve DDİ araçlarında ses bilginin etkili kullanımına yönelik çalışmalar, alanın temel araştırma odakları arasında yer almaktadır. Ses bilimi ve ses bilimsel yapılar, dillerin ses sistemlerini anlamada kritik bir rol oynar.

Bu bölümde, ses yapılarının DDİ uygulamalarındaki önemine değinilerek ilgili hesaplamalı yöntemler ve ölçüler (metrikler) tartışılmaktadır. Literatürdeki mevcut yöntemler, özellikle yazım-ses uyumu, ses bilimsel süreçleri ve bu süreçlerin DDİ sistemleriyle bütünleştirilmesi üzerine değerlendirilmiştir. Ayrıca, Ortak Türk Abecesinin bu alana olası katkıları da ele alınmaktadır.

DDİ'deki temel görevler arasında ASR, TTS, duygu analizi, konuşmacı tanıma, karşılıklı konuşma sistemleri, makine çevirisi, yazım denetimi ve dil modellemesi bulunmaktadır. Bu alanlar, DDİ araştırmaları ve uygulamalarının başlıca bileşenlerini oluşturmaktadır.

Konuşma tanıma görevinde kullanılan temel ses bilgiler arasında fonemler, akustik özellikler, diakritikler, tonlama ve vurgu yer alır. Bu görev, konuşmanın metne dönüştürülmesi, sesli komutların anlaşılması ve sesli aramaların gerçekleştirilmesi gibi amaçları içerir. Örneğin, sesli yardımcılar (Siri, Google Asistan) ve transkripsiyon yazılımları bu alanda yaygın olarak kullanılır. Ses temelli dil modellerinin geliştirilmesi, çeşitli aksan ve konuşma stillerini daha iyi tanımak suretiyle ASR sistemlerinin doğruluğunu artırır [33-36].

TTS uygulamalarında hece yapısı, vurgu, tonlama, bürün (prozodi) ve söyleyiş kuralları gibi ses unsurlar büyük önem taşır. TTS, yazılı metni sesli biçime dönüştürerek sesli kitap oluşturma veya sanal asistanların konuşmasını sağlama gibi işlevlere sahiptir. Ekran okuyucular ve yol bulma sistemleri bu teknolojiye örnek gösterilebilir. TTS sistemlerinin doğal ve anlaşılır ses üretmesi için, ses kurallar ile prozodinin dikkatle gözetilmesi gerekir [37] [38].

Duygu analizi sürecinde tonlama, perde (pitch), süre, yoğunluk ve ses kalitesi gibi ses bilgiler kullanılır. Bu sayede konuşmada veya metinde duygusal ton belirlenebilir, müşteri geri bildirimleri analiz edilebilir ve sosyal medya içerikleri takip edilebilir. Müşteri hizmetleri chatbot'ları ve pazarlama araştırmaları gibi alanlarda, ses özelliklerin duygusal ifadeleri anlamaya ve yorumlamaya katkısı büyüktür [39] [40].

Konuşmacı tanıma, ses özellikleri (frekans, formantlar), konuşma stili (hız, ritim), aksan ve diksiyon gibi faktörlere dayanmaktadır. Bu bilgiler, konuşmacının kimliğini doğrulama, güvenlik sistemleri geliştirme ve adli soruşturmalarda ses analizleri yapma amaçlarıyla kullanılır. Örneğin, biyometrik kimlik doğrulama veya ses imzası doğrulama uygulamalarında konuşmacının kendine özgü ses özellikleri devreye girer [41] [42].

Diyalog sistemleri, bürün, tonlama, vurgu, duraklamalar ve söylem edimleri gibi ses öğelere odaklanarak daha doğal ve etkileşimli bir iletişim deneyimi sunmayı hedefler. Bu kapsamda, sanal yardımcılar veya müşteri hizmetleri chatbot'ları, insanlarla gerçekçi biçimde etkileşime geçmek için ses bilgiden yararlanır. Ses ögelerin tanınması, diyalog

sistemlerinin kullanıcı niyetini ve duygusal durumunu daha iyi analiz etmesine yardımcı olur [43] [44].

Makine çevirisi alanında hedef dilin ses özellikleri, söyleyiş kuralları ve bürün dikkate alınarak çevirilerin doğruluğu ile akıcılığının artırılması amaçlanır. Örneğin, ses transkripsiyonun kullanılması, makine çevirisi sistemlerinde söyleyiş hatalarını azaltmaya yardımcı olur. Böylece farklı diller arasındaki ses uyumunun doğru biçimde eşleştirilmesi mümkün hale gelir [45-47].

Yazım denetimi görevinde ses benzerlik ve söyleyiş kuralları esas alınır. Bu sayede yazım hataları tespit edilerek kullanıcıya ses olarak benzer sözcüklerin önerilmesi sağlanır. Örneğin, "kalp" (yürek) ile "kalıp" (bir nesnenin şekli) gibi sözcükler arasındaki fark, ses bilgi sayesinde yakalanabilir. Dolayısıyla yazım denetleyicileri, benzer sesli sözcükleri ayırt etmekte daha başarılı olur [48-50].

Dil modellemesi kapsamında ses temsiller, ses özellikleri ve prozodi gibi ögeler dikkate alınarak daha doğru ve kapsamlı modeller oluşturulabilir. Bu yaklaşım, modellerin doğal dil üretimi ve anlamlandırma süreçlerinde daha başarılı olmasını sağlar. Ses bilgiyi içselleştiren dil modelleri, metin analizinden konuşma tanımaya pek çok uygulamada yüksek başarım gösterebilir [51] [52].

Ortak Türk Abecesinin DDİ'ye etkin entegrasyonu için ses yapıları ve ses bilimsel süreçlerin ayrıntılı incelenmesi gereklidir. Yazım-ses uyumu, ses derinliği ve grafem-fonem ilişkileri DDİ bağlamında analiz edilmelidir. Ayrıca, ses bilginin entegrasyonunu destekleyen hesaplamalı yöntem ve ölçüler bütüncül değerlendirilmelidir.

Bir sonraki bölümde, ses yapılar ile DDİ arasındaki ilişki, ses bilimsel işleme yöntemleri ve hesaplamalı ölçülerle birlikte ayrıntılı şekilde incelenecektir. Derin öğrenme modellerinin ses süreçlere uyarlanması, dinamik yaklaşımların geliştirilmesi ve Türk dilleri üzerine yapılan ses çalışmalar bu analizlerin temel alt başlıklarını oluşturacaktır. Bu değerlendirmelerin amacı, Ortak Türk Abecesinin DDİ uygulamalarında daha verimli kullanılmasına katkıda bulunmaktır.

3.1. Ses Bilimsel Yapılar ve Doğal Dil İşleme (DDİ) ile İlişkisi

Ses bilimsel bilgi, DDİ sistemlerinin doğru ve verimli çalışması için temel bir unsur konumundadır. Bu bilgi, yazım-ses uyumundan konuşma tanıma sistemlerine kadar geniş bir alanda uygulanmakta ve aşağıdaki alt başlıklarda ses yapıların DDİ uygulamalarındaki rolü incelenmektedir.

3.1.1. Yazım-Biçimbirim İlişkisi

Yazım-biçimbirim ilişkisi, yazılı dilin sözlü dile nasıl dönüştürüldüğünü ve bu dönüşümün dil işleme sistemleri üzerindeki etkilerini ele alan kritik bir çalışma alanıdır. Bu ilişki, DDİ uygulamalarında ve dil öğrenme süreçlerinde belirleyici bir konuma sahiptir. Yazılı ve sözlü biçimler arasındaki bağlantının gücünü yansıtan "yazım-ses uyumu", hem dilsel modellemelerde hem de DDİ sistemlerinde başarımı artırma potansiyeli taşır. Bu uyumu anlamaya yönelik araştırmalar, daha etkin dil öğrenme araçlarının ve DDİ modellerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

"Yazımsal Derinlik", bir dilin yazılı biçimi ile söyleyişi arasındaki ilişkinin tutarlılığını ölçen bir kavramdır. İngilizce gibi "derin" yazım sistemleri, yazı ile konuşma arasındaki düzensiz ve karmaşık bağlantılarla öne çıkarken; Almanca gibi "yüzeysel" yazım sistemleri, bu ilişkiyi daha tutarlı ve sistematik yansıtır. Bu farklılıklar, yalnızca dil öğrenme süreçlerini değil, beynin dili işleme mekanizmalarını da etkiler. Yapılan çalışmalarda, yüzeysel yazım kuralına sahip dillerde okuma sırasında ses bilimsel yolların daha güçlü biçimde etkinleştiği gösterilmiştir [53]. Bu durum, yüzeysel yazım biçimlerinin ses bilimsel edinim süreçlerini kolaylaştırdığına dair önemli kanıtlar sunar.

"Yazımsal Saydamlık" ise yazılı sözcükler ile onların söyleyişleri arasındaki ilişkinin ne derece açık ve anlaşılır olduğunu ifade eder. Saydam yazım biçimleri yazılı ve sözlü biçimler arasında daha kolay bir eşleme sağlar. Buna karşın, saydam olmayan yazım biçimleri dil öğrenme ve dil işleme modelleri açısından daha büyük zorluklara neden olur. Bu bağlamda yapay sinir ağlarını kullanan araştırmalar, çeşitli dillerin yazım saydamlığını incelemiş ve bu modellerin, grafemden-foneme veya fonemden-grafeme dönüştürme görevlerindeki hata oranlarını öngörmede etkili olduğunu göstermiştir [54]. Ayrıca, bu modellerin dil öğrenenlerin karşılaştığı yaygın hatalara dair önemli bulgular sunduğu, böylece dil edinme süreçlerini desteklediği belirtilmektedir.

Sonuç olarak, ortografi-fonem ilişkisi, bir dilin yazılı ve sözlü biçimleri arasındaki bağlantının dil işleme süreçlerini nasıl etkilediğini anlamanın temel anahtarlarından biridir. Bu alanda yürütülen araştırmalar hem dil öğrenme hem de DDİ uygulamaları için daha verimli sistemler ve yöntemler geliştirilmesine imkân tanımaktadır. "Ortografik derinlik" ve "ortografik saydamlık" gibi kavramlar üzerine yapılan çalışmalar, bu özelliklerin dil öğreniminde olduğu kadar yapay modellerin geliştirilmesinde de büyük etkisi olduğunu göstererek alanın önemini pekiştirmektedir.

3.1.2. Ses Bilimsel Derinlik Kavramı

Ses bilimsel derinlik, bir dilin ses yapılarının öğrenilmesi, işlenmesi ve kullanılmasıyla ilgili çeşitli boyutları kapsayan geniş bir kavramdır. Bu kavram, bir dilin ses bilimsel özelliklerinin ne kadar karmaşık olduğunu ve bu karmaşıklığın öğrenme ve işleme süreçlerini nasıl etkilediğini irdeler. Doğal ses bilimsel yapılardaki düzenlilikler, dilin hem insanlar hem de makineler tarafından daha sezgisel biçimde edinilmesini sağlar. "Ses bilimsel doğallık" olarak anılan bu düzenlilikler, bir dilin ses sisteminin kolay edinilebilmesine imkân tanır. Doğal ses bilimsel yapıların tutarlılığı, hem bireyler hem de DDİ modelleri açısından dil kurallarının anlaşılmasını ve uygulanmasını basitleştirir. Örneğin, bir dilde ünlülerin ve ünsüzlerin sistematik dizilişi, dil öğrenimini desteklediği gibi konuşma tanıma sistemlerinin doğruluğunu da artırır.

Ses bilimsel derinlik, yalnızca bireysel dil öğreniminde değil, TTS ve ASR gibi DDİ uygulamalarında da önemli bir rol oynar. Bir dilin ses yapıları ve ses dizilim (fonotaktik) özelliklerine ilişkin kuralların öğrenilmesi, hangi ses dizilimlerinin geçerli olduğunu belirler ve böylelikle modellerin daha doğru sonuçlar üretmesini sağlar. Örneğin, Türkçede "ng" birleşiminin sözcük başında bulunamayacağı kuralı,

öğrenenlerin veya DDİ modellerinin yanlış genellemeler yapmasını engeller.

Ses bilimsel derinlik aynı zamanda bir dilin ne kadar karmaşık olduğunu da yansıtır. Daha derin ses bilimsel yapılara sahip diller, öğrenme sürecinde daha fazla çaba gerektirirken, daha basit ve tutarlı yapılara sahip dillerin edinimi daha kolaydır. Bu durum hem bireysel dil öğrenenler hem de DDİ modelleri için geçerlidir. Düzenli ve öngörülebilir ses bilimsel yapılara sahip dillerde, grafemden-foneme dönüştürme ve söyleyiş değerlendirme gibi görevlerde daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmak mümkündür. Böylece dil öğrenimi kolaylaşır, DDİ modelleri ise genelleme yeteneklerini geliştirir.

Sonuç olarak ses bilimsel derinlik hem dil öğrenimi hem de DDİ uygulamalarında kritik bir etkendir. Bir dilin ses bilimsel yapılarının tutarlılığı, doğallığı ve düzenliliği, bu süreçlerin başarısını büyük ölçüde belirler. Ses bilimsel doğallık ve ses dizilim özelliklerin anlaşılması hem bireyler hem de makineler için daha etkili ve verimli dil işleme sistemlerinin geliştirilmesine katkı sunar.

3.2. Ses Bilimsel İşleme Yöntemleri ve DDİ Uygulamaları

Ses bilimsel işleme yöntemleri ve bu süreçlerde kullanılan metrikler, bir dilin ses yapısını daha iyi anlamak ve DDİ sistemlerinin bu yapıyı algılama kapasitesini yükseltmek açısından önemlidir. Bu alt bölümde, ses bilimsel işleme yöntemleri ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

Ses bilimsel işleme, okuma becerisinin edinilmesinde de kritik bir rol oynar. Ses bilimsel işleme içindeki birbiriyle ilişkili ögeler— ses bilimsel farkındalık, sözcüksel erişim ve çalışma belleği—okuma gelişimine katkıda bulunur. Özellikle ses bilimsel farkındalığın hem sözcük tanıma hem de anlama süreçlerini etkileyerek okuma öğreniminde nedensel bir rol oynadığı öne sürülmektedir [55-60].

3.3. Ses Bilimi Ölçüleri ve Hesaplamalı Yöntemler

Ses ve ses bilimsel yapıların değerlendirilmesinde kullanılan hesaplamalı yöntemler ve ölçüler, DDİ sistemlerinin bir dilin ses özelliklerini daha iyi kavramasını sağlamaktadır. Hesaplamalı modelleme alanındaki ilerlemeler, ses bilimsel öğrenimle ilgili anlayışımızı önemli ölçüde derinleştirmiştir. Bu modeller, niceliksel, gürültülü ve tutarsız doğaya sahip doğal dil verilerinden öğrenebilir; gizli ses bilimsel yapıların açığa çıkarılmasına yardımcı olabilir; açık öğrenme kuramları ile gerçek dil verileri arasındaki boşluğu doldurarak, ses bilimsel bilginin edinimi ve çeşitlenmesi konularında derin içgörüler sunar [61].

3.3.1. Grafemden-Foneme (G2P) Dönüştürme

Grafemden-Foneme (G2P) dönüştürme, yazılı metni konuşma biçimine dönüştürmek için kullanılan bir tekniktir. Bu işlem, özellikle TTS ve ASR sistemlerinde kritik bir önem taşır. G2P dönüşümünün doğruluğu, yani yazılı metnin ses karşılığına ne kadar başarılı dönüştürülebildiği, söz konusu sistemlerin başarımını doğrudan etkiler.

G2P dönüşümünün başarısı, dilin özelliklerine, yönteme ve kullanılan verilere göre değişiklik gösterir. Her dilin kendine özgü ses sistemi ve söyleyiş kuralları olduğundan, G2P dönüşümünün karmaşıklığı ve doğruluğu bu kurallara bağlıdır. Örneğin, yazım ve söyleyiş arasındaki uyumun yüksek olduğu (yani yazım-ses uyumunun güçlü olduğu) Türkçe gibi dillerde, G2P dönüşümü genellikle daha basit ve daha yüksek doğrulukla gerçekleştirilebilmektedir [62].

G2P dönüşümünde kullanılan yöntemler de doğruluğu etkiler. Kural tabanlı yaklaşımlar, dil bilim uzmanlarının oluşturduğu kurallara dayanırken; veri odaklı yaklaşımlar, büyük veri kümeleri üzerinde eğitilmiş istatistiksel modellere başvurur. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları olup; kullanılan algoritmalar ile veri içeriğine göre doğruluk oranı değişmektedir. Veri odaklı modellerde, eğitim verisinin miktarı ve kalitesi büyük önem taşır. Daha kapsamlı ve temsil yeteneği yüksek veriler kullanıldığında, G2P doğruluğunun artması beklenir [63].

Görüldüğü üzere G2P dönüştürme, DDİ'deki ses bilimi uygulamalarının temelini oluşturmakta ve başarısı bu sistemlerin genel başarımını belirgin biçimde etkilemektedir. Doğruluğu artırmak için, dilin ses özelliklerini, kullanılan yöntemleri ve eğitim verisinin kalitesini göz önünde bulundurmak büyük önem taşır.

3.3.2. Levenshtein Uzaklığı

Levenshtein uzaklığı, bir dizgiyi (string) başka bir dizgiye dönüştürmek için gereken en az düzenleme işlemi (ekleme, silme, yerine koyma) sayısını ölçer. Mesafe değeri ne kadar düşükse, dizgiler arasındaki benzerlik o kadar yüksektir. DDİ'de sözcük veya cümlelerin benzerliğini ölçmek amacıyla sıkça kullanılır ve yazım denetimi, konuşma tanıma, bilgi erişimi gibi görevler için özellikle faydalıdır [64].

Örneğin, "masa" ve "kasa" sözcükleri arasındaki Levenshtein uzaklığı 1'dir. Burada tek bir düzenleme işlemi ("m" harfinin "k" harfiyle değiştirilmesi) yeterlidir.

Bu ölçü, bir sözcüğün yazılı biçimi ile söylenişi arasındaki benzerliği ölçmek için de uygulanabilir. Farklı söyleyişler arasındaki uzaklığı hesaplayarak, yazılı biçime hangi söyleyişin daha uygun olduğuna karar verilebilir. Bu bilgi, konuşma tanıma sistemlerinin doğruluğunu artırmak veya dil öğrenenlere söyleyiş konusunda yardımcı olmak amacıyla kullanılabilir [65].

Düzenleme uzaklığı algoritmaları DDİ'de yaygın biçimde kullanılır ve farklı sözcük veya cümle çiftleri için gereken işlem süresine bağlı olarak hesaplama karmaşıklığı analiz edilmiştir. Levenshtein, Jaro-Winkler, Soundex, N-grams ve Mahalanobis gibi çeşitli düzenleme uzaklığı yöntemleri, işlem süresiyle ilişkili karmaşıklık bakımından karşılaştırılmıştır [66].

Her ne kadar Levenshtein uzaklığı yazım denetimi ve konuşma tanıma gibi DDİ uygulamalarında dizgi benzerliğini ölçmek için basit ama etkili bir yöntem olsa da anlamsal benzerliği dikkate almaz. Bu nedenle, salt Levenshtein uzaklığı yeterli olmayıp, örneğin anlamsal analiz gibi diğer yöntemlerle de birleştirilerek kullanılmalıdır.

3.3.3. Entropi Tabanlı Ölçüler ve Tutarlılık İndeksi

Entropi tabanlı ölçüler ve tutarlılık indeksi, bir dilin ses yapısının karmaşıklığını ve düzenliliğini değerlendirmek için kullanılan önemli araçlardır. Entropi, bir sistemdeki belirsizlik veya rastgelelik düzeyini ölçer. Dil bilimde, bir dildeki ses veya hece dağılımının ne kadar öngörülemez olduğunu anlamak için kullanılır. Yüksek entropi, daha fazla belirsizlik veya rastgelelik olduğunu gösterir. Örneğin, İngilizce gibi yazım derinliği yüksek bir dil, Türkçe gibi yazım derinliği düşük bir dile görece daha yüksek entropi değerine sahip olacaktır.

Entropi tabanlı ölçüler, yazım-ses uyumunu da değerlendirebilir. Eğer bir dildeki her bir harf her zaman tek bir sese karşılık geliyorsa, dilin entropi değeri düşük olur. Tersi durumda, tek bir harf birden fazla sesi temsil ediyorsa ya da tek bir ses birden fazla harfle gösteriliyorsa, dilin entropi değeri yükselir.

Yazım ile söyleyiş arasındaki sistematik ilişkiyi yansıtan "yazımsal saydamlık" entropi ile bağlantılıdır. Yazımsal derinlik arttıkça entropi değerlerinin yükselme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmalar, yazımsal derinliğin entropiyi etkilediğini, ancak bu etkinin diller arasında tam olarak örtüşmeyen unsurlarla sınırlı kaldığını göstermektedir.

Tutarlılık indeksi, bir dildeki harf veya harf bileşimlerinin seslerle ne kadar düzenli eşleştiğini gösterir. Tutarlılık indeksi yüksek olan dillerde, yazılı sözcüklerin söyleyişleri daha öngörülebilir olduğu için DDİ modellerinin başarımı da yükselir. Örneğin, tutarlılık indeksi yüksek dillerde konuşma tanıma sistemleri daha iyi sonuçlar üretir ve TTS sistemleri daha doğal ve anlaşılır çıktılar sağlar.

DDİ uygulamalarında bu ölçüler farklı amaçlara hizmet edebilir. Entropi değeri düşük ve tutarlılık indeksi yüksek diller, modellenmesi daha kolay dillerdir. Yüksek yazım-ses uyumu, çeviri görevlerinde kaynak dildeki seslerin hedef dildeki karşılıklarıyla eşleştirilmesini de kolaylaştırır. Sonuç olarak, entropi tabanlı ölçüler ve tutarlılık indeksi, bir dilin ses yapısını analiz etmede ve anlamada değerli araçlardır. Bu metrikler, DDİ uygulamalarının başarımını artırmaya ve dil teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

3.4. Derin Öğrenme Modelleri ve Ses Bilimsel İşleme

Derin öğrenme modelleri, son yıllarda ses bilimsel işleme alanında merkezi bir konuma gelerek önemli başarılar elde etmiştir. Özellikle Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks – CNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory – LSTM) mimarileri, log-mel spektrogramlar veya ham dalga biçimi (raw waveforms) gibi özellik temsilleriyle farklı ses bilimsel görevlerde geniş kullanım alanı sunar. LSTM'ler, zaman serisi verilerini işleyebilme yetenekleri nedeniyle konuşma tanıma gibi uygulamalarda öne çıkmaktadır [67]. Ayrıca, ses işleme için özel tasarlanmış modellerin geliştirilmesi de yaygınlaşmış; konuşma tanıma, müzik bilgilendirme ve çevresel ses algılama gibi alanlarda daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmasını sağlamıştır. Derin öğrenme teknikleri, geleneksel yöntemlere kıyasla fonolojik süreçlerin daha derinlemesine analizine ve anlaşılmasına olanak tanıyarak önemli üstünlükler sunar [68].

Konuşma tanıma ve ses işleme alanlarındaki derin öğrenme başarıları, bu teknolojilerin araştırma potansiyelini artırmıştır. ASR sistemlerinde, derin öğrenme yöntemleri diğer makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla sürekli olarak daha yüksek doğruluk oranları sergileyerek sistemleri daha tutarlı ve güvenilir kılar. Derin öğrenmenin ses bilimsel işlemeye yönelik uygulamaları oldukça çeşitlidir. Otomatik konuşma tanıma, ses sentezi ve dönüştürme gibi görevlerde sıklıkla kullanılan bu modeller, çevresel ses tanıma, sesin kaynağını belirleme ve izleme gibi alanlarda da önemli katkılar sunar. Ayrıca, ses kaynağının ayrıştırılması (source separation) ve ses iyileştirme (audio enhancement) gibi görevlerde de derin öğrenme yöntemleri etkin biçimde kullanılır [67].

Derin öğrenme teknikleri, bireysel farklılıkları analiz etme veya ses dizilimi kuralları öğrenme gibi geniş bir yelpazede yenilikçi yaklaşımlar sunar. Bu teknikler, bir dili öğrenme, işleme ve ses bilimsel yapıları kullanma süreçlerinin daha kapsamlı anlaşılmasına katkıda bulunur. Derin öğrenmenin sağladığı dinamik yaklaşımlar ve hesaplamalı modelleme yöntemleri, okuma sürecinde fonolojik işlemenin rolü gibi kritik konulara da ışık tutar [69].

Sonuç olarak, derin öğrenme ve ses bilimsel işleme alanında dönüştürücü ilerlemeler sağlamış ve yeni araştırma alanlarının önünü açmıştır. CNN ve LSTM gibi modeller ve ses bilimsel görevlerde yüksek doğruluğa ulaşılmasını mümkün kılmıştır. Bununla birlikte veri çeşitliliği ve hesaplama gücü gibi konular, gelecekteki araştırmaların ele alması gereken önemli sorunlar olmaya devam etmektedir. Derin öğrenmenin ve ses bilimsel işlemeye uyarlanması genişletildikçe ve daha yenilikçi uygulamalar geliştirildikçe, bu alanın geleceği de şekillenmeye devam edecektir.

3.5. Ses Bilimsel İşlemeye Yönelik Dinamik Yaklaşımlar

Ses bilimsel işlemeye yönelik dinamik yaklaşımlar, dilin zamansal doğasına vurgu yapar. Bu yaklaşımlar, biçimbirimlerin ve işitsel hedeflerin zaman içinde dinamik olarak nasıl kontrol edildiğini ve yapılandırıldığını ele alır. Seri sıralama ve kontrol mekanizmalarının entegrasyonu, konuşma üretimi ve algısının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Bu bakış açısı, dilin akışkan ve kesintisiz niteliğini daha net biçimde kavramamızı sağlar [70].

3.6. Türk Dillerinde Ses Bilimi Çalışmaları

Türk dillerinin zengin ses yapısı ve ses özellikleri, DDİ alanında hem fırsatlar hem de zorluklar doğurmaktadır. Bu dillerin özgün ses sistemlerini doğru biçimde modellemek, ses uyumu, ünlü-ünsüz değişimleri gibi yapısal özellikler göz önünde bulundurulduğunda, dil teknolojileri için kritik önem taşır. Bu süreçte kullanılan abecenin rolü de belirleyicidir. Abece, bir dilin ses özelliklerini yazıya dökme konusunda köprü işlevi görür ve DDİ tabanlı uygulamalarda doğru temsil ile analiz için temel bir araçtır. Bu kapsamda Ortak Türk Abecesine geçiş sürecinde mutabık kalan ülkelerde yapılan ses çalışmalar incelenmiş; bu araştırmaların, söz konusu dillerin yapısal ve teknolojik gelişimine katkıları değerlendirilmiştir.

Türkçenin ses özelliklerine dayanan DDİ uygulamaları, metinlerin ses birimlere dönüştürülmesi, vurgu bilgisinin

çıkarılması ve biçim bilimsel çözümleme gibi konuları kapsamaktadır. Örneğin, Türkçenin eklemeli yapısı ve net ses bilimsel kuralları, konuşma tanıma ve transkripsiyon süreçlerini kolaylaştırır. Bununla birlikte, eklerin çeşitliliğinden kaynaklanan gelişmişlik nedeniyle, sözcük temelli bir yaklaşım yerine çoğunlukla biçimbirim temelli bir yöntem tercih edilir. Ayrıca vurgu, uzunluk, ses uyumu ve tonlama gibi üst dil bilimsel (suprasegmental) özellikler de DDİ uygulamalarında dikkate alınması gereken unsurlar arasında yer alır [71].

Kazakça üzerine yapılan DDİ çalışmaları, bu dilin ses ve biçim bilimsel yapısından kaynaklanan zorlukları ortaya koymaktadır. Nazerke Sultanova ve arkadaşları, Kazakçanın eklemeli doğasının, farklı biçim birimlerin sözcüklerle birleşmesi sürecini karmaşıklaştırdığını belirtmiştir [72]. Kazakçanın ses özelliklerinin doğru biçimde modellenmesi, DDİ sistemlerinin doğruluğunu artırma bakımından kritik önemdedir. Örneğin, Yerzhan Seitkulov ve ekibi, Kazakçanın ses yapısının istatistiksel özelliklerini analiz etmiş ve ses benzerliklerin doğru modellenmesinin DDİ sistemlerinin etkinliğini artıracağını vurgulamıştır [73].

Kırgızca üzerine yapılan araştırmalar, bu dilin akustik ve dil bilgisel özelliklerinin konuşma tanıma sistemlerine entegre edilmesi gerektiğini ortaya koyar. Örneğin, Kırgızcanın eklemeli yapısı ve ses özelliklerinin doğru modellenmesi, bu sistemlerin doğruluğunu iyileştirmede kritik bir adımdır [74].

Özbekçe üzerine yapılan çalışmalar, bu dilin ses yapısını DDİ sistemlerine entegre etme konusunda eksiklikler olduğunu göstermektedir. Mevcut araştırmalar, Özbekçenin özgün ses özelliklerini daha iyi yansıtan DDİ modellerine duyulan ihtiyacı vurgular [75]. Özellikle sözcüklerin yapısal ve ses özelliklerinin doğru analiz edilmesi, dil teknolojilerinin etkinliğini artırabilir.

Azerbaycan Türkçesi üzerine yürütülen DDİ araştırmaları, ses özelliklerin korunması ve dijital ortamlarda doğru biçimde temsil edilmesinin önemine işaret etmektedir. Örneğin, Alguliyev ve arkadaşları, Azerbaycan Türkçesinin ses yapısının korunmasının teknolojik entegrasyon sürecine katkı sağlayacağını öne sürmüştür [76].

Sonuç olarak, Türk dillerinin ses yapılarının doğru biçimde modellenmesi, DDİ uygulamalarının doğruluğunu ve etkinliğini artırmada kritik önemdedir. Ortak Türk Abecesi kullanımı, bu diller arasında yazı birliğini güçlendirirken aynı zamanda dil teknolojilerinin gelişimine de katkıda bulunur.

4. Tartışma

Bu çalışma, Türk dillerinde yazı-söyleyiş uyumunu ve Ortak Türk Abecesinin DDİ uygulamaları üzerindeki etkilerini ele alan kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Ortak Türk Abecesinin amacı, farklı Türk dillerinde zaten var olan sesleri tek bir abece aracılığıyla standartlaştırmaktır. Bu bağlamda x, ə, q, ñ ve û gibi harfler, tamamen yeni sesleri değil, belirli lehçelerde kullanılan sesleri temsil etmekte olup, ortak bir yazı sisteminde bu seslerin birleştirilmesini hedeflemektedir.

Her Türk dilinin kendine özgü bir abecesi ve ses yapısı bulunmakla birlikte, Ortak Türk Abecesinin hedefi, farklı lehçelerde aynı sesler için aynı harflerin kullanılmasını sağlamaktır. Bu standardizasyon, yazı-söyleyiş uyumunu güçlendirerek Türk toplulukları arasındaki yazılı iletişimi kolaylaştırır ve dil teknolojilerinde tutarlılık sağlar.

Türkçenin ses özelliklerinden yararlanan DDİ uygulamaları, metinlerin ses birimlere dönüştürülmesi, bürünsel bilginin çıkarılması ve biçimbilimsel analiz gibi konuları içermektedir. Örneğin, Türkçenin eklemeli yapısı ve belirgin ses bilimsel kuralları, konuşma tanıma ve metinden konuşma üretimi gibi süreçleri kolaylaştırır. Bununla birlikte, eklerin çeşitliliğinden kaynaklanan karmaşıklık nedeniyle, sözcük odaklı bir yaklaşım yerine biçimbirim temelli bir yönteme ihtiyaç duyulmaktadır. Vurgu, uzunluk, ses uyumu ve tonlama gibi üst dilbilimsel özellikler de DDİ uygulamalarında dikkate alınması gereken diğer etmenlerdir [71].

Ortak Türk Abecesinin temel amacı, farklı lehçelerde mevcut seslerin yazıda temsilini tutarlı hâle getirmektir. Bu yaklaşım, hiçbir lehçeye yeni bir ses eklemez; aksine, var olan seslerin farklı Türk dillerinde aynı harflerle gösterilmesini sağlar. Böylece DDİ algoritmaları ve dil teknolojileri, Türk dillerinin ses yapılarını daha tutarlı ve doğru şekilde işleyebilir.

DDİ bağlamında, Ortak Türk Abecesi konuşma tanıma, TTS ve makine çevirisi gibi teknolojileri iyileştirme potansiyeline sahiptir. Ancak somut sonuçlar elde edebilmek için yeni veri kümeleri geliştirilmeli ve mevcut DDİ modelleri bu verilerle yeniden eğitilmelidir. Yazı-söyleyiş uyumunu geliştirmeye yönelik yeni metriklerin ve algoritmaların geliştirilmesi de Türk dillerinin dijitalleşmesine önemli ölçüde katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, Ortak Türk Abecesi Türk dillerinin dijitalleşmesi, yazı-söyleyiş uyumunun artırılması ve DDİ uygulamaları açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Bu potansiyelin tam olarak değerlendirilebilmesi için daha kapsamlı veri kümelerine ve uygulamalı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

5. Çalışmanın Etkileri

5.1. Kuram ve Araştırma Boyutu

Bu çalışma, Türk dillerinin ses yapısını DDİ uygulamalarında doğru ve tutarlı biçimde temsil etmek üzere kuramsal bir çerçeve sunmaktadır. Bu çerçevede, Ortak Türk Abecesinin rolü, farklı Türk dillerinde zaten var olan aynı seslerin tek bir yazı sistemi altında standartlaştırılmasına dayanır. x, ə, q, ñ ve û gibi harflerin kullanımı, herhangi bir dile yeni sesler kazandırmak yerine, var olan sesleri tutarlı bir biçimde ifade etmeyi hedefleyerek yazılı iletişimi güçlendirir ve dil teknolojilerinde veri bütünlüğünü sağlar.

Bu yaklaşım, özellikle sesli yardımcılar, konuşma tanıma ve makine çevirisi gibi DDİ uygulamalarında Türk dillerinin ses özelliklerinin doğru biçimde modellenmesini kolaylaştırır. Ses çeşitliliğin dijital platformlara dâhil edilmesiyle, bu sistemlerin başarımı ve kapsayıcılığı artırılabilir. Böylelikle çalışma, az kaynaklı Türk dillerinin dijitalleştirilmesi hedefine yönelik yeni veri kümeleri ve stratejiler geliştirilmesi için yol gösterici bir çerçeve sunar.

Ayrıca TTS ve ASR gibi teknolojilerde, ses yapıların doğru biçimde temsil edilmesi bu sistemlerin kesinlik ve verimliliğini artırabilir. Dolayısıyla bu çalışma, Türk dillerinin ses zenginliğini yansıtan DDİ sistemlerinin geliştirilmesi için kuramsal bir temel oluşturur ve akademik araştırmaların yanı sıra pratik dil teknolojisi uygulamaları için de yeni ufuklar açar.

5.2. Uygulamalı Çıkarımlar

Bu çalışmanın uygulamaya dönük katkıları, Türk dillerinin dijitalleşmesi ve dil teknolojilerinin ilerlemesi için önemli fırsatlar sunar. Ortak Türk Abecesinin DDİ uygulamalarında ölçünleştirilmiş biçimde kullanılması, Türk dilleri arasında yazılı iletişimi güçlendirerek bütüncül bir dijital altyapının temelini atar. Bu öncünleme eğitim, bilimsel araştırma ve ticari uygulamalar gibi çeşitli alanlarda teknolojik entegrasyonu destekler.

Ortak Türk Abecesinin kullanılmasının, sesli yardımcılar, konuşma tanıma ve otomatik çeviri sistemleri gibi teknolojilerde daha doğal ve kullanışlı deneyimler sunması beklenmektedir. Türk dillerinin dijital platformlarda doğru biçimde temsil edilmesi, metin analizi, duygu analizi ve anlamsal arama gibi DDİ görevlerinin kesinliğini artırır. Bu gelişmeler az kaynaklı Türk dillerinin dijitalleşmesini hızlandırarak dil teknolojilerinde ilerlemeye katkı sunar.

Ayrıca ortak bir abece, ortak eğitim materyallerinin oluşturulmasını kolaylaştırarak dil öğretimini daha erişilebilir hale getirir ve Türk dünyasında kültürel paylaşımı teşvik eder. Eğitimde ve kültürel işbirliğinde kaydedilecek bu ilerleme, yalnızca dil öğrenimini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda Türk toplulukları arasındaki bağları da güçlendirir.

5.3. Gelecek Potansiyeller ve Yönelimler

Bu çalışma, Ortak Türk Abecesinin ilerideki DDİ uygulamalarında sunabileceği önemli fırsatları ve olası yönelimleri gözler önüne sermektedir. Ortak Türk Abecesine uyumlu yeni metin veri kümelerinin oluşturulması, Türk dilleri için daha kapsamlı ve çeşitli bir dilsel kaynak sağlamaya yardımcı olacaktır. Bu veri kümeleri, az kaynaklı dillerin dijitalleşmesini destekleyerek, bu dillere özgü DDİ uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanır.

Türk dillerinin ses ve yazım sistemlerini doğru bir şekilde yansıtan çok dilli dil modellerinin geliştirilmesi, konuşma tanıma, TTS ve makine çevirisi gibi uygulamaların başarımını artırabilir. Böylelikle Türk dilleri arasında daha etkili iletişim sağlanır ve uluslararası dijital platformlarda daha güçlü bir temsil imkânı doğar.

Ayrıca, yazı-söyleyiş uyumunu iyileştirmeye yönelik yeni DDİ algoritmaları ve ölçülerin tasarlanması, Türk dillerine özgü gelişmiş ses yapıları daha verimli biçimde işleyebilen dil modelleri geliştirilmesine katkı sağlar. Ortak Türk Abecesinin dil öğrenme platformlarına entegrasyonu da dil edinimine destek olacak ve eğitimde yapay zekâ teknolojilerinin yaygınlaşmasını teşvik edecektir. Bu yaklaşım, Türk dünyasında dil öğretiminin modernleşmesini hızlandırırken, ortak bir dil kimliğinin oluşmasına da katkıda bulunur.

6. Sonuç

Bu çalışma, Türk dillerinde yaygın olarak kullanılan x, ə, q, ñ ve û harflerinin ölçünlü bir abece çerçevesine oturtulmasının, yazı-söyleyiş uyumunu güçlendirmede ve ses çeşitliliği DDİ uygulamalarında daha doğru biçimde temsil etmede önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Çalışmada, ses temelli DDİ araştırmalarının odağa alınmasıyla, her bir Türk diline özgü ses yapılarının dijital sistemlerde yansıtılmasının değeri vurgulanmaktadır. Bu harfler, yeni sesleri tanıtmak yerine, farklı Türk dillerinde zaten var olan sesleri tutarlı bir şekilde göstermeyi amaçladığından ortografik birliği artırma potansiyeline sahiptir.

Ayrıca çalışma, ses ayrıntıların daha iyi yakalanması için yazım ölçünlenmesinin geniş kapsamlı etkilerine dikkat çekmekte ve yazılı-sözlü biçimler arasındaki uyumun geliştirilmesinin, konuşma tanıma, metinden konuşma üretimi, makine çevirisi ve duygu analizi gibi DDİ görevlerinde başarımı yükseltebileceğini öne sürmektedir. Mevcut çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, bu yönde yeni algoritmalar ve ölçüler tasarlayarak az kaynaklı Türk dillerinin dijitalleşmesinin hızlandırılabileceği ve bu dillerin uluslararası dijital platformlarda temsilinin güçlendirilebileceği öngörülmektedir.

Eğitim ve kültürel açıdan, ortak bir abece kullanımı, dil öğrenme materyallerinin hazırlanması ve yayılmasını kolaylaştırarak Türk dünyasında daha etkili öğretimi destekleyebilir. Böylece ortak bir dil kimliğinin pekişmesine katkı sağlanırken, yapay zekâ tabanlı dil eğitim platformlarının benimsenmesiyle Türk dillerinin küresel dijital ortamlarda görünürlüğü ve erişilebilirliği de artacaktır.

Sonuç olarak, ses çeşitliliği standart biçimde temsil etmeye yönelik bu yaklaşım, Türk dillerinin dijital evrimi adına önemli bir sıçrama noktasıdır. Yapılan değerlendirmeler ve literatürdeki çalışmalara dayanarak hem algoritmaların hem de ölçülerin geliştirilmesiyle bu potansiyelin daha da güçlendirilebileceği yorumlanmaktadır. Böylelikle eğitim, kültürel etkileşim ve teknolojik entegrasyon süreçleri ivme kazanacak; yazı ile konuşma arasındaki köprü işlevi gören bu abece standardizasyonu, yalnızca farklı Türk dillerini ortak bir yazım çatısı altında birleştirmekle kalmayıp, DDİ ve ilişkili alanlarda yenilikçi araştırmalara ve uygulamalara da zemin hazırlayacaktır.

Kaynakça

[1] Davenport, M., Hannahs, S. J. Introducing Phonetics and Phonology (4th ed.), Routledge, 2020.

[2] Bar-Yosef, Y., Aloni-Lavi, R., Opher, I., Lotner, N., Tetariy, E., Silber-Varod, V., Moyal, A. Automatic learning of phonetic mappings for cross-language phonetic-search in keyword spotting, 2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEE, 2012, pp. 1-5.

[3] Hanumanthappa, M., Rashmi, S., Jyothi, N. M. Impact of Phonetics in Natural Language Processing: A Literature Survey, IIJISET–International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1(3), 2014.

[4] Lewis, G. The Turkish Language Reform: A Catastrophic Success, Oxford University Press, 1999.

[5] Shoibekova, G. B., Odanova, S. A., Sultanova, B. M., Yermekova, T. N. Vowel Harmony is a Basic Phonetic Rule of the Turkic Languages, Interdisciplinary Journal of Environmental and Science Education, 2016.

[6] Choi, H., Choi, M., Kim, S., Lim, Y., Lee, M., Yun, S., Kim, S. H. Spoken-to-written text conversion for enhancement of Korean–English readability and machine translation, ETRI Journal, 46(1), 127-136, 2024.

[7] Cedden, G., Aydın, Ö. Do non-native languages have an effect on word order processing in first language Turkish?, International Journal of Bilingualism, 23(4), 804-816, 2019.

[8] Reed, M., Levis, J. M. The handbook of English pronunciation, John Wiley & Sons, 2019.

[9] Ocal, T., Ehri, L. Spelling pronunciations help college students remember how to spell difficult words, Reading and Writing, 30, 947-967, 2017.

[10] Chiang, C. Y., Li, W. H., Lin, Y. T., Su, J. J., Chen, W. C., Kao, C. C., Chen, S. H. The Speech Labeling and Modeling Toolkit (SLMTK) Version 1.0, 2022 25th Conference of the Oriental COCOSDA International Committee for the Co-ordination and Standardisation of Speech Databases and Assessment Techniques (O-COCOSDA), IEEE, 2022, pp. 1-5.

[11] Jurafsky, D., Martin, J. H. Speech and Language Processing (3rd ed.), Prentice Hall, 2000.

[12] Yu, M., Nguyen, H. D., Sokolov, A., Lepird, J., Sathyendra, K. M., Choudhary, S., Kunzmann, S. Multilingual grapheme-to-phoneme conversion with byte representation, ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE, 2020, pp. 8234-8238.

[13] Yang, J., McCandliss, B. D., Shu, H., Zevin, J. D. Simulating language-specific and language-general effects in a statistical learning model of Chinese reading, Journal of Memory and Language, 61(2), 238-257, 2009.

[14] Schmidtke, D., Conrad, M. Effects of affective phonological iconicity in online language processing: Evidence from a letter search task, Journal of Experimental Psychology: General, 147(10), 1544, 2018.

[15] Oflazer, K. Spelling correction in agglutinative languages, arXiv preprint cmp-lg/9410004, 1994.

[16] Hmooda, S. S., Jasimb, B. H. A Study of the Syntactic Phonological Interface in English Sentence Form, 2020.

[17] Çöltekin, Ç. Improving successor variety for morphological segmentation, LOT Occasional Series, 16, 13-28, 2010.

[18] Oflazer, K. Turkish and its challenges for language processing, Language Resources and Evaluation, 48, 639-653, 2014.

[19] Atabey, İ. Türkçe-Yazı İlişkisi ve Bağımsızlıklarının 30. Yılında Türk Cumhuriyetlerinde Abece, International Journal of Volga-Ural and Turkestan Studies, 6(2), 207-220, 2024.

[20] Common Turkic alphabet. Wikipedia, Erişim Tarihi: 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Common_Turkic_alphabet.

[21] Dees, J. Non-uniformity in phonologizing phase heads: Evidence from Kazakh, Proceedings of the Workshop on Turkic and Languages in Contact with Turkic, 2023.

[22] Aliyeva, E. Yeni Uygur Türkçesinin Dil Özellikleri ve Azerbaycan Türkçesiyle Ortaklıklar, Akademik Tarih ve Düşünce Dergisi, 9(2), 484-499, 2022.

[23] Seddiq, Y., Alotaibi, Y. A., Selouani, S. A., Meftah, A. H. Distinctive phonetic features modeling and extraction using deep neural networks, IEEE Access, 7, 81382-81396, 2019.

[24] Huang, Z., Epps, J., Joachim, D., Sethu, V. Natural language processing methods for acoustic and landmark event-based features in speech-based depression detection, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 14(2), 435-448, 2019.

[25] Kukanov, I., Trong, T. N., Hautamäki, V., Siniscalchi, S. M., Salerno, V. M., Lee, K. A. Maximal figure-of-merit framework to detect multi-label phonetic features for spoken language recognition, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 28, 682-695, 2020.

[26] Nair, J., Ahammed, R. English to Indian Language and Back Transliteration with Phonetic Transcription for Computational Linguistics Tools based on Conventional Transliteration Schemes, 2021 Fourth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), IEEE, 2021, pp. 1-6.

[27] Vykhovanets, V. S., Du, J., Sakulin, S. A. An overview of phonetic encoding algorithms, Automation and Remote Control, 81, 1896-1910, 2020.

[28] Kavros, A., Tzitzikas, Y. SoundexGR: An algorithm for phonetic matching for the Greek language, Natural Language Engineering, 29(5), 1305-1340, 2023.

[29] El-Imam, Y. A., Don, Z. M. Rules and algorithms for phonetic transcription of standard Malay, IEICE Transactions on Information and Systems, 88(10), 2354-2372, 2005.

[30] Almeida, G. A. D. M. Using phonetic knowledge in tools and resources for Natural Language Processing and Pronunciation Evaluation, Doktora Tezi, Universidade de São Paulo, 2016.

[31] Żelasko, P., Moro-Velázquez, L., Hasegawa-Johnson, M., Scharenborg, O., Dehak, N. That sounds familiar: an analysis of phonetic representations transfer across languages, arXiv preprint arXiv:2005.08118, 2020.

[32] Nazarov, A. I. Learning phonetically and phonologically natural classes through constraint indexation, Proceedings of the Annual Meetings on Phonology, 2021.

[33] Fang, A., Filice, S., Limsopatham, N., Rokhlenko, O. Using phoneme representations to build predictive models robust to ASR errors, Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, ACM, 2020, pp. 699-708.

[34] Koffi, E. A tutorial on acoustic phonetic feature extraction for automatic speech recognition (ASR) and text-to-speech (TTS) applications in African languages, Linguistic Portfolios, 9(1), 11, 2020.

[35] Lee, C. Y., Zhang, Y., Glass, J. Joint learning of phonetic units and word pronunciations for ASR, Proceedings of the 2013 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2013, pp. 182-192.

[36] Żelasko, P., Feng, S., Velazquez, L. M., Abavisani, A., Bhati, S., Scharenborg, O., Dehak, N. Discovering phonetic inventories with crosslingual automatic speech recognition, Computer Speech & Language, 74, 101358, 2022.

[37] Ungurean, C., Burileanu, D. An advanced DDİ framework for high-quality Text-to-Speech synthesis, 2011 6th Conference on Speech Technology and Human-Computer Dialogue (SpeD), IEEE, 2011, pp. 1-6.

[38] Kurihara, K. Phonetic and Prosodic Features for Sequence-to-Sequence Acoustic Modeling on Japanese Text-to-Speech and Their Estimation, 2024.

[39] Mukit, M., Rabbi, M. M. H., Ahmed, M. M., Latif, S., Saha, S. Sentiment Analysis on Bangla and Phonetic Bangla Reviews: A Product Rating Procedure using DDİ and Machine Learning, 2023 IEEE 9th International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), IEEE, 2023, pp. 433-437.

[40] Peng, H., Ma, Y., Poria, S., Li, Y., Cambria, E. Phonetic-enriched text representation for Chinese sentiment analysis with reinforcement learning, Information Fusion, 70, 88-99, 2021.

[41] Kabir, M. M., Mridha, M. F., Shin, J., Jahan, I., Ohi, A. Q. A survey of speaker recognition: Fundamental theories, recognition methods and opportunities, IEEE Access, 9, 79236-79263, 2021.

[42] Ohi, A. Q., Mridha, M. F., Hamid, M. A., Monowar, M. M. Deep speaker recognition: Process, progress, and challenges, IEEE Access, 9, 89619-89643, 2021.

[43] Becerra, A., De La Rosa, J. I., González, E. Speech recognition in a dialog system: From conventional to deep processing: A case study applied to Spanish, Multimedia Tools and Applications, 77, 15875-15911, 2018.

[44] Wilks, Y., Catizone, R., Worgan, S., Turunen, M. Some background on dialogue management and conversational speech for dialogue systems, Computer Speech & Language, 25(2), 128-139, 2011.

[45] Kumar, A., Pratap, A., Singh, A. K. Generative adversarial neural machine translation for phonetic languages via reinforcement learning, IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 7(1), 190-199, 2022.

[46] Kumar, A., Parida, S., Pratap, A., Singh, A. K. Machine translation by projecting text into the same phonetic-orthographic space using a common encoding, Sādhanā, 48(4), 238, 2023.

[47] Hanumanthappa, M., Rashmi, S., Reddy, M. V. Metrics for evaluating phonetics machine translation in Natural Language Processing through modified Edit Distance algorithm-A naive approach, 2015 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), IEEE, 2015, pp. 1-7.

[48] Randhawa, E. S., Saroa, E. C. Study of spell checking techniques and available spell checkers in regional languages: a survey, International Journal For Technological Research In Engineering, 2(3), 148-151, 2014.

[49] Tan, M., Chen, D., Li, Z., Wang, P. Spelling error correction with BERT based on character-phonetic, 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), IEEE, 2020, pp. 1146-1150.

[50] Doshi, F., Gandhi, J., Gosalia, D., Bagul, S. Normalizing text using language modelling based on phonetics and string similarity, arXiv preprint arXiv:2006.14116, 2020.

[51] Sundararaman, M. N., Kumar, A., Vepa, J. Phoneme-bert: Joint language modelling of phoneme sequence and asr transcript, arXiv preprint arXiv:2102.00804, 2021.

[52] Tsvetkov, Y., Sitaram, S., Faruqui, M., Lample, G., Littell, P., Mortensen, D., Dyer, C. Polyglot neural language models: A case study in cross-lingual phonetic representation learning, arXiv preprint arXiv:1605.03832, 2016.

[53] Buetler, K., Rodríguez, D., Laganaro, M., Müri, R., Nyffeler, T., Spierer, L., Annoni, J. Balanced bilinguals favor lexical processing in their opaque language and conversion system in their shallow language, Brain and Language, 150, 166-176, 2015.

[54] Marjou, X. OTEANN: Estimating the Transparency of Orthographies with an Artificial Neural Network, arXiv preprint arXiv:1912.13321, 2019.

[55] Wagner, R., Torgesen, J. The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills, Psychological Bulletin, 101, 192-212, 1987.

[56] Mitchell, J. Comprehensive Test of Phonological Processing, Assessment for Effective Intervention, 26, 57-63, 2001.

[57] Torgesen, J., Wagner, R., Rashotte, C. Longitudinal Studies of Phonological Processing and Reading, Journal of Learning Disabilities, 27, 276-286, 1994.

[58] Yang, X., McBride, C. How do phonological processing abilities contribute to early Chinese reading and mathematics?, Educational Psychology, 40, 893-911, 2020.

[59] Schoenel, A., Escarce, A., Araújo, L., Lemos, S. Influence of phonological processing on poor school performance: systematic literature review., CoDAS, 32(5), e20180255, 2020.

[60] Werfel, K., Hendricks, A. The Contribution of Phonological Processing to Reading and Spelling in Students With Cochlear Implants., Language, Speech, and Hearing Services in Schools, 1-14, 2023.

[61] Jarosz, G. Computational Modeling of Phonological Learning, Annual Review of Linguistics, 2019.

[62] Koşaner, Ö., Birant, Ç. C., Aktaş, Ö. Improving Turkish language training materials: Grapheme-to-phoneme conversion for adding phonemic transcription into dictionary entries and course books, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 103, 473-484, 2013.

[63] Altinok, D. Towards Turkish ASR: Anatomy of a rule-based Turkish g2p, arXiv preprint arXiv:1601.03783, 2016.

[64] Al-Bakry, P., Al-Rikaby, M. Enhanced Levenshtein Edit Distance Method functioning as a String-to-String Similarity Measure, (Yayın bilgisi kısmi), 1, 48-54, 2016.

[65] Greenhill, S. Levenshtein Distances Fail to Identify Language Relationships Accurately, Computational Linguistics, 37, 689-698, 2011.

[66] Maarif, H., Akmeliawati, R., Htike, Z., Gunawan, T. Complexity Algorithm Analysis for Edit Distance, 2014 International Conference on Computer and Communication Engineering, IEEE, 2014, pp. 135-137.

[67] Purwins, H., Li, B., Virtanen, T., Schlüter, J., Chang, S., Sainath, T. Deep Learning for Audio Signal Processing, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 13, 206-219, 2019.

[68] Nassif, A. B., Shahin, I., Attili, I., Azzeh, M., Shaalan, K. Speech recognition using deep neural networks: A systematic review, IEEE Access, 7, 19143-19165, 2019.

[69] Otter, D., Medina, J., Kalita, J. A Survey of the Usages of Deep Learning for Natural Language Processing, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 32, 604-624, 2020.

[70] Hatfield, H. Dynamic Approaches to Phonological Processing, 2023.

[71] Adalı, E. The Logic of Turkish Language for DDİ, Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies, 2(2), 2024.

[72] Sultanova, N., Kessikbayeva, G., Amangeldi, Y. Kazakh Language Open Vocabulary Language Model with Deep Neural Networks, 2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), IEEE, 2019, pp. 1-4.

[73] Seitkulov, Y. N., Boranbayev, S. N., Yergaliyeva, B. B., Atanov, S. K., Davydau, H. V., Patapovich, A. V. The base of speech structural units of Kazakh language for the synthesis of speech-like signals, 2018 IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), IEEE, 2018, pp. 1-4.

[74] Stern, N. Z., Washington, J. N. A phonetic study of length and duration in Kyrgyz vowels, Proceedings of the Workshop on Turkic and Languages in Contact with Turkic (Vol. 4), 119-131, 2019.

[75] Azimov, I. M. The problem of vowels in the Uzbek language, The American Journal of Social Science and Education Innovations, 5(04), 73-81, 2023.

[76] Alguliyev, R., Jafarov, Y., Aliguliyev, R. ICT problems of the Azerbaijani language, the Azerbaijani language problems of ICT, environment, 15(2), 3-13, 2024.

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

6 Şubat 2023 Depremi Üzerine X (Twitter) Verilerinin Konu İncelemesi: LDA ve BERTopic Yaklaşımlarının Karşılaştırması

Topic Analysis of X (Twitter) Data on the February 6, 2023 Earthquake: A Comparison of LDA and BERTopic Approaches

Dilara CANDAN KARADAŞ
Atatürk Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği
Erzurum – Türkiye
dilarac@atauni.edu.tr
ORCID: 0009-0005-6465-9642

Tolga AYDIN
Atatürk Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği
Erzurum – Türkiye
atolga@atauni.edu.tr
ORCID: 0000-0002-8971-3255

Gülşah TÜMÜKLÜ ÖZYER
Atatürk Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği
Erzurum – Türkiye
gulsah.ozyer@atauni.edu.tr
ORCID: 0000-0002-0596-0065

Öz

6 Şubat 2023'te Türkiye ve Suriye'yi etkileyen, insanların hayatını kaybetmesine ve yıkıma yol açan depremler, bölgesel ve küresel çapta insani yardım ve kriz yönetimi süreçlerini başlatmıştır. Çalışmada, bu depremle ilgili X (Twitter) platformundan toplanan 29.185 veri incelenmiştir. Zaman içerisindeki konuların değişimini ve en çok konuşulan başlıkları belirlemek için Latent Dirichlet Allocation (LDA) ve BERTopic yöntemleri kullanılmıştır. LDA, afet bölgesindeki yardım çağrıları, bağışlar ve enkaz kurtarma gibi geniş kapsamlı konuları öne çıkarırken; BERTopic, konu detaylandırma ve ayrıştırmada daha başarılı sonuçlar vermiştir. Analizler, konuşulan konuların özellikle ilk iki günde yoğun olduğunu, sonraki günlerde ise dikkatlerin farklı noktalara kaydığını göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, sosyal medya verilerinin afet yönetiminde kritik bir bilgi kaynağı olduğunu vurgulamakta ve yayınlara hem yöntemler arasındaki fark hem de kriz analitiği açısından anlamlı bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: 6 Şubat 2023 depremi, LDA, BERTopic

Abstract

The earthquakes that affected Türkiye and Syria on February 6, 2023, resulted in the loss of lives and widespread destruction, triggering regional and global humanitarian aid and crisis management processes. In this study, 29,185 data points collected from the X (Twitter) platform related to this earthquake were analyzed. Latent Dirichlet Allocation (LDA) and BERTopic methods were employed to identify the evolution of topics over time and the most frequently discussed issues. While LDA highlighted broad themes such as calls for aid, donations, and search and rescue efforts in the affected regions, BERTopic yielded more successful results in detailing and differentiating topics. The analyses revealed that discussions were particularly intense during the first two days, with attention shifting to different issues in the subsequent days. The findings of this study emphasize that social media data serve as a critical source of information in disaster management, offering a meaningful contribution to the literature both in terms of methodological differences and crisis analytics.

Keywords: February 6 2023 Earthquake, LDA, BERTopic

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 09.02.2025 - 03.04.2025 – 22.04.2025
Makale türü: Araştırma

1. Giriş

Depremler, tarih boyunca milyonlarca insanın yaşamını etkileyerek toplumsal, ekonomik ve çevresel açıdan ciddi krizlere neden olmuştur. 6 Şubat 2023'te Türkiye ve Suriye'yi etkileyen Kahramanmaraş merkezli depremler, 50 binden fazla insanın hayatını kaybetmesine, milyonlarca kişinin yerinden edilmesine ve geniş çaplı bir insani krize yol açmıştır. Bu tür afetlerde, sosyal medya platformları bilgi paylaşımı, yardım çağrıları ve toplumun duygusal durumunun ifade edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kaynaklarda, sosyal medya analizlerinin afet yönetimindeki potansiyelini ele alan birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin yapılan bir çalışma, 6 Şubat 2023 Türkiye depremlerinden sonraki 15 günlük dönemde halkın sosyal medya kullanımını incelemiştir. Türkiye'de yaşayan 1698 kişiden anketle toplanan veriler, sosyal medyanın bilgi paylaşımı için güçlü bir kaynak olarak kullanıldığını göstermiştir. Afetler bağlamında sosyal medyanın önemi son yıllarda giderek artmakta ve kaçınılmaz

bir rol üstlendiği görülmektedir [1]. Özellikle kriz durumlarında, sosyal medyanın haber alma kaynağı olarak giderek daha fazla tercih edildiği gözlemlenmektedir [2]. Ayrıca sosyal medyanın, kriz anlarında müdahale süreçlerine katkısı ve toplulukların iyileşme sürecindeki etkisi, araştırmacıların dikkatini çeken önemli bir konu haline gelmiştir [3]. Depremlerin zararlarını ve yardımları içeren paylaşımlar bazı katılımcılarda olumsuz duygular yaratırken, sosyal medya fenomenleri ve STK'ların (Sivil Toplum Kuruluşlarının) paylaşımları sosyal medyanın faydalı olduğunu düşündürmüştür. Çalışma, kriz yönetiminde sosyal medya kullanımının etkinliğini artırmak için kullanıcı geri bildirimlerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır [4].

Yaşanan bir krizin ardından olayın ciddiyetine ve büyüklüğüne bağlı olarak toplumun bu olayı nasıl değerlendirdiği sosyal medya verilerinin analizi ile incelenebilmektedir. Bir çalışmada HAARP (Yüksek Frekanslı Etkin Aurora Araştırma Programı) komplo teorisini analiz ederek, bu teorinin söyleminin zamanla nasıl değiştiğini ve dikkat artışını tetikleyen faktörleri araştırmaktadır. 2022 Ocak ile 2023 Mart arasında X API'si (Uygulama Programlama Arayüzü) ile HAARP hakkında bir milyondan fazla tweet toplanmış ve 6 Şubat 2023'teki Türkiye-Suriye depremi öncesi, sırası ve sonrasındaki tweetler üzerinde duygu analizi yapılmıştır. Çalışma, büyük depremlerin ardından HAARP tartışmalarının arttığını ve olumlu tweet duyguları ile tweet sayısının pozitif ilişkili olduğunu bulmuştur. Bu durum, sosyal medyanın krizlerde komplo teorilerine olan inancı pekiştirdiğini göstermektedir [5].

Sadece deprem özelinde kalmayıp farklı kriz durumları üzerinde de sosyal medya verileri üzerinden analizler yapılarak bazı çıkarımlar elde edilmiştir. Bu duruma örnek olarak yapılan bir çalışmada Sina Weibo verilerini kullanarak Pekin-Tianjin-Hebei bölgesindeki "23·7" aşırı yağış olayını analiz etmiş ve BERTopic, BERT, NER (Named Entity Recognition), duygu analizi ve afet zarar sözlükleri gibi yöntemleri entegre etmiştir. Çalışmada, Weibo'daki "yardım çağrıları" ve "afet zararları" gibi konular aracılığıyla potansiyel afet bölgelerinin belirlenmesi ve zararların değerlendirilmesi incelenmiştir. Duygu analizi ve zarar sözlükleri kullanılarak afetlerin psikolojik ve fiziksel etkileri nicel olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, aşırı yağış koşullarına duyarlılığı göstererek belediye düzeyinde zararları analiz etmiş ve afet zararlarının hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için etkili bir yöntem sunmuştur. Geleneksel afet verilerinin yerini tamamen alamasa da Sina Weibo verilerinin afet olaylarını hızlı tanımlama ve raporlama açısından benzersiz bir değer taşıdığı vurgulanmıştır [6].

Sosyal medya, yalnızca doğal afetler değil, toplumsal olarak önemli görülen her konuda bilgi paylaşımının yanı sıra, halkın duygusal tepkilerini anlamak ve toplumda konuşulan konuların değişimini analiz etmek için de etkili bir araçtır. Örneğin yapılan bir çalışmada Birleşik Krallık'taki ana akım medyadan elde edilen sosyal medya verileri kullanılarak, plastikler hakkındaki kamuoyu algıları analiz edilmiştir. LDA tabanlı gözetimsiz makine öğrenimi modeli ve bir sözlük yöntemi, yorumların duygusunu değerlendirmek için uygulanmıştır. Çalışma, plastiklerle ilgili 6 birinci düzey ve 13 ikinci düzey konu kategorisi belirlemiştir. Sonuçlar, halkın plastik ürünlere yönelik tutumunun genel olarak istikrarlı olduğunu ve duyguların zamansal ve mekânsal dağılımının, konuların sıklığıyla yüksek oranda ilişkili olduğunu göstermektedir [7].

Yapılan çalışmalar, kullanılan yöntemlerin sadece tek tür kriz odaklı ve tek bir amaca hizmet eden çalışmalar olmadığını; aynı zamanda çok dilli veri kümelerinde de başarılı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar, kriz dönemlerinde çok dilli konu dinamiklerini ve iletişim trendlerini çözümlemek için yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Tunus sosyal ağlarındaki pandemi, spor ve siyasetle ilgili diyaloglar analiz edilmiş, çok dilli bir veri kümesi toplanarak işlenmiştir. Dil farklılıklarını ele almak için No-English-to-English Makine Çevirisi yöntemi kullanılmıştır. LDA ve HDP (Hierarchical Dirichlet Process) modelleriyle önemli konular çıkarılmış, ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) zaman serisi analiziyle konu trendleri incelenmiştir. Bu yöntem, kamuoyu duygularını yansıtan anahtar konuları başarıyla belirlemiş ve uyum puanı gibi metriklerle standart yaklaşımlardan daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, tartışmalardaki konusal değişimler ve trendler doğru bir şekilde tespit edilmiştir [8].

Bu çalışma, konu belirlemeye yönelik araştırmalara bir katkı olarak, X verileri üzerinden felaket etkilerini hızlı bir şekilde tespit etmeye yönelik bir çerçeve sunmaktadır. Anahtar sözcük ve konum filtreleme gibi yöntemlerle X verileri işlenmiş ve BERT tekniği kullanılarak felaket bölgelerinden gelen tweetler kategorize edilmiştir. Analiz, toplam 376 konu belirlemiş, bunların 196'sının felaket etkileriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu etkiler arasında elektrik kesintileri, yol kapanmaları, su basan yollar ve altyapı hasarları gibi unsurlar yer almaktadır. Çalışma, acil durum yönetimi için değerli bilgiler sağlayacak bir yöntem sunmaktadır [9].

Sonuç olarak, yayınlarda sosyal medya verilerinin afet yönetimi, bilgi paylaşımı ve toplumun duygusal tepkilerini anlamada önemli bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Hem geleneksel yöntemler olan LDA gibi modellerin hem de BERTopic gibi modern tekniklerin farklı kriz durumlarında etkili sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır. Bu bağlamda, 6 Şubat 2023 depremleri üzerine yapılan analizler, sosyal medya platformlarının kriz yönetiminde nasıl kullanılabileceğini anlamak için kritik bir zemin oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremin ardından sosyal medyada tartışılan konuların, sonraki beş günlük süreçteki değişimini analiz etmektir. Analizlerde, konu modelleme yöntemlerinden BERTopic ve LDA kullanılarak, kriz dönemlerinde toplumsal ilgi ve odaklanmanın konusal olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmanın bir diğer önemli hedefi, bu iki yöntemin benzer amaçlarla kullanılmalarına rağmen, farklı algoritmik yaklaşımlar ve modelleme süreçlerinden kaynaklanan sonuç farklılıklarını ortaya koymaktır. Görselleştirmeler aracılığıyla, her iki yöntemin ürettiği konu dağılımlarındaki farklılıklar karşılaştırılmış ve bu farkların kriz konulu veri analizi bağlamındaki etkileri tartışılmıştır. Bu kapsamda, çalışmanın hem kriz dönemlerinde iletişim dinamiklerini anlamaya hem

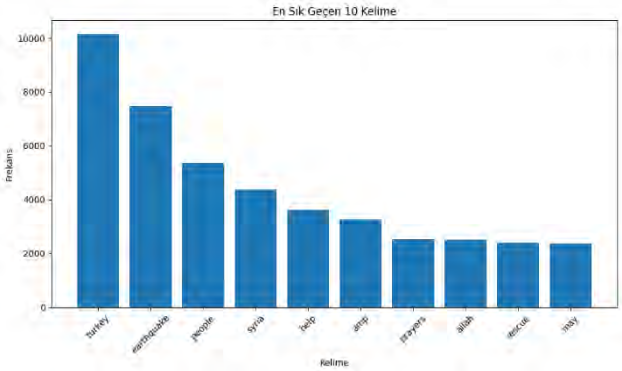
de yöntemler arası farkların pratik kullanım sonuçlarını değerlendirmeye önemli katkılar sunması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın 2. Bölümü'nde kullanılan veriye ve ön işleme ait bilgiye, 3. bölümde kullanılan yönteme, 4. ve 5. Bölümlerde sırasıyla yapılan deneylere ve performans sonuçlarına yer verilmiştir.

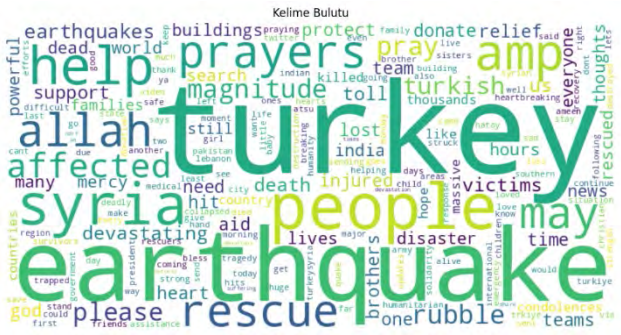
2. Veri Kümesi ve Ön İşleme

2.1. Veri Kümesi

Bu çalışmada, Türkiye'de 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremle ilgili sosyal medya verilerini içeren hazır bir veri kümesi kullanılmıştır [10]. Veri kümesi, deprem sonrasındaki beş gün boyunca toplanan ve her biri bir güne ait verilerden oluşan toplam beş CSV (Comma-Separated Values – Virgülle Ayrılmış Değerler) dosyasını içermektedir. Çalışmada bu beş dosya birleştirilerek toplamda 29.185 İngilizce metinden oluşan bir veri kümesi elde edilmiştir. Veri kümesinde, metin uzunlukları incelenmiş ve en uzun metnin 56 sözcükten oluştuğu, ortalama sözcük sayısının ise 19,47 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, deprem sonrası sosyal medya etkileşimlerini yansıtan bu metinlerde en sık geçen sözcükler analiz edilmiştir. Bu analizde, "turkey" (10.145 kez), "earthquake" (7.491 kez) ve "people" (5.360 kez) gibi ifadelerin öne çıktığı görülmüştür. Şekil-1'de en sık geçen 10 sözcüğün sıklığı (frekansı) görselleştirilirken, Şekil 2'de ise bu sözcüklere ilişkin bir sözcük bulutu sunulmuştur.



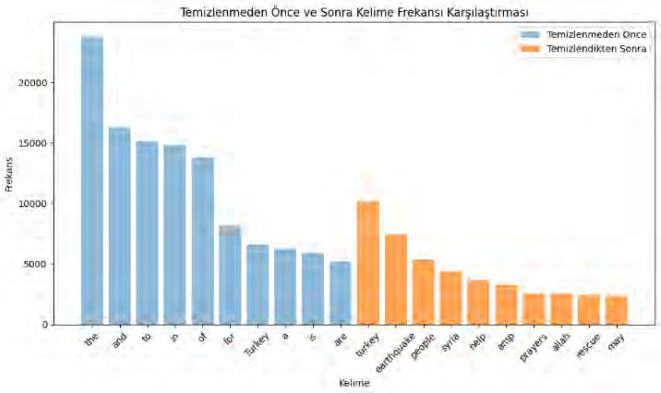
Şekil-1. Veri setinden sık geçen 10 sözcük ve sıklıkları



Şekil-2. Veri setine ait sözcük bulutu

2.2. Ön İşleme

Çalışmada kullanılan veri kümesi üzerinde, metinlerin modelleme ve analiz için uygun hale getirilmesi amacıyla bir dizi ön işleme adımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, metinlerdeki URL'ler ve web adresleri temizlenmiş; ardından, metinlerde bulunan *mentionlar* (@kullanıcıadı) ve *hashtag* işaretleri (#) kaldırılmıştır. Daha sonra, yalnızca harflerden oluşmayan karakterler, noktalama işaretleri ve sayılar metinlerden çıkarılmıştır. Bu işlemlerin ardından, metinlerin tamamı küçük harfe çevrilmiş ve doğal dil işleme sürecinde gereksiz olan durdurma sözcükleri (örneğin "and", "the", "is") metinlerden arındırılmıştır. Ayrıca, metinlerde anlam taşımayan tek harfli sözcükler temizlenmiş ve fazladan oluşabilecek boşluklar düzeltilmiştir. Bu ön işlemler sonucunda, metinler hem istatistiksel analiz hem de konu modelleme yöntemleri için daha verimli ve temiz bir formata dönüştürülmüştür. Bu adımlar, veri kümesindeki gürültüyü azaltarak model sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemiştir. Şekil-3'te, metinler temizlenmeden önce ve sonra en sık geçen sözcüklerin sıklıklarındaki değişim karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil-3. Ön işlem öncesi ve sonrası sözcüklerin sıklık dağılımı

Seçilen ön işleme adımlarının uygulanmasının ardından veri kümesindeki değişimler Şekil-4'te görsel olarak; Çizelge-1'de ise sayısal olarak ifade edilmiştir.

Çizelge-1: Ön İşleme Sürecinin Verilere Etkisi

Özellik	Ön İşlem Öncesi	Ön İşlem Sonrası
Toplam Farklı Sözcük Sayısı	50.382	23.197
En Uzun Metin Uzunluğu	56	35
Ortalama Sözcük Sayısı	19,47	10,77
Toplam Veri Sayısı	29.185	29.185
Toplam Sözcük Sayısı	568.245	314.191

3. Yöntem

Çalışmanın bu kısmında seçilen ve ön işlem süreçleri ile deneysel işlemlere hazırlana veri kümesi ile hangi yöntemlerin izlendiği ve bu yöntemlerin neden uygulandığı ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmektedir. Şekil 4'te, konu modelleme sürecinde kullanılan adımlar ve LDA ile BERTopic yöntemlerinin nasıl karşılaştırıldığı görselleştirilmiştir.

Şekil-4. Çalışmanın akış diyagramı

3.1. Coherence ile En İyi Konu Sayısı Seçimi

Bu aşamada, LDA modeli için en uygun konu sayısını belirlemek amacıyla coherence sonuçları hesaplanmıştır. Coherence sonucu, modelin oluşturduğu konuların tutarlılığını ve anlamlılığını ölçen bir ölçüdür. Bu ölçü, bir modelin gerçek dünyadaki konusal yapıyı ne kadar iyi yansıttığını anlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Coherence sonuçlarının yüksek olması, modelin ürettiği konuların daha anlamlı ve ayrıştırılabilir olduğunu gösterir.

Öncelikle, Gensim kütüphanesi ile veri kümesindeki metinler lokmalarına (token) ayrılmıştır ve bir sözlük nesnesi ile derlem oluşturulmuştur. Bu işlem sırasında, analizde gürültü yaratabilecek çok nadir ve çok sık geçen sözcükler filtrelenmiş ve yalnızca anlamlı sözcükler analize dahil edilmiştir. Ardından, farklı konu sayıları (2'den 20'ye kadar) için LDA modelleri eğitilmiş ve her bir modelin coherence sonucu hesaplanmıştır. Optimal konu sayısını belirlemek için, her bir modelin coherence sonucu bir grafik üzerinde görselleştirilmiş ve en yüksek sonuç veren konu sayısı optimal olarak seçilmiştir.

3.2. LDA ile Konu Modelleme

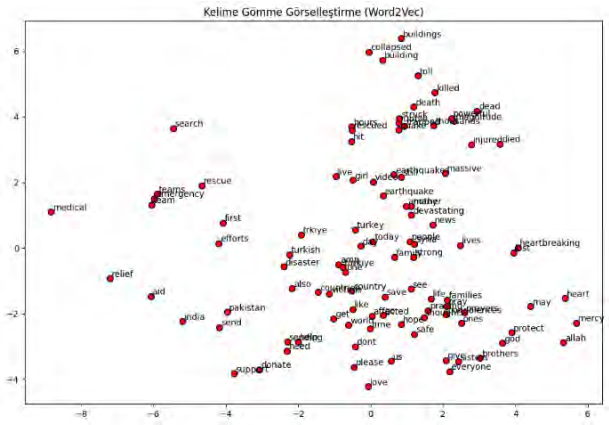
LDA modeli, ön işleme sonrası elde edilen temiz metinler üzerinde çalıştırılmış ve belirlenen optimal konu sayısına göre eğitilmiştir. Gensim kütüphanesi ile eğitilen LDA modeli, her bir metni belirlenen konular arasında dağıtacak şekilde tasarlanmıştır. Model, metinlerdeki sözcük dağılımına dayanarak her bir metin için en olası konuyu belirlemiş ve genel konu dağılımlarını çıkarmıştır. Model çıktıları arasında, her bir konunun temsil ettiği en sık kullanılan sözcükler de bulunmaktadır. Bu sözcükler, her konunun konusal içeriğini anlamak ve sonuçları yorumlamak için kullanılmıştır. Ayrıca, günlük bazda konu dağılımları çıkarılarak, deprem sonrası sosyal medya etkileşimlerindeki konusal değişimler analiz edilmiştir. Sonuçlar, bir çizgi grafiği ile görselleştirilmiş ve her bir günün hangi konulara odaklandığı ortaya konmuştur.

3.3. BERTopic ile Konu Modelleme

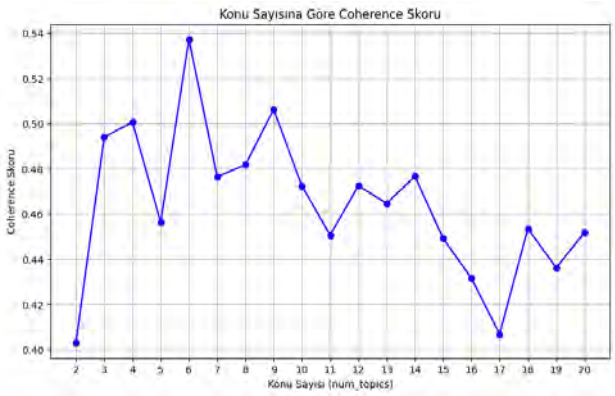
Bu aşamada, konuları belirlemek için BERTopic modeli kullanılmıştır. BERTopic, LDA modelinden farklı olarak, metinlerin anlamını ve bağlamını yakalamak için derin öğrenmeye dayalı sözcük yerleştirme (word embedding) tekniklerini kullanır. Model, metinleri daha derin anlam ilişkilerine göre gruplandırarak konuları belirlemiştir. BERTopic modeli eğitildikten sonra, her bir metin belirlenen konular arasında sınıflandırılmış ve konu başlıkları, model tarafından otomatik olarak atanmıştır. Ayrıca, günlük bazda konu dağılımları çıkarılmış ve görselleştirilmiştir. BERTopic'in sunduğu konu dinamikleri ve anahtar sözcükler bir çizgi grafiği üzerinde gösterilmiş, her bir gün için öne çıkan konular detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

4. Bulgular

Bu çalışmada, LDA modeli için en uygun konu sayısını belirlemek amacıyla farklı konu sayılarında (2'den 20'ye kadar) coherence sonuçları hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en yüksek coherence sonucuna sahip olan model, konu sayısı 6 olduğunda elde edilmiştir (Coherence Sonucu: 0,5373). Bu sonuç, 6 konunun veri kümesindeki konusal dağılımı en iyi şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Word2Vec modeli, sözcükler arasındaki bağlamsal ilişkileri modelleyerek LDA'nın ürettiği konuların tutarlılığını artırmada önemli bir rol oynamıştır. Word2Vec ile elde edilen sözcük yerleştirmeleri, benzer anlamdaki sözcükleri aynı vektör alanında gruplandırarak LDA'nın daha anlamlı ve yorumlanabilir konular üretmesine katkı sağlamıştır. Bu yaklaşım sayesinde, LDA modelinin coherence sonucu artırılmış ve elde edilen konular, kriz sonrası sosyal medya etkileşimlerini daha doğru bir şekilde analiz etmek için uygun bir yapı sunmuştur. Şekil 5'te, Word2Vec modeli ile oluşturulan sözcük yerleştirmelerinin iki boyutlu uzaydaki dağılımı görselleştirilmiş; Şekil 6'da ise farklı konu sayıları için hesaplanan coherence sonuçları sunularak en uygun konu sayısının belirlenme süreci gösterilmiştir.



Şekil-5. Sözcük Yerleştirme Görselleştirmesi- Word2Vec



Şekil-6. Konu Sayısına Göre Coherence Sonucu

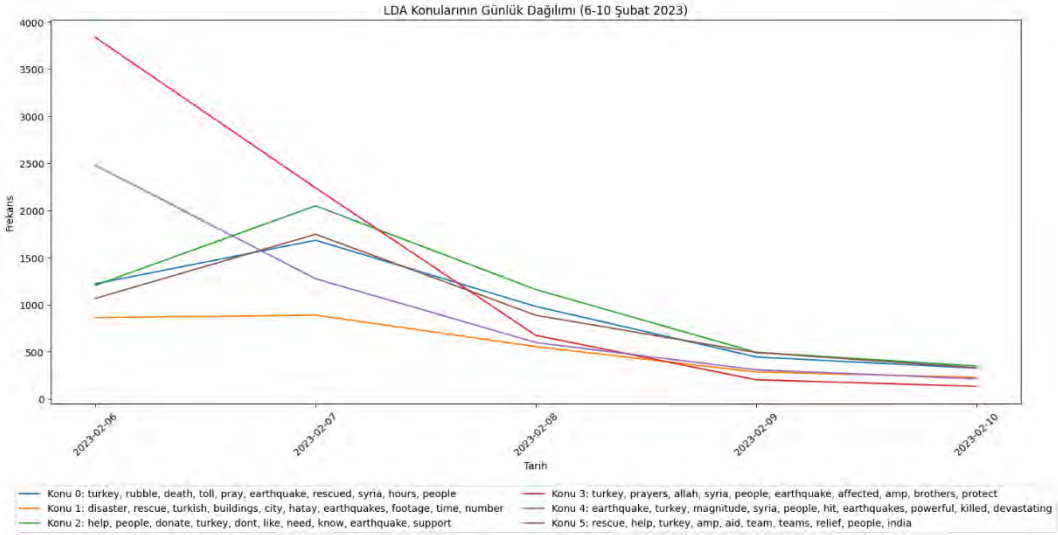
Şekil 7'de, 6-10 Şubat 2023 tarihleri arasındaki sosyal medya paylaşımlarında LDA ile belirlenen konuların günlük dağılımını göstermektedir. Görselde, her bir konu, ilgili günlerdeki sıklıklarına göre çizilmiş ve bu sıklıklar üzerinden kriz sürecinde hangi konuların öne çıktığı analiz edilmiştir. Konu 3 ("turkey", "prayers", "allah", "syria", "people", "affected") kriz sonrası yoğun bir şekilde dikkat çeken ve dua, dayanışma gibi konular etrafında şekillenen mesajlarla en yüksek sıklığa ulaşmıştır. Ancak, bu konu, 7 Şubat'tan itibaren belirgin bir şekilde azalmış ve diğer konularla paralel bir düşüş göstermiştir. Benzer şekilde, Konu 4 ("earthquake", "turkey", "magnitude", "syria", "people") depremle doğrudan ilişkili konusal bir yapıya sahiptir ve başlangıçta oldukça yüksek bir sıklık sergilemiştir. Ancak, bu konunun günlük sıklıklarında da gözle görülür bir düşüş yaşanmış, sosyal medyadaki ilginin zamanla azaldığı gözlemlenmiştir. Konu 0 ve Konu 1 gibi konular ("rescue", "rubble", "aid", "disaster") ise yardım çağrıları ve kurtarma çalışmalarıyla ilişkili anahtar sözcükler barındırmaktadır. Bu konuların sıklıklarının, deprem sonrası ikinci ve üçüncü günlerde arttığı, ancak ilerleyen günlerde diğer konularla birlikte azaldığı görülmektedir. Bu durum, yardım çalışmalarının kriz anında daha fazla vurgulandığını ancak zaman geçtikçe sosyal medya etkileşimlerinin genel olarak azaldığını göstermektedir. Genel olarak, görseldeki dağılım, kriz sonrası sosyal medya etkileşimlerinin zamanla azaldığını ve başlangıçta yoğun olan duygusal tepkilerin yerini daha rasyonel ve yardım odaklı tartışmalara bıraktığını ortaya koymaktadır. Bu analiz, kriz ile ilgili konuların zamanla nasıl şekillendiğini anlamak için önemli bir içgörü sunmaktadır.

Şekil8'de ise, BERTopic yöntemi kullanılarak belirlenen konuların 6-10 Şubat 2023 tarihleri arasındaki günlük dağılımını göstermektedir. Görselde, her bir konu, ilgili günlerdeki sıklıklarına göre çizilmiş ve kriz sürecinde hangi konuların öne çıktığı analiz edilmiştir.

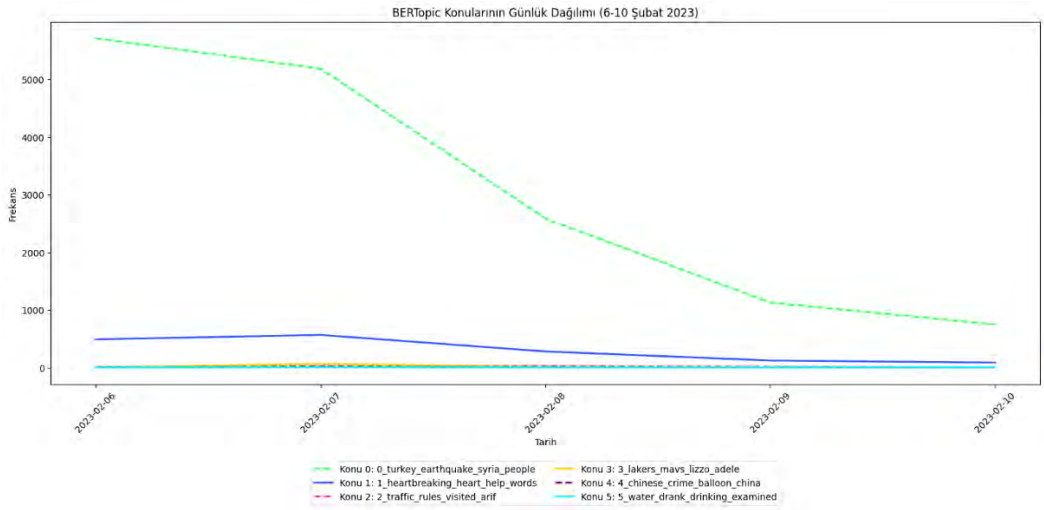
Konu 0 ("turkey", "earthquake", "syria", "people") açık ara en yüksek sıklığa sahip konudur ve deprem sonrası sosyal medyadaki genel konuyu temsil etmektedir. Bu konunun sıklığı, depremle ilgili kriz ortamının en yoğun olduğu ilk günlerde zirve yapmış, ancak sonraki günlerde düzenli bir azalma göstermiştir. Bu durum, depremle ilgili sosyal medya etkileşimlerinin zamanla azaldığını ve kriz sonrası ilginin düşüşe geçtiğini işaret etmektedir.

Konu 1 ("heartbreaking", "heart", "help", "words"), duygusal ve yardım odaklı mesajları içeren bir konudur. İlk günlerde görece düşük bir sıklığa sahip olmasına rağmen, sonraki günlerde sabit bir artış göstermiş ve sosyal medya paylaşımlarında istikrarlı bir şekilde yer bulmuştur. Bu durum, deprem sonrası dayanışma ve yardım çağrılarının sosyal medyada sürekliliğini koruduğunu göstermektedir. Diğer konular ise (örneğin, Konu 3, "lakers", "mavs", "lizzo", "adele") deprem bağlamının dışında kalan, sosyal medyada arada sırada bahsi geçen ve depremle ilişkili olmayan konuları temsil etmektedir. Bu tür konuların sıklığının düşük olması, sosyal medya etkileşimlerinin büyük ölçüde depremle ilgili olduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, BERTopic yöntemiyle elde edilen konuların dağılımı, sosyal medya kullanıcılarının deprem sonrası ilk günlerde genel krizle ilgili içeriklere yoğunlaştığını, ancak bu ilginin zamanla azaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, duygusal ve yardım odaklı konuların sosyal medyada daha uzun süre gündemde kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil-7. LDA Konularının Günlük Dağılımı



Şekil-8. BERTopic Konularının Günlük Dağılımı

5. Sonuçlar

LDA ve BERTopic yöntemleriyle elde edilen günlük konu dağılımlarının analizine bakıldığında, her iki modelin sonuçları arasında önemli farklılıklar görülmektedir. LDA modeli, sözcük sıklıklarına ve dağılımlarına dayalı istatistiksel bir yaklaşım sunar. Bu nedenle, elde edilen konular daha dengeli ve konusal olarak ayrıştırılmıştır. Örneğin, LDA grafiğinde, belirli günlerde farklı konuların öne çıktığı açıkça görülmektedir. Konu 3 gibi dua ve destek odaklı konular, kriz sonrası ilk günlerde yüksek bir sıklık gösterirken, kurtarma ve yardım çağrılarıyla ilişkilendirilen Konu 0 ve Konu 1 daha uzun bir süre boyunca gündemde kalmıştır. Bu durum, LDA'nın sosyal medya etkileşimlerini farklı konusal yönlerden analiz etmek için daha ayrıntılı bir yapı sunduğunu göstermektedir.

BERTopic modeli ise, sözcükler arasındaki bağlamsal ilişkileri anlamlandırmak için sözcük yerleştirme yöntemlerini kullanır. Bu yaklaşım, belirli bir konuyu diğerlerinden daha baskın hale getirerek daha genel bir analiz sağlar. Nitekim BERTopic grafiğinde, Konu 0 ("turkey", "earthquake", "syria", "people") depremle ilgili genel konuyu temsil eden en baskın konu olarak açık ara öne çıkmıştır. Diğer konuların sıklıkları ise görece düşük ve sabit kalmıştır. BERTopic'in bu bağlamsal odaklı yaklaşımı, sosyal medya paylaşımlarındaki genel eğilimleri ve büyük konuları yakalamada etkili olsa da konusal çeşitliliği ve ayrışmayı ikinci plana atabilir. İki yöntem arasındaki bu farklılıklar, temel olarak kullanılan modelleme yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. LDA modeli, sözcüklerin dağılımına dayalı bir istatistiksel yapı sunarken, BERTopic bağlamı ve anlam ilişkilerini vurgulayan bir yöntemdir. Ayrıca, optimal konu sayısı seçimi de bu farklılıkları etkilemiştir. LDA için coherence sonucuna dayalı olarak optimal konu sayısı 6 olarak belirlenmişken, BERTopic'te kullanılan bağlamsal modelleme nedeniyle belirgin bir şekilde baskın bir konu öne çıkmıştır.

Sonuç olarak, LDA, zaman içindeki konusal değişimleri ve detaylı konuları daha ayrıntılı bir şekilde analiz edebilirken, BERTopic, genel konuların öne çıktığı daha bağlamsal bir analiz sunmaktadır. Bu iki yöntem, kriz sonrası sosyal medya analizlerinde birbirini tamamlayıcı nitelikte kullanılabilir ve her biri farklı boyutları anlamada önemli katkılar sağlayabilir.

Bununla birlikte, çalışmanın bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Kullanılan veri kümesi yalnızca Türkçe paylaşımları içermekte ve belirli bir zaman aralığını kapsamaktadır; bu da sonuçların genellenebilirliğini sınırlayabilir. Diğer taraftan veriler sadece deprem bölgesindeki insanların paylaşımları ile sınırlı değildir; bu durum özellikle deprem bölgesi için değerlendirme yapmak için uygun değildir. Ayrıca, yalnızca iki konu modelleme yöntemi kullanılmış olup, diğer yöntemlerle karşılaştırma yapılmamıştır. Gelecek çalışmalar, çok dilli ve konuma bağlı veri kümeleriyle benzer analizlerin yürütülmesi, farklı konu modelleme tekniklerinin karşılaştırılması ve zamana bağlı duygu değişimlerinin entegre edilmesi gibi yönlerde genişletilebilir. Bu tür çalışmalar, afet iletişimi ve sosyal medya analizleri konusunda daha kapsamlı içgörüler sunabilir.

Teşekkür

Hakemlere değerli görüşler ve önerilerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] Argın, Y. (2023). DOĞAL AFETLERDE SOSYAL MEDYA KULLANIMI: 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMİ ÖZELİNDE TWİTTER ÖRNEĞİ. İnsanat Sanat Tasarım ve Mimarlık Araştırmaları Dergisi, 3(1), 140-165.

[2] Alam, F., & Imran, M. (2020). CrisisDPS: Crisis Data Processing Services. In Proceedings of the 17th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management.

[3] Zhang, Y., & Vos, M. (2019). Social media monitoring: aims, methods, and challenges for international companies. Corporate Communications: An International Journal.

[4] Mızrak, S. (2024). Public's social media use during the Kahramanmaraş earthquakes on 6 February 2023. International Journal of Disaster Risk Reduction, 108, 104541.

[5] Erokhin, D., & Komendantova, N. (2024). Earthquake conspiracy discussion on Twitter. Humanities and Social Sciences Communications, 11(1), 1-10.

[6] Wang, C., Zhang, X., & Wu, J. (2024). Disaster information mining from a social perception perspective: A case study of the "23· 7" extreme rainfall event in the Beijing–Tianjin–Hebei region. International Journal of Disaster Risk Reduction, 115, 105056.

[7] Xue, Y., Kambhampati, C., Cheng, Y., Mishra, N., Wulandhari, N., & Deutz, P. (2024). A LDA-Based Social Media Data Mining Framework for Plastic Circular Economy. International Journal of Computational Intelligence Systems, 17(1), 8.

[8] Jaballi, S., Hazar, M. J., Zrigui, S., Mahjoubi, A., Nicolas, H., & Zrigui, M. (2024). Decoding Multilingual Topic Dynamics and Trend Identification through ARIMA Time Series Analysis on Social Networks: A Novel Data Translation Framework Enhanced by LDA/HDP Models. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2024(1), 6669491.

[9] Bhuvaneswari, A., & Kumudha, M. (2024, April). Topic Modeling Based Clustering of Disaster Tweets Using BERTopic. In 2024 MIT Art, Design and Technology School of Computing International Conference (MITADTSoCiCon) (pp. 1-6). IEEE

[10] https://www.kaggle.com/datasets/esatakkasoglu/turkey-06-02-2023-eartquake-tweets/data?select=englishV2

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Sızma Denemeleri: Ölçünler, Süreçler ve Kandırma Teknikleri Üzerine Bir İnceleme

Penetration Testings: An Examination of Standards, Processes, and Exploitation Techniques

Mustafa Furkan CEYLAN
Balıkesir Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Balıkesir, Türkiye
furkan.ceylan@balikesir.edu.tr
0009-0005-5609-395X

Selçuk KAVUT
Balıkesir Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Balıkesir, Türkiye
skavut@balikesir.edu.tr
0000-0002-9460-1418

Öz

Bu çalışma, siber güvenlik alanında yaygın olarak kullanılan sızma denemesi yöntemlerini, ölçünlerini ve güncel istismar tekniklerini ele almaktadır. Sızma denemesi, sistemlerdeki zayıflıkları önceden tespit ederek potansiyel saldırılara karşı etkili savunma stratejileri geliştirmek amacıyla uygulanan temel bir güvenlik sürecidir. Bu çalışmada OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF ve NIST gibi ölçünler incelenmiş; sızma denemesi süreçleri detaylandırılmış ve güvenlik açıklarının belirlenmesine yönelik örnekler sunulmuştur. Ayrıca, SQL enjeksiyonu, MITM (ortadaki adam) saldırıları, DoS (hizmet dışı bırakma) saldırıları, XSS (çapraz site betik çalıştırma) ve parola saldırıları gibi güncel istismar tekniklerine dair uygulamalı örnekler verilmiş ve bu tehditlere karşı alınabilecek önlemler tartışılmıştır. Buna ek olarak, söz konusu tekniklerin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla senaryo tabanlı bir sızma denemesi vakası benzetimi düzenlenmiş; elde edilen bulgular CVSS (ortak zafiyet puanlama sistemi) kullanılarak yapılandırılmış bir risk analiziyle değerlendirilmiştir. Teknik ve yönetsel seviyede hazırlanmış örnek bir raporlama çıktısı da çalışmaya dahil edilmiştir. Literatürde sızma denemesi süreçleri ve ölçünleri üzerine ulusal bazda sınırlı sayıda çalışma bulunması, bu makalenin hem sektöre hem de Türkçe literatüre katkı sağlaması açısından önem arz etmektedir.

Anahtar sözcükler: Sızma Denemesi Ölçünleri, Siber Güvenlik, OWASP, İstismar Teknikleri, Vaka Analizi

Abstract

This study addresses commonly used penetration testing methodologies, standards, and recent exploitation techniques in cybersecurity. Penetration testing is a fundamental security procedure applied to identify vulnerabilities in systems in advance and develop effective defense strategies against potential attacks. This work examines standards such as OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF, and NIST, detailing the penetration testing processes and providing examples of identifying security weaknesses. Additionally, practical examples of current exploitation techniques, including SQL injection, MITM (Man-in-the-Middle) attacks, DoS (Denial of Service) attacks, XSS (Cross-Site Scripting), and password attacks, are presented, along with a discussion of countermeasures against these threats. Furthermore, a scenario-based penetration testing case is simulated to demonstrate the application of these techniques, and the findings are evaluated through a structured risk analysis using the CVSS (Common Vulnerability Scoring System). A reporting sample addressing both technical and managerial levels is also included. The limited number of national studies on penetration testing processes and standards in the literature highlights this paper's importance in contributing to the industry and Turkish literature.

Keywords: Penetration Testing Standards, Cybersecurity, OWASP, Exploitation Techniques, Case Study

1 Giriş

Teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, web ve mobil uygulamalar modern yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ancak, yapay zekâ destekli saldırılar, sıfırıncı gün istismarları ve bulut güvenliği sorunları, IoT sistemlerinin

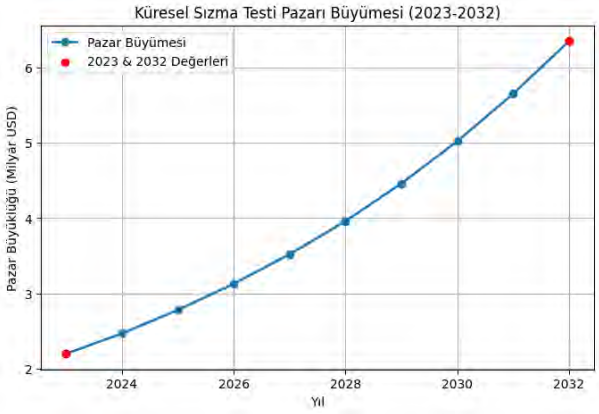
Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 05.03.2025 - 22.05.2025 – 25.03.2025
Makale türü: Derleme

zayıflığı, siber güvenlik tehditlerini daha karmaşık hale getirmektedir[1]. Dijitalleşmenin yaygınlaşması, kişisel verilerin, kurumsal varlıkların ve kritik altyapının korunmasını zorunlu hale getirmektedir.

Günümüzde, internet tabanlı hizmetlerin artışı ve COVID-19 pandemisiyle birlikte uzaktan çalışmaya ani geçiş, siber güvenlik risklerini önemli ölçüde artırmıştır. Kuruluşlar, yeterli hazırlık yapamadan yeni teknolojileri hızla benimsemek zorunda kalmış ve bu durum, dolandırıcılık amaçlı oltalama saldırılarında artışa, güvenlik açıkları bulunan cihazların yaygınlaşmasına ve genel güvenlik zayıflıklarının ortaya çıkmasına neden olmuştur [2].

Bu güvenlik açıklarının temel nedenlerinden biri, geliştirilen yazılım ve donanım ürünlerinin OWASP [3] güvenlik ilkeleri, NIST [4] ve PTES [5] gibi uluslararası güvenlik yöntemlerine tam uyum sağlamadan üretilmesidir. Eksik veya hatalı uygulanan güvenlik protokolleri, sistemleri savunmasız hale getirerek saldırganlar için kolay hedefler oluşturmaktadır. Nitekim, yakın zamanda yayımlanan bir rapor, web uygulamalarındaki güvenlik açıklarının %82'sinin doğrudan kaynak kodundaki hatalardan kaynaklandığını ortaya koymaktadır [6]. Bu bulgu, güvenli bir yazılım geliştirme sürecinde uluslararası ölçünler ve yöntemlerin hayati önem taşıdığını açıkça göstermektedir. Yakın zamanda yayımlanan bir siber güvenlik raporuna göre, 2021 yılında siber saldırı sayısı 125 milyonken 2022 yılında iki katına çıkarak 250 milyona ulaşmıştır [7]. Bu saldırıların büyük bir kısmı insan kaynaklı değil, otomatikleştirilmiş botlar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Bu bağlamda, sızma denemeleri (penetration testings), güvenlik açıklarını saldırganlardan önce tespit etmeyi ve zayıflıkların kullanımı sonucunda potansiyel zararları göstermeyi amaçlayan kritik bir siber güvenlik stratejisidir [8]. Önalıcı bir yaklaşımla riskleri belirleyerek, sistemlerin güvenliğini artırır ve saldırılara karşı savunma mekanizmalarını güçlendirir.

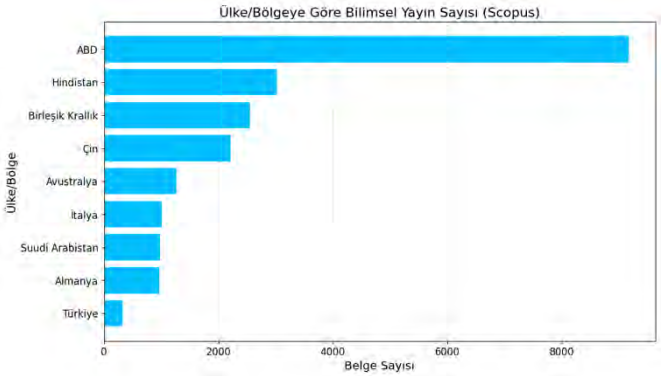


Şekil-1: Küresel sızma denemesi pazar büyümesi (2023-2032 Milyar Dolar) [9]

Artan siber tehditlere karşı kuruluşlar güvenlik stratejilerini güçlendirmekte ve sızma denemelerine olan talep hızla yükselmektedir. Şekil-1'de sunulan küresel sızma denemesi pazarı 2023'te 2,20 milyar USD olarak değerlenmiş olup, 2024-2032 yılları arasında %12,6'lık bir büyüme oranı ile 2032'de 6,35 milyar USD'ye ulaşması beklenmektedir [9]. Bu büyüme, sızma denemelerinin yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda ticari bir zorunluluk haline geldiğini göstermektedir.

Toplumun yaygın olarak kullandığı sistemlere yönelik saldırıların artmasıyla birlikte, özellikle finans, sağlık ve devlet kurumları gibi kritik sektörlerde güvenlik açıklarını en aza indirmek amacıyla sızma denemelerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Son yıllarda Türkiye'de siber saldırılar önemli ölçüde artış göstermiş ve bu durum özellikle kritik altyapılar için ciddi tehditler oluşturmuştur. Örneğin, Türkiye'nin DNS sunucularına, bankacılık sistemlerine ve e-devlet hizmetlerine yönelik gerçekleştirilen geniş çaplı bir DDoS saldırısı, saniyede 220 Gbps'ye ulaşarak yaklaşık 40.000 '.tr' uzantılı alan adının devre dışı kalmasına yol açmıştır [10]. Bu tür saldırılar, toplumun günlük yaşamda yaygın olarak kullandığı hizmetleri hedef alarak etki alanını genişletmeyi ve kamuoyu tepkisini artırmayı amaçlamaktadır. Bunun yanı sıra, STM'nin Ocak 2024 Siber Tehdit Durum Raporu'nda [11] yer alan 'The Mother of All Breaches' veri sızıntısında, Twitter, LinkedIn ve Dropbox gibi platformlardan 26 milyar kullanıcının verilerinin sızdırıldığı ve Türkiye'nin de etkilenen ülkeler arasında bulunduğu belirtilmektedir.

Dünyada siber saldırıların artışıyla birlikte bu alandaki bilimsel çalışmalar da hız kazanmış ve akademik araştırmaların sayısı önemli ölçüde artmıştır. Ancak Türkiye, siber güvenlik alanında yapılan akademik yayınlar açısından küresel ölçekte geride kalmaktadır. Şekil- 2'de görüldüğü üzere ABD'de 9174, Hindistan'da 3015, İngiltere'de 2551 makale yayımlanmışken, Türkiye'de yalnızca 329 makale yayımlanmıştır [12]. Bu durum, Türkiye'de siber güvenlik alanındaki akademik üretkenliğin yeterli olmadığını ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.



Şekil- 2: Ülkelere göre siber güvenlik alanında yapılan bilimsel yayın sayıları

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de artan siber saldırı tehditlerine karşın yeterli olmadığı görülen Türkçe literatüre katkı sağlamaktır. Özellikle, uluslararası sızma denemesi ölçünleri ve yöntemleri hakkında farkındalığın artırılması, geliştiriciler ve şirketler için daha güvenli sistemler tasarlanmasına yardımcı olacaktır. Siber güvenlik alanında, özel olarak sızma denemesi süreçlerinde yaygın olarak kullanılan PTES, OWASP, OSSTMM, ISSAF ve NIST gibi yöntemlerin Türkçe literatürde yeterince ele alınmadığı görülmektedir. Örneğin, [20-27] çalışmalarında yalnızca temel zafiyet tarama süreçleri ele alınmış, ancak uluslararası

yöntemler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmamıştır. Ayrıca, bahsedilen çalışmalarda mevcut ölçünlerin uygulanabilirliği ve organizasyonlara uygun yöntemlerin seçimi konusunda yeterli akademik çalışma bulunmamaktadır.

Bu doğrultuda, ilgili çalışmaların ele alındığı bir sonraki bölümde görülebileceği gibi, çalışmamızın katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- *Senaryo temelli ve zincirleme bir sızma denemesi vaka analizi sunumu.* Literatürde genellikle bağımsız zayıflıklar veya araç odaklı incelemeler öne çıkarken, bu çalışmada gerçekçi bir saldırı zinciri modeli kurgulanmıştır. Özel olarak, bilgi toplama, XSS, oturum ele geçirme, SQL enjeksiyonu, kaba kuvvet ve log temizleme adımlarının her biri analiz edilmiş ve bu süreç teknik bir rapor formatıyla sonuçlandırılmıştır.

- *Uluslararası sızma denemesi ölçünlerinin bütüncül bir yaklaşımla sistematik biçimde karşılaştırılması.* Önceki çalışmalarda çoğunlukla OWASP ve NIST gibi belirli ölçünlere odaklanıldığı gözlemlenebilir. Çalışmamızda, OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF ve NIST çerçeveleri teknik süreçlerle ilişkilendirilmiş ve kapsamlı biçimde değerlendirilerek Türkçe literatüre kazandırılmıştır.

- *Saldırı türleri ile sızma denemesi yöntemlerinin tematik olarak eşleştirilmesi.* Literatürde çoğunlukla saldırı teknikleri ile yöntemler ayrı ayrı incelenmektedir. Bu çalışmada SQL enjeksiyonu, XSS, MITM, DoS ve parola saldırılarının hangi deneme ölçününde nasıl ele alındığı gösterilmiş; yöntemlerin kapsam ve yeterliliği teknik olarak karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada betimsel bir araştırma yöntemi benimsenmiş; sızma denemesi alanındaki kuramsal yaklaşımlar ve uygulamalı yöntemler, literatür taraması yoluyla çok boyutlu olarak ele alınmıştır. Kaynak taraması, tematik bir yapı çerçevesinde gerçekleştirilmiş; yöntemler, saldırı türleri, risk değerlendirme yaklaşımları ve vaka analizleri gibi başlıca temalar altında sınıflandırılmıştır. Uluslararası literatürde OWASP, NIST, OSSTMM gibi otoritelerin yayımladığı güvenlik ölçünlerinin yanı sıra hakemli akademik makaleler, sektörel teknik raporlar ve açık kaynak güvenlik veri tabanları (Common Vulnerabilities and Exposures - CVE, Common Weakness Enumeration - CWE, Common Vulnerability Scoring System - CVSS) temel kaynak olarak değerlendirilmiştir. Kaynak seçiminde özellikle çalışmanın konusuyla doğrudan ilişkili olması, teknik içerik sunması ve güncel (ağırlıklı 2015 sonrası) olması gibi ölçütler dikkate alınmıştır. Vaka analizinde ise senaryo temelli yapı izlenmiş; tespit edilen zayıflıklar OWASP ve CVE/CWE eşleştirmeleriyle analiz edilmiş, risk seviyeleri CVSS puanlamasına göre değerlendirilmiş ve bulgular hem teknik hem yönetsel düzeyde sistematik biçimde raporlanmıştır. Bu kapsamda çalışmanın bütünsel yapısını destekleyen içerik, aşağıda sıralanan bölümler doğrultusunda yapılandırılmıştır.

Makalenin bir sonraki bölümü, sızma denemeleriyle ilgili ulusal ve uluslararası literatürü inceleyerek bu çalışmanın özellikle Türkçe literatüre olan katkılarını ortaya koymaktadır. Üçüncü bölüm, sızma denemelerinin temel kavramlarını ve tarihsel gelişimini ele almaktadır. Dördüncü bölümde, kara kutu, beyaz kutu ve gri kutu gibi farklı sızma denemesi yöntemlerine yer verilmiştir. Beşinci bölüm, OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF ve NIST gibi yaygın kullanılan sızma denemesi ölçünlerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Altıncı bölüm, sızma denemesi sürecinin aşamalarını detaylandırmakta; bilgi toplama, tehdit modelleme, zafiyet analizi, istismar ve raporlama gibi temel adımlara odaklanmaktadır. Yedinci bölüm, SQL enjeksiyonu, MITM, DoS, XSS ve parola saldırıları gibi yaygın istismar tekniklerini teknik detaylarıyla ele almaktadır. Sekizinci bölüm, bu saldırı türlerinin sızma denemesi ölçünleriyle olan ilişkisini değerlendirerek yöntemsel bütünlük sağlamaktadır. Dokuzuncu ve son bölümde ise, örnek bir vaka analizi üzerinden uygulamalı bir sızma denemesi senaryosu sunulmakta, deneme zinciri içerisindeki adımlar (bilgi toplama, XSS, oturum ele geçirme, SQL enjeksiyonu, kaba kuvvet ve log silme) OWASP Top 10 ve CVE/CWE eşleştirmeleriyle ilişkilendirilmektedir. Bu bölüm ayrıca, tespit edilen zayıflıklara yönelik risk analizini CVSS değerlendirmesiyle gerçekleştirmekte ve hem teknik hem de yönetsel düzeyde örnek bir raporlama çıktısı sunarak çalışmanın uygulamaya dönük katkılarını ortaya koymaktadır.

2 İlgili Çalışmalar

Sızma denemesi, kuruluşların güvenlik açıklarını önalıcı olarak tespit edip gidermelerini sağlayan önemli bir siber güvenlik uygulamasıdır. Sızma denemesi süreçlerini yapılandırmak ve güvenlik değerlendirmelerini ölçünleştirmek etmek amacıyla OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF ve NIST gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiş olup, güvenlik değerlendirme süreçlerini ölçünleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çerçeveler, deneme aşamaları, kullanılan araçlar ve yöntemler açısından rehberlik sunarak sistematik bir güvenlik değerlendirmesi sağlar. Söz konusu ölçünler, uluslararası literatürde de geniş bir şekilde ele alınmış olup, yapılan akademik çalışmalar bu ölçünlerin etkinliğini, karşılaştırmalı analizlerini ve uygulama alanlarını detaylı biçimde incelemektedir.

Shah ve Mehtre [13], güvenlik açığı değerlendirme ve sızma denemesi konusuna odaklanarak, özellikle finans sektöründe yaygın kullanımını ve OWASP ile OSSTMM gibi ölçünlerin önemini vurgulamaktadır. Buna ek olarak, Bertoglio ve Zorzo [14] de benzer bir yaklaşımla sızma denemesi yöntemlerini inceleyerek OWASP, OSSTMM ve PTES'in en yaygın kullanılan çerçeveler olduğunu tespit etmiştir. Çalışma, tek bir ölçünün tüm ihtiyaçları karşılamadığını vurgulayarak, farklı yöntemlerin bir arada kullanılmasının daha kapsamlı güvenlik değerlendirmeleri sağlayacağını öne sürmektedir.

Adam ve ark.[15], sızma denemesi ölçünlerini ve araçlarını değerlendirerek farklı siber güvenlik alanlarındaki etkinliklerini incelemektedir. Araştırmaları, OWASP'ın en yaygın kullanılan çerçeve olduğunu ve PTES'in onu takip ettiğini göstermektedir. Özellikle web güvenlik denemelerinde her iki çerçevenin önemli bir rol oynadığı belirtilmektedir. Araştırmacılar, OWASP ve PTES'in birleştirilmesinin kapsamlı bir sızma denemesi yaklaşımı sağlayabileceğini öne sürmektedir. Bunun yanı sıra, ISSAF, OSSTMM ve NIST'in de yaygın kullanılan ölçünler arasında yer aldığı vurgulanmaktadır.

Shanley [16], çalışmasında dokuz farklı sızma denemesi yöntemini karşılaştırarak, bu ölçünlerin güçlü ve zayıf yönlerini analiz etmektedir. Araştırma, OWASP, OSSTMM, NIST ve PTES'in en yapılandırılmış ve yaygın olarak kabul edilen ölçünler olduğunu ortaya koymaktadır. Sarker ve ark.[17], sızma denemesi ölçünleri, araçları ve puanlama yöntemlerini inceleyerek kapsamlı ve esnek bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Çalışmaları, OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF ve NIST'in en yaygın kullanılan ölçünler olduğunu belirterek, her birinin farklı avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Haq ve ark.[18], mobil uygulama güvenliği için sızma denemesi ölçünlerini inceleyerek, özellikle Android güvenlik açıklarına ve mobil uygulamaların korunmasındaki zorluklara odaklanmaktadır. Çalışmaları, OWASP Mobil Güvenlik Denemesi Kılavuzu'nun (MSTG) en etkili ölçün olduğunu vurgularken, OSSTMM, PTES ve NIST'in mobil odaklı deneme tekniklerinden yoksun olduğunu belirtmektedir. Wen ve ark.[19], yapay zekâ destekli otomasyonun sızma denemelerine entegrasyonunu inceleyerek, güvenlik açıklarının tespiti, tehdit analizi ve izleme süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağladığını belirtmektedir. Ancak, mevcut çerçevelerin (OSSTMM, NIST, OWASP) AI yeteneklerine sahip olmaması, tehditlere uyum sağlama konusunda eksiklikler yaratmaktadır. Bu çalışma, güvenlik değerlendirmelerinin AI destekli yöntemlerle genişletilmesi gerektiğini öne sürmektedir.

Sızma denemesi yöntemleri, güvenlik değerlendirmelerini ölçünleştirmek amacıyla geliştirilmiş olup, OWASP ve OSSTMM web ve sistem güvenliğinde öne çıkarken, PTES ve NIST kapsamlı deneme süreçleri sunmaktadır. ISSAF ise detaylı güvenlik analizleri için önemli bir ölçün olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda, yapay zekâ destekli güvenlik denemeleri ve mobil platformlara yönelik çözümler sızma denemesi alanında yeni eğilimler yaratmakta ve mevcut çerçevelerin bu gelişmelere uyum sağlamasını gerekli kılmaktadır.

Bu alanda uluslararası düzeyde kapsamlı bir literatür bulunmasına karşın, Türkiye'deki akademik araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir [20-27]. Bu bölümde, Türkçe literatürde yer alan önemli çalışmalar incelenerek mevcut araştırmalarla karşılaştırılmıştır.

Özellikle OWASP ve NIST çerçevelerine odaklanan çalışmalar, güvenlik deneme süreçlerinin etkinliğini artırmaya yönelik yöntemler sunmaktadır. Vural ve ark. [20] çalışmasında OWASP, NIST ve OSSTMM çerçevesinde güvenlik deneme yöntemlerini ele alarak kurumsal sistemlerde güvenlik denetimlerinin nasıl yürütülebileceğini detaylandırmıştır. Benzer şekilde, Yılmaz ve ark. [21] çalışması, endüstriyel sistemlerde siber güvenlik risklerini azaltmak için NIST ve OWASP ölçünlerinin uygulanmasının önemini vurgulamaktadır. Tulgar ve ark. [22] çalışmasında, "Ulusal Bilgi ve İletişim Güvenliği Rehberi" hazırlanmasına odaklanılmış ve özellikle IoT güvenliği alanındaki uygulama süreci ele alınmıştır. Çeşitli uluslararası bilgi güvenliği ölçünlerinden yararlanılan bu çalışmada, çalışmamızda ele alınan sızma denemesi ölçünlerinden sadece OWASP ve NIST bulunmaktadır. Benzetim ortamında gerçekleştirilen uygulama ile bahsedilen rehberin IoT güvenliği tedbirlerine uyumun nasıl sağlanabileceği gösterilmiş ve kurumlara yönelik uyum yol haritası önerilmiştir.

Web uygulamalarına yönelik güvenlik denemeleri üzerine yapılan çalışmalar, OWASP yöntemine dayalı olarak güvenli yazılım geliştirme süreçlerini iyileştirmeye odaklanmaktadır. Of [23] çalışmasında OWASP çerçevesinde yazılım güvenliği açıklarını ele almış ve güvenli yazılım geliştirme süreçlerine yönelik önerilerde bulunmuştur. Aydoğdu ve ark. [24] çalışmasında, OWASP tarafından tanımlanan web güvenlik açıklarını ele almakta ve güvenlik önlemleri sunmaktadır. Yalçınkaya ve ark. [25] çalışmasında, web uygulamalarında güvenlik denemelerinin kapsamını genişletmeye yönelik yöntemsel bir yaklaşım önermektedir.

Kurumsal sistemlerde güvenlik riskleri ve tehdit modellemeleri üzerine yapılan çalışmalar, ağırlıklı olarak NIST çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Şentürk ve ark. [26] çalışmasında, NIST çerçevesinde aktif dizin ortamlarında karşılaşılabilecek güvenlik risklerini analiz etmiştir. Bu çalışma, genel güvenlik denemeleri yerine, belirli tehdit senaryolarına dayalı daha spesifik bir güvenlik tehdit modeli üzerinden değerlendirme yaparak, olası saldırı ve savunma stratejilerini ele almaktadır. Kestane ve ark. [27] makalesinde, NIST çerçevesinde bulut bilişim sistemlerinde iç güvenlik denetim süreçlerini incelemiştir. Bu çalışmada, güvenlik denemeleri ile ilgili detaylı bir yöntemsel yaklaşım yerine denetim süreçleri üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmalar incelendiğinde, Türkçe literatürde OWASP ve NIST'in öne çıktığı, ancak OSSTMM, PTES ve ISSAF gibi diğer önemli yöntemlerin yeterince ele alınmadığı görülmektedir. Ayrıca, Çizelge 1'de görüleceği üzere mevcut çalışmaların çoğu belirli bir yönteme odaklanmakta ve ölçünler arasında sistematik bir karşılaştırma sunmamaktadır. Bu doğrultuda, çalışmamızın PTES, OWASP, OSSTMM, ISSAF ve NIST gibi uluslararası sızma denemesi ölçünlerini karşılaştırarak, uluslararası literatürü referans alıp değerlendirerek Türkçe literatüre katkı sağladığı düşünülmektedir.

Çizelge 1: Türkçe Literatürde ve Çalışmamızda Ele Alınan Ölçünleri Karşılaştırması

Çalışmalar	OWASP	OSSTMM	PTES	ISSAF	NIST
[20]	✓	✓	✗	✗	✓
[21]	✓	✗	✗	✗	✓
[22]	✓	✗	✗	✗	✓
[23]	✓	✗	✗	✗	✗
[24]	✓	✗	✗	✗	✗
[25]	✗	✗	✗	✗	✗
[26]	✗	✗	✗	✗	✓
[27]	✗	✗	✗	✗	✓
Çalışmamız	✓	✓	✓	✓	✓

3 Sızma Denemeleri

Sızma denemeleri, güvenlik değerlendirme sürecinde, deneme uzmanlarının gerçek dünya saldırılarını taklit ederek bir uygulama, sistem veya ağın güvenlik mekanizmalarını aşabilecek yöntemleri belirlemeye çalıştığı bir güvenlik denemesidir [28]. Sızma denemesi "bir açık kapı bulma

sanatı" olarak da tanımlanmaktadır [29]. Sızma denemesinde sürekli değişen tehdit ortamına göre saldırganların kullandığı yöntemleri canlandırılır. Bu sırada sistemlerin güvenlik seviyesi ölçülür ve olası saldırı senaryoları analiz edilir. Günümüzde sızma denemesi, organizasyonların siber güvenlik stratejilerinin temel bir bileşeni haline gelmiş olup, birçok sektörde güvenlik gereksinimleri doğrultusunda uygulanmaktadır.

Sızma denemelerinin kökeni, 1970'lerin başlarına kadar uzanır. ABD Savunma Bakanlığı, askeri sistemlerdeki güvenlik açıklarını tespit etmek amacıyla ilk girişimlerde bulunmuş ve bu çalışmalar modern sızma denemelerinin temelini atmıştır [30]. Bu denemeler, bilgisayar sistemlerinin güvenliğini değerlendirmek için kullanılan ilk sistematik yaklaşımlar olmuştur.

1990'lı yıllarda, ağ güvenliği alanında ilk otomatik deneme araçları geliştirilmeye başlanmıştır. 1995 yılında piyasaya sürülen Security Administrator Tool for Analyzing Networks (SATAN), ilk geniş çaplı otomatik zafiyet tarama araçlarından biri olarak kabul edilir [31]. Bu araç, 100'den fazla bilinen güvenlik açığını tarayarak sistemlerin savunmasız noktalarını belirleyebilme yeteneği sunmuştur. Ancak, kötü niyetli saldırganların da bu aracı kullanmasıyla, siber güvenlik topluluğunda tartışmalara yol açmıştır.

Bu dönemin ardından, Nmap, Nessus ve Metasploit gibi araçlar geliştirilmiş ve sızma denemelerinin daha geniş kitleler tarafından uygulanabilir hale gelmesini sağlamıştır [32]. Bu araçlar, sızma denemelerini manuel süreçlerden otomatik sistemlere doğru taşıyarak, daha hızlı ve kapsamlı güvenlik değerlendirmeleri yapılmasını mümkün kılmıştır.

Günümüzde sızma denemeleri, gelişen tehdit ortamına uyum sağlayarak daha kapsamlı ve sistematik hale gelmiştir. Yapay zekâ destekli otomatik sistemler [33] ve Snort [34] gibi otonom güvenlik araçları, gerçek zamanlı verilere dayalı olarak stratejilerini dinamik bir şekilde ayarlayarak geleneksel yöntemlere kıyasla daha karmaşık siber saldırı senaryolarını daha gerçekçi bir şekilde canlandırabilmektedir [19].

Bununla birlikte, sızma denemelerinin etkinliği, belirli bir yönteme dayanılarak yürütülmesiyle doğrudan ilişkilidir. PTES, OWASP, OSSTMM, ISSAF ve NIST gibi uluslararası ölçünler, sızma denemelerinin sistematik olarak planlanmasını ve güvenlik açıklarının tutarlı bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır. Yapay zekâ destekli araçlar, bu yöntemlere entegre edildiğinde, zafiyet analizlerinin hızlanmasını ve kapsamlı güvenlik değerlendirmelerinin daha verimli hale getirilmesini mümkün kılmaktadır [35]. Bu entegrasyon, manuel deneme süreçlerinin zaman alıcı ve maliyetli doğasını azaltarak, sızma denemelerinin ölçeklenebilirliğini artırmakta ve kurumsal güvenlik stratejilerinin daha önalıcı hale gelmesine katkı sunmaktadır.

4 Sızma Denemelerinin Yöntemleri

Sızma denemeleri, yazılım deneme yöntemleri arasında önemli bir yer işgal eder ve sistematik deneme süreçlerinin kritik bir parçasıdır. Bu denemeler, çeşitli saldırı senaryoları tasarlanarak gerçekleştirilir ve yazılım veya sistemdeki güvenlik zayıflıklarını belirlemeyi amaçlar. Şekil-3'de görüldüğü üzere üç farklı türü bulunur: Kara kutu, gri kutu ve beyaz kutu denemeleri [36]. Kara kutu denemesi saldırganın hiçbir bilgiye sahip olmadığı bir senaryoyu varsayarken, beyaz kutu denemesi sistemin iç işleyişinin tam olarak bilindiği bir senaryoyu varsayarak gerçekleştirilir. Gri kutu denemesi ise sınırlı bilgiye sahip bir saldırganın bakış açısıyla gerçekleştirilir. Bu farklı yaklaşımlar, farklı türde zayıf noktaların tespit edilmesine ve güvenlik açıklarının giderilmesine yardımcı olur [36], [37]. Bu sayede yazılımlar daha güvenli hale getirilir ve potansiyel saldırılara karşı daha dirençli hale gelir.

4.1 Kara Kutu Denemesi

Bu deneme türü, bilgi gereksiniminin düşük olduğu bir yaklaşımla icra edilir ve güvenlik uzmanları sanki gerçek bir saldırganmış (black hat) gibi hareket eder [38]. Ürün ya da şirket ortamının dışından yapılan bir deneme yöntemidir.

Şekil- 3: Sızma denemesi yöntemleri

Deneme yapanlar ile yazılım geliştiricileri genellikle bağımsız çalıştıklarından, bu denemeler geliştiricilerin gözünden kaçan hataların tespit edilmesine yardımcı olur. Aynı zamanda alınan güvenlik tedbirlerinin ne kadar etkili olduğunu da ölçer. Dolayısıyla, kara kutu yöntemi ile gerçekleştirilen denemeler, yazılımın güvenilirliğini artırmak için önemli bir araç olarak kabul edilir.

4.2 Beyaz Kutu Denemesi

Beyaz kutu denemesi, kara kutu denemesiyle birlikte yazılım deneme süreçlerinde önemli bir rol oynar ve birbirlerini tamamlayıcı olarak kullanırlar. Beyaz kutu denemesinde saldırgan, ürünün ağ topolojisi, portları, sistem bilgileri, servisler dahil olmak üzere hedefler hakkında detaylı bilgiye hatta kaynak koda sahiptir. Dolayısıyla, deneme edilmek istenen unsurlar daha özel olarak belirlenebilir ve denemeler daha derinlemesine tasarlanabilir. Beyaz kutu denemesinde, tasarım ve planlamanın detaylarına hâkim olunduğu için, deneme senaryoları ve stratejileri daha doğrudan ve özelleştirilebilir bir şekilde oluşturulabilmektedir [38]. Kara kutu denemesinde gereken bilgi toplama adımına ihtiyaç duyulmadığından dolayı bu deneme yöntemi zaman açısından daha az maliyetlidir. Bu deneme türü genellikle şirket içinde gerçekleştirilir ve kara kutu denemesi ile kullanıldığında, yazılımın farklı yönlerini kapsamlı bir şekilde deneme etmeye yardımcı olur. Bu nedenle, beyaz kutu denemesi, yazılımın güvenilirliğini ve kalitesini artırmak için önemli bir araç olarak kabul edilir.

4.3 Gri Kutu Denemesi

Gri kutu denemesi, kara kutu ve beyaz kutu deneme tekniklerinin birleşiminden oluşan melez bir yaklaşımdır. Bu yöntemde güvenlik uzmanı, sistemin tüm kaynak koduna sahip değildir; ancak tamamen dış kaynaklı bir saldırgan gibi de değildir. Genellikle kurum içinden bir çalışanın bakış açısını taklit ederek, fiziksel ortama, sistem mimarisine ve belirli web uygulamalarına sınırlı düzeyde erişim sağlar [38]. Gri kutu denemesinde, senaryoların tasarımında beyaz kutu yaklaşımı; uygulama aşamasında ise kara kutu teknikleri kullanılır. Diğer bir ifadeyle, yazılımın iç yapısını kısmen anlamak ve kodu incelemek için içsel bilgilerden yararlanılırken, dışarıdan gelen bir saldırganın bakış açısıyla davranışlar ve güvenlik açıkları deneme edilir. Bu sayede hem içsel zayıflıklar hem de dışa açık tehdit yüzeyleri tespit edilebilir. Gri kutu deneme yöntemi, sistemin hem içeriden hem de dışarıdan değerlendirilebilmesini sağladığı için dengeli bir yaklaşım sunmakta; ayrıca yazılım geliştirme sürecinde güvenlik açıklarının erken tespitiyle ürünün toplam maliyetini azaltma potansiyeli taşımaktadır [39].

Ele alınan üç farklı sızma denemesi yönteminin bilgi seviyesi, gerçekçilik, zaman ve maliyet, avantajlar ve dezavantajlar açısından karşılaştırmalı analizi Çizelge 2'de sunulmaktadır. Yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini sistematik bir çerçevede göstererek, farklı senaryolar için en uygun yöntemin belirlenmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Çizelge 2: Kara Kutu, Beyaz Kutu ve Gri Kutu Denemesi Karşılaştırması

Özellikler	Kara Kutu Denemesi	Beyaz Kutu Denemesi	Gri Kutu Denemesi
Bilgi Seviyesi	Sisteme dair hiçbir bilgiye sahip olunmaz.	Tüm sistem bilgileri, kaynak kodu ve yapı detayları bilinmektedir.	Sınırlı sistem bilgisine sahiptir.
Gerçekçilik	Gerçek saldırgan senaryolarına en yakın denemedir.	İç güvenlik açıklarını belirlemeye odaklanır, ancak dış tehditleri yansıtmaz.	Hem iç hem dış tehdit perspektifinden analiz sağlar.
Zaman ve Maliyet	Uzun sürebilir, maliyetlidir.	Daha az zaman ve kaynak gerektirir.	Orta düzeyde zaman ve maliyet gerektirir.
Avantajları	Dış tehditlerin benzetimini sağlar.	Derinlemesine analiz ile spesifik güvenlik açıklarını ortaya çıkarır.	İç ve dış tehditleri birlikte değerlendirme imkânı sunar.
Dezavantajları	İç tehditleri ve sistem içi güvenlik açıklarını tespit etmede yetersizdir.	Gerçek saldırgan perspektifini tam olarak yansıtmaz.	Her iki yöntemin bazı sınırlamalarını içerebilir.

5 Sızma Denemesi Ölçünleri

Sızma denemesi, sistemlerin güvenlik açıklarını belirlemek ve riskleri minimize etmek amacıyla uzman ekipler tarafından yürütülen sistematik bir süreçtir. Yeni güvenlik açıklarının sürekli keşfedilmesi ve saldırı tekniklerinin gelişmesi, bu alanda ölçünleştirilmiş yöntemlere duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak üzere, OSSTMM, ISSAF, PTES, NIST ve OWASP gibi uluslararası kabul görmüş sızma denemesi ölçünleri geliştirilmiştir [14]. Bu ölçünler, sızma denemelerinin belirli yöntemlere uygun şekilde yürütülmesini sağlayarak, deneme süreçlerini daha sistematik ve tekrarlanabilir hale getirmektedir. Ayrıca, ölçünler hem kurumlar hem de bağımsız güvenlik araştırmacıları için ortak bir çerçeve sunarak güvenlik değerlendirmelerinin tutarlılığını artırmaktadır.

5.1 Açık Web Uygulama Güvenlik Projesi

Açık Web Uygulama Güvenlik Projesi (OWASP – Open Web Application Security Project) kâr amacı gütmeyen ve web uygulamalarının güvenliğini artırmaya odaklanan küresel bir organizasyondur [40]. 2001 yılında kurulan bu platform, güvenlik araştırmacıları, geliştiriciler ve sektördeki uzmanlar tarafından desteklenmekte olup yaygın güvenlik hatalarını belirlemek, güvenlik açıklarını azaltmak ve güvenli yazılım geliştirme süreçlerini teşvik etmek amacıyla çeşitli projeler yürütmektedir [13].

OWASP tarafından yayımlanan en önemli kaynaklardan biri OWASP Top Ten listesi [3] olup, belirli dönemlerde güncellenen ve sektörde en yaygın görülen güvenlik açıklarını kritiklik derecesine göre sıralayan bir çalışmadır. Bu liste, yazılım geliştiriciler, güvenlik uzmanları ve deneme mühendisleri için rehber niteliğinde olup, en kritik güvenlik zayıflıklarını tanımlayarak bu zayıflıkların nasıl tespit edileceği ve nasıl önlenebileceği konusunda yol gösterici bilgiler sunmaktadır. Örneğin, SQL enjeksiyonu, kimlik doğrulama açıkları ve siteler arası betik çalıştırma (XSS) gibi saldırı türleri OWASP Top Ten listesinde yıllar boyunca en kritik zayıflıklar arasında yer almıştır [41]. Çalışmamız yapılırken en son çıkan ilk 10 zafiyet listesi aşağıdaki gibidir [3]:

OWASP İlk On Zafiyet – 2021

I. Bozuk Erişim Kontrolü (A01:2021 - Broken Access Control)
II. Şifreleme Hataları (A02:2021 - Cryptographic Failures)
III. Enjeksiyon (A03:2021 - Injection)
IV. Güvensiz Tasarım (A04:2021 - Insecure Design)
V. Güvenlik Yanlış Yapılandırma (A05:2021 - Security Misconfiguration)
VI. Savunmasız ve Eski Bileşenler (A06:2021 - Vulnerable and Outdated Components)
VII. Tanımlama ve Kimlik Doğrulama (A07:2021 - Hataları Identification and Authentication Failures)
VIII. Yazılım ve Veri Bütünlüğü Hataları (A08:2021 - Software and Data Integrity Failures)
IX. Güvenlik Loglama ve İzleme (A09:2021 - Security Logging and Monitoring)
X. Sunucu Taraflı İstek Sahteciliği (A10:2021 - Server Side Request Forgery)

5.2 Açık Kaynak Güvenlik Deneme Yöntemi Kılavuzu

ISECOM (The Institute for Security and Open Methodologies) tarafından ilk olarak 2000 yılında ortaya çıkarılan bu proje

[42], çeşitli disiplinlerden ve dış meslek gruplarından uzmanların oluşturduğu açık bir topluluk tarafından sürdürülmektedir. Ticari ve siyasi etkilerden bağımsız olarak finanse edilen ISECOM projeleri, ortaklıklar, abonelikler, sertifikalar ve lisanslara dayalı araştırmalarla desteklenmektedir. Teknolojik ortamların giderek karmaşıklaşması, uzaktan operasyonlar, sanallaştırma ve bulut bilişim gibi gelişmelere paralel olarak, OSSTMM buna uyum sağlamıştır. Yönteminin günümüzdeki üçüncü versiyonu, insan, fiziksel, kablosuz, telekomünikasyon ve veri ağları da dahil olmak üzere geniş bir kanal yelpazesini kapsamaktadır. Bu esneklik, OSSTMM'nin bulut bilişiminden mobil iletişim ağlarına kadar çeşitli altyapıları değerlendirmek için ideal olmasını sağlamakta ve birden fazla kanalda karşılaşılan karmaşık güvenlik sorunlarını ele alınmasında yardımcı olmaktadır. İnsan faktörünün sistemde ciddi bir güvenlik zafiyeti yaratabileceğine değinen ve sosyal mühendisliğe karşı yöntemler öneren ilk ölçün olarak bilinmektedir [43].

5.3 Sızma Denemesi Yürütme Ölçünü

Penetration Testing Execution Standard (PTES), sızma denemelerinin sistematik olarak gerçekleştirilmesini sağlayan kapsamlı bir yöntemdir [5]. Yedi aşamadan oluşan bir deneme çerçevesi sunarak, saldırı vektörlerinin belirlenmesinden güvenlik açıklarının analizine kadar tüm süreci detaylandırmaktadır. Şekil-4'te gösterildiği gibi, PTES yalnızca teknik değerlendirmeleri değil, aynı zamanda deneme stratejileri ve uzman deneyimlerini de içeren bir rehber olarak geliştirilmiştir. Günümüzde, Bilgi teknolojileri güvenliği alanında yaygın olarak kabul gören ölçünlerden biri olarak kullanılmaktadır [44].

Şekil- 4: Sızma denemesi süreç akış şeması [45]

5.4 Bilgi Sistemleri Güvenlik Değerlendirme Çerçevesi

Bilgi Sistemleri Güvenlik Değerlendirme Çerçevesi [46] (ISSAF – Information Systems Security Assessment Framework), Açık Sistem Bilgi Güvenliği Grubu (OISSG) tarafından geliştirilen ve sızma denemesi süreçlerini ölçünleştirmeyi amaçlayan bir güvenlik deneme yöntemidir. Kurumlara güvenlik değerlendirmelerinde kapsamlı bir çerçeve sunarak, güvenlik denemelerinin planlanması, yürütülmesi ve raporlanması aşamalarını detaylandırmaktadır. ISSAF'ın temel hedefi, sızma denemesi sürecinin neden ve nasıl uygulanması gerektiğine dair eksiksiz bir rehber oluşturmaktır [46]. Diğer yöntemlerin genellikle belirli teknik süreçlere odaklandığı eleştirisiyle geliştirilen ISSAF, ağ güvenliği, sistem güvenliği, fiziksel güvenlik ve uygulama güvenliği gibi geniş bir yelpazeyi kapsayan bir deneme süreci sunmaktadır [18].

Ancak, güncellenmemiş olması nedeniyle modern tehdit ortamında etkinliğini yitirdiği belirtilmektedir [17].

5.5 Ağ Güvenliği Deneme Kılavuzu

Ulusal Ölçünler ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından geliştirilen güvenlik deneme yöntemi, başlangıçta Ağ Güvenliği Deneme Kılavuzu (GNST) olarak tanıtılmış ve SP 800-42 [47] çerçevesinde şekillendirilmiştir. Daha sonra bu rehberin genişletilmiş versiyonu SP 800-115 [28] – Bilgi Güvenliği Deneme ve Değerlendirme Teknik Kılavuzu olarak yayımlanmış ve deneme süreçleri daha kapsamlı hale getirilmiştir.

Her iki kılavuz da deneme süreçlerini dört temel aşamada ele almaktadır: planlama, keşif, saldırı ve raporlama [28] [47]. SP 800-42, özellikle ağ güvenliği denemelerine odaklanırken, SP 800-115 daha geniş kapsamlı bir çerçeve sunarak genel bilgi güvenliği değerlendirmelerini içermektedir. Bu yöntemler, kurumların güvenlik açıklarını tespit etmelerini ve sızma denemelerini daha verimli hale getirmelerini sağlamaktadır [14].

Sızma denemeleri için geliştirilen çeşitli uluslararası ölçünler, güvenlik değerlendirme süreçlerinin sistematik ve etkin bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu ölçünler, yöntemsel yaklaşımlar, deneme kapsamları ve değerlendirme kriterleri açısından farklılık göstermektedir. Çizelge 3'te, NIST, OWASP, PTES, OSSTMM ve ISSAF gibi yaygın kullanılan sızma denemesi ölçünleri kapsam, avantaj ve dezavantajları açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, her bir ölçünün güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak, güvenlik uzmanlarının ihtiyaçlarına en uygun yöntemi seçmelerine yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

6 Sızma Denemesi Süreci

Bu bölümde, sızma denemelerinde genellikle kullanılan ve güvenlik endüstrisinde kabul gören Şekil- 4'te gösterildiği gibi deneme süreci ve alt başlıkları incelenmiştir [5], [13], [46], [48].

6.1 Deneme Öncesi Etkileşim

Sızma denemelerinin icrası öncesinde, müşteri ile yapılan toplantılar esas alınarak denemesin amaçları, kapsamı, süresi,

yöntemi, zaman planlaması, maliyeti ve ücretlendirme gibi hususlar ele alınır. Özellikle deneme kapsamının doğru şekilde belirlenmesi, kritik sistemlerin deneme sürecinde istem dışı hizmet kesintisine uğramasını önlemek açısından hayati öneme sahiptir [49].

Çizelge 3: Sızma Denemesi Ölçünlerin Karşılaştırılması

Ölçün	Kapsamı	Avantajları	Dezavantajları
NIST [4]	Ağ Güvenliği, Bilgi Güvenliği, Uygulama Güvenliği, Risk Yönetimi	Risk bazlı yaklaşımı destekler ve her organizasyon için uyarlanabilir. Güvenlik çerçevesi; risk yönetimi, tehdit farkındalığı ve adaptif süreçleri içerir.	Sızma denemesini uygulayacak kişinin çerçeveyi iyi bilmesi gerekir. Organizasyonun mevcut güvenlik durumu hakkında detaylı analiz gerektirir.
OWASP [40]	Web Uygulamaları, API Güvenliği, Mobil Güvenlik, Gömülü Sistemler (IoT, Firmware)	Web güvenliği denemeleri için detaylı yöntemler sağlar (OWASP Web Security Testing Guide vb.). Güncel tehditlere göre düzenli olarak güncellenir. Güvenlik bilinci oluşturma, yazılım geliştirme ve deneme süreçlerine katkı sağlar.	Yalnızca uygulama güvenliğine odaklanır, ağ veya sistem güvenliği konularını kapsamaz. Organizasyon güvenliği yerine bireysel deneme süreçlerine ağırlık verir.
PTES [5]	Ağ Güvenliği, Web Uygulamaları, Fiziksel Güvenlik	Sızma denemeleri için yapılandırılmış yedi aşamalı yöntem sunar. Araçlar, uygulama alanları ve teknikler içeren bir rehberdir. Teknik ve yönetsel raporlama süreçleri içerir.	Hala geliştirilmekte olup, belirli ölçünler açısından eksiklikler barındırmaktadır. Gerçek dünyadaki tüm saldırı senaryolarını kapsamaz.
OSSTMM [42]	Ağ Güvenliği, Fiziksel Güvenlik, Kablosuz Güvenlik, Bulut ve Telekomünikasyon Güvenliği	Ölçülebilir ve tekrarlanabilir deneme yöntemini sunar. İşlemsel güvenlik risk değerlendirmelerine odaklanır. Mobil, telekomünikasyon ve bulut güvenliğini kapsayan geniş bir perspektife sahiptir.	Oldukça karmaşıktır ve tam uygulanması zaman alır. Kuramsal kanıtlar yerine doğrudan işlemsel güvenliği ölçmeye odaklanır.
ISSAF [46]	Ağ Güvenliği, Web Uygulamaları, Veri Tabanı ve Sistem Güvenliği	Sızma denemesi aşamalarını belirli araçlarla ilişkilendirerek kapsamlı bir yöntem oluşturur. Deneme sürecinin kapsamını detaylıca tanımlar ve yürütme aşamalarını sistematikleştirir. Teknik ve yönetsel raporlamaları içeren yapılandırılmış bir süreç sunar.	Güncellenmemekte olup, modern güvenlik tehditlerine tam olarak uyum sağlamamaktadır. Eski araç ve yöntemleri içermesi nedeniyle günümüz tehditleri için sınırlı kalabilir.

Bu aşamada, deneme sürecinde karşılıklı iletişim ve koordinasyon gerektirecek kişilerin kimlik bilgilerini içeren bir liste oluşturulur. Denemesin yasal çerçevesi ve uygunluğu için gerekli olan tüm belgeler ve sözleşmeler hazırlanır ve imzalanır. Tüm bu hazırlıklar tamamlandıktan sonra, deneme uzmanları, belirtilen yetkilendirme ve izinler doğrultusunda sızma denemelerine başlamak üzere harekete geçerler. Bu şekilde, deneme süreci başarılı bir şekilde yürütülmüş ve aynı zamanda taraflar arasındaki güven ve iş birliği pekiştirilmiş olur.

6.2 Bilgi Toplama

Bilgi toplama süreci, sızma denemesinin temel bir unsurudur ve denemesin etkinliğini doğrudan etkiler. Bilginin çeşitliliği ve niteliği, yapılan denemelerde keşfedilebilecek zayıflıkların kapsamını belirleyen kritik faktörlerdir. Bu bilgiler arasında fiziksel bilgiler (sunucu odasının yeri, geçiş kontrol sistemleri, donanım özellikleri vb.), bireysel bilgiler (çalışan ismi, ünvanı, mail adresi ve sosyal mühendislikte kullanılmak üzere potansiyel hassas kişisel bilgiler vb.), mantıksal ilişkiler (ağ topolojisi, sunucu – istemci ilişkisi ve veri akış diyagramı vb.), organizasyon yapısı (organizasyonun yönetim yapısı, departmanlar ve çalışanları, anahtar kişiler vb.), kullanılan cihazlar (bilgisayar, mobil telefonlar, ağ ekipmanları ve diğer donanımlar vb.), gibi çeşitli türleri bulunmaktadır. Deneme uzmanı belirlenen hedefe üç farklı perspektiften yaklaşır.

Pasif Keşif: Pasif keşif, hedef sistemle doğrudan iletişime geçmeden gerçekleştirilen bilgi toplama faaliyetidir. Bu yöntemde, güvenlik uzmanı hedefin varlığından haberdar olmaksızın; WHOIS sorguları, Google Dorking gibi açık kaynak istihbarat teknikleriyle alan adı, barındırma hizmetleri, DNS kayıtları ve altyapı bileşenlerine dair bilgiler toplar [50]. Herhangi bir ağ trafiği oluşturulmadığından tespit edilme riski yoktur. Ancak, kullanılan veriler genellikle geçmişe dönük ve güncelliğini yitirmiş olabileceğinden analiz sırasında dikkatli olunmalıdır.

Yarı Pasif Keşif: Hedefin dikkatini üzerimize çekmeden, çeşitli kaynaklardan taramalar gerçekleştirilir. Bu kaynaklar, önceden yayınlanmış web sayfaları ve bunların barındığı sunucular, haberler, blog yazıları gibi çeşitli platformlar olabilir. Ağ düzeyinde aktif port taramaları ya da gizli içerik aramaları gibi müdahaleler yapılmaz. Bunun yerine, normal internet trafiği gibi görünen hareketlerle hedefin profil bilgileri toplanmaya çalışılır. Bu yaklaşım, saldırı sonrasında hedefin geriye dönüp trafik akışına baktığında kesin bir yargıya varamamasını sağlamayı amaçlar.

Aktif Keşif: Bu aşama, deneme uzmanının hedef sistemle doğrudan etkileşime geçtiği bilgi toplama sürecidir. Bu aşamada Nmap, FinalRecon gibi araçlar kullanılarak açık portlar, çalışan servisler, işletim sistemi bilgileri ve yapılandırma ayrıntıları belirlenir [50]. Ağ haritalama, sistem keşfi ve zafiyet taraması gibi işlemler içerdiğinden tespit edilme riski yüksektir. Ancak, sistemin mevcut güvenlik durumu hakkında en kapsamlı ve güncel bilgiler bu aşamada elde edilir

Elde edilen bilgiler ileride açık bir arka kapı bırakmak için ya da farklı deneme yaklaşımlarında kullanmak amacıyla önemlidir.

6.3 Tehdit Modelleme

Önceden toplanan bilgilerin ışığında, en uygun ve etkili deneme tekniklerini kapsayan bir yol haritası oluşturulur ve modelleme süreci başlatılır. Bu modelleme süreci; iş varlıkları,

iş süreçleri, potansiyel tehdit aktörleri ve bu aktörlerin bilgi seviyesi, erişim yetenekleri ve saldırı kapasiteleri gibi unsurları kapsamlı şekilde ele alır. STRIDE (Spoofing, Tampering, Repudiation, Information Disclosure, Denial of Service, Elevation of Privilege) gibi yöntemlerden yararlanılarak her bir tehdidin kategorik analizi yapılabilirken; DREAD (Damage, Reproducibility, Exploitability, Affected Users, and Discoverability) modeli kullanılarak tehditlerin hasar potansiyeli ve tekrar edilebilirliği gibi faktörlerle risk önceliği hesaplanabilir[51].

Sistem, her bir açıdan olası tehditleri belirlemeye çalışır ve bu tehditler, şirket yönetimiyle yapılan görüşmeler neticesinde belirlenen risk düzeylerine göre önceliklendirilir. Bu çerçevede; tehditlerin sıklığı, erişim türü, hedeflenen sistem bileşenleri ve uygulanan teknikler gibi parametreler dikkate alınır. Öncelikli tehditlerin belirlenmesinin ardından deneme uzmanları, bu tehditlere karşı etkili mücadele stratejileri geliştirerek sızma denemesi senaryolarını oluşturur. Deneme ekibi, saldırı vektörlerini, kullanılacak araçları ve süreç planlamasını belirleyerek denemesin uygulama çerçevesini tanımlar.

Bu yapılandırma, tehditlerin gerçekçi biçimde modellenmesini ve zafiyet analizinin yönünün belirlenmesini sağlar. Nihai olarak; potansiyel zayıflıklar, risk seviyelerine, etki derecelerine ve önem düzeylerine göre sıralanır ve değerlendirilir. Bu sistematik yaklaşım, sızma denemesinin teknik doğruluğunu artırmakla kalmaz, aynı zamanda kurumsal güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesine de katkı sunar.

6.4 Zayıflık Analizi

Sistem ve uygulamalardaki zayıflıkların tespit edilmesi, siber güvenlik alanında kritik öneme sahip bir süreç olan zafiyet analizinin temelini oluşturur. Bu analiz, bir organizasyonun bilgi teknolojisi altyapısında potansiyel güvenlik açıklarını belirlemek ve bu açıkların etkilerini anlamak için önemlidir. Zafiyet değerlendirmesi, hedef bir sistemdeki zayıflıkları belirleme, analiz etme ve önceliklendirme sürecidir. Bu süreç; hedef keşfi, sistem taraması, sonuç analizi ve raporlama gibi aşamaları içerir. Amacı; yanlış yapılandırmalar, yazılım hataları ve saldırganlar tarafından istismar edilebilecek işlemsel açıklar gibi zayıflıkları ortaya çıkarmaktır[13].

Zafiyet analizinde, sızma denemesi ekibi, denemesin derinliğini ve kapsamını özenle belirler. Derinlik, her bir sistem veya uygulamanın kimlik doğrulama, erişim kontrolleri ve güvenlik önlemleri gibi kritik bileşenlerini detaylı bir şekilde incelemeyi içerir. Bu inceleme, sistemin savunma mekanizmalarının etkinliğini değerlendirmeyi amaçlar. Kapsam ise, denemesin hangi sistemlerin ve uygulamaların dahil edileceğini ve hangi ağ bölütlerinin deneme edileceğini belirler. Bu aşamada, organizasyonun iş ihtiyaçları, kritik varlıkları ve risk toleransı gibi faktörler dikkate alınır. Kapsamlı bir zafiyet analizi, organizasyonun tüm dijital varlıklarını koruma stratejilerini geliştirmesine ve siber saldırılara karşı daha hazırlıklı olmasına yardımcı olur.

Zafiyet analizi sürecinde, aktif denemeler, pasif gözlemlemeler, araştırmalar ve doğrulama adımları gibi farklı yöntemler kullanılır. Bu adımların tamamlanmasıyla, organizasyonun güvenlik zayıflıkları ve risk alanları hakkında kapsamlı bir anlayış elde edilir. Uzman bir deneme ekibi, deneyim ve bilgi birikimi sayesinde bazen daha önce bilinmeyen (zero-day) zayıflıkları bile tespit edebilir ve organizasyonun savunma stratejilerini güçlendirmesine yardımcı olabilir.

Aktif denemeler, uygulama arayüzü gibi üst seviyeden veya düşük seviyeli bir ağ bileşeniyle etkileşime geçebilir. Bu etkileşimler, manuel ve otomatik yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Örneğin, aktif port taraması gibi işlemler, manuel olarak oldukça zaman alabilir; ancak, otomasyon ile yapılarak zaman tasarrufu sağlanır ve deneme uzmanının diğer alanlara daha fazla odaklanabilmesi mümkün hale gelir [52]. Otomatik port, servis veya direkt zafiyet tarayıcı araçlar mevcuttur. Bu araçların kullanılması zaman tasarrufu sağlayabilir, ancak otomatik sistemlerde hata payı bulunmaktadır. Bu nedenle, tespit edilen zayıflıklar, açık portlar veya servisler manuel olarak da doğrulanmalıdır. Bu doğrulama süreci, zafiyet analizinin daha güvenilir verilere dayanmasını sağlar ve saldırı vektörlerinin belirlenmesinde aktif bir rol oynar.

Pasif gözlemlerde, şirket içinden elde edilen dosyaların metadata analizi yapılabilir. Dosyanın oluşturan kişi, oluşturma tarihi, son kaydetme tarihi ve kullanıcının unvanı gibi bilgiler metadatayı oluşturur. Başka bir pasif veri elde etme yöntemi ise ağ trafiğinin dinlenmesidir. Bazen ağ paketlerin de veri sızıntıları oluşabilir ve bu sızıntılar dışarıya açık ve güvensiz bir şekilde yayılabilir. Bu veriler yeterince toplandığında, önemli bilgiler elde edilebilir.

Doğrulama aşamasında, sızma denemesi uzmanları genellikle aynı ana bilgisayarda birden fazla araç kullanarak elde ettikleri tekrarlanan belirli zayıflıkların mikro sorunlarına odaklanır. Ancak bu durum, deneme çıktısındaki istatistiksel sonuçları yanıltıcı bir şekilde etkileyebilir ve yanlış bir risk profili oluşturabilir. Belirli korelasyon, belirli bir tanımlanabilir soruna ilişkin bilgileri (zafiyet kimliği, Common Vulnerabilities and Exposures - CVE, satıcı dizinleme numaraları vb.) mikro faktörlerle (makine adı, IP, tam alan adı, MAC Adresi vb.) gruplandırır. Örneğin, aynı zafiyeti CVE numarasına göre gruplandırarak, farklı araçlardan gelen bulguları birleştirebiliriz. Böylece zayıflıklar tekrara uğramaz ve farklı araçlardan faydalanarak daha doğru sonuçlar elde edilir.

Araştırma aşamasında ise tespit edilen zayıflıkların kaynağı araştırılır ve bir açık kaynak yazılım veya aracından kaynaklanıp kaynaklanmadığı incelenir. Ayrıca, zafiyetin ne kadar kolay ulaşılabilir ve kullanılabilir olduğu değerlendirilir. Genellikle, bulunan zayıflıklar bir sürecin açığı olabileceğinden dolayı hızla çözüme kavuşturulabilir.

6.5 İstismar

İstismar aşaması, sızma denemesi sürecinin en kritik ve zorlu adımlarından biridir. Bu aşamada, sızma denemesi ekibi, hedef sistemde tespit edilen güvenlik açıklarını kullanarak yetkisiz erişim elde etmeye veya sistemin normal işleyişini aksatmaya çalışır. Sızma denemesi ekibinin amacı, gerçek dünyadaki saldırganlar gibi davranarak, hedef sistemin

güvenlik önlemlerini aşmak ve hedef sistem üzerinde kontrol sağlamaktır.

İstismar süreci, yalnızca teknik bilgi ve becerileri değil, aynı zamanda hedef sistemi analiz etme, uygun saldırı tekniklerini seçme ve saldırıları dikkatlice planlama yeteneğini de gerektirir. Bu nedenle, bu aşama genellikle diğer aşamalardan daha fazla zaman alır ve titizlikle yürütülmesi gerekir. İstismar aşaması sırasında, sızma denemesi ekibi OWASP İlk On Zafiyet tablosunda da yer alan başlıklar kapsamında aşağıda bir kısmı belirtilen çeşitli gerçek dünya saldırı tekniklerini kullanır [48]:

I. SQL Enjeksiyonu (SQL Injection)
II. Ortadaki Adam Saldırısı (Man-in-the-middle (MITM))
III. Hizmet Reddi Saldırısı (Denial of Service Attack- DoS)
IV. Parola Saldırısı (Password Attack)
V. Siteler Arası Betik Çalıştırma Saldırısı (Cross-site scripting - XSS)

Bu saldırı türleri, Bölüm 7 'de detaylı şekilde incelenmiştir.

İstismar aşamasında, saldırı türlerinden birini veya birkaçını hedef sistem üzerinde denemek, mevcut güvenlik açıklarının ne kadar ciddi olduğunu ortaya koymak açısından önemlidir. Ancak bu aşamada, saldırıların dikkatli bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir; çünkü hedef sistem üzerinde gerçekleştirilen herhangi bir saldırı, sistemin çökmesine veya işlevselliğinin bozulmasına neden olabilir. Sızma denemesi ekipleri, sistemin güvenlik mekanizmalarını atlatmaya çalışırken genellikle şu tür engellerle karşılaşırlar:

1. Güvenlik yazılımları: Çoğu sistem anti-virüs yazılımı, saldırı tespit sistemleri (Intrusion Detection Systems - IDS), saldırı önleme sistemleri (Intrusion Prevention System - IPS) ve web güvenlik duvarları (WAF) ile korunur. Sızma denemesi ekipleri, bu yazılımları aşarak saldırılarını gerçekleştirmek zorundadır.

2. Şifreleme ve kod karartma teknikleri: Modern sistemler veri güvenliğini sağlamak için şifreleme ve kod karartma (obfuscation) tekniklerini kullanır. Bu yöntemler, sızma denemesi ekibinin şifrelenmiş verileri çözmesini ya da karartılmış kodları analiz etmesini zorlaştırır.

3. Gelişmiş güvenlik mekanizmaları: Sistemlerde kullanılan beyaz liste ve kara liste stratejileri, saldırıların engellenmesi için önemli bir güvenlik önlemidir. Beyaz listeleme, yalnızca belirlenen güvenli kaynaklardan gelen işlemlere izin verirken, kara listeleme bilinen zararlı kaynakları engeller. Sızma denemesi ekibi, bu güvenlik önlemlerini aşmak için daha karmaşık saldırı teknikleri geliştirmek zorundadır.

4. Saldırı tespit ve önleme sistemleri: IDS ve IPS sistemleri, ağ trafiğini analiz ederek şüpheli davranışları tespit eder ve saldırıları engeller. Bu tür sistemlerin etkin olduğu ortamlarda sızma denemesi ekipleri, saldırılarını bu sistemlerden gizlemek zorundadır.

5. Ağ bölütleme ve ileri düzey erişim denetimleri: Kurumlar genellikle ağlarını bölütlere ayırır ve her bölüt için ayrı erişim denetimleri uygularlar. Sızma denemesi ekipleri, bu önlemleri aşarak farklı ağlara sızmayı hedefler.

6. Gerçek zamanlı izleme ve alarmlar: Şüpheli faaliyetlerin tespit edilmesi durumunda yöneticilere anında bildirim gönderen gerçek zamanlı izleme ve alarm sistemleri kullanılır. Sızma denemesi ekipleri, bu alarmları devre dışı bırakmaya ya da farklı bir saldırı stratejisi geliştirmeye çalışır.

İstismar aşamasında bulunan zayıflıkların kritiklik düzeyi, sızma denemesinin genellikle en önemli sonuçlarından biridir; çünkü bu aşama, sistemin güvenlik seviyesinin ne derece zayıf olduğunu açık bir şekilde ortaya koyar. İstismar aşaması tamamlandığında, sızma denemesi ekibi ele geçirdiği sistemde kalıcı bir yer edinme aşamasına geçer. Bu süreçte, daha önce ele geçirilen sistemde, saldırıların devamlılığını sağlamak için çeşitli yöntemler kullanılır. Ayrıca, sistemde daha derinlere inmek ve ek hedefler keşfetmek amacıyla yatay hareket stratejileri devreye sokulabilir.

6.6 İstismar Sonrası

Sızma denemesinin istismar sonrası aşamasında, ele geçirilen bir makine üzerindeki kontrolü sürdürmek amaçlanır. Bu aşamada, sızma denemesi ekibi ağ arayüzleri, yönlendirme tabloları, Alan Adı Sistemi (Domain Name System - DNS) ayarları ve vekil sunucuları (proxy servers) gibi bileşenleri analiz ederek ek hedefler belirler ve uzun vadeli erişim için arka kapı programları yükler. Gerektiğinde, deneme sonrası sistemlerde izleri silmek için temizlik işlemi de yapılır.

Uzun vadeli erişim sağlama

1. Arka Kapı Yerleştirme: Arka kapılar, sistem yeniden başlatılsa ya da oturum kapatılsa bile saldırganın sisteme erişimini sürdürmesini sağlayan yazılım ya da yöntemlerdir. Bu, bir hizmeti manipüle etmek ya da zararlı bir yazılım yerleştirmek suretiyle yapılabilir. Arka kapılar, saldırganın ileriki aşamalarda sisteme daha hızlı ve fark edilmeden erişmesini sağlar.

2. Yetki Yükseltme: Sızma denemesi sırasında elde edilen yetkiler her zaman sistemdeki en yüksek yetkiler olmayabilir. İstismar sonrası aşamada saldırgan ya da sızma denemesi ekibi, yönetici (root) yetkilerini ele geçirmeye çalışır. Bu yetkiler, sistem üzerinde tam kontrol sağlamanın yanı sıra daha fazla hedefe ulaşmada da kullanılabilir.

3. Bilgi Çıkışı: Ele geçirilen sistemde ya da ağda önemli veriler bulunabilir. Bu aşamada, kritik verilere erişilip bu verilerin dışarıya sızdırılması deneme edilir. Bu veriler, kimlik bilgileri, müşteri bilgileri, ticari sırlar veya başka hassas bilgiler olabilir. Bilgi çıkışı, genellikle saldırganların nihai hedeflerinden biridir ve ciddi veri ihlallerine neden olabilir.

4. Yatay Hareket Kabiliyeti: İstismar sonrası süreçte, saldırganlar mevcut ele geçirdikleri sistemleri kullanarak başka sistemlere erişmeye çalışır. Yatay hareket, aynı ağ içinde ya da başka bir ağ bölütüne geçmek anlamına gelir. Bu süreç, deneme ekibinin ağın ne kadar derinine nüfuz edebileceğini ve hangi diğer cihazları hedef alabileceğini anlamak için önemlidir. Bu, birden fazla sistemi kontrol altına almayı ve en kritik verilere ulaşmayı sağlayabilir.

5.

İzlerin temizlenmesi

Gerçek dünya saldırılarında, saldırganlar genellikle sistemdeki izlerini temizleyerek kendilerini gizlerler. Bu süreç, sızma denemesi sırasında da denenebilir. Log dosyalarının silinmesi veya log manipülasyonu, sistemde yapılan işlemler hakkında iz bırakmamak için yaygın kullanılan yöntemlerdir. Ayrıca, saldırı sırasında kullanılan araçlar ve arka kapılar da kaldırılır ya da tespit edilmesi zor olacak şekilde gizlenir. Bu adım, saldırganın sistemde uzun süre fark edilmeden kalabilmesi için kritik öneme sahiptir. Ancak, sızma denemeleri tamamlandıktan sonra deneme edilen sistemlerin normal çalışma düzenine dönmesi için bu izlerin tamamen temizlenmesi gerekmektedir.

7. Log Manipülasyonu: Deneme sırasında kullanılan araçların ve yapılan işlemlerin sistemde iz bırakmaması için olay günlüklerinde değişiklik yapılabilir. Bu da saldırının tespit edilmesini zorlaştırır.
8. Zararlı Yazılım (Malware) veya Kod Bloğu (Script) Kaldırma: Sızma denemesi sırasında kullanılan zararlı yazılımlar veya komut dosyaları denemesin sonunda kaldırılmalıdır. Bu, sistemin normal çalışma durumuna geri döndüğünden emin olmak için kritik bir adımdır.
9. Ağ Trafiği İzleme ve Gizleme: Saldırının tespit edilmesini önlemek amacıyla ağ trafiğinde yapılan değişiklikler ve gizli bağlantılar da temizlenmelidir.

6.7 Raporlama

Raporlama aşaması, sızma denemesinin en önemli çıktılarından biridir ve gerçekleştirilen denemelerin sonuçlarının hem teknik ekip hem de yönetim seviyesine uygun biçimde sunulmasını amaçlar. Yapılan tüm deneme ve analizler tamamlandıktan sonra, tespit edilen zayıflıkların detaylandırıldığı kapsamlı bir teknik rapor hazırlanır. Teknik rapor, sızma denemesi süresince kullanılan yöntemleri, tespit edilen güvenlik açıklarının ciddiyetini ve her bir zafiyetin ortaya çıkarılmasında uygulanan teknikleri ayrıntılı bir şekilde ele alır. Ayrıca, sektörde yaygın olarak kullanılan diğer deneme yöntemlerine referanslar da bu rapor kapsamında sunulur. Bu şekilde, teknik ekip, hangi yöntemlerin ve araçların kullanıldığını net bir şekilde anlayarak, bulguların güvenilirliği ve geçerliliği hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme yapabilir.

Yönetim seviyesine sunulan rapor ise, daha stratejik ve özetleyici bir yaklaşımla hazırlanır. Bu rapor, belirlenen zayıflıkların risk seviyeleri ve bu zayıflıkların kuruma veya sistemin işleyişine doğurabileceği potansiyel etkiler üzerine kapsamlı bir analiz sunar. Yönetim düzeyinde hazırlanan rapor, genellikle teknik detaylardan arındırılarak, güvenlik açıklarının iş sürekliliği, itibar kaybı ve mali zararlar gibi kritik konular üzerindeki etkilerine odaklanır. Bu değerlendirme, üst düzey yöneticilere, kurumun mevcut siber güvenlik durumunu anlamaları ve alınması gereken önlemler hakkında bilinçli kararlar verebilmeleri için gerekli olan bilgileri sağlar.

Her iki raporda da tespit edilen güvenlik açıklarına yönelik düzeltici ve önleyici öneriler sunulur. Teknik raporda, her bir zafiyetin nasıl giderilebileceği üzerine ayrıntılı teknik çözümler ve en iyi uygulama önerileri yer alırken, yönetim seviyesindeki rapor, bu güvenlik açıklarının kapatılmasının sağlayacağı işlevsel ve işlemsel faydaları vurgular. Özellikle, zafiyet yönetimine yönelik öneriler, siber güvenlik politikalarının iyileştirilmesine ve sistemlerin genel güvenlik duruşunun güçlendirilmesine yönelik somut adımlar içerir.

Bu raporlama süreci, sızma denemesinin bütünsel bir çerçevede değerlendirilebilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Raporlar hem teknik hem de yönetim seviyesinde, kurumun güvenlik açıklarını kapatma yönündeki eylem planlarını şekillendirmekle kalmaz, aynı zamanda kurumun uzun vadeli siber güvenlik stratejilerine katkı sağlar. Sonuç olarak, bu sistematik ve hedefe yönelik raporlama yaklaşımı, kurumun genel siber güvenlik duruşunu güçlendirmek için gerekli olan stratejik kararların alınmasını kolaylaştırır ve potansiyel tehditlere karşı daha dirençli bir savunma mekanizması oluşturulmasına zemin hazırlar.

7 İstismar Saldırıları

Bu bölümde sistem de bulunan zayıflıklara nasıl saldırı denemelerinin yapıldığını göreceğiz. Sızma denemesi süreçlerinde OWASP'ta yaygın olarak karşılaşılan bazı istismar tiplerinin bahsedilecektir.

7.1 SQL Enjeksiyonu

Saldırgan, SQL enjeksiyonu gerçekleştirmek için, normal bir SQL komutunun anlamını değiştirmek amacıyla kodun içine anahtar kelimeler veya operatörler yerleştirdiğinde, bir SQL saldırısı gerçekleşmiş olur. Kötü niyetli SQL ifadeleri, güvenlik açığı bulunan bir uygulamada, farklı giriş mekanizmaları aracılığıyla uygulamaya dahil edilebilir [53] .

Çerezler aracılığıyla enjeksiyon

SQL enjeksiyonu, çerezler aracılığıyla da gerçekleştirilebilir. Çerezler, istemci tarafında yerel bir dosyada saklanır ve kullanıcının oturum durumunu koruyarak web uygulamalarında kullanılır. Kötü niyetli bir saldırgan, çerezlere zararlı kodlar enjekte edebilir. Eğer web uygulaması, kullanıcı oturumlarını çerezler aracılığıyla izliyorsa, saldırgan bu çerezlere zararlı SQL kodlarını gömebilir ve böylece sunucuya gönderilen SQL sorgularını manipüle edebilir.

Sunucu değişkenleri üzerinden enjeksiyon

Sunucu değişkenleri, Hipermetin Transfer Protokolü (Hypertext Transfer Protocol-HTTP), ağ başlıkları ve çevresel değişkenler (bir kullanıcının oturum bilgileri, geçerli dizin yolu vb.) gibi bir dizi veriyi kapsar. Web uygulamaları, bu sunucu değişkenlerini kullanıcı etkinliğini izlemek ve tarama desenlerini analiz etmek gibi çeşitli amaçlar için kullanır. Ancak, bu değişkenler uygun temizlenmeden bir veri tabanında saklanırsa, bu bir SQL enjeksiyonu zafiyeti yaratabilir. Kötü niyetli aktörler, HTTP ve ağ başlıklarında saklanan değerleri manipüle ederek, SQL enjeksiyon saldırılarını doğrudan başlıklara yerleştirebilirler. Sonuç olarak, veri tabanı sunucu değişkenlerini kaydetmeye çalıştığında, başlıklardaki enjekte edilmiş SQL kodu çalıştırılabilir ve potansiyel güvenlik ihlallerine yol açabilir.

İkinci dereceden enjeksiyon

İkinci dereceden enjeksiyonlar, saldırganların bir sistem veya veri tabanına kötü niyetli girdiler ekleyerek, bu girdiler daha sonra kullanıldığında dolaylı olarak bir SQL enjeksiyon saldırısını tetiklemesidir. Bu tür saldırının amacı, tipik bir (yani birinci dereceden) enjeksiyon saldırısından önemli ölçüde farklılık gösterir. İkinci dereceden enjeksiyonlar, kötü niyetli girişin veri tabanına ilk gönderildiği anda saldırının gerçekleşmesini sağlamaya odaklanmaz. Bunun yerine, saldırganlar, girdinin daha sonradan hangi amaçla kullanılacağını bilerek ve saldırılarını bu kullanım sırasında gerçekleşecek şekilde planlarlar.

Şekil-5'te görülen bir parola güncelleme SQL sorgusu üzerinde nasıl bir enjeksiyon örneği yapılabileceğini aşağıda verilmektedir.

```
queryString="UPDATE users SET password='" + newPassword + "' WHERE
    userName='" + userName + "' AND password='" + oldPassword + "'"
```

Şekil- 5: Parola güncelleme sorgusu

Burada newpasword yerine istediğimiz değeri (ör:newpwd) , oldpassword yerinede rastgele bir (ör: oldpwd) değer ve username yerine "admin' --" yazılırsa SQL sorgusu Şekil-6'deki haline dönüşür.

```
UPDATE users SET password='newpwd'
WHERE userName= 'admin'--' AND password='oldpwd'
```

Şekil- 6: Enjeksiyon sorgusu

"--" operatöründen sonraki alanlar yorum satırı haline gelir ve parola kısmı etkisiz hale gelir.

Bu SQL çalıştığı zaman admin kullanıcısının istediğimiz ve SQL sorgusuna yazdığımız parolasıyla girebiliriz.

7.2 Aradaki Adam Saldırısı

Aradaki adam saldırısı (MITM), iki taraf arasında gerçekleşen iletişim trafiğine izinsiz şekilde müdahale edilmesini içeren kritik bir siber saldırı türüdür. Saldırgan, iletişim kuran tarafların arasına girerek veri akışını gizlice dinleyebilir, değiştirebilir veya yönlendirebilir. Bu saldırılar, özellikle şifrelenmemiş bağlantılarda veya zayıf güvenlik önlemlerine sahip ağlarda kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

MITM saldırıları hem yazılım hem de fiziksel yöntemlerle uygulanabilmektedir. Yazılım teknikler arasında ARP dinzime (spoofing) ve DNS dinzimesi gibi ağ katmanı manipülasyonları öne çıkarken, fiziksel yöntemlerde ise ağ trafiğinin pasif olarak izlenmesi için TAP (Test Access Point) cihazları veya ağ anahtarlarında yer alan iskele aynalama (port mirroring) özellikleri kullanılmaktadır[54]. Bu yöntemler sayesinde, saldırganlar ağ trafiğini doğrudan manipüle etmeksizin izleyebilir ve veri toplama işlemini ağ performansını etkilemeden gerçekleştirebilirler. Özellikle TAP'ler, tüm trafik akışını kayıpsız ve kesintisiz şekilde sunarak iskele aynalamaya kıyasla daha güvenilir veri erişimi sağlamaktadır [55]. Diğer bir yöntem ise saldırganın cihazını meşru bir erişim noktası gibi yapılandırarak kullanıcıları sahte bir Wi-Fi ağına yönlendirmesiyle gerçekleştirilen ve şeytan ikizi (evil-twin) olarak adlandırılan yöntem, MITM saldırılarında sıkça kullanılan etkili bir tekniktir [56]. Bu senaryoda kullanıcı, saldırganın erişim noktasına bağlanarak tüm trafiğini onun üzerinden geçirir.

Aşağıda MITM saldırısına ait tipik bir topoloji örneği sunulmuştur ve yukarıda bahsedilen saldırı vektörlerinin nasıl gerçekleştirilebileceği aktarılmıştır.

[KULLANICI] <-----> [SALDIRGAN] <-----> [SUNUCU]

Adım 1: Kullanıcı sunucuya bağlanmak ister.
Adım 2: Trafik saldırganın cihazına yönlendirilir.
Adım 3: Saldırgan veriyi okuyabilir, değiştirebilir.
Adım 4: Saldırgan veriyi sunucuya iletir.
Adım 5: Sunucudan dönen veri tekrar saldırgana gelir.
Adım 6: Manipüle edilmiş veya izlenmiş veri kullanıcıya ulaşır.

Bu tür saldırılar sonucunda kişisel bilgiler, oturum verileri, finansal bilgiler veya kurumsal veriler ele geçirilebilir. Ayrıca saldırganlar, kimlik doğrulama sürecine müdahale edebilir, kullanıcıyı sahte web sayfalarına yönlendirerek kötü amaçlı yazılımlar bulaştırabilir ya da kullanıcı davranışlarını manipüle edebilir.

MITM saldırıları genellikle şu aşamalardan oluşur:

- Yakalama (Intercepting): Saldırgan, iki taraf arasındaki iletişimi kesmek veya yönlendirmek için bir yöntem bulur. Bu, genellikle ARP sahteciliği, DNS zehirlemesi veya Güvenli Soket Katmanı (Secure Sockets Layer - SSL) / Taşıma Katmanı Güvenliği (Transport Layer Security - TLS) zayıflıkları üzerinden yapılır. Örneğin, ARP sahteciliği ile saldırgan, yerel ağdaki cihazlara kendi MAC adresini yönlendirir ve böylece iki taraf arasındaki trafiği kendine çeker.
- Dinleme (Eavesdropping): Saldırgan, iki cihaz arasındaki trafiği başarılı bir şekilde üzerine aldıktan sonra, bu trafiği izleyebilir. Şifrelenmemiş veriler saldırgan tarafından kolayca okunabilir ve hassas bilgiler elde edilebilir. Şifreli trafiğin ise SSL/TLS protokollerindeki güvenlik açıkları kullanılarak çözülmesi mümkündür.
- Manipülasyon (Manipulation): Trafiğin saldırganın eline geçmesiyle birlikte, saldırgan iletişimdeki veri paketlerini değiştirebilir, sahte veri gönderebilir veya iletişim akışını bozar. Örneğin, kullanıcının girdiği banka bilgilerinin değiştirilebilmesi ya da bir kullanıcıyı kimlik avı sitesine yönlendirme gibi durumlar bu aşamada gerçekleşir.

MITM saldırıları, farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir ancak en yaygın olarak ARP sahteciliği yapılarak gerçekleştirilir [57]. Bu yöntem, ARP protokolünün zayıf güvenliği ve saldırının basit bir şekilde uygulanabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. ARP, MAC adresi ile IP adresi arasında bir eşleme yaparak çalışır ve iki tür mesaj kullanır: istek ve yanıt. Bu iletişim, kaynak ve hedef olmak üzere iki cihaz arasında gerçekleşir. ARP'de herhangi bir güvenlik önlemi bulunmadığı için, sahte bir ARP yanıtı bir cihaz tarafından alınabilir ve istekte bulunulmamış olsa bile bu yanıttaki bilgi cihazın belleğine kaydedilebilir. Bu durum, MITM saldırılarının kolayca gerçekleştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

MITM saldırısı örneği

Uygulamada bir iOS cihazın modem olarak davrandığı ve Windows işletim sistemine sahip iki bilgisayarın bağlı olduğu bir ağ ortamında ARP sahteciliği kullanılarak bir MITM saldırısı gerçekleştirilmiştir.

Bu saldırının gerçekleştirilmesin de kullanılan araç Şekil- 7'de görüldüğü gibi Ettercap, Linux tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir ağ analiz ve saldırı aracıdır. Ettercap başlatıldığında, ilk olarak hangi ağ arabiriminin kullanılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Genellikle, kullanılan ağ arayüzü "*eth0*" veya "*wlan0*" olacaktır. Çıkan pencereden uygun ağ arabirimi seçilir ve onaylanır (örneğin, Şekil- 7'de görüldüğü gibi *eth0* seçilir). Böylece tarama (unified sniffing) başlatılır. MITM saldırısının başarılı olması için hedef cihazları belirlemeniz gerekmektedir.

Şekil- 7: Ettercap açılışı

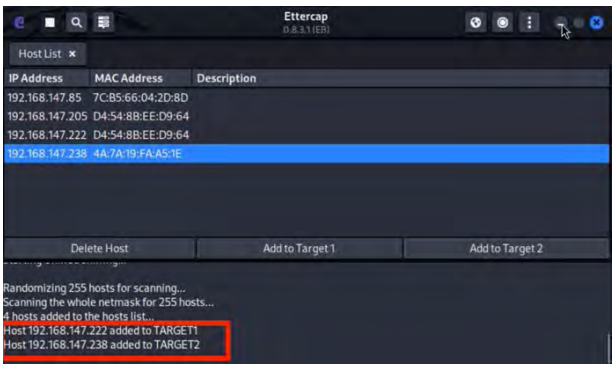
Ettercap, ağdaki tüm cihazları tarayabilir ve bunları IP adresleriyle birlikte listeler. Ettercap arabiriminde menüden Şekil- 8'de olduğu gibi arama sembolüne tıklanarak tarama başlatılır ve listeyi yanındaki butona tıklayarak görüntüleyebiliriz.

Şekil- 8: Tarama başlatılması

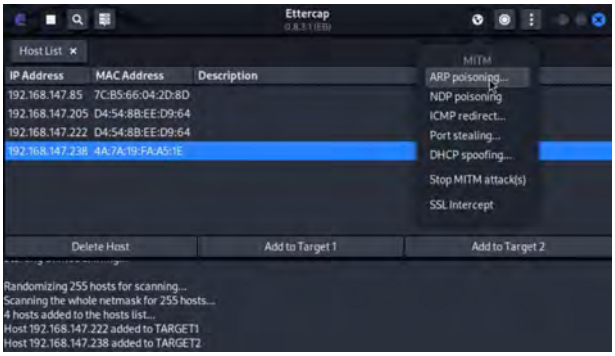
Şekil- 9'de görüldüğü üzere saldırı düzenlenmek istenen cihazlar belirlenir. Örneğin, modem (router) ve kurban cihaz seçilebilir. Ardından ARP sahteciliği kullanılarak MITM saldırısını başlatılacaktır. Bu saldırı, iki cihaz (örneğin, bir kullanıcı cihazı ve modem) arasındaki trafiğin saldırgan üzerinden geçirilmesini sağlar.

Şekil- 10'da görüldüğü gibi menüde yer alan MITM > ARP Poisoning seçeneği izlenerek, "*Sniff remote connections*" seçeneği işaretlenip onaylandığında, iki cihaz arasındaki tüm trafiğin dinlenmesi sağlanmaktadır. Bu işlem, ağ üzerinde gerçekleşen veri iletişimini izlemeye olanak tanımaktadır.

MITM saldırısı ile iki cihaz arasındaki trafik başarılı bir şekilde yönlendirilip kontrol altına alındıktan sonra, ağdaki veri trafiğinin detaylı olarak izlenmesi ve analiz edilmesi amacıyla Wireshark kullanılmıştır.



Şekil- 9: Ağ listesinden hedef cihazların seçimi



Şekil- 10: ARP sahteciliğinin başlatılması

Wireshark, ağ üzerindeki veri paketlerini yakalayarak bu paketlerin içeriğini ayrıntılı şekilde inceleme imkânı sunan güçlü bir ağ analiz aracıdır. Saldırı esnasında Wireshark aracılığıyla ağ trafiği dinlenmiş ve iki cihaz arasında gerçekleşen tüm veri paketleri detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle ARP sahteciliği işlemi sonucunda, iki cihaz arasındaki veri alışverişi Wireshark yardımıyla yakalanmış ve analiz edilmiştir.

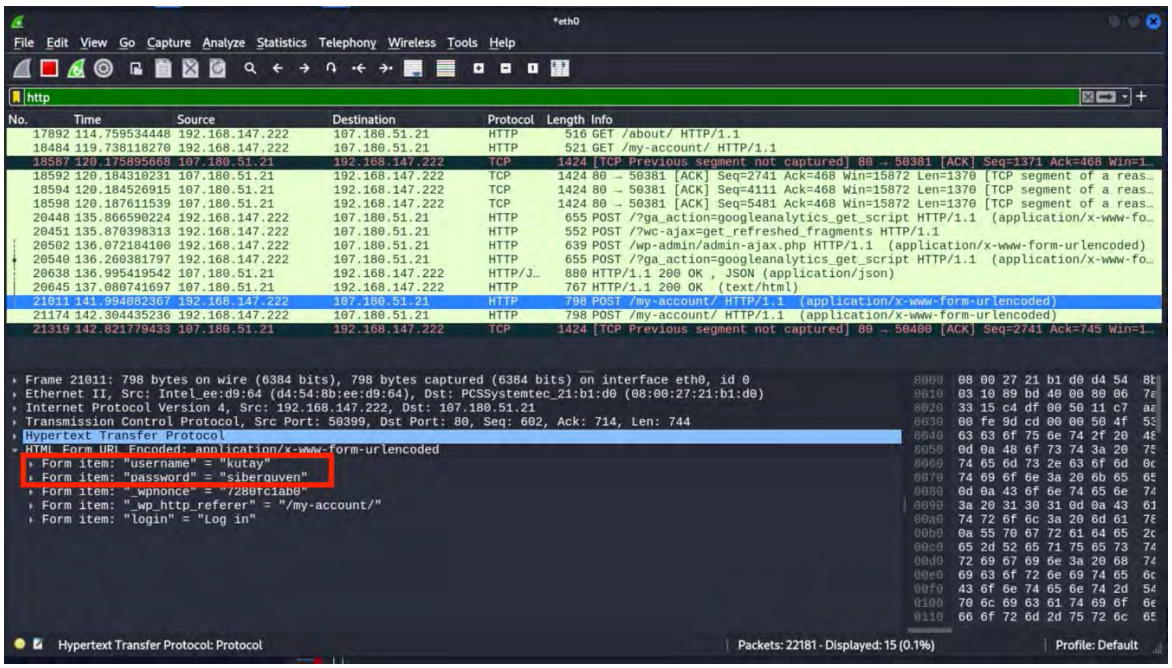
MITM saldırısı yapıldığı sırada mağdur aşağıdaki işlemleri yapmıştır:

- Bir web sayfasına girmiş.
- Kullanıcı adı ve parolasını doğru bir şekilde girmiş.
- Oturumunu açmıştır.

Saldırganın eşzamanlı hamleleri aşağıdaki gibidir:

- MITM saldırısı başarıyla yapılır.
- Herhangi bir ağ izleme aracı açılır (Örneğin Wireshark).
- Saldırganın trafiğini takip etmek için ilgili protokol filtresi uygulanır.
- Gelen ve giden istekler detaylıca incelenerek trafik dinlenir.

Saldırgan, Şekil- 11'de görüldüğü gibi kullanıcının kullanıcı adı ve parolasını yazıp gönderdiği "HTTP POST" isteğini yakalayarak kullanıcının bilgilerini ele geçirmiştir.



Şekil- 11: ARP sahteciliği ile trafiğin dinlenmesi

Bu uygulamadan da anlaşılacağı üzere, kolayca gerçekleştirilebilen ARP sahteciliği saldırıları, bireyler ve kurumlar açısından ciddi güvenlik riskleri taşımakta ve önemli zararlara yol açabilmektedir. MITM saldırılarının risklerini en aza indirmek amacıyla, uç cihazlarda çalışan hafif IDS-IPS sistemleri kullanılarak saldırılar başarıyla tespit edilebilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle kaynak kısıtlı ortamlarda etkili bir önlem olarak önerilmektedir [58].

7.3 Hizmet Reddi Saldırısı

Hizmet Reddi (Denial of Service - DDoS) veya birden fazla makine/bilgisayar kullanan DoS saldırısı türü olan Dağıtılmış Hizmet Reddi (Distributed Denial of Service - DDoS) saldırıları, web sunucuları için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Birçok ele geçirilmiş sistem, hedefe aşırı trafik göndererek normal hizmet işleyişini kesintiye uğratır [58]. Bu saldırılar genellikle uygulama katmanında HTTP istekleriyle gerçekleştirilir, bu da kötü niyetli trafiğin normal kullanıcı taleplerini taklit etmesi nedeniyle tespit edilmesini zorlaştırır. (D)DoS saldırısının amacı, bant genişliği, Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit - CPU) ve bellek gibi sunucu kaynaklarını aşırı yükleyerek gerçek kullanıcıların hizmete erişmesini engellemektir. Bu bölümde tek bir makine tarafından tek bir hedefe hizmet reddi (DoS) saldırı örneği çalışması yapılacaktır.

DoS saldırısı örneği

Yapılan uygulamada, hedef sistemin DoS saldırısına maruz bırakılarak hizmet kesintisine uğratılması için HPing3 aracı kullanılmıştır. İlk aşamada, hedef sistemin domain adresine ping gönderilerek IP adresi elde edilmiştir. Bu işlem, terminale aşağıdaki komutun girilmesiyle gerçekleştirilmiştir:

```
ping hedefdomain.com
```

Bu komut ile hedef domeyne İnternet Kontrol Mesajlaşma Protokolü Yankı İsteği (Internet Control Message Protocol (ICMP) echo request) gönderilmiş ve dönüş yanıtlarından hedef IP adresi elde edilmiştir. Elde edilen IP adresi, sonraki aşamalarda DoS saldırısında kullanılmak üzere kaydedilmiştir.

DoS saldırısının bir parçası olarak İletim Kontrol Protokolü Senkron (Transmission Control Protocol Synchronous – TCP

SYN) saldırısı gerçekleştirilmiştir. Bu saldırı türü, hedef sistemin TCP bağlantılarını aşırı yükleyerek hizmetlerin kesintiye uğratılmasını amaçlamaktadır. HPing3 aracı kullanılarak sahte TCP SYN paketleri hedefe gönderilmiş ve bu şekilde sistemin kaynaklarının tüketilmesi sağlanmıştır. Saldırının başlatılması için aşağıdaki komut kullanılmıştır:

```
sudo hping3 -S --flood -V -p 80 hedefIP
```

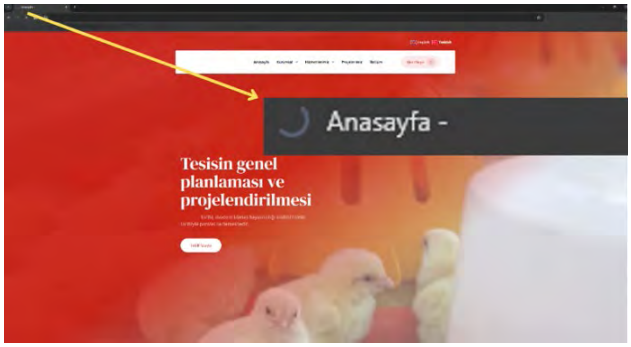
Bu komutta:

- -S bayrağı, TCP SYN paketlerinin gönderilmesini sağlamaktadır.
- --flood parametresi, paketlerin sürekli ve hızlı bir şekilde gönderilmesine olanak tanımaktadır.
- -V seçeneği, saldırı sürecindeki bilgilerin ayrıntılı olarak gösterilmesini sağlamaktadır.
- -p 80 parametresi, hedefin 80 numaralı portuna saldırı yapılacağını belirtmektedir; bu port, genellikle web sunucuları tarafından HTTP hizmetleri için kullanılır.
- hedefIP ise, ping komutuyla elde edilen IP adresini temsil etmektedir.

Saldırı esnasında hedefe sürekli TCP SYN paketleri gönderilmiş ve bu işlem sonucunda hedefin TCP bağlantıları yoğun bir şekilde aşırı yüklenmiştir. Bu yüklenme sonucunda, Şekil-12'de görüldüğü gibi hedef web sayfasının erişilemez/tepkisiz hale geldiği gözlemlenmiştir. Normal kullanıcılar, bu saldırı esnasında hizmetlere erişimde zorluk yaşamış ve web sayfası yüklenememiştir.

7.4 Parola Saldırısı

Parola saldırıları, sistemin kimlik doğrulama bileşenlerini hedef alarak kullanıcı hesaplarına yetkisiz erişim sağlamayı amaçlayan saldırı türleridir. En yaygın yöntemlerden biri olan kaba kuvvet (brute force) saldırısında, parola kombinasyonları sistematik olarak denenir.



Şekil-12: DoS saldırısı sırasında hedef web sayfasının tepkisi

Bu tür saldırılar, parolanın uzunluğu ve karmaşıklığına bağlı olarak zaman ve işlem gücü açısından maliyetli hale gelebilir. Alternatif olarak kullanılan sözlük saldırısı ise, daha önceden bilinen veya sık kullanılan parolaların listesinden yararlanarak çok daha hızlı sonuç verebilir. Kullanıcıların yaygın parolaları tercih etmesi, bu yöntemi özellikle etkili kılmaktadır[59]. Yapılan denemeler, işlemci gücü açısından düşük ila orta seviye tek bir GPU'nun bile birkaç gün içinde parolaların %95'inden fazlasını kırabildiğini, daha özel bir sistemin ise en güçlü %0,5'lik dilim dışındaki tüm parolaları çözebildiğini göstermiştir [59].

Bu tür saldırıların etkinliğini artıran başlıca unsurlardan biri, saldırganların kimlik doğrulama sistemlerini çeşitli otomasyon araçları aracılığıyla sistematik olarak deneme edebilmesidir. Parola tabanlı kimlik doğrulama mekanizmalarına yönelik saldırılarda yaygın olarak kullanılan araçlar arasında Hydra, John the Ripper, Medusa, Cain & Abel ve Burp Suite Intruder öne çıkmaktadır [60]. Bu araçlar, genellikle sözlük tabanlı saldırılar ve kaba kuvvet saldırıları (brute force attacks) yoluyla kullanıcı adı ve parola kombinasyonlarını otomatik olarak denemekte; bu sayede zayıf veya yetersiz güvenlik yapılarını tespit etmede yüksek başarı oranı sergilemektedir. Bu çalışmada, HTTP protokolü üzerinden çalışan parola giriş noktalarına yönelik olarak Burp Suite yazılımının Intruder modülü kullanılmış ve kaba kuvvet saldırısı denemeleri gerçekleştirilmiştir.

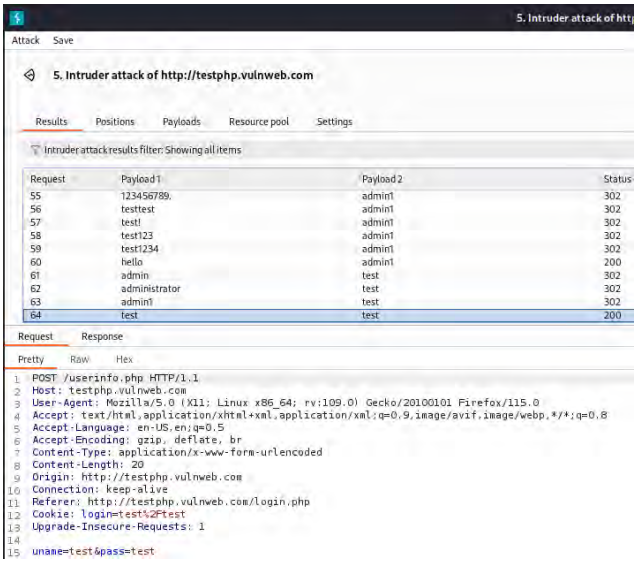
Parola saldırısı örneği

Bu bölümde, kaba kuvvet yöntemi kullanılarak bir parola saldırısının nasıl gerçekleştirildiği anlatılacaktır. Görseller ile süreç detaylandırılarak saldırının işleyişi ve sonuçları açıklanacaktır. Doğru giriş bilgilerini elde etmek amacıyla, birçok olası parola ve kullanıcı adı kombinasyonunun sistematik bir şekilde denendiği bir kaba kuvvet saldırısı gerçekleştirilecektir. Bu saldırı yöntemi, özellikle zayıf parola sistemlerine karşı oldukça etkilidir.

Bu saldırı senaryosunda, Burp Suite'in Intruder modülü kullanılarak hedef sisteme ardışık istekler gönderilmektedir. Intruder modülü, saldırganın belirli bir parametreyi (örneğin, kullanıcı adı ve parola alanlarını) belirleyip bu parametre üzerinde çok sayıda deneme yapmasına olanak tanır. Burp Suite, farklı kullanıcı adı ve parola kombinasyonlarını otomatik olarak deneyerek, bir başarı durumu elde edene kadar sürekli istek göndermektedir. Her deneme için sunucudan alınan yanıtlar kaydedilmekte ve bu yanıtlar üzerinden saldırının başarı durumu değerlendirilmektedir.

Şekil- 13 ve Şekil- 14'te görsellerinde, Burp Suite kullanılarak gerçekleştirilen kaba kuvvet saldırısının sırasıyla istek ve yanıt bilgileri gözlemlenmektedir. Bu adımda, farklı kullanıcı adı ve parola kombinasyonlarını kullanılarak hedef sistemin giriş formuna ardışık istekler gönderilmektedir. İsteklerin her birinde farklı "kullanıcı adı" ve "parola" değerleri denenmektedir (örneğin, admin/deneme, deneme/deneme123 gibi). Gönderilen isteklerin yanıtları incelendiğinde, hedef sunucu her kombinasyona karşı bir yanıt kodu döndürmektedir. Yanıtların 302 ve 200 durum kodları dikkate alınmalıdır. 302 durumu, yönlendirme anlamına gelir ve genellikle hatalı giriş bilgilerine karşı sistemin giriş sayfasına geri yönlendirdiği anlamına gelir. 200 durum kodu ise, başarılı bir girişin gerçekleştiğini ve oturumun açıldığını gösterir.

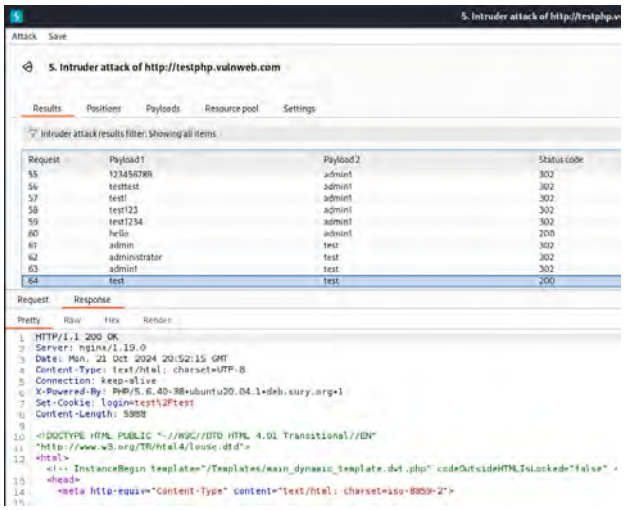
Şekil- 14'te yanıt analizine göre, denenen kombinasyonlardan biri (deneme/deneme) başarıya ulaşmış ve hedef sistemden 200 OK yanıtı alınmıştır. Bu durum, doğru kullanıcı adı ve parola kombinasyonunun bulunduğu anlamına gelir.



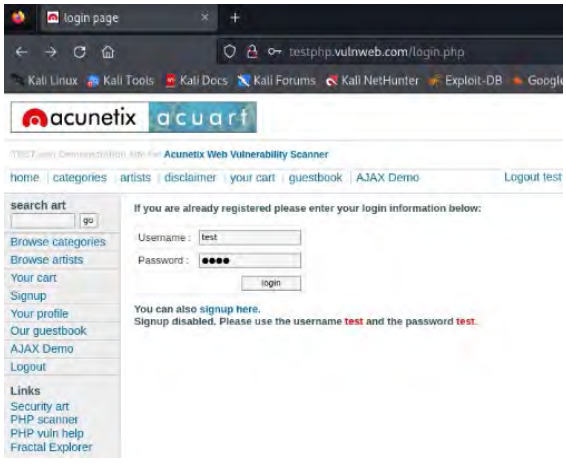
Şekil- 13: Parola saldırısı istek detayı

Şekil- 15-a'da soldaki resimde, Şekil- 14'te görülen 200 OK yanıtı ile doğrulanan kullanıcı adı ve parola kombinasyonu (deneme/deneme) kullanılarak giriş yapılmıştır. Bu noktada, saldırgan, doğru giriş bilgilerini bularak hedef sistemde oturum açmıştır. Bu işlem, saldırının başarıya ulaştığını göstermektedir. Kullanıcı adı ve parola girildikten sonra, Şekil- 15-b'de resimde oturum açıldığına dair bir sayfa görüntülenmektedir. Bu sayfa, başarılı girişin kanıtıdır ve kullanıcının sisteme giriş yaptığını göstermektedir. Giriş ekranında kullanıcı bilgileri ve diğer oturum detayları yer almaktadır. Saldırganın sistemde oturum açtıktan sonra kullanıcı profili bilgilerine eriştiği gözlemlenmektedir.

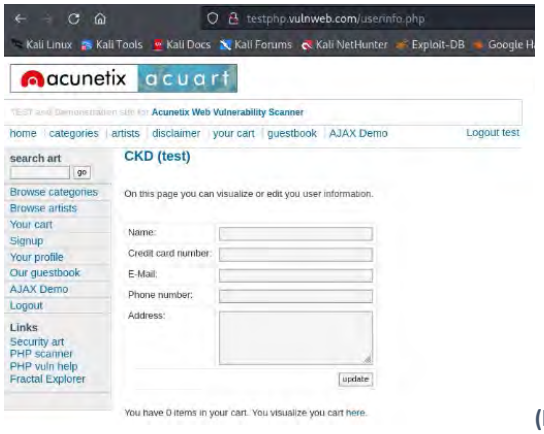
Kullanıcıya ait e-posta adresi, adres bilgileri ve diğer kişisel bilgilerin yer aldığı bu sayfa, saldırının başarılı bir şekilde sonuçlandığını ve sistemdeki kullanıcı verilerine ulaşıldığını göstermektedir. Bu aşamada, saldırganın hedef sistemdeki hassas bilgilere erişimi olduğu ve bunları görüntüleyebildiği anlaşılmaktadır. Kaba kuvvet saldırısı sonucunda sistemin zayıf parola koruma mekanizması aşılmış ve yetkisiz erişim sağlanmıştır.



Şekil- 14: Parola saldırısı yanıt detayı



(a)



(b)

Şekil- 15: Doğru kullanıcı bilgileri ile giriş

7.5 Siteler Arası Betik Çalıştırma Saldırısı

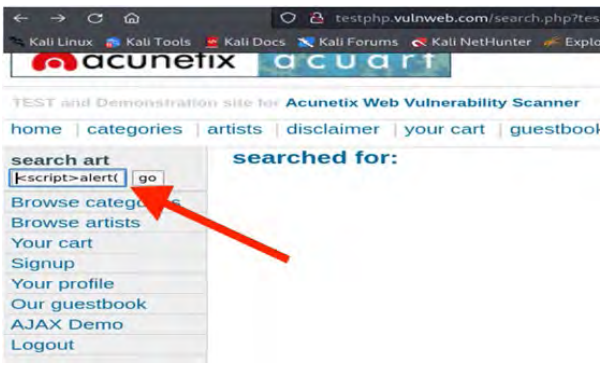
Siteler arası betik çalıştırma saldırısı (Cross-Site Scripting - XSS), saldırganın bir web uygulamasına kötü niyetli komut dosyaları enjekte ettiği bir tür kod enjeksiyonu saldırısıdır. Bu komut dosyaları, genellikle kurbanın haberi olmadan, kurbanın tarayıcısında çalıştırılır ve çerezlerin çalınması, kullanıcı oturumlarının ele geçirilmesi, kullanıcıların kötü amaçlı sitelere yönlendirilmesi veya kötü amaçlı yazılım yayılması gibi çeşitli zararlı sonuçlara yol açar [61]. XSS saldırıları, web uygulamalarındaki yetersiz girdi doğrulama açıklarını istismar eder ve saldırganın içeriği manipüle etmesine olanak tanır. XSS saldırılarının üç ana türü vardır: Yansıtmalı (kalıcı olmayan), depolanmış (kalıcı) ve belge nesne modeli (Document Object Model - DOM) tabanlı XSS[62]. Yansıtmalı XSS, kötü niyetli komut dosyalarının bir web sunucusu üzerinden yansıtılmasıyla gerçekleşirken, depolanmış XSS, saldırganın sunucuya enjekte ettiği ve web sayfasına erişen kullanıcılar tarafından çalıştırılan kodu içerir. DOM tabanlı XSS ise istemci tarafı kodundaki güvenlik açıklarından kaynaklanır. XSS saldırılarını etkili bir şekilde önlemek için en yaygın kullanılan yöntemler arasında, Content Security Policy (CSP) uygulanması, katı girdi doğrulama ve çıktı kodlaması, ayrıca HttpOnly ve Secure niteliklerine sahip çerezlerin kullanılması yer almaktadır[62].

XSS saldırı örneği

Burada XSS saldırısının gerçekleştirilme süreci anlatılmaktadır. XSS, web uygulamalarında güvenlik açıklarından faydalanarak kullanıcı tarayıcılarında zararlı komutlar çalıştırmayı amaçlayan bir saldırı türüdür. Bu tür saldırılar, genellikle yetersiz girdi doğrulama mekanizmalarıyla savunmasız hale gelmiş web sitelerinde yapılır ve saldırganların zararlı kodu hedef siteye enjekte etmesine olanak tanır.

Şekil- 16'te sunulan görselde, kalıcı olmayan (*reflected*) bir XSS saldırısının başlangıç adımı görülmektedir. Burada, bir web uygulamasının arama veya form alanına, JavaScript kodu enjekte edilmiştir. Enjekte edilen kod aşağıdaki gibidir:

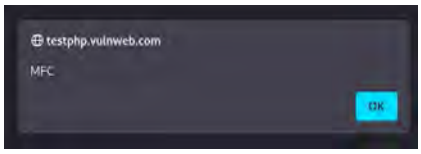
```
<script>alert("MFC")</script>
```



Şekil- 16: Arama alanına JavaScript kodunun enjekte edilmesi

Bu kod, web uygulamasının girdi alanına gönderildiğinde, tarayıcıya bu komutun çalıştırılmasını emreder. Web uygulamasının bu girdiyi doğrulamadan doğrudan kabul etmesi ve tarayıcıya iletmesi, güvenlik açığının varlığını gösterir. Özellikle, sunucu tarafında girdi doğrulama

mekanizmaları yetersiz olduğu zaman, bu tür saldırılar başarılı olur. Şekil- 17'da sunulan görselde, gönderilen XSS kodunun tarayıcıda başarılı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmektedir. Tarayıcı, bu enjekte edilen JavaScript kodunu algılar ve komutu çalıştırarak bir uyarı penceresi (popup) oluşturur. Bu durumda, ekranda "MFC" içeren bir uyarı mesajı görüntülenir. Bu işlem, saldırganın tarayıcı üzerinde zararlı kod çalıştırabileceğini ve potansiyel olarak daha ciddi saldırılar gerçekleştirebileceğini kanıtlamaktadır.



Şekil- 17: Başarılı XSS saldırısı çıktısı

8 Saldırı Türleri ile Sızma Denemesi Ölçünlerinin İlişkisi

Sızma denemeleri, güvenlik zayıflıklarını tespit etmek ve sistemleri olası saldırılara karşı daha dayanıklı hale getirmek için kullanılan yöntemsel yaklaşımlardır. Farklı sızma denemesi ölçünleri, belirli saldırı türlerine yönelik tespit ve analiz mekanizmaları sunarak, güvenlik açıklarının giderilmesine katkı sağlamaktadır. Ancak her yöntem, tüm saldırı türlerini kapsamamakta ve farklı odak noktalarına sahip olabilmektedir.

Çizelge 4, yaygın sızma denemesi ölçünlerinin SQL enjeksiyonu, Ortadaki Adam Saldırısı (MITM), Hizmet Reddi Saldırısı (DoS), Parola Saldırıları ve Siteler Arası Betik Çalıştırma (XSS) gibi saldırılarla ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu karşılaştırma, farklı ölçünlerin hangi saldırıları ele aldığı ve hangi alanlarda daha etkin olduğu konusunda rehberlik sunmaktadır.

Çizelge 4: Sızma denemesi ölçünlerinin saldırı türleriyle ilişkisi

Saldırı Türü	NIST	OWASP	PTES	OSSTMM	ISSAF
SQL Enjeksiyonu	✓	✓	✓	X	✓
Ortadaki Adam Saldırısı (MITM)	✓	X	✓	✓	✓
Hizmet Reddi Saldırısı (DoS)	✓	X	✓	✓	X
Parola Saldırısı	✓	✓	✓	✓	✓
Siteler Arası Betik Çalıştırma (XSS)	X	✓	✓	X	✓

Saldırı türleri ve sızma denemesi ölçünlerinin ilişkilendirilmesiyle sonucunda, farklı ölçünlerin çeşitli güvenlik açıklarını ele alma kapasiteleri aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- OWASP, özellikle web uygulamalarına odaklandığından, SQL Enjeksiyonu ve XSS gibi uygulama katmanındaki saldırıları kapsamlı şekilde ele almaktadır. Ancak ağ seviyesindeki saldırılara (MITM, DoS) karşı doğrudan bir yöntem sunmamaktadır [15], [18], [40].
- NIST, daha geniş bir güvenlik perspektifi sunarak hem ağ hem de uygulama güvenliği denemelerini içeren bir yaklaşım benimsemektedir ancak OWASP kadar web güvenliği detaylandırılmamıştır[18], [28].
- PTES, kapsamlı bir saldırı benzetim yöntemi sunarak tehdit modellemelerinin daha sistematik ve derinlemesine gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Güvenlik açıklarının nasıl kötüye kullanılabileceğini ve sistem üzerindeki potansiyel etkilerini vurgular [5], [17], [18].
- OSSTMM, MITM ve DoS gibi ağ seviyesindeki tehditlere karşı daha kapsamlı analizler sunarken, uygulama güvenliği konusunda daha sınırlı kalmaktadır[17], [18], [42].
- ISSAF, çok yönlü bir deneme çerçevesi sunduğundan, saldırı türlerinin büyük bir kısmını ele almaktadır, ancak modern tehditlere uyum sağlama açısından güncel değildir [15], [46].

Bu karşılaştırma, farklı sızma denemesi yöntemlerinin güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmek ve hangi tehdit türleri için hangi ölçünlerin daha uygun olduğunu belirlemek adına önemli bir yol gösterici niteliğinde olarak görülebilir.

9 Vaka Analizi: Örnek Sızma Denemesi Senaryosu

Bu vaka çalışmasında, orta ölçekli bir kurumunun web tabanlı bilgi sistemine yönelik gerçekleştirilen kontrollü ve izinli bir sızma denemesi sürecinin benzetimi yapılmıştır. Senaryo, makalenin önceki bölümlerinde detaylı biçimde ele alınan saldırı türlerini içerecek şekilde yapılandırılmış ve deneme zinciri, bilgi toplama, XSS, oturum ele geçirme, SQL enjeksiyonu, parola saldırısı ve log suppression (kısmi DoS) adımlarını içermiştir. Her bir adım, OWASP Top 10 zafiyet kategorileri ve CVE kayıtları temel alınarak değerlendirilmiştir.

Senaryonun sonunda, tespit edilen güvenlik açıkları için etki ve olasılık puanlamasına dayalı risk analizi gerçekleştirilmiş ve bu analizler ışığında hem teknik ekipler hem de yöneticiler için örnek bir raporlama çıktısı hazırlanmıştır. Bu yapı, sızma denemelerinin yalnızca tespit süreciyle sınırlı kalmayıp, kurumsal karar süreçlerini destekleyen ölçülebilir çıktılar üretmesi yönünden önemli bir örnek teşkil etmektedir.

9.1 Senaryo Akışı ve Aşamaları

Adım 1: Bilgi Toplama

Sızma denemesi uzmanı, hedef sistemin genel mimarisi ve servisleri hakkında bilgi edinmek amacıyla Nmap ve Shodan araçlarını kullanmıştır. Açık portların tespiti sonrası HTTP yanıt başlıklarında web sunucusunun (Apache) versiyon bilgisi gibi meta verilerin dışarıya açık olduğu görülmüştür. Bu durum, sistemin yapılandırma seviyesindeki zaaflarını yansıtmakta olup OWASP A05:2021 -Security Misconfiguration kapsamında değerlendirilir.

Adım 2: Komut Enjeksiyonu Tabanlı Oturum Taklidi Hazırlığı (XSS benzeri)

Uzman, kullanıcı başvuru formunda girdi doğrulamasının yapılmadığını tespit etmiş ve form alanına kötü amaçlı bir JavaScript kodu enjekte etmiştir. Enjekte edilen kodun çalışması sonucunda oturum açmış bir yöneticinin oturum çerezi, deneme uzmanının kontrolündeki dış bir sunucuya yönlendirilmiştir. Bu davranış, özellikle istemci etkileşimiyle tetiklenen komut yürütme açıklıklarına benzemekte olup, gerçek dünyada benzer etkiler CVE-2022-30190 (Follina) gibi açıklarla gözlenmiştir. Bu açık, kullanıcı girdisi üzerinden uzaktan komut yürütme ile sistem kontrolünün sağlanmasına olanak tanımaktadır.

Adım 3: Oturum Ele Geçirme (Session Hijacking)

Elde edilen çerez bilgileri, uzman tarafından tarayıcıda oturum oluşturmak amacıyla manuel olarak kullanılmış ve bu sayede sistemin yönetim paneline doğrudan erişim sağlanmıştır. Bu işlem, sistemin oturum yönetimi kurulumunda güvenli bayrak (secure flag) ve HttpOnly parametrelerinin eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Zafiyet, OWASP A07:2021 – Identification and Authentication Failures başlığı altında değerlendirilir.

Adım 4: SQL Enjeksiyonu ile Yetkisiz Veri Erişimi

Yönetici panelindeki arama fonksiyonunda, kullanıcı girişleri sunucu tarafında filtrelenmediği için "OR '1'='1" gibi klasik SQL enjeksiyon ifadesiyle veri tabanına doğrudan sorgular gönderilebilmiştir. Bu zafiyet sayesinde sistemdeki kullanıcı bilgileri dışarıya sızdırılmıştır. Bu açık, OWASP A01:2021 – Broken Access Control kapsamında sınıflandırılabilir ve CVE-2022-24124 gibi bilinen SQL enjeksiyonu vakalarıyla benzerlik göstermektedir.

Adım 5: Kaba Kuvvet Yöntemi ile Hesap Ele Geçirme

Elde edilen kullanıcı adı listeleri, uzman tarafından Burp Suite Intruder aracıyla parola kombinasyonları denenerek kaba kuvvet saldırılarına maruz bırakılmıştır. “admin: admin123” gibi varsayılan parolalar hâlen sistemde aktif olduğu için giriş başarılı olmuştur. Bu zafiyet, OWASP A07:2021 kapsamında tekrar değerlendirilir.

Adım 6: Günlük Kayıtlarının Silinmesi – Kısmi Hizmet Engelleme (Log Suppression)

Sızma denemesi uzmanı, denemesin sonunda sistemdeki olay günlüklerini (auth.log, iislogs, vb.) hedefli şekilde silerek, olay sonrası analiz süreçlerinin engellenmesine ilişkin benzetimini yapmıştır. Bu işlem, hizmetin kendisini doğrudan aksatmasa da, güvenlik denetim ve olay müdahale süreçlerini geçici olarak işlevsiz hale getirerek uygulama katmanında kısmi DoS etkisi yaratmaktadır. Bu tarz senaryolar, NIST SP 800-61 Rev.2 tarafından tanımlanan olay yönetimi ilkelerine aykırılık teşkil eder [63].

9.2 Zayıflıkların Uluslararası Ölçünlerle Risk Değerlendirmesi

Bu bölümde, gerçekleştirilen sızma denemesi senaryosunda tespit edilen güvenlik açıkları; uluslararası kabul görmüş güvenlik ölçünleri olan OWASP Top 10:2021 [3], Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) [64] kayıtları ve Common Vulnerability Scoring System (CVSS v3.1) [65] esas alınarak değerlendirilmiştir. Her bir zafiyet, etki ve olasılık düzeylerine göre puanlanmış ve bu iki değerin çarpımıyla risk skoru hesaplanmıştır. CVSS temel puanları, CVE verisi olan açıklar için doğrudan NIST Ulusal Zafiyet Veri tabanı (NVD) [66] üzerinden alınmıştır. CVE tanımı bulunmayan açıklarda ise benzer zafiyet türlerinin ortalama risk düzeyleri baz alınarak tahmini değerleme yapılmıştır.

Çizelge 5, tespit edilen her bir zafiyeti; OWASP kategorisi, varsa CVE kodu, CVSS skoru ve etki-olasılık değerleriyle birlikte sunmakta ve zayıflıkların renkli sınıflandırma yöntemiyle risk düzeylerine göre önceliklendirilmesini sağlamaktadır.

9.3 Raporlama Örneği

Aşağıda sunulan rapor bölümü, çalışmada tanımlanan senaryo temelinde oluşturulmuş, teknik bulgularla yönetim düzeyinde karar destek sağlayacak biçimde yapılandırılmıştır.

Teknik Rapor Özeti

Deneme sürecinde belirlenen temel zayıflıklara ilişkin açıklayıcı bilgileri içeren teknik rapor özeti, aşağıdaki Çizelge 6’da sunulmuştur.

Çizelge 6: Sızma denemesi teknik rapor özeti

No	Zafiyet Tanımı	Açıklama	Risk Seviyesi
1	Apache HTTP başlıklarında versiyon	Server yanıt başlıklarında sunucu sürüm bilgisi dışa sızmakta	Orta
2	XSS benzeri komut enjeksiyonu (Follina)	Kullanıcı girdisi kontrol edilmeden işlendi, dış sunucuya veri sızdırma gerçekleşti	Yüksek
3	Oturum yönetiminde güvenlik açığı	HttpOnly veya Secure cookie bayrakları eksik, oturum ele geçirme mümkün	Orta
4	SQL Enjeksiyonu	Arama fonksiyonunda filtrelenmemiş girişle veri tabanına doğrudan erişim sağlandı	Yüksek
5	Zayıf parola kullanımı	Admin kullanıcı için varsayılan parola aktif, kaba kuvvet ile giriş mümkün	Yüksek
6	Log silme ve iz temizleme	Yetkisiz kullanıcı tarafından sistem loglarının silinmesi teknik olarak mümkün	Orta

Çizelge 5: Risk değerlendirmesi

	Zafiyet Tanımı	OWASP Kategorisi	CVE Kodu	CVSS v3.1 Skoru	Etki (1–5)	Olasılık (1–5)	Risk Skoru	Risk Düzeyi
1	HTTP başlıklarında sürüm bilgisi açık	A05:2021 – Misconfiguration	CVE-2014-0226	5.0	2	5	10	Orta
2	Follina (komut enjeksiyonu ile XSS)	A03:2021 – Injection	CVE-2022-30190	7.8	5	4	20	Yüksek
3	Oturum güvenliği eksikliği	A07:2021 – ID/Auth Failures	CVE-2015-2080	6.8	4	3	12	Orta
4	SQL Enjeksiyonu	A01:2021 – Broken Access Ctrl	CVE-2022-24124	7.5	5	5	25	Yüksek
5	Zayıf parola / brute-force açığı	A07:2021 – ID/Auth Failures	CWE-521	~6.5	4	4	16	Yüksek
6	Log silme (adli bilişim engelleme)	A09:2021 – Security Logging and Monitoring Failures	CWE-778	~6.0	3	3	9	Orta
1–5: Düşük , 6–14: Orta , 15–19: Yüksek , 20–25: Kritik								

Önerilen Güvenlik İyileştirmeleri:

- Web sunucusu yapılandırmasında ServerTokens ve ServerSignature kapatılmalı.
- Tüm kullanıcı giriş alanlarında sunucu taraflı girdi doğrulama uygulanmalı.
- Oturum yönetiminde HttpOnly, Secure ve SameSite cookie bayrakları etkinleştirilmeli.
- SQL sorguları parametreli hale getirilerek ORM tabanlı yapı kullanılmalı.
- Parola politikaları güncellenerek kompleksite ve zorunlu değişiklik periyodu tanımlanmalı.
- Loglama mekanizmaları merkezi bir SIEM altyapısına bağlanmalı ve loglar imzalanarak saklanmalı.

Yönetim Özeti

Gerçekleştirilen sızma denemesi sonucunda, hedef sistemin dışa açık bileşenlerinde toplam 6 adet kritik ve orta seviyeli güvenlik zafiyeti tespit edilmiştir. Bu açıklardan ikisi doğrudan yetkisiz veri erişimi ve veri sızıntısı ile sonuçlanabilecek nitelikte olup, özellikle kişisel veri içeren sistemlerde KVKK veya GDPR gibi regülasyonlara aykırılık riski oluşturmaktadır. Oturum güvenliğindeki zayıflık, kullanıcı hesaplarının ele geçirilmesine yol açabilir ve kurumsal kaynaklara sızılmasını mümkün kılar.

Parola yönetimi ve log izleme eksiklikleri, kurumun hem önleyici güvenlik (preventive controls) hem de olay tespit ve müdahale (detection & response) süreçlerinde zayıflık yarattığını göstermektedir. Bu durum, sistemde gerçekleşen saldırıların geç tespit edilmesine veya hiç fark edilmemesine neden olabilir.

Tespit edilen zayıflıkların kuruma potansiyel etkileri şunlardır:

- İtibar Kaybı: Veri sızıntısı sonrası kamuoyunda güven kaybı ve basın etkisi.
- Yasal Riskler: Kişisel veri ihlali durumunda KVKK kapsamında yaptırım ve para cezaları.
- Finansal Kayıplar: Hizmet kesintisi, sistem geri yükleme ve kriz iletişimi maliyetleri.
- İş Sürekliliği Riski: Kritik sistemlerin saldırıya uğraması sonucu işlemsel duraksamalar.

Deneme süreci, uluslararası ölçünlere uygun şekilde OWASP Top 10, CVE/CWE sistemleri ve CVSS v3.1 risk derecelendirmesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Bulgular, teknik ekiplerin müdahale önceliklerini belirlemesine ve yönetim kadrosunun kurumsal bilgi güvenliği stratejilerini yeniden yapılandırmasına rehberlik etmektedir.

10 Sonuç

Bu çalışmada, farklı sızma denemesi yöntemleri karşılaştırılarak OWASP, OSSTMM, PTES, ISSAF ve NIST gibi yaygın ölçünlerin siber güvenlik alanındaki rollerine dair kapsamlı bir değerlendirme sunulmuştur. Literatürde genellikle yalnızca belirli bir yönteme odaklanan sınırlı sayıdaki çalışmanın aksine, bu çalışmada farklı ölçünlerin güçlü ve zayıf yönleri sistematik olarak analiz edilmiş ve karşılaştırmalı bir çerçeve oluşturulmuştur.

Çalışmanın önemli katkılarından biri, sızma denemesi yöntemlerinin yaygın saldırı türleriyle eşleştirilerek teknik düzeyde ilişkilendirilmesidir. Buna ek olarak, senaryo tabanlı örnek bir sızma denemesi uygulaması benzetimi yapılarak, gerçekçi bir saldırı zinciri üzerinden güvenlik açıkları belirlenmiş ve her bir açıklık CVSS puanlarına göre risk analizi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular ayrıca teknik ve yönetsel düzeyde yapılandırılmış bir rapor örneği ile desteklenmiştir.

Analizler, OWASP'ın uygulama güvenliği denemelerinde, NIST'in ağ güvenliğinde, OSSTMM'nin kapsamlı güvenlik değerlendirmelerinde ve PTES'in saldırı benzetimlerinde öne çıktığını ortaya koymuştur. ISSAF yöntemi ise kapsamlı yapısına rağmen güncellenmemesi nedeniyle güncel uygulamalarda etkisini kaybetmektedir. Her yöntemin farklı odak alanları bulunsa da özellikle kurumsal düzeyde risk yönetimi ve otomasyon süreçlerinin entegrasyonu açısından yöntemler arası birlikte çalışabilirlik önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, Türkçe literatürde sınırlı olarak ele alınan yöntem karşılaştırmalarına katkı sağlamakta; uygulamalı bir vaka analizi, teknik değerlendirme ve risk temelli raporlama içeriğiyle sızma denemesi süreçlerinin etkin kullanımına yönelik çok boyutlu bir yol haritası sunmaktadır.

Gelecek çalışmaların, sızma denemesi süreçlerine yapay zekâ destekli otomatik denemelerin entegrasyonu ve güvenlik denemelerinin daha sistematik hale getirilmesi üzerine yoğunlaşabileceği düşünülmektedir.

11 Kaynakça

[1] Admass, W. S., Y. Y. Munaye, ve A. A. Diro, *"Cyber security: State of the art, challenges and future directions"*, Cyber Security and Applications, c. 2, Oca. 2024, doi: 10.1016/J.CSA.2023.100031.

[2] Nurse, J. R. C., N. Williams, E. Collins, N. Panteli, J. Blythe, ve B. Koppelman, *"Remote Working Pre- and Post-COVID-19: An Analysis of New Threats and Risks to Security and Privacy"*, Communications in Computer and Information Science, c. 1421, ss. , pp. 583-590, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-78645-8_74.

[3] OWASP, "OWASP Top Ten", OWASP Foundation. Erişim: 22 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://owasp.org/www-project-top-ten/

[4] Karen, S. ve O. Angela, *"NIST - Technical Guide to Information Security Testing and Assessment Recommendations"*, Nist Special Publication, c. 800, ss. , pp. 1-80, 2008, doi: 10.6028/NIST.SP.800-115.

[5] PTES, "The Penetration Testing Execution Standard", Pentest Standard. Erişim: 05 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.pentest-standard.org/index.php/Main_Page

[6] Positive Technologies, "Web Applications vulnerabilities and threats: statistics for 2019", Global Ptsecurity. Erişim: 23 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://global.ptsecurity.com/analytics/web-vulnerabilities-2020

[7] SiteLock, "Cybersecurity Statistics Report 2022", SiteLock. Erişim: 20 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.sitelock.com/resources/security-report/

[8] Goel, J. N. ve B. M. Mehtre, *"Vulnerability Assessment & Penetration Testing as a Cyber Defence Technology"*, içinde *Procedia Computer Science*, Elsevier, 2015, ss. , pp. 710-715. doi: 10.1016/j.procs.2015.07.458.

[9] "Penetration Testing Market Size, Share | Growth Report [2032]", Fortune Business Insights. Erişim: 02 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.fortunebusinessinsights.com/penetration-testing-market-108434

[10] Sari, A., *"Turkish national cyber-firewall to mitigate countrywide cyber-attacks"*, Computers and Electrical Engineering, c. 73, ss., pp. 128-144, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.11.008.

[11] ThinkTech, "ThinkTech - Siber Tehdit Durum Raporu (Ocak - Mart 2024)", Savunma Teknolojileri Mühendislik A.Ş. Erişim: 03 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://thinktech.stm.com.tr/tr/siber-tehdit-durum-raporu-ocak-mart-2024

[12] Neciyev, S. ve B. Pazarbaşi, *"Siber Güvenlik, Siber Savaş Alanında Seçili Anahtar Kelimeler ile İlgili Araştırmaların Bibliyometrik Analizi"*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, c. 12, sy 1, ss. , pp. 57-79, Mar. 2024, doi: 10.29109/GUJSC.1378921.

[13] Shah, S. ve B. M. Mehtre, *"An overview of vulnerability assessment and penetration testing techniques"*, J Comput Virol Hack Tech, c. 11, ss. , pp. 27-49, 2015, doi: 10.1007/s11416-014-0231-x.

[14] Bertoglio, D. D. ve A. F. Zorzo, *"Overview and open issues on penetration test"*, Journal of the Brazilian Computer Society, c. 23, sy 1, ss. , pp. 1-16, Ara. 2017, doi: 10.1186/S13173-017-0051-1/FIGURES/6.

[15] Adam, H. M., Widyawan, ve G. D. Putra, *"A Review of Penetration Testing Frameworks, Tools, and Application Areas"*, içinde *Proceedings - 2023 IEEE 7th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering, ICITISEE 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, ss. , pp. 319-324. doi: 10.1109/ICITISEE58992.2023.10404397.

[16] Shanley, A., *"Penetration Testing Frameworks and methodologies: A comparison and evaluation"*, Edith Cowan University, 2016. Erişim: 11 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://ro.ecu.edu.au/theses_hons/1553

[17] Sarker, K. U., F. Yunus, ve A. Deraman, *"Penetration Taxonomy: A Systematic Review on the Penetration Process, Framework, Standards, Tools, and Scoring Methods"*, 01 Temmuz 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su151310471.

[18] Haq, I. U. ve T. A. Khan, *"Penetration Frameworks and Development Issues in Secure Mobile Application Development: A Systematic Literature Review"*, IEEE Access, c. 9, ss. , pp. 87806-87825, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3088229.

[19] Wen, S.-F., A. Shukla, ve · Basel Katt, *"Artificial intelligence for system security assurance: A systematic literature review"*, International Journal of Information Security 2024 24:1, c. 24, sy 1, ss. , pp. 1-42, Ara. 2024, doi: 10.1007/S10207-024-00959-0.

[20] Vural, Y. ve Sağıroğlu,Ş. *"Kurumsal Bilgi Güvenliğinde Güvenlik Denemeleri ve Öneriler"*, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., c. 26, sy 1, ss. , pp. 89-103, 2011.

[21] Yılmaz, E. N., Gönen, S., Şanoğlu, S., Karacayılmaz,G. ve Özbirinci, Ö.,*"Endüstri 4.0'ın Gelişim Sürecinde Unutulan Bileşen: Siber Güvenlik"*, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 9, sy 4, ss. , pp. 1142-1158, Tem. 2021, doi: 10.29130/dubited.905340.

[22] Tulgar, M., Halim Zaim, A., Ali Aydın, M.ve Tarihi,G. *"Ulusal Bilgi ve İletişim Güvenliği Rehberi: IoT Güvenliği İçin Bir Uygulama Örneği"*, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 21, sy 42, ss. , pp. 353-382, Ara. 2022, doi: 10.55071/TICARETFBD.1141795.

[23] Of, M., *"Siber Güvenlik Üzerine Bir Araştırma: Yazılım Güvenliği"*, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 2, sy 2, ss. , pp. 254-260, Ara. 2019, Erişim: 06 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/en/pub/bufbd/issue/50962/653374

[24] Aydoğdu, D. ve M. S. Gündüz, *"Web Uygulama Güvenliği Açıklıkları ve Güvenlik Çözümleri Üzerine Bir Araştırma"*, Uluslararası Bilgi Güvenliği Mühendisliği Dergisi, c. 2, sy 1, ss. , pp. 1-7, Haz. 2016, doi: 10.18640/UBGMD.56836.

[25] Yalçınkaya, M. A. ve E. Küçüksille, *"Web Uygulama Sızma Denemelerinde Kapsam Genişletme İşlemi İçin Yöntem Geliştirilmesi ve Uygulanması"*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 25, sy 1, ss. , pp. 16-27, Nis. 2021, doi: 10.19113/sdufenbed.661867.

[26] Senturk, Z. ve E. Irmak, *"Windows Aktif Dizin Etki Alanı Servisi ve Kurumsal Ağ Güvenliği: PowerShell Erişiminin Analizi ve Önlemler"*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, Eyl. 2024, doi: 10.29109/gujsc.1447924.

[27] Kestane, A. ve G. Kurt, *"Bulut güvenlik denetimi: Bulut siber güvenlik uygulamalarında iç denetim"*, Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, c. 17, sy

3, ss. , pp. 667-690, Tem. 2024, doi: 10.25287/ohuiibf.1482734.

[28] Scarfone, K., M. Souppaya, A. Cody, ve A. Orebaugh, *"Guideline on network security testing - Special Publication 800-115"*, National Institute of Standards, 2008, Erişim: 13 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-115.pdf

[29] Geer, D. ve J. Harthorne, *"Penetrationt: A duet"*, 18th Annual Computer Security Applications Conference, ACSAC, c. 2002-January, ss. , pp. 185-195, 2002, doi: 10.1109/CSAC.2002.1176290.

[30] Leeuw, K. ve J. Bergstra, *The history of information security : a comprehensive handbook*. Elsevier, 2007. Erişim: 16 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://books.google.com.tr/books/about/The_History_of_Information_Security.html?id=pQBrsonDp6cC&redir_esc=y

[31] Tabibian, O. R., *Internet Scanner Finds Security Holes*. PC Magazine, 1996. Erişim: 16 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://books.google.com/books?id=LYp7r6OrMdIC&pg=PA536

[32] Raju, R., *"A Literature Survey on System Security and Network Vulnerability Assessment"*, International Journal of Scientific Research in Engineering and Management, c. 08, sy 04, ss. , pp. 1-5, Nis. 2024, doi: 10.55041/IJSREM29695.

[33] Dehghantanha, A., A. Yazdinejad, ve R. M. Parizi, *"Autonomous Cybersecurity: Evolving Challenges, Emerging Opportunities, and Future Research Trajectories"*, AutonomousCyber 2024 - Proceedings of the Workshop on Autonomous Cybersecurity, Co-Located with: CCS 2024, c. 10, sy 24, ss. , pp. 1-10, Kas. 2024, doi: 10.1145/3689933.3690832.

[34] Roesch, M., "Snort - Network Intrusion Detection & Prevention System", Snort. Erişim: 17 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.snort.org/

[35] Alkhurayyif, Y. ve Y. Saad Almarshdy, *"Adopting Automated Penetration Testing Tools"*, Journal of Information Security and Cybercrimes Research, c. 7, sy 1, ss. , pp. 51-66, Haz. 2024, doi: 10.26735/rjjt2453.

[36] Khan, M. E. ve F. Khan, *"A Comparative Study of White Box, Black Box and Grey Box Testing Techniques"*, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, c. 3, sy 6, 2012, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.ijacsa.thesai.org

[37] Reed, K. ve T. Murnane, *"On the Effectiveness of Mutation Analysis as a Black Box Testing Technique"*, içinde *Proceedings of the Australian Software Engineering Conference, ASWEC*, IEEE Computer Society, 2001. doi: 10.1109/ASWEC.2001.948492.

[38] Sarker, K. U., F. Yunus, ve A. Deraman, *"Penetration Taxonomy: A Systematic Review on the Penetration Process, Framework, Standards, Tools, and Scoring Methods"*, Sustainability 2023, Vol. 15, Page 10471, c. 15, sy 13, s. , pp. 10471, Tem. 2023, doi: 10.3390/SU151310471.

[39] Saxena, R. ve M. Singh, *"Gray Box Testing: Proactive Methodology for the Future Design of Test Cases to Reduce Overall System Cost"*, c. 1, sy 8, ss. , pp. 62-66, 2014, Erişim: 04 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.krishisanskriti.org/jbaer.html

[40] OWASP, "OWASP Web Security Testing Guide", OWASP Foundation. Erişim: 12 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/

[41] Vieira, M. ve B. Sousa, *"Evaluation Of Static Analysis Tools In Detecting OWASP Top 10 Vulnerabilities"*, Master Thesis, Technology of the University of Coimbra, 2024. Erişim: 12 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://hdl.handle.net/10316/118126

[42] Herzog, P., *"The Open Source Security Testing Methodology Manual (Version 3.0)"*, Institute for Security and Open Methodologies (ISECOM), 2010.

[43] Prandini, M. ve M. Ramilli, *"Towards a practical and effective security testing methodology"*, içinde *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2010, ss. , pp. 320-325. doi: 10.1109/ISCC.2010.5546813.

[44] Abu-Dabaseh, F. ve E. Alshammari, *"Automated Penetration Testing: An Overview"*, Academy and Industry Research Collaboration Center (AIRCC), ss. , pp. 121-129, 2018, doi: 10.5121/csit.2018.80610.

[45] Ceylan, M. F., *"Makine öğrenmesi ile adres çözümleme protokolü sahteciliğinin tespiti"*, Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2024. Erişim: 22 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/15943

[46] OISSG, "Information Systems Security Assessment Framework (ISSAF) draft 0.2", 2005. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://untrustednetwork.net/files/issaf0.2.1.pdf

[47] Wack, J., M. Souppaya, ve M. Tracy, *"Guideline on Network Security Testing - Special Publication 800-42"*, National Institute of Standards, Eki. 2003, doi: 10.6028/NIST.SP.800-42.

[48] Chu, G., *"Automation of Penetration Testing"*, Doctoral dissertation, The University of Liverpool, 2021.

[49] Lachkov, P., L. Tawalbeh, ve S. Bhatt, *"Vulnerability Assessment for Applications Security Through Penetration Simulation and Testing"*, Journal of Web Engineering, c. 21, sy 7, ss. , pp. 2187-2208, 2022, doi: 10.13052/JWE1540-9589.2178.

[50] Laxmi Kowta, A. S., K. Bhowmick, J. R. Kaur, ve N. Jeyanthi, *"Analysis and overview of information gathering tools for pentesting"*, 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2021, c. 2021-January, Oca. 2021, doi: 10.1109/ICCCI50826.2021.9457015.

[51] Zografopoulos, I., J. Ospina, X. Liu, ve C. Konstantinou, *"Cyber-Physical Energy Systems Security: Threat Modeling, Risk Assessment, Resources, Metrics, and Case Studies"*, IEEE Access, c. 9, ss. , pp. 29775-29818, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058403.

[52] Altulaihan, E. A., A. Alismail, ve M. Frikha, *"A Survey on Web Application Penetration Testing"*, Electronics (Switzerland), c. 12, sy 5, Mar. 2023, doi: 10.3390/ELECTRONICS12051229.

[53] Halfond, W. G. J., J. Viegas, ve A. Orso, *"A Classification of SQL Injection Attacks and Countermeasures"*, ISSSE, 2006.

[54] Lin, H., Z. Yan, Y. Chen, ve L. Zhang, *"A Survey on Network Security-Related Data Collection Technologies"*, IEEE Access, c. 6, ss. , pp. 18345-18365, Mar. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817921.

[55] Parry, J., D. Hunter, K. Radke, ve C. Fidge, *"A network forensics tool for precise data packet capture and replay in cyber-physical systems"*, ACM International Conference Proceeding Series, c. 01-05-February-2016, Şub. 2016, doi: 10.1145/2843043.2843047;TOPIC:TOPIC:CONFERENCE-COLLECTIONS>AUS-CSW;JOURNAL:JOURNAL:ACMOTHERCONFERENCES;CTYPE:STRING:BOOK.

[56] Wang, L. ve A. M. Wyglinski, *"Detection of man-in-The-middle attacks using physical layer wireless security techniques"*,

Wireless Communications and Mobile Computing, c. 16, sy 4, ss, pp. 408-426, Mar. 2016, doi: 10.1002/WCM.2527;CTYPE:STRING:JOURNAL.

[57] Ylli, E. ve J. Fejzaj, *"Man in the Middle: Attack and Protection"*, içinde *RTA-CSIT*, 2021, ss. , pp. 198-204.

[58] Jaafar, G. A., S. M. Abdullah, ve S. Ismail, *"Review of Recent Detection Methods for HTTP DDoS Attack"*, 2019, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2019/1283472.

[59] Bosnjak, L., J. Sres, ve B. Brumen, *"Brute-force and dictionary attack on hashed real-world passwords"*, içinde *41st International Convention on Information and Communication Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Haz. 2018, ss. , pp. 1161-1166. doi: 10.23919/MIPRO.2018.8400211.

[60] Islam, S., *"Security Auditing Tools: A Comparative Study"*, International Journal of Computing Sciences Research, c. 5, sy 1, ss., pp. 407-425, Oca. 2021, doi: 10.25147/ijcsr.2017.001.1.49.

[61] Sarmah, U., D. K. Bhattacharyya, ve J. K. Kalita, *"A survey of detection methods for XSS attacks"*, Journal of Network and Computer Applications, c. 118, ss. , pp. 113-143, Eyl. 2018, doi: 10.1016/j.jnca.2018.06.004.

[62] Rodríguez, G. E., J. G. Torres, P. Flores, ve D. E. Benavides, *"Cross-site scripting (XSS) attacks and mitigation: A survey"*, Computer Networks, c. 166, s. , pp. 106960, Oca. 2020, doi: 10.1016/J.COMNET.2019.106960.

[63] Cichonski, P., T. Millar, T. Grance, ve K. Scarfone, *NIST - Computer Security Incident Handling Guide*. 2025. doi: 10.6028/NIST.SP.800-61r3.

[64] "CVE - Common Vulnerabilities and Exposures". Erişim: 02 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://cve.mitre.org/

[65] Maris, A., A. Kundu, ve A. Yoon, *Common Vulnerability Scoring System version 3.1 Specification Document Revision 1*. 2024. Erişim: 02 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.first.org/cvss/

[66] National Institute of Standards and Technology (NIST), "National Vulnerability Database (NVD)". Erişim: 02 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://nvd.nist.gov/

Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi

Cilt-18
Sayı-1
2025

Çevik Yazılım Geliştirme Modeline Geçiş Sürecinde Kurumsal Değişim ve Uyum Deneyimi

Experience of Corporate Change and Adaptation in Transition to Agile Software Development Model

Ahmet Can RAMAZANOĞLU
Borsa İstanbul
Ar-Ge Merkezi
İstanbul, Türkiye
ahmetcan.ramazanoglu@borsaistanbul.com
ORCID: 0009-0003-7521-2745

Ömer Faruk KAYA
Borsa İstanbul
Ar-Ge Merkezi
İstanbul, Türkiye
omerfaruk.kaya@borsaistanbul.com
ORCID: 0000-0002-8320-7554

Nuriye AKPINAR
Borsa İstanbul
Ar-Ge Merkezi
İstanbul, Türkiye
nuriye.akpinar@borsaistanbul.com
ORCID: 0009-0004-6124-7530

Sena YAVUZ
Borsa İstanbul
Ar-Ge Merkezi
İstanbul, Türkiye
sena.yavuz@borsaistanbul.com
ORCID: 0009-0008-8998-8452

Feyzanur TÜRKMEN
Borsa İstanbul
Ar-Ge Merkezi
İstanbul, Türkiye
feyzanur.turkmen@borsaistanbul.com
ORCID: 0009-0004-3078-1669

Mehmet GÖKTÜRK
Gebze Teknik Üniversitesi
Bilişim Teknolojileri Enstitüsü
Gebze, Türkiye
gokturk@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-8030-8923

Öz

Finans sektöründe geleneksel yazılım geliştirme yöntemleri, projelerin ihtiyaç duyduğu esnekliği ve hızla uyum sağlama kabiliyetini sunmada yetersiz kalmaktadır. Çevik yazılım geliştirme metodolojileri ise müşteri ihtiyaçlarına hızlı yanıt verebilme, proje karmaşıklığını azaltma, ölçülebilir gelişim sağlama ve esnek yönetim gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, sermaye piyasalarına yönelik bir dijital dönüşüm projesinde, çevik yöntemlerin uygulanabilirliği ve kurumsal uyum süreçleri incelenmiştir. Farklı disiplinlerden ekiplerin katılımıyla yürütülen bu projede, öykü tahtaları (storyboard) ve koşu (sprint) yaklaşımları kullanılmış ve performans ölçümleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, çevik modelin şirket kültürüne uyarlanması ve ekip üyelerinin bu modeli benimsemeleri, proje süreçlerinde iyileşme sağlamış; koşular sayesinde ekiplerin görevlerini daha iyi anlaması ve takip edebilmesi mümkün olmuştur. Yapılan uyarlama, tamamlanma oranlarında ve teslim sürelerinde kayda değer gelişmeler sağlarken, maliyet-fayda analizleri ile takip edilebilirlik güçlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Çevik Yöntem, Yazılım Geliştirme, Atak Yaklaşım, Sermaye Piyasaları, Kurumsal Uyum

Abstract

Traditional software development methods often lack the flexibility and adaptability required in the financial sector, where rapid response to changing requirements is crucial. Agile software development methodologies provide a dynamic framework that enhances project efficiency by enabling quick response to customer needs, reducing complexity, and supporting flexible management. This study examines the implementation and organizational adaptation of Agile methodologies in a digital transformation project within the capital markets sector. The project involved cross-disciplinary teams, utilized various storyboard and sprint approaches, and included performance measurements. Results indicate that adapting the Agile model to align with corporate culture facilitated team acceptance and integration, allowing team members to better understand and monitor their tasks throughout the project. These adaptations yielded significant improvements in task completion rates and project timelines, while cost-benefit tracking became feasible.

Keywords: Agile Methodology, Software Development, Scrum, Capital Markets, Organizational Adaptation

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 23.11.2023 - 19.04.2025 – 27.05.2025
Makale türü: Araştırma

1. Giriş

Büyük finansal organizasyonlar ve sermaye piyasası yazılım projelerinde, yüksek uyumluluk ve güvenlik gereksinimlerinden ötürü geleneksel şelale modeli uzun yıllar boyunca tercih edilegelmiştir. Fakat bu model, öngörülebilir süreçler sunması ve bozulma kabul edilen değişikliklere direnci ile geçmişte avantaj sağlarken, değişen müşteri ihtiyaçlarına ve pazar koşullarına hızlı yanıt verme gerekliliği karşısında zamanla önemli ölçüde yetersiz kalmıştır [1]. Şelale modeliyle yürütülen projelerde, değişikliklerin zincirleme etkisi nedeniyle maliyetler artmakta, teslim süreleri uzamakta ve müşteri beklentileri karşılanamamaktadır [2].

2001 yılında, 17 yazılım geliştirici Snowbird, Utah'ta bir araya gelerek yazılım teslimat süreçlerini hızlandırmak ve değişen piyasa koşullarına uyum sağlamak için yenilikçi yöntemler ortaya atmıştır. Kendilerini "kurumsal anarşistler" olarak adlandıran grup, ağırlıklı olarak Silikon Vadisi ve teknoloji sektöründen temsilcilerden oluşmuş ve toplantı sonucunda, herkesin üzerinde uzlaştığı dört temel değeri içeren "Çevik Yazılım Geliştirme Manifestosu" oluşturulmuştur. Bunun ardından, "Çevik Manifesto'nun Ardındaki Prensipler" olarak adlandırılan 12 temel ilke geliştirilmiştir [3][4]. Günümüzde 'çevik' (agile) kavramı, müşteri değerini artırmak ve teslimat sürelerini hızlandırmak amacıyla kullanılan geniş kapsamlı bir metodoloji kavramı olup, yazılımın ötesine geçerek diğer yenilikçi süreçlerde de uygulanmaktadır [5][6].

Çevik yazılım geliştirme yöntemleri esnekliği artıran, yinelemeli geliştirme ve sürekli geri bildirim döngüleriyle müşteri odaklı çözümler sunma potansiyeli ile dikkat çekmiştir [7][8]. Literatürde, çevik metodolojilerin yazılım kalitesini artırdığı, paydaşlar arasında sürekli iletişim ve koordinasyonu güçlendirdiği, üretkenliği yükselttiği ve müşteri memnuniyetini artırdığı sıkça belirtilir [9]. Ancak, bu metodolojilerin başarısı yalnızca basit teknik bir dönüşümle değil, organizasyon kültürüne entegrasyon ve ekiplerin bu modele uyumu ile doğrudan ilişkilidir [10][11]. Çevik yöntemlerin uygulanması, özellikle büyük organizasyonlarda, kapsamlı bir kurumsal dönüşüm gerektirmektedir [12].

Bu çalışmada, finans sektöründe sermaye piyasalarına yönelik dijital dönüşüm projelerinde çevik metodolojilerin adaptasyon süreci örnek proje üzerinde ele alınmakta ve dönüşümde uygulanan yöntem ve elde edilen kazanımlar incelenmektedir. Finans ve mali piyasalar sektörü, yönetmelik tabi olması ve kendine özel gereksinim dinamikleri nedeniyle çevik dönüşüm literatüründe özel olarak ilgi alanı olarak görülmektedir [13]. Çalışmada Borsa İstanbul'da gerçekleştirilen projelerden elde edilen bulgular üzerinden, öykü tahtası ve koşu (sprint) yaklaşımlarının uygulama süreçleri, adaptasyon aşamasında karşılaşılan zorluklar ve elde edilen kazanımlar nitel ve nicel ölçümlere dayanılarak gözlem tekniği ile incelenmiştir. Özellikle regülasyonlar altında olan ve hatasızlık gereksinimleri ile özel kısıtlar altında bulunan firma içinde yapılan bu çalışma, örnek üzerinde çevik yaklaşımların sermaye piyasası projelerine uyarlanabilirliğini değerlendirmektedir. Bu kapsamda çevik dönüşümün kurumsal yapılara entegrasyonunun etkilerini ve sonuçlarını, elde edilen kazanımları sistematik olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Bu çalışma ile elde edilen bilgiler sayesinde sermaye piyasalarına yönelik yazılım geliştirme projelerinde çevik yaklaşımların doğru yaklaşım ile benimsenmesi proje verimliliğini olumlu yönde etkileyebilecektir. Uzun vadede maliyet ve zaman açısından daha sürdürülebilir bir modele hızlı ulaşım için takip edilebilir bir örnek oluşturmaktadır. Çevik yazılım geliştirme modelinde tek bir sabit reçete olmadığı için bu çalışmanın amacı örnek uygulamada edinilen deneyimlerin paylaşılmasıdır.

Çalışma kapsamında gözlem, veri toplama ve ölçme, değerlendirme ve nitel inceleme teknikleri kullanılmıştır. İkişer aylık periyotlar ile değişim gözlenmiş ve elde edilen bulgular tablo haline getirilmiş ve yorumlanmıştır. Başarı için olumlu sonuç verdiği görülen yaklaşımlara dikkat çekilmiştir.

Bu makalenin ilerleyen bölümlerinde, öncelikle yapılan çalışmaya ve çalışma kapsamına özel olan çevik modele geçiş ve yöntemler hakkındaki literatür ve prensipler ele alınmaktadır. Bunun ardından çevik proje yönetimi sürecinde yapılan gözlemler, kurumdaki süreçte uygulanan özel yöntemler ve bu yöntemlerin kurumsal etkileri, ölçümleri ve değerlendirmeleri biçiminde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Son olarak, sonuç bölümünde elde edilen çıkarımlar, benzer çalışmaların bulgularıyla karşılaştırılmış ve gelecekteki araştırmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. Çevik Yöntem Modeline Geçiş

2.1 Literatürde Problem Tanımı

Finans sektörü gibi değişken regülasyonlara tabi, risk ve güvenlik hassasiyetinin yüksek olduğu alanlarda, bu modelin sınırlamaları zamanla belirgin hale gelmiştir [14]. Özellikle sık değişen yasal düzenlemeler ve müşteri talepleri karşısında yazılım geliştirme süreçlerinde zorluklar yaşanmıştır.

Büyük ölçekli finans sektörü için örnek teşkil edebilecek kurumlar arasında olan Borsa İstanbul özelindeki projelerde, yüksek entegrasyon ihtiyaçları ve modüler yapı gereklilikleri karşılanırken ortaya çıkan yeni taleplere zamanında ve kolayca yanıt verilememesi, maliyetli revizyonlara neden olmuştur. İş birimleri ve yazılım ekipleri arasındaki koordinasyon zayıflamış, müşteri taleplerinin etkin şekilde karşılanması güçleşmiştir. Bu durum literatürde tanımlanan sorunlara paraleldir ve çok boyutludur [15]. Sektördeki değişken ihtiyaçlara uyum sağlayabilen daha esnek yöntemlerin gerekliliği açıkça ortada olmasına karşın atılması gereken birçok kritik adım vardır ve büyük organizasyonların dönüşümü kolay değildir [16].

Çevik yaklaşımlar, projelerin erken aşamalarında sürekli geri bildirim mekanizmaları sayesinde müşteri beklentilerine ve düzenleyici değişikliklere hızlı yanıt verme fırsatı sunmaktadır [17]. Örneğin kısa süreli "koşu"lar ile proje ilerleyişi daha kolay ölçülebilmekte, sorunlar erken tespit edilerek çözüme kavuşturulmaktadır. Böylece, çevik süreçlere geçişin gerek proje maliyetlerini azaltan gerekse zaman verimliliğini artıran faydalar sunduğu gözlemlenmiştir [18]. Çok parametreli olan bu süreçler genellikle kurumsal değişim ve şirket kültürünün,

ekip dinamiklerinin dönüşümünü isteyen kapsamlı çalışma gerektirmektedir [19]. Dolayısı ile süreçlerin nasıl uygulandığı, hangi yaklaşımların nasıl birleştirildiği başarıyı önemli ölçüde etkilemektedir. 2001 de "Çevik Manifesto" ile ortaya atılan prensiplerin temelde aynı olmasına karşın birçok farklı yaklaşım ile uygulandığı görülmektedir [4]. 2. Bölümün geri kalanında çevik yaklaşımın çalışma özelindeki niteliklerine özet olarak değinilerek genel çerçeve çizilerek yönteme dair bilgiler verilmiştir.

2.2 Çevik Yöntem

Çevik yöntem proje yönetiminde bireyler arası etkileşimi, çalışan yazılımı ve müşteri iş birliğini ön planda tutarak, plan odaklı bir yaklaşımdan esneklik odaklı bir yaklaşıma geçiş olarak tanımlanır [20]. Ulusal ve uluslararası çalışmalar, çevik metodolojilerin etkili bir şekilde uygulanmasıyla proje süreçlerinin hızlandığını ve müşteri memnuniyetinin arttığını göstermektedir [21][22]. Çevik yöntemlerin kurumsal bağlama uyarlanması, yalnızca teknik bir geçişi değil, aynı zamanda ekiplerin bu yeni yaklaşımı benimseme süreçlerini de kapsamaktadır. Bu süreçte organizasyon kültürünün çevik değerlere uyum sağlaması, başarının şartı olarak gösterilmektedir.

2.3. Çevik Koç

Çevik Koç (Agile Coach), çevik dönüşüm ve yaşam sürecinde organizasyonlara rehberlik ederek ekiplerin çevik yöntemleri benimsemesini, verimliliği artırmasını hedefleyen liderdir [4]. Çevik koçlar, organizasyondaki dirençleri yönetir, etkili iletişimi teşvik eder ve çevik değerlerin kurumsal kültüre entegrasyonunu sağlar [23]. Ekiplerin performansı, koçun başarısıyla orantılıdır. Başarılı bir çevik koç, teknik bilgiyle birlikte liderlik anlayışına ve duygusal zekâya sahip olmalıdır. Ekiplerin güçlü yönlerini keşfederek motivasyonlarını artırmak, karar alma süreçlerine dahil olmalarını sağlamak ve takım ruhunu güçlendirmek temel görevlerindendir. Araştırmalar, çevik koçların ekiplerde verimliliği artırdığını göstermektedir [24].

Çevik koçlar, "mentor", "danışman" ve "rehber" rollerini birleştirerek ekiplerin bağımsız karar alma süreçlerini desteklerken, teknik becerilerin yanı sıra paydaşlar arasında iletişim köprüleri kurar ve çevik değerlerin iş süreçlerine entegrasyonunu sağlar. Örneğin, çevik yöntemlerin organizasyona katkılarını göstermek ve dönüşüm algısını güçlendirmek koçların görevidir [25][26].

2.4 Atak Yaklaşım (Scrum)

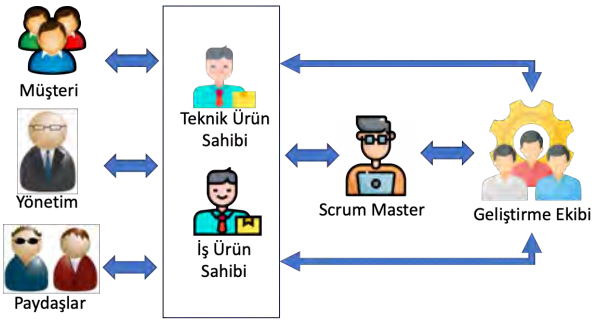
Çevik yaklaşım yapıları arasında en bilinen temel yapı olan "Atak Yaklaşım: Atak Yaklaşım", kısa ve düzenli koşular aracılığıyla projelerin daha hızlı ilerlemesine olanak tanıyan bir çerçeve terimdir. Bu terim, Hirotaka Takeuchi ve Ikujiro Nonaka tarafından yazılan bir makaleden türetilmiş olup, yaklaşımını ragbi oyununa dayandırmıştır [27]. Atak yaklaşım, takım üyelerinin görevlerini net bir şekilde anlamasını sağlamakla birlikte, süreçlerin sürekli gözden geçirilmesine ve uyarlanmasına yol açar ve iş süreçlerini şeffaflaştırarak ekip içi iletişimini güçlendirir [28].

Atak Yaklaşım yazılım geliştirme projelerinde karmaşık problemleri basitleştirip ekiplerin verimliliğini artırmayı amaçlayan çevik bir yönetim çerçevesi olmuştur. Şeffaflık, gözlem ve adaptasyona dayanan bu yöntemin kaynak yayınlarda yazılım geliştirme süreçlerinde verimlilik, hız, kalite ve müşteri memnuniyetini artırdığı belirtilmektedir [29].

Atak Yaklaşım çerçevesinin temel bileşenlerinden biri, projeyi koşu (sprint) adı verilen kısa süreli döngülerle yönetmektir. Koşular, projeyi daha küçük parçalara bölerek, her döngünün sonunda tamamlanan işlerin gözden geçirilmesini ve iyileştirilmesini sağlar ve risklerin erken ele alınmasına yol açar [30].

Yapılan araştırmalarda şeffaflığın yanında Atak yaklaşım toplantıları, koşu planlama, gözden geçirme ve retrospektif gibi süreçlerin, ekiplerin iletişimini artırırken projeye odaklanmalarını sağladığı görülmüştür [31].

Çalışmaya konu olan Borsa İstanbul projesindeki atak yaklaşımında atak yaklaşım ekibinin rolleri net bir şekilde tanımlanmıştır. "Atak Yaklaşım Master" ekip işleyişini düzenlerken, teknik ve iş olarak ikiye ayrılan "Ürün Sahibi" rolü müşteri taleplerini geliştirici ekibe gönderir. "Geliştirme Ekibi" teknik uygulamaları üstlenerek koşu hedeflerine odaklanabilmektedir. Bu rollere dayalı çalışma modeli, ekip verimliliğini artırırken iş süreçlerinde hızlı çözümler sunabilmektedir. Şekil 1, bu rolleri özetlemektedir.



Şekil-1: BIST Atak Yaklaşım Rolleri

2.5. Atak Yaklaşım Rolleri

Atak Yaklaşım Master, atak yaklaşım ilkelerini uygulamada ekiplere rehberlik eden ve bu ilkelerin etkin şekilde benimsenmesini sağlayan önemli liderdir. yayınlarda, atak yaklaşım Master'ın ekip verimliliğini artırmada ve proje süreçlerini hızlandırmada önemli bir rol oynadığı vurgulanmaktadır [32].

Araştırmalar, atak yaklaşım Master'ın etkin bir koç olarak takım dinamiklerini güçlendirdiğini ve ekip üyeleri arasında iletişimi geliştirdiğini göstermiştir [33]. "Hizmetkâr lider" rolüyle ekibin ve ürün geliştirme sürecinin gereksinimlerini ön planda tutarken, kaynaklarda "dönüşümcü liderlik" olarak adlandırılan yaklaşımla, ekiplerin çevik süreçlerde daha esnek ve uyarlanabilir hale gelmesini sağlar [34].

Diğer rol ürün sahibi (product owner) rolü ise, müşteri beklentilerinin analiz edilmesi, iş listesinin (backlog) önceliklendirilmesi ve gereksinimlerin geliştirme ekibine iletilmesinden sorumludur. Ürün sahibi, müşteri, paydaşlar ve ekip arasında köprü görevi ile iş listesindeki düzenlemeler

aracılığıyla ürün geliştirme sürecine özellikle küçük takımlar olarak değer katmaktadır [35].

Çoğu projede ürün sahibinin temel görevleri arasında ürün vizyonunu belirlemek, koşu hedeflerini tanımlamak ve her koşu sonunda ürünün müşteri gereksinimlerine uyumunu değerlendirmek yer almaktadır. Bu süreç, ürünün stratejik kararlarla şekillendirilmesini sağlamaktadır.

"Geliştirme Takımı", analistler, yazılımcılar, kalite uzmanları ve test mühendislerinden oluşan, proje sürecine doğrudan katkı sağlayan disiplinler arası bir ekipten oluşur. Fonksiyonel çeşitliliğin, proje çıktılarının kalitesini artırdığı ve karmaşık problemlere daha hızlı çözümler üretilmesini sağladığı görülmektedir [36]. Yapılan araştırmalar, kendi kendini organize edebilen ekiplerin, iş birliğini ve performansı artırdığını çok kez göstermiştir [37]. Ekip üyeleri, uzmanlıklarına uygun görevler üstlenirken, koşu hedeflerine ulaşmak için kolektif bir çaba gösterirler. Ekip içi etkileşim, risklerin hızlı ele alınmasını ve yaratıcılığı sağlamaktadır.

3. Yöntem ve Kurum İçi Atak Yaklaşım Deneyimi

3.1. Yöntem

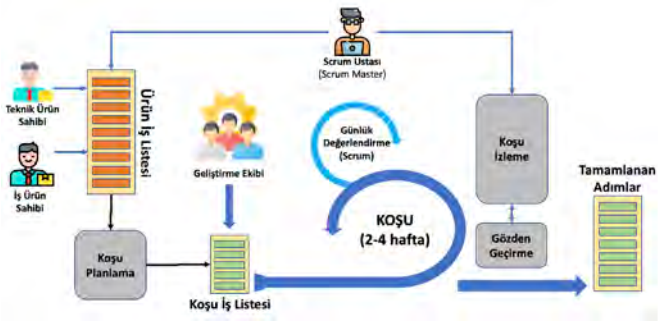
Bu çalışmada Borsa İstanbul bünyesindeki personel tarafından yaşanan atak yaklaşım deneyimi üzerinde farklı boyutlarda durulmuştur. Projede aktif olarak çalışan yaklaşık 250 toplam kurumsal personel ve 50'den fazla yine proje kapsamında görevli yazılım geliştiriciden oluşan bir ekip üzerinde çalışma yapılmıştır. Geliştiricilerin 2 aylık koşu periyotları ile gözlem ve veri toplama yöntemi kullanılarak geleneksel ve geçiş sonrası performans verileri incelenmiştir. Veriler JIRA proje yönetim ve izleme yazılımı üzerinden toplanmıştır.

Çalışmada proje ana konusu Borsa İstanbul'da yürütülen "CRM Projesi", çevik koçluk uygulamalarının pilot çalışması olarak seçilmiştir. Bu kapsamda belirlenen çevik koç, proje yönetim ofisi tarafından desteklenmiş ve atak yaklaşım, gözden geçirme (retrospective) gibi süreçlerin yönetiminden sorumlu tutulmuştur.

CRM projesi kapsamında öykü tahtası ve koşu yapıları ile, süreçlerin bölünmesi sağlanmış ve düzenli geri bildirimler ile ekiplerin performansının artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca, kısa süreli görevlerin belirlenmesi ve bu görevlerin tamamlanma oranlarının sürekli izlenmesi, proje verimliliğini destekleyen önemli bir unsur olarak görülmüştür. Borsa İstanbul CRM projesinde, "Geliştirme Takımı" analist, yazılımcı ve test mühendislerinden oluşmuş ve entegrasyon gereksinimlerini karşılamak için disiplinler arası bir yapıya sahip olmuştur. Her koşu sonunda, iş birimleri ve müşteri ihtiyaçlarına uygun iyileştirmeler yapılmıştır.

Çalışmada ürün sahibi rolü gelenekselden farklı olarak çift yönlü bir yapı olarak tasarlanmıştır. BT biriminden "Teknik Ürün Sahibi" ve iş biriminden "İş Ürün Sahibi" atanmıştır. Teknik Ürün Sahibi, teknik gereksinimlere odaklanarak geliştirme sürecini yönlendirirken, İş Ürün Sahibi müşteri taleplerini analiz ederek bu talepleri ürüne yansıtmıştır. Bu yapı, müşteri ihtiyaçlarının eksiksiz karşılanmasını ve iş birimi taleplerinin teknik açıdan etkin yönetilmesini amaçlamıştır (Şekil1).

Atak yaklaşım, projelerde karmaşık sorunlara pratik çözümler sunan çevik bir yönetim çerçevesi olup dinamik yapısıyla değişen gereksinimlere hızla uyum sağlamayı amaçlar. Genellikle projenin başında oluşturulan ürün iş listesi (product backlog), koşu içeriklerini belirlemektedir. Koşular genellikle iki ila dört hafta sürmekte ve her döngü sonunda, potansiyel olarak kullanıma hazır bir ürün geliştirilmektedir. Görevlerin düzenli gözden geçirilmesi ve koşu sonunda yapılan değerlendirmeler, sorunların erken fark edilmesini sağlamaktadır. Çalışmada uygulanan yönteme dair döngüsel model Şekil-2'de gösterilmektedir.



Şekil-2: BİST Çevik Yaklaşım Döngüsü

3.2. Günlük Atak Yaklaşım Toplantıları

Günlük atak yaklaşım toplantıları, ekiplerin bir araya gelerek proje ilerleyişini değerlendirdiği, bireysel katkılarını paylaştığı ve koşu hedeflerine yönelik planlamalar yaptığı süreç olup bu toplantılar, ekip üyeleri arasındaki iletişimi artırarak iş birliğini güçlendirir ve ekip dinamiklerini olumlu yönde etkilemiştir.

En fazla 15 dakika süren bu toplantılarda ekip üyelerinin, "Dün ne yaptım?", "Bugün ne yapacağım?" ve "Bir engel var mı?" sorularına yanıt vermesi beklenmektedir. Bu yapı, bireysel iş yüklerini ve ortak darboğazları görünür kılmaktadır. Genellikle ayakta gerçekleştirilen bu toplantılar, odaklanmayı ve dinamikliği artırmaktadır. Ayakta yapılan toplantılar süreyi kısaltarak karar alma sürecini hızlandırmakta ve katılımı artırmaktadır [38]. Ayrıca Covid-19 pandemisi sırasında, video konferansla sürdürülen bu toplantılar, atak yaklaşım çerçevesinin uzaktan çalışma koşullarında dahi uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır.

Süreç içindeki toplantılar, gerçekten de ekip koordinasyonunu artırırken bilgi paylaşımını artırmış ve bilinçli karar alma süreçlerine katkıda bulunmuştur. Borsa İstanbul CRM projesinde, bu toplantılar düzenli olarak gerçekleştirilmiş ve iş birimlerinden alınan geribildirimlerle geliştirmeler yönlendirilmiştir.

Çalışma kapsamındaki Borsa İstanbul CRM projesinde, günlük atak yaklaşım toplantıları başlangıçta her gün yapılmış, ancak ekiplerin iş yoğunluğu ve organizasyon kültürüne uyum sağlamak için haftada üç güne indirilmiştir. Bu uyarlama, esnek çalışma ortamı sunarak görev odaklı süreleri artırmış ve tamamlanma oranlarında iyileşme sağlamıştır. Bu proje deneyimi, günlük atak yaklaşım toplantılarının esnek bir şekilde uyarlanmasının ekip verimliliğini artırdığını

göstermiştir. Bu toplantılar iş yükünü dengelemek ve ekip içi etkileşimleri artırmakla kalmamakta, aynı zamanda olası sorunların erken fark edilerek çözülmesini sağlamaktadır [39].

3.4. Koşu Planlama (Sprint Planning)

Koşu planlamada ekip, iş listesindeki görevlerden koşu içinde tamamlanabilecekleri belirler ve koşu için somut hedefler oluşturur. Koşu planlamanın odaklanmayı artırdığı ve iş yükünü dengeleyerek verimliliği yükselttiği araştırmalarda belirtilmektedir [40]. Literatür, koşu planlama toplantılarının iş yükünü dengeli şekilde dağıtarak zaman yönetimini iyileştirdiğini göstermektedir [41][42]. Çoğu kez toplantılarda, ürün sahibi ve ekip ortak çalışarak iş listesinden seçilen görevleri koşu hedeflerine dönüştürmektedir. Görevlerin önceliklendirilmesi ekip verimliliğini ve tamamlama oranlarını artırmaktadır.

Öte yandan koşu planlamada temel soru, "Bu koşuda hangi işlerin tamamlanması mümkündür?" sorusu olmaktadır. Koşu hedeflerinin açıkça tanımlanması, ekip üyelerinin odaklanma düzeyini artırarak başarı oranlarını yükseltmektedir. Çalışmada bu durum göz önüne alınmıştır. Koşu planlama toplantıları, koşu başında yapılmış ve tamamlanacak görevler belirlenmiştir. Ürün sahibinin önceliklendirdiği iş listesindeki maddeler doğrultusunda ekip, iş yükünü dengeli bir şekilde dağıtmaya çalışmıştır. Doğru önceliklendirme ve görev tahmini ile, projenin başarı oranını iyileşmektedir. Koşu izleme toplantıları ile ekiplerin zaman yönetimi ve görev bilincinin iyileşmesi çalışmada hedeflenmiştir.

Bu çalışma kapsamında koşu planlama toplantısı ilk iki koşuda 2 hafta olarak uygulanmıştır. Ancak gözlenen verim sorunları nedeniyle çıktının verimi ve kalitesini arttırmak için kurum özelinde 4 haftada bir olacak şekilde revizyon yapılmıştır. Bazı ulusal büyük ölçekli firmaların 2 hafta yerine 3 hafta tercih ettikleri geçmişte görülmekle birlikte yapılan 4 haftalık revizyonun geri dönüşleri olumlu olmuştur. Bu bağlamda müşteriye sunulan çıktının istenilen kalitede elde edildiği gözlemlenmiştir. Verim artışı gözlenmesi nedeniyle proje sonuna kadar 4 haftalık aralıklarla koşu planlama toplantıları yapılmasına çalışma kapsamında devam edilmiştir.

Bu değişiklik ile ekiplerin iş yükünü daha verimli yönetmesine olanak tanımış ve proje çıktılarını olumlu yönde etkilemiştir. Her görev için zorluk derecelerinin tahminiyle iş yükü dengelenmesi hedeflenmiş, koşular planlanan sürede başarıyla tamamlanmıştır. Koşu sürelerinin projeye göre uyarlanmasının atak yaklaşım uygulamalarının başarısını doğrudan etkilediğini kaynaklarda da de ayrıca belirtmektedir [43].

3.5. Koşu İzleme

Koşu süreci boyunca görevlerin planlanan takvime uygun ilerleyip ilerlemediğini değerlendirmekte ve karşılaşılan zorluklara çözüm üretilmesini sağlarken ekibin performansını değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Mevcut araştırmalar, koşu izlemenin erken uyarı mekanizmaları geliştirdiğini ve olası aksaklıkları hızlıca tespit etmeye yardımcı olduğunu göstermektedir [44].

Günlük atak yaklaşım toplantılarında görevlerin durumu paylaşılarak koşu hedeflerine yönelik ilerleme tartışılmaktadır. Literatürde, bu süreçlerin projelerin verimliliğini ve ekip üyelerinin iş yükü yönetim becerilerini geliştirdiği belirtilmektedir [45].

Koşu izleme, iş listesindeki öğelerin ilerleyişini ve görev tamamlama oranlarını takip eder. Bu amaçla araç kullanılırsa ve ekibin performansı objektif verilerle değerlendirilirse ekiplerin planlanan süre ve kalitede görev tamamlama oranı artmaktadır.

Çalışma kapsamındaki Borsa İstanbul CRM projesinde koşu izleme, haftalık toplantılarla gerçekleştirilmiş ve ilerleme raporlarıyla iş yükü yönetimi optimize edilmiştir. JIRA gibi yazılımlar, tamamlama oranlarını ve zorluk derecelerini izleyerek projeye verimlilik kazandırmış, izleme işlemi, görev tahminlerinin daha isabetli yapılmasına katkıda bulunmuştur.

Koşu izleme, ekibin güçlü ve zayıf yönlerini analiz ederek iyileştirme stratejileri geliştirme fırsatları sunmaktadır. Toplantılarda darboğazlar ve çözüm önerileri ele alınarak ekip içindeki sorumluluk bilinci güçlendirilmiştir. Literatür de bu sürecin ekip üyelerinin kendini değerlendirme becerilerini ve sorumluluk duygusunu artırdığını ifade etmektedir [46].

3.6. Koşu Gözden Geçirme

Koşu gözden geçirme toplantıları koşu sonunda ekiplerin performansını değerlendirdiği stratejik iyileştirme çalışmasıdır. Ekip üyeleri, elde edilen deneyimlerden yola çıkarak gelecekteki koşular için stratejiler geliştirmektedir. Bu çalışmada, Jira yazılımı üzerinden analizler yapılmış ve ekip performansında ölçülebilir iyileştirmeler olup olmadığı incelenmiştir.

Ürün sahibi, geliştirici ekip ve diğer paydaşlar, koşu süresince tamamlanan işleri gözden geçirir ve iş listesi öğelerinin gereksinimlerle uyumunu değerlendirir. Koşu sonunda ekip tarafından tamamlanan işlerin değerlendirilmesi ve koşu hedeflerine ulaşılıp ulaşılmadığının analiz edilmesi bu sayede mümkün olmaktadır. Araştırmalarda koşu gözden geçirmenin müşteri odaklı ilerlemeyi desteklediği ve ekip üyelerinin süreçteki katkılarını anlamalarına yardımcı olduğu belirtilmektedir [47].

Koşu gözden geçirme, ekibin tamamlanan işlerin verimliliğini ve kalitesini değerlendirerek projeye daha fazla değer katma yollarını araştırdığı bir fırsattır. Bu toplantılar ayrıca toplam kalite yönetimi açısından kritik olup ve sürekli iyileştirme süreçlerini desteklemede önemlidir [48].

Borsa İstanbul CRM projesinde, koşu gözden geçirme süreçleri haftalık olarak gerçekleştirilmiş, iş birimlerinden gelen geri bildirimlerle iş listesi güncellenmiş ve sonraki koşular için stratejik düzenlemeler yapılmıştır. Jira gibi araçlarla görevlerin durumu izlenerek ekip içi iş birliği desteklenmiştir. Bu süreç, koşu hedeflerinin güncel müşteri ihtiyaçlarına uyumlu hale getirilmesine katkı sağlamıştır. Koşu gözden geçirme sadece mevcut koşunun değerlendirilmesini değil, gelecekteki koşuların planlanması için veri sağlamayı da ele almaktadır. Literatürde ekiplerin kendini değerlendirme becerilerini geliştirmede etkilidir [49].

Borsa İstanbul CRM projesinde uygulanan bu süreçler, iş birimlerinden alınan geri bildirimlerin projeye yansıtılması ve müşteri beklentilerine uygun iş listesi güncellemeleri ile stratejik bir önem taşımıştır. Çalışmalar, ekip üyelerinin performansını artırarak projenin başarı oranını yükseltmiş olup bulgular ve sonuçlar ilerideki bölümlerde incelenmiştir.

3.7. Öykü Puanı Kavramı

Öykü puanı (Story Point) kavramı, atak yaklaşım ve diğer çevik yöntemlerde işlerin karmaşıklık, belirsizlik ve çaba gereksinimlerine göre tahmin edilmesini sağlayan ölçüm birimi olup görevin zorluk derecesini temsil eder. Ekip için göreceli bir ölçüt sunarken iş yükü tahminlerinin daha objektif yapılması mümkün hale gelir [50]. Bu puanlamalar, bireysel beceri ve deneyimlere göre şekillenerek ekibin projeye geniş bir perspektiften bakmasını sağlar. Araştırmalar, öykü puanı kavramının ekiplerin görev karmaşıklığını anlamalarına ve belirsizlikleri yönetimde faydasını vurgulamaktadır [51].

Tahminlerde genellikle Fibonacci dizisi gibi ölçekler kullanılmaktadır. Örneğin, "1 puan" basit bir görevi, 8 veya 13 puan daha karmaşık ve çaba gerektiren bir görevi ifade eder. Öykü puanları, görevlerin karmaşıklığını, risk ve belirsizlik düzeyini ve hacmini dikkate alarak hesaplanmaktadır. Bazı yaklaşımlarda ise yapay zeka dil modelleri de kullanıldığı görülmektedir [52].

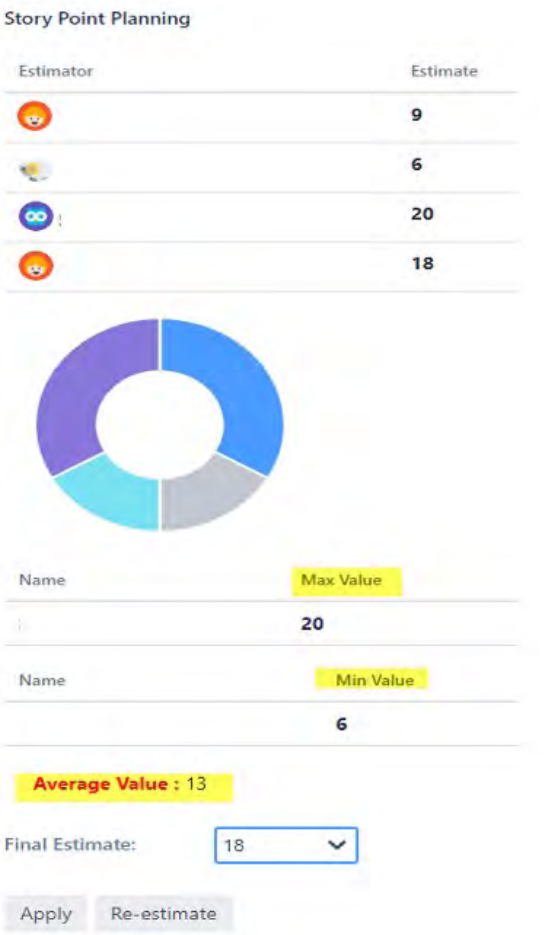
Çoğu çalışmada öykü puanlarının bu şekilde ölçeklendirilmesi aşağıdaki şekilde yapılmaktadır:

$$HikayePuanı = f(Hacim, Risk\&Belirsizlik, Karmaşıklık)$$

Bu formül, her bir görevin karmaşıklık değerlerinin toplanarak koşu içindeki toplam iş yükünün belirlenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca esneklik ve başarı oranları artışı sağlamaktadır [52]. Koşu hedefleri için "toplam öykü puanı" değeri hesaplanarak gerçekçi bir kapsam belirlenir. Doğru tahminler, koşu sonunda görev tamamlama oranlarını artırır ve zaman yönetimini geliştirir.

Borsa İstanbul CRM projesinde öykü puanı (story point) kavramı, görev karmaşıklığını ve iş gücünü belirlemek için aktif olarak yöntem içinde kullanılmıştır. Görevlerin karmaşıklığına göre belirlenen puanlar, adil ve dengeli görev dağılımı sağlamış, görev tamamlama oranını artırmıştır. Tahminler, Jira gibi araçlarla izlenmiş ve proje verimliliğini artıran temel bir gösterge olarak kullanılmış olup Şekil-3'de puanlama sonucunu gösteren arayüz örneği verilmiştir.

Ayrıca, öykü puanı (story point) değerlendirmeleri ekiplerin kendini geliştirme fırsatları sunar. Koşu gözden geçirme toplantılarında tahminlerin doğruluğu analiz edilerek ekip, performansını değerlendirme ve tahmin yeteneklerini iyileştirme şansı bulur. Ekiplerin sürekli öğrenmesini ve gelişimini desteklediği ifade edilmektedir [53].

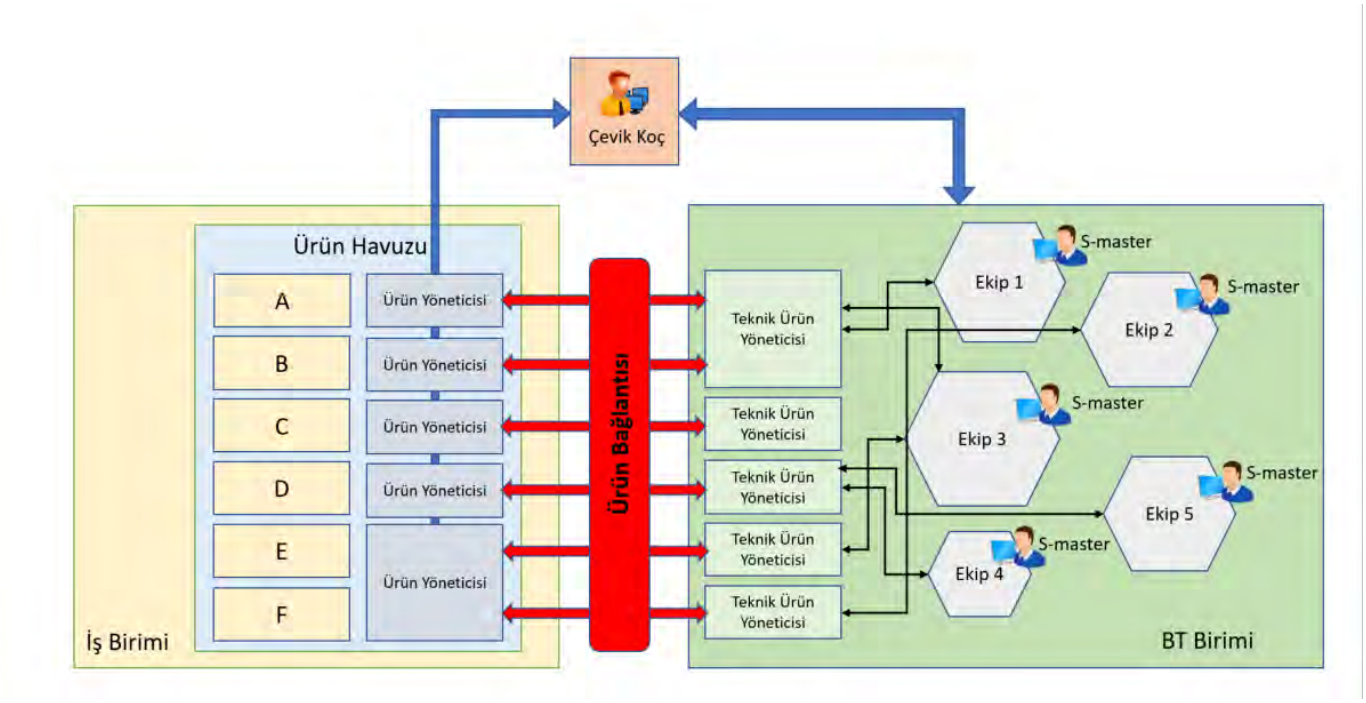


Şekil-3: BIST Hikaye Puanı (Story Point) Hesaplama Ekranı

4. Çevik Kurumsal Model Uygulama Bulguları

Çevik kurumsal model uygulaması, büyük ölçekli projelerde çevik metodolojilerin organizasyon genelinde benimsenmesini sağlayan bir yönetim çerçevesi olarak görülmektedir. Sadece proje bazlı değil, kurumsal düzeyde de çevik değerlerin entegrasyonunu hedeflemektedir. Modelin organizasyonlara stratejik avantaj sunduğunu, değişim yönetiminde esnekliği artırdığını ve iş birimleri arasındaki uyumu güçlendirdiği bilinmektedir [54].

Modelin başarılı uygulanması için, iş birimlerinin ve ekiplerin çevik prensiplere uygun şekilde yeniden yapılandırılması ve matris yapıda bir işleyişin benimsenmesi gerekmektedir. Bu yapı, ekiplerin bağımsız çalışmasını desteklerken ortak hedeflere uyumlu ilerlemelerini sağlamaktadır. Araştırmalar, matris yapıların karmaşık projelerde verimliliği artırdığını ve ekipler arası iş birliğini güçlendirdiğini göstermektedir [55].



Şekil-4: Borsa İstanbul (BIST) Çevik Kurumsal Modeli

Çevik kurumsal modelin üç temel unsuru yönetim desteği, ekip özerkliği ve sürekli iyileştirme kültürüdür. Yönetim desteği, ekiplerin bağımsız karar alma süreçlerini kolaylaştırmakta ve çevik yöntemlerin günlük iş süreçlerine entegrasyonunu desteklemektedir. Sürekli iyileştirme kültürü ise ekiplerin süreç boyunca öğrendiklerini uygulamalarına ve verimliliği artırmalarına olanak tanımaktadır.

Borsa İstanbul CRM projesindeki yaklaşımda çevik kurumsal model, müşteri gereksinimlerini karşılamak amacıyla belli ölçüde özelleştirilerek kademeli olarak uygulanmıştır. Ekipler, çevik eğitimler ve çevik koç desteğiyle sürece adapte olmuş, geri bildirim döngüleri sayesinde iş listesi güncellenmiş ve koşu hedefleri düzenlenmiştir. Bu süreç, müşteri odaklı ilerlemeyi ve çevik metodolojilerin kurumsal entegrasyonunu desteklemiştir. Uygulanan matris yapı sayesinde iş birimlerinin proje hedeflerine uyumu kolaylaşmış ve ekip koordinasyonu güçlenmiştir. Şekil 4'de bu yapı gösterilmektedir. Burada özellikle iş birimi ve Ar-Ge birimi arasında çift taraflı ürün sahibi/yöneticisi rolü ile etkin bir başarı elde edilmektedir. Ürün yöneticilerinin müşteri taleplerini dikkatle yönetmesi ve teknik gereksinimleri düzenli olarak gözden geçirmesi, proje hedeflerine ulaşılmasında önemli bir katkı sunmuştur. Ayrıca çevik koç hem iş birimi hem de teknik birimlerle etkin biçimde çevik prensiplerin uygulanması için çalışmıştır. Kurum yapısı da dikkate alındığında iş birimleri ile teknik birimlerin özellikle çevik yaklaşımda etkin iletişimi ve hızlı döngü performansının önemi dikkat çekmiştir.

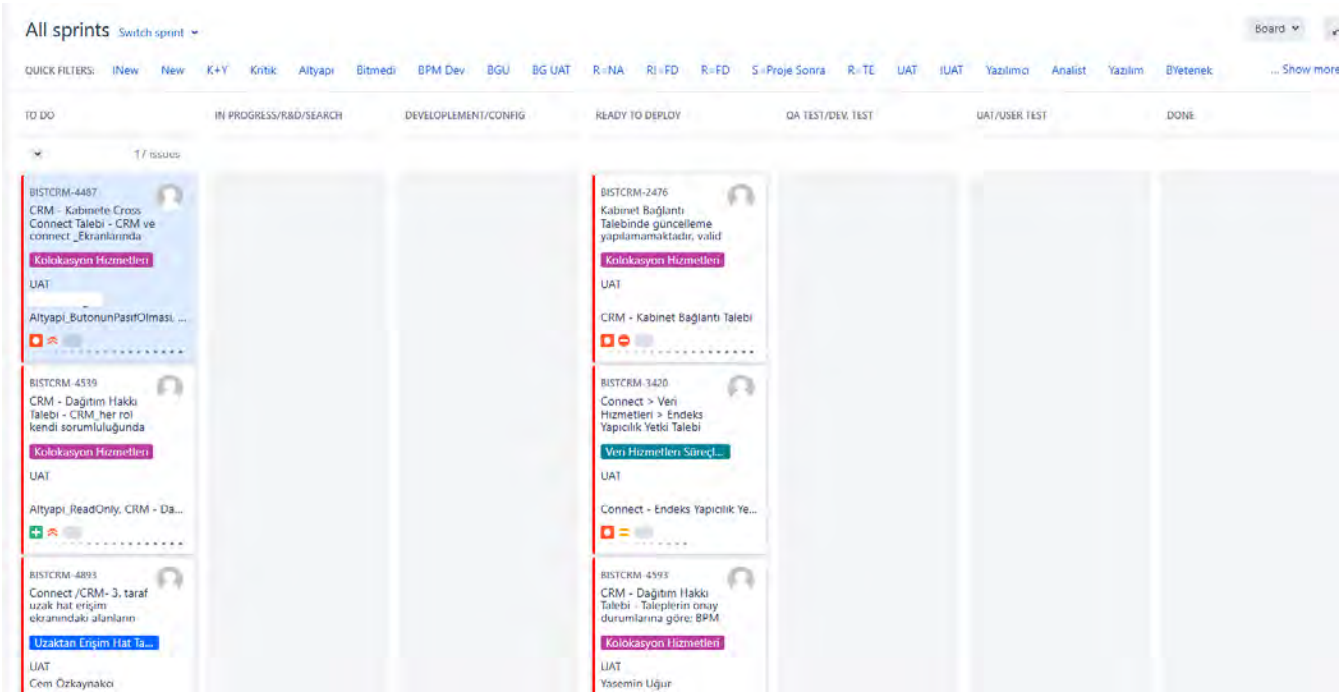
Sürekli iyileştirme kültürü, belirtildiği üzere uygulanmış olan çevik kurumsal modelin sürdürülebilirliğinde kritik bir rol oynayacaktır. Bu nedenle düzenli retrospektif toplantılarla ekipler, süreçlerini değerlendirip iyileştirme önerilerinde bulunmuş, bu da çevik kültürün organizasyon genelinde yaygınlaşması ve memnuniyeti sağlamıştır. Sürekli iyileştirme döngülerinin kurumsal verimliliği artırdığı ve çevik metodolojilere uyumu hızlandırdığı zaten bilinmektedir [56].

Borsa İstanbul'da atak yaklaşım, proje süreçlerini daha etkin ve şeffaf hale getirmiştir. Günlük atak yaklaşım toplantıları ile koşu hedefleri düzenli olarak gözden geçirilmiş, "Atak Yaklaşım Master" sorunları tespit edip çözüm üretirken, "Ürün Sahibi" iş birimleriyle yakın çalışarak proje ihtiyaçlarını güncel tutmuştur. Başlangıçta haftada beş gün yapılan toplantılar, organizasyon kültürüne uyum sağlamak için haftada üç güne indirilmiştir. Bu değişiklik, ekiplerin daha odaklı çalışmasını ve toplantıların verimliliğini artırmıştır. Bulgular, atak yaklaşım yönteminin büyük ölçekli projelerde de başarıyla uygulanabileceğini ve ekip verimliliğine katkı sağladığını göstermektedir.

Borsa İstanbul CRM projesinde uygulanan çevik kurumsal model, müşteri gereksinimlerine hızlı yanıt verilmesini sağlamış, iş birimlerinin çevik sürece katkısını artırmış ve proje genelinde verimliliği yükseltmiştir.

4.1. Proje İzlenmesinde Kullanılan Araçlar

Kurumsal çevik yaklaşımdaki bir başka önemli konu araçlar konusudur. Proje takibinde kullanılan yazılımlar, iş süreçlerini şeffaflaştırmak, görevlerin durumunu gerçek zamanlı izlemek ve proje verimliliğini artırmak amacı taşırlar. Görev önceliklendirme, zamanında tamamlama ve kaynakların etkin kullanımı gibi kritik işlevler üstlenmektedir. Proje yönetim araçlarının zaman yönetimi becerilerini geliştirdiği ve proje süreçlerini düzenli hale getirdiği görülmektedir.

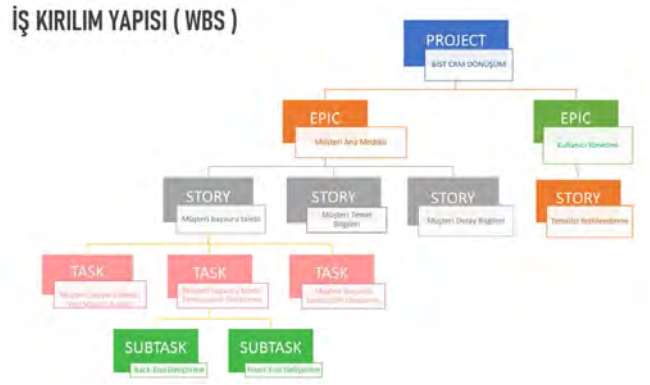


Şekil-5: BIST Atak Yaklaşım Kanban Tahtası

Jira, Trello, Asana ve Microsoft Project gibi araçlar, iş listesi (backlog) yönetimi, koşu planlama ve geri bildirim döngüleri gibi çevik metodoloji işlevlerini desteklemektedir. Özellikle çalışma kapsamında kullanılan JIRA, görevlerin karmaşıklık derecelerine göre öykü puanı atanmasını sağlayarak işyükü tahminlerini iyileştirmekte ve gerçekçi değerlendirme yapılmasını kolaylaştırmaktadır [57].

Çalışma kapsamındaki CRM Projesinde her bir koşu başlamadan önce "görevler" takım lideri tarafından geliştiricilere atanmıştır. Bu bağlamda Şekil-5'de verilen "Kanban Tahtası" sayesinde çalışılan koşudaki görevlerin statüleri, kim tarafından çalışıldığı vb. takip edilebilmektedir.

Çevik yaklaşımda kullanılan araçlar, görev atama, ilerleme izleme ve raporlama işlevleriyle ekiplerin iş yükünü dengeli bir şekilde yönetmesini sağlamalıdır. Görsel arayüzler, görevlerin durumunu ve tamamlanma oranlarını kolayca takip etmeyi mümkün hale getirmektedir.

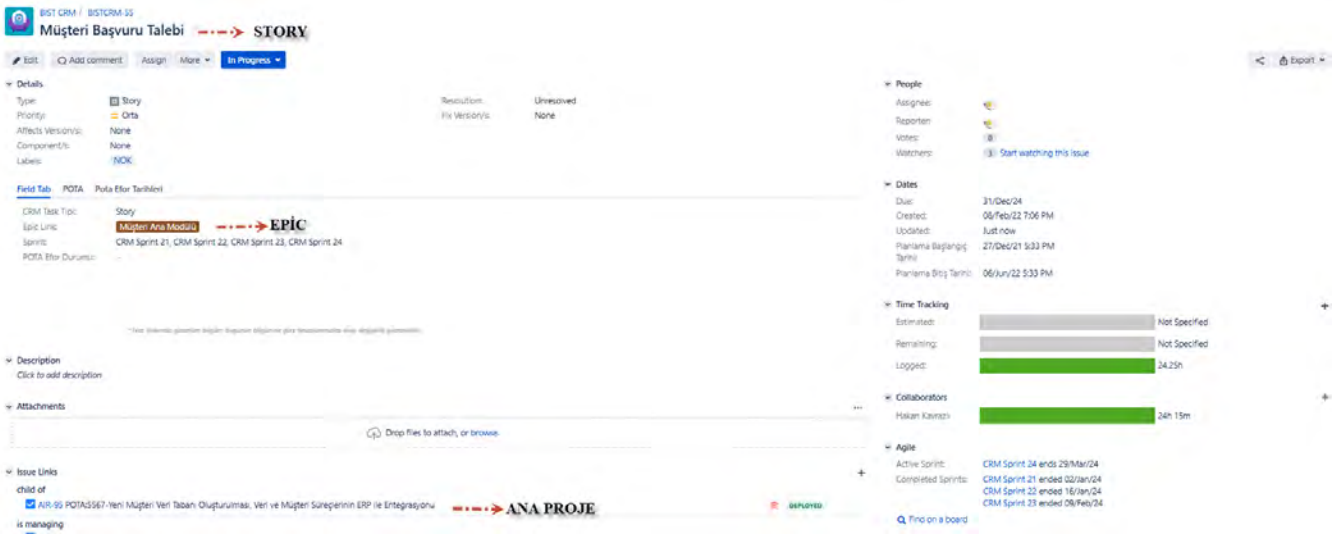


Şekil-6: BIST İş Kırılım Yapısı

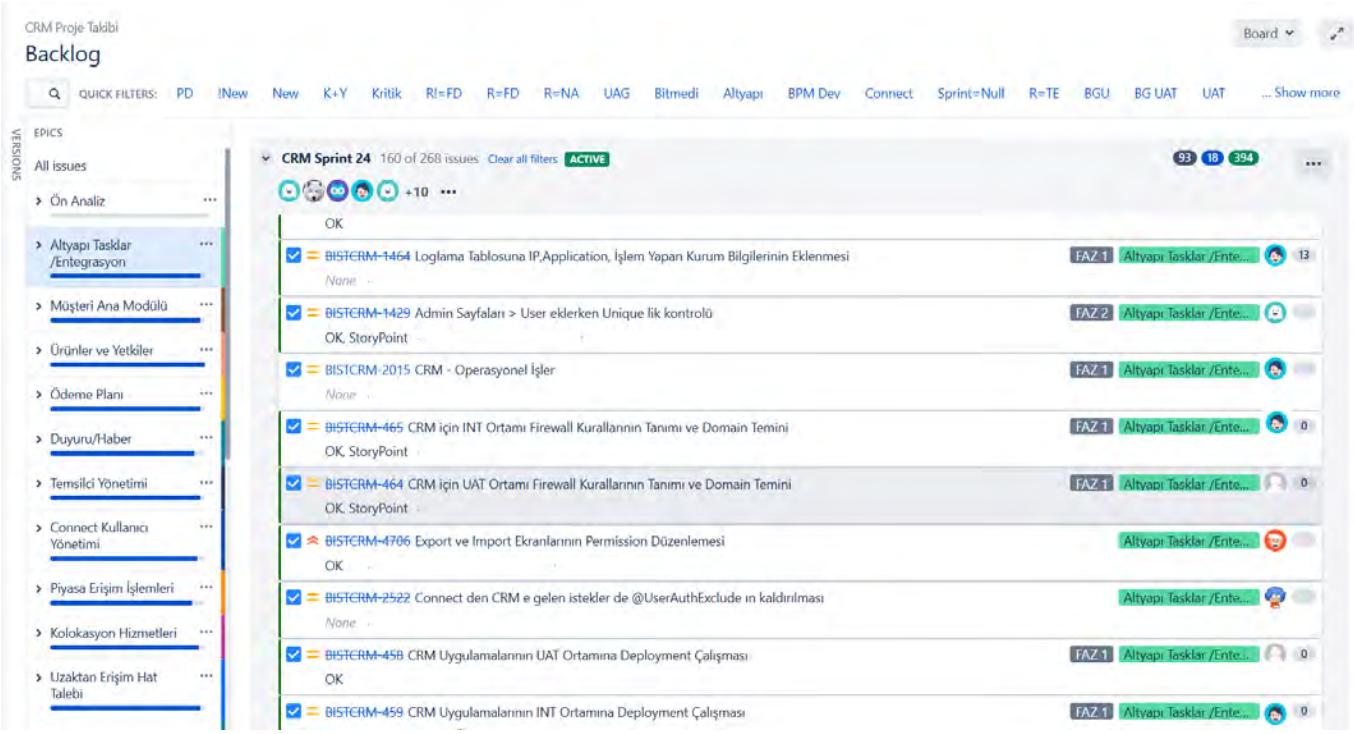
Literatürde, bu görsel odaklı yaklaşımların ekiplerin görev yönetimini kolaylaştırdığı ve iş akışındaki engelleri hızlı tespitinde yardımcı olduğu belirtilmiştir [58].

Proje yönetim araçları, genel olarak performans analizi ve veri odaklı karar alma süreçlerini de destekleyebilir. Çalışma kapsamında koşu gözden geçirme toplantılarında kullanılan performans verileri, ekiplerin kendi süreçlerini değerlendirmesine ve iyileştirme fırsatlarını belirlemesine yardımcı olmuştur. Alt detay seviyesinde ise Şekil 6'da verildiği üzere projenin bir alt kırılımının ayrıntı ekran görüntüsü oluşturulmuştur. Ekranlar öykü yapısıyla temsil edilmekte ve her bir ekranı geliştirmek için gereken özellikler görev yapısıyla temsil edilmektedir. Ayrıca ekran gereksinimleri ve modüller (TASK, STORY, EPIC) birbirine Jira yazılımının klasik ilişki yapıları "Child of", "Manage" vb. gibi yapılar kullanılarak alt kırılımlar ana projeye bağlanmıştır. Bu yaklaşıma göre kurgulanmış ekranlar sayesinde ilgili çalışmanın ne durumda olduğu (TO DO, IN PROGRESS, DONE) takip edilebilir duruma gelmiştir. Alt kırılımdan üst kırılıma doğru tamamlandıkça statüler ise otomatik olarak değişmektedir (Şekil-7).

Borsa İstanbul CRM projesinde tercih edilen Jira, iş listesi yönetimi, koşu takibi ve geri bildirim döngülerini destekleyerek iş akışını optimize etmiş ve proje süreçlerini şeffaf hale getirmiştir. Görevlerin karmaşıklığına göre öykü puanlama takibi yapılmış olup, bu veriler gözden geçirme toplantısıyla değerlendirilerek süreç iyileştirmelerine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, Jira panelleri sayesinde görevlerin durumu ve tamamlanma yüzdesi kolaylıkla izlenebilmiştir.



Şekil-7: Hikaye (Story) Detay Ekranı

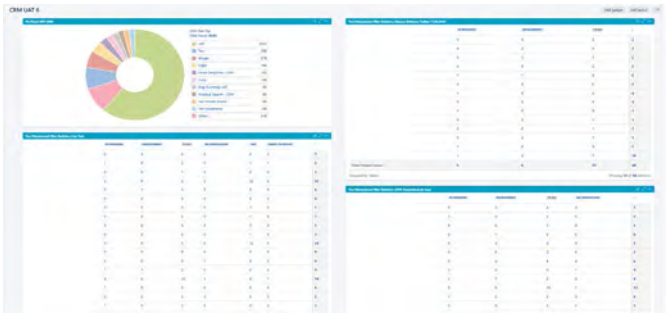


Şekil-8: Koşu İş Listesi (Backlog)

Proje yönetim araçlarının, ekipler ve iş birimleri arasındaki iletişimi kolaylaştırarak görevlerin önceliklendirilmesini ve müşteri gereksinimlerinin etkin karşılanmasını desteklediği gözlenmiştir. Ayrıca proje süreçlerinin şeffaflığı artmış, geri bildirim döngüleri sayesinde iş birimleri ve proje ekipleri arasındaki uyum güçlenmiştir.

4.2. Proje Takibi

Proje takibi, projenin hedeflere uygun ilerlemesini izlemek, kaynak kullanımını optimize etmek ve sorunları erken aşamada çözmek için kullanılan stratejik bir süreç olarak kurum içinde etkin bir yere sahip olmuştur. Borsa İstanbul'daki yaklaşımda, genel proje takibi bir proje izleme paneli (dashboard) aracılığıyla kullanıcılara sunulmuş olup, Şekil 9'de bu ana ekranın bir örneği verilmektedir.



Şekil-9: BIST Genel Proje Takip Ekranı

Proje takibinde iş listesi yönetimi, zaman çizelgesi izleme, performans değerlendirme ve geribildirim döngüleri izleme gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler, görevlerin durumunu izleme, hedeflere uyumu gözlemleme ve ekibin

verimliliğini değerlendirme olanağı sunmaktadır. İş listesi yönetimi, görevlerin durumunu sürekli takip etmeyi sağlarken, zaman çizelgesi izleme hedeflerin zamanında gerçekleştirilmesini güvence altına almaktadır. Ekip üyelerinin iş listesine göre o günkü işlerin durumunu paylaşmasıyla, proje ilerleyişi daha net bir şekilde izlenebilmiş ve zaman yönetimini gelişmiştir. Genel kabule göre, bu yaklaşımın teslim süresi uyumunu %25-30 oranında artırdığı bilinmektedir [59].

Çalışmada proje ilerleyişini ölçmek için tamamlanan görev sayısı, koşu hedeflerine uyum ve iş gücü verimliliği gibi metrikler temel alınmıştır. Bu süreçlerin ekip iş birliğini geliştirdiğini ve proje başarı oranlarını artırdığı gözlenmiştir.

Geribildirim döngüleri, proje takibinin esneklik sağlayan önemli bir bileşenidir. Özellikle çevik projelerde, koşu sonunda yapılan gözden geçirme toplantıları, süreçteki zorlukları değerlendirerek iyileştirme stratejileri geliştirmeye olanak tanımaktadır. Genel yaklaşımda bu döngülerin ekip performansını yaklaşık %20 oranında artırdığı ve uzun vadeli başarıyı desteklediği görülmekte olup çalışma kapsamında da benzer oranlar gözlenmiştir. Örnek olarak "epic" bazlı tamamlama oranı tablosu Tablo-1'de verilmiştir.

Proje yönetim araçları, proje takibinde ölçülebilir veriler sunarken, görevlerin durumu, bütçe uyumu ve kaynak kullanımı gibi göstergeleri izlemeyi kolaylaştırmaktadır. Ayrıca proje yönetim araçlarının şeffaflığı artırarak ekiplerin görevlerini daha etkin bir şekilde yönetmesine katkı sağladığı bilinmektedir [60]. Borsa İstanbul CRM projesinde, proje takibi Jira yazılımı ile yapılarak, haftalık raporlamalar ve düzenli geri bildirimler ile iş listesi ve zaman çizelgesi güncellenmiştir. Bu süreç, ekiplerin hedeflere uyumunu desteklemiş, iş birimleri ve ekipler arasındaki koordinasyonu güçlendirmiştir. Geribildirim döngüleri, ekiplerin müşteri odaklı bir yaklaşımla hareket etmesine olanak tanıyarak proje sürecinde verimliliği artırmıştır.

Tablo-1: Hikaye (Epic) Bazlı Bitirme Yüzdesi

Modüller	Yapıldı	Yapılacak	Top.	%
Admin	1	4	5	20%
Altyapı Taslaklar /Entegrasyon	62	31	93	67%
Connect Kullanıcı Yönetimi	140	9	149	94%
Duyuru/Haber	23	2	25	92%
Kolokasyon Hizmetleri	40	31	71	56%
Müşteri Ana Modülü	136	32	168	81%
Piyasa Erişim İşlemleri	37	24	61	61%
Temsilci Yetkilendirme	33	19	52	63%
Ürünler ve Yetkiler	3	17	20	15%
Uzaktan Erişim Hat Talebi	23	18	41	56%
Veri Hizmetleri Süreçleri	89	74	163	55%
CRM Proje Tamamlama Oranı	**587**	**261**	**848**	**70%**

Daha küçük kırımlılarda başarı oranlarını takip edebilmek adına koşu sonlarında kapanan görev sayısı ve "öykü puanı" tamamlama sayıları temel alınarak koşu başarı oranları Tablo-2 ve Tablo-3'de gösterildiği biçimde hesaplanmıştır.

Koşu oluşturulduğunda ilk iki koşu 2 haftalık periyotla bitecek şekilde uygulanmıştır. Diğer koşular 4 haftalık periyotlarla devam edilmiştir. Daha sonra koşulardaki tamamlanma yüzdesi hesaplanmış olup, ilk iki koşunun öykü puanı olmadan ortalama tamamlanma yüzdesi %60 olarak gözlemlenmiştir. 4 haftalık periyodun üçüncü ve dördüncü koşularında öykü puansız ortalama tamamlanma yüzdesi %58 olarak gözlemlenmiştir (Tablo-4).

Tablo-2: Koşu Başarı Durumu

Koşu #	Hikaye Puansız Başarı Oranı	Hikaye Puanlı Başarı Oranı
Koşu 1	69%	-
Koşu 2	51%	-
Koşu 3	61%	-
Koşu 4	55%	-
Koşu 5	-	61%
Koşu 6	-	93%
Koşu 7	-	90%
Koşu 8	-	83%
Ortalama Başarı	**59%**	**82%**
Ortalama Başarı Farkı	**23%**	

Bunun ardından öykü puanlı olarak yürütülen 5,6,7 ve 8. Koşularda 4 haftalık periyot uygulanmış ve başarı yüzdesi 82 olarak gerçekleşmiştir. Dolayısı ile literatürün de önerdiği biçimde öykü puanı kullanımının başarı oranını artırdığı somut olarak hissedilmiş ve gözlenmiştir.

Tablo-3: Koşu Görev (Sprint Task) Başarı Oranı

Koşu	Başlangıçta	Toplam İş	Kapanan	Hikaye Pueanı
Koşu 1	33	48	33	Hesaplanmadı
Koşu-2	22	70	36	Hesaplanmadı
Koşu-3	55	83	51	Hesaplanmadı
Koşu-4	61	75	41	Hesaplanmadı
Koşu-5	99	119	72	763
Koşu-6	74	73	68	977
Koşu-7	75	88	79	947,5
Koşu -8	77	117	97	791
Kapanan Görev (Task) Ortalaması			**60**	

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Borsa İstanbul CRM projesinde çevik metodolojilerin kurumsal düzeyde uygulanabilirliğini ve proje başarısına etkisini uygulanan bir proje üzerinde analiz etmiştir. Elde edilen bulgulara göre çevik kurumsal model, iş birimleri ile proje ekipleri arasındaki koordinasyonu iyileştirerek müşteri gereksinimlerinin etkin bir şekilde karşılanmasını sağlamıştır. Özellikle iş listesi yönetimi, zaman çizelgesi takibi ve geribildirim döngüleri gibi süreçleri optimize eden proje yönetim araçları, süreç şeffaflığını artırmış ve karar almayı kolaylaştırmıştır. Proje yönetim aracından elde edilen

veriler, çevik araçların proje süreçlerinde verimlilik artışı sağlandığını ve çevik kültürün kurumsal entegrasyonunda etkili olduğunu doğrulamaktadır. Tablo analizleri, görev tamamlama oranlarında yaklaşık %23 somut artışları ortaya koymuştur. Koşu takip süreleri ve tamamlama yüzdeleri olumlu görülmüştür (Tablo-4). Bu artışlar benzeri alanlardaki sonuçlarla uyumludur [61].

Proje süresince daha önceden elle Microsoft Excel ile yürütülmekte olan süreçler artık Jira yazılımı ile takip edilmeye başlanmış, MS Project ve kurum içi geliştirilen proje talep takip ve iş yükü planlama uygulamaları ile desteklenmiştir. Bu araçların çevik sürecin özellikle farklı iş birimleri ile etkileşimde önemli olduğu düşünülmektedir.

Tablo-4: Koşu tamamlama yüzdeleri ve takip süreleri

Koşu takip süresi ve tamamlanma yüzdeleri	
Hikaye Puanlı (Sp)	**Hikaye Puansız(Spsiz)**
-	2 Hafta (Spsiz→1,2) Tamamlanma yüzdesi: 60
4 Hafta (Sp→5,6,7,8) Tamamlanma yüzdesi: 81,75	2 Hafta (Spsiz→3,4) Tamamlanma yüzdesi: 58,0

Dolayısı ile bu endüstriyel deneyim çalışması kapsamında edinilen sonuçlara göre çevik yazılım geliştirme yaklaşımının günümüzün değişen koşullarına hızlıca adapte olabilmesi yönüyle geleneksel şelale yöntemine göre finans alanındaki büyük projelerde daha tercih edilebilir olduğu görülmüş ve doğrulanmıştır.

Bu doğrultuda sermaye piyasası finans alanındaki bilgi teknolojisi proje geliştirme çalışmalarında yazılım yaşam döngüsü açısından çevik yaklaşım gözlenen faydaları sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Ancak her iki yöntemin uygulanacağı alanlara göre artıları ve eksileri de göz önüne bulundurulmalı ve büyük projelerde planlama ve fizibilite çalışmalarının çevik yaklaşımın "aşırıya kaçılarak" plansızlık olarak algılanması ile tamamen göz ardı edilmemesi şiddetle önerilmektedir. Bu noktada, başarılı teknik yardımcı araçların etkin kullanımının olası hataları giderebileceği değerlendirilmektedir.

Çevik yazılım geliştirme yöntemi için kurum kültüründe değişme, iş biriminde değişim gerektiği gözlenmiştir. Normal şartlarda proje bitişinde iş birimine proje teslim edilmekte ve teslim sonunda büyük döngü çerçevesinde testler yapılıyor ve bildirimler geri gelmekteyken tercih edilen yeni çevik modelde aylık çıktıların iş birimine gönderilmesi ilk başta tepki toplamıştır. İş yükünün artabileceği yönünde bazı endişeler oluşmuş olsa da süreç içerisinde elde edilen dönüşlerin düzenli bir şekilde iletilmesi, olumlu geri bildirimlere zemin hazırlamıştır. Çıktıların beklenen başarıyı sağlamasıyla birlikte pozitif bir yaklaşım giderek güçlenmiştir. Özellikle, başarı oranlarının hızlı bir şekilde paylaşılması ve bu doğrultuda geri bildirim alınması ekipler tarafından memnuniyetle karşılanmıştır. Ancak zaman içinde çıktıların görünmesi ve iş birimi ile teknik birimin arasındaki etkileşimin artması sonucunda memnuniyet artışı olmuş ve bu şekilde etkileşimli ve kısa döngülerle devam edilmesi iş birimi tarafından da talep edilmiştir.

Ayrıca çevik yazılım geliştirme sürecinde hiyerarşiden biraz daha uzaklaşılarak inisiyatif alınmasının geliştirici ekip üzerinde olumlu etkisi ciddi biçimde gözlenmiştir. Geliştiricilerde de başlangıçta öykü puanı kavramı kendilerinin takip edilmesine yönelik olarak değerlendirilerek dirençle tepki almıştır ancak asıl amaç ortaya çıktıktan sonra bu kavramdan memnuniyet dile getirilmiştir. Koşu izleme toplantıları ekip iş birliğini ve bilgi paylaşımını güçlendirmiştir. Bu yapı, ekiplerin görevlerini daha bilinçli bir şekilde yerine getirmesini sağlayarak proje hedeflerinin zamanında gerçekleştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Borsa İstanbul bünyesinde "Atak Yaklaşım Master", günlük atak yaklaşım toplantıları ve gözden geçirme gibi etkinliklere liderlik ederek ekipler arası bilgi akışını sağlamış ve sorunlara hızlı çözümler üretmiştir. Müşteri gereksinimlerini ekiplere ileterek geri bildirim döngülerini yönetmiştir. Proje sonuçları, Atak Yaklaşım Master'ın liderliğinin projenin başarısına doğrudan katkı sağladığını önceki çalışmalara paralel olarak göstermiştir.

Öte yandan CRM Projesi'nde çevik koçluk, ekiplerin çevik metodolojilere adaptasyonunu hızlandırmış, iletişimi güçlendirmiş ve projenin dinamik yapısını destekleyerek çevik dönüşümün kurumsal kültüre entegrasyonuna katkı sağlamıştır. Ekiplerin bağımsız karar alma yeteneği, proje sürecine esneklik kazandırmış ve ürün teslim sürelerini kısaltmıştır. Bağımsız karar alabilen ve disiplinler arası çalışan ekiplerin, projelerde daha yüksek başarı sağladığı gözlenmiş olup bu durum daha önce ülkemizde yapılan diğer çalışmalarla da uyumludur [62].

Projede kullanılan teknik araçlar sayesinde izleme sürecinden elde edilen veriler, bir sonraki koşunun daha verimli planlanması için stratejik bir rehber işlevi görmüştür. Ayrıca, hikaye puanı uygulamaları ve koşu bazlı çalışma düzeninin sağlanması gibi süreçler, yeni olmaları ve sektörde popüler olmaları gereği ekiplerin motivasyona olumlu etki yapmıştır. Bu sayede, çevik yaklaşımın benimsenmesi hızlanmış ve firma içi organizasyonda olumlu bir dönüşüm sağlanmıştır.

Proje ekibiyle sürekli iletişim amacıyla proje kapsamında tamamlanma oranları açık kaynak bir yapı ile Jira entegrasyonu sağlanarak ofiste bulunan büyük bir ekran TV'ye sürekli olarak yansıtılarak ekip tarafından sürekli algılanması temin edilmiştir. Bu yaklaşım farklı firmalarda ve çalışmalarda da gözlendiğinden tercih edilmiş ve olumlu etkisi personel tarafından ifade edilmiştir.

6. Tartışma

Borsa İstanbul içinde üst yönetim yönüyle de bu yapılan çalışma olumlu değerlendirilmiştir. Elde edilen katkı farklı yönetim katmanlarında dikkat çekmiştir. Üst yönetim çıktıları sık aralıklarla gördüğü için daha çok projeye önem verip pozitif katkı sağlamış olup diğer projelerde çevik yöntem uygulanması talep edilmiştir. Özellikle çıktıların hızlı gözlenebilmesi yönetimce oldukça olumlu değerlendirilmiştir. Bu noktada çevik yöntemdeki iletişimin ne denli önemli olduğu bir kez daha ortaya konmuştur. Bu çalışmanın

ardından iki büyük projede daha çevik yöntem kullanımı ile ilgili çalışma başlatılmış olup devam etmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki öneriler ile elde edilen yaklaşım tamamlanabilir:

Çevik Eğitim Programları: Çevik metodolojilerin başarısı, ekiplerin çevik prensiplere uyumuna bağlıdır. Eğitim programları, ekiplerin performansını %20'nin üzerinde artırmaktadır. Kurumsal düzeyde çevik eğitimlerin yaygınlaştırılması, projelerin daha etkin yönetimini destekleyecektir.

Çevik Koçluk: Çevik koçluk, ekiplerin çevik süreçleri daha etkin uygulamasını sağlar. Çevik koçluk desteği alan ekiplerde görev tamamlama oranlarında %30 artış gözlemlenmiştir. Her projeye çevik koç atanması, iş birliğini ve uyumu artıracaktır. Ulusal kültürel faktörler de dikkate alınarak çevik koçlar uygun seçildiği takdirde başarı oranı daha yüksek olabilir.

Proje Yönetim Araçlarının Gelişimi: Jira gibi araçların analitik özelliklerinin kullanılması, proje performansını artırmaktadır. Daha gelişmiş ve yeni bazı çalışmalarda görülen yapay zeka kullanımına yönelik ölçme, analiz ve yönetim imkânları, sapmaların erken tespiti ve süreçlerin iyileştirilmesini kolaylaştıracaktır.

Geribildirim Döngüleri: Düzenli geribildirim döngüleri, ekip performansını optimize etmektedir. Bu süreçlerin sistematikleştirilmesi, ekiplerin öğrenme ve gelişim süreçlerini hızlandıracaktır. Projelerde iş birimi memnuniyeti %15 oranında artmıştır.

Çevik Modellerin Organizasyona Entegrasyonu: Çevik metodolojiler, müşteri odaklı süreçleri destekler ve iş birimlerinin projelere daha etkin katılımını sağlamaktadır. Organizasyon genelinde çevik kültürün daha da yaygınlaştırılması, proje verimliliğini artıracaktır.

Çalışma konusu proje kapsamında atılan adımlar, iş birimlerinin taleplerini eksiksiz karşılamak, esnek çalışma yapısını benimsemek ve müşteri memnuniyetini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Atak yaklaşım, Borsa İstanbul CRM projesinde sürekli geliştirilen bir yapı oluşturarak organizasyon genelinde çevik metodolojilerin gerçekten benimsenmesine literatüre paralel bir biçimde katkıda bulunmuştur [63][64].

Bu çalışma, çevik kurumsal modelin müşteri odaklı süreçleri desteklediğini, ekip performansını artırdığını ve kurumsal uyumu güçlendirdiğini Borsa İstanbul özelinde uygulamada ispatlamış olmaktadır.

Öte yandan çalışmanın tek bir proje üzerinde yapılmış olması, katılımcı anketleri ile formal olarak desteklenmemiş olması, yapay zekaya dayalı ölçme tekniklerinin kullanılmamış olması olası sınırlamaları arasındadır. Bu sınırlamaların Ar-Ge merkezindeki sıradaki projelerde yeniden ele alınarak çalışmanın ileriye götürülmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda Borsa İstanbul bünyesinde, çevik metodolojilerin kurumsal süreçlere entegrasyonu, uzun vadeli stratejik avantajlar sunarak sürdürülebilir başarı sağlayacaktır. Gelecek projelerde bu şekilde çevik kültürün daha geniş ve etkin araçlarla desteklenecek bir perspektifte uygulanması önerilmektedir.

7. Kaynakça

[1] Munteanu, V. P., ve Paul Dragos. "The case for agile methodologies against traditional ones in financial software projects." European Journal of Business and Management Research 6.1 (2021): 134-141.

[2] Levy, R., Michael S., ve Peter M.. "Agile foundations: principles, practices and frameworks." BCS, 2015.

[3] Rigby, Darell K., Jeff S., ve Hirotaka T.. "The secret history of agile innovation." Harvard Business Review 4 (2016).

[4] Fowler, M. ve Highsmith, J., "The agile manifesto." Software development 9.8 (2001): 28-35.

[5] Ozkan, N., Karen E., ve Gök M.Ş., "Back to the essential: a literature-based review on Agile mindset." 2023 18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS). IEEE, 2023.

[6] Aydar, S., ve Akcan Yetgin, S. "Çevik Proje Yönetimi Metodolojisi Ve Endüstride Kullanılabilirliği." Yapay Zekâ Ve Makine Öğrenimi İle Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar (2024): 33.

[7] Williams, L.,, Alistair C.. "Guest Editors' Introduction: Agile Software Development: It's about Feedback and Change." Computer 36.06 (2003): 39-43.

[8] Sutherland J., Schwaber, K., The Atak Yaklaşım Papers : Nuts, Bolts, and Origins of an Agile Process, 2007 [1] Schwaber, Ken, ve Jeff Sutherland. "The Atak Yaklaşım guide." Atak Yaklaşım Alliance 21.1 (2011): 1-38.

[9] Karlıdere, T., Kalıpsız, O., "Yazılım Mühendisliği Projelerinde Çevik Yaklaşımların Yeri." Ulusal Yazılım Mühendisliği Sempozyumu (2003): 23-25.

[10] Misra, Subhas C., ve ark. "The organizational changes required and the challenges involved in adopting agile methodologies in traditional software development organizations." 2006 1st International Conference on Digital Information Management. IEEE, 2006.

[11] Popoola, O. A., ve ark. "Conceptualizing agile development in digital transformations: Theoretical foundations and practical applications." Engineering Science & Technology Journal 5.4 (2024): 1524-1541.

[12] Natarajan, T., ve Shanmugavadivu P.. "Transition from Waterfall to Agile Methodology-An Action Research Study." IEEE Access (2024).

[13] Pacheco C., Darley B., Josefa B.-R., ve Jaime G.-L.. "Transitioning to Agile Organizational Structures: A Contingency Theory Approach in the Financial Sector." Systems 12.4 (2024): 142.

[14] Munteanu, V. P., ve Dragos, P.. "The case for agile methodologies against traditional ones in financial software projects." European Journal of Business and Management Research 6.1 (2021): 134-141.

[15] Kuhrmann, M. Ve ark. "What makes agile software development agile?." IEEE transactions on software engineering 48.9 (2021): 3523-3539.

[16] Dikert, K., Paasivaara, M., ve Lassenius C.. "Challenges and success factors for large-scale agile transformations: A systematic literature review." Journal of Systems and Software 119 (2016): 87-108.

[17] Munteanu, V. P., ve Dragos P.. "The case for agile methodologies against traditional ones in financial software projects." European Journal of Business and Management Research 6.1 (2021): 134-141.

[18] Anand, A., ve ark. "Optimal Sprint Length Determination for Agile-Based Software Development." Computers, Materials & Continua 68.3 (2021).

[19] Dikert, K., Paasivaara, M., ve Lassenius, C.. "Challenges and success factors for large-scale agile transformations: A systematic literature review." Journal of Systems and Software 119 (2016): 87-108.

[20] Sutherland, J. ve Schwaber, K., "The Atak Yaklaşım Guide. Atak Yaklaşım.Org." 2017.

[21] Gwanhoo, L. ve Weidong X.. "Toward agile: an integrated analysis of quantitative and qualitative field data on software development agility." MIS quarterly 34.1 (2010): 87-114.

[22] Aydıner A. S. , Esen M. F. Özlü, E., Türkiye'de Çevik Yazılım Geliştirme Süreçlerinde Atak Yaklaşım, 2020, p. 465.

[23] Stray, V., Bakhtawar M., ve Paruch, P., "A systematic literature review on agile coaching and the role of the agile coach." Product-Focused Software Process Improvement: 21st International Conference, PROFES 2020, Turin, Italy, November 25–27, 2020, Proceedings 21. Springer International Publishing, 2020.

[24] Stray, V., Anastasiia T., ve Nils B. M.. "The agile coach role: coaching for agile performance impact." arXiv preprint arXiv:2010.15738 (2020).

[25] Nalbant, B., Biçakçi. M., "Savunma Projelerinde Çevik Metodolojiler." UYMS. 2015.

[26] Cohn, M.. Agile estimating and planning. Pearson Education, 2005.

[27] Takeuchi, H. ve Nonaka, I. (1986) The New New Product Development Game. Harvard Business Review, 64, 137-146

[28] Hron, M., ve Obwegeser. N., "Why and how is Atak Yaklaşım being adapted in practice: A systematic review." Journal of Systems and Software 183 (2022): 111110.

[29] Pikkarainen, M. Ve ark. "The impact of agile practices on communication in software development." Empirical Software Engineering 13 (2008): 303-337.

[30] Williams, L.,. "What agile teams think of agile principles." Communications of the ACM 55.4 (2012): 71-76.

[31] Coelho, E., ve Anirban B.. "Effort estimation in agile software development using story points." International Journal of Applied Information Systems (IJAIS) 3.7 (2012).

[32] Noll, J., ve ark. "A study of the Atak Yaklaşım master's role." Product-Focused Software Process Improvement: 18th International Conference, PROFES 2017, Innsbruck, Austria, November 29–December 1, 2017, Proceedings 18. Springer International Publishing, 2017.

[33] Haugen, N. C.. "An empirical study of using planning poker for user story estimation." AGILE 2006 (AGILE'06). IEEE, 2006.

[34] Rigby, D. K., Sutherland, J., ve Takeuchi, H. (2016). "Embracing agile." Harvard Business Review, 94(5), 40-48.

[35] Rising, L. Ve Norman S. Janoff. "The Atak Yaklaşım software development process for small teams." IEEE software 17.4 (2000): 26-32.

[36] Yongliang, S., Cheang P., Sharon. Y., "Exploring the impact of agile project management practices on supply chain resilience and sustainability: a case study of the manufacturing industry." The Journal of Modern Project Management 10.1 (2022): 300-319.

[37] Da Silva, Fabio QB, ve ark. "Team building criteria in software projects: A mix-method replicated study." Information and Software Technology 55.7 (2013): 1316-1340.

[38] Whitworth, E., ve Biddle, R. "The social nature of agile teams." Agile 2007 (AGILE 2007). IEEE, 2007.

[39] DŽANIĆ, A., Toroman A., ve Džanić, A., "Agıle Software Development: Model, Methods, Advantages And Dısadvantages." Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering 15.4 (2022).

[40] Al-Saqqa, S., Samer S., ve Hiba A.. "Agile software development: Methodologies and trends." International Journal of Interactive Mobile Technologies 14.11 (2020).

[41] Adkins, L.. Coaching agile teams: a companion for Atak YaklaşımMasters, agile coaches, and project managers in transition. Pearson Education India, 2024.

[42] Kula, E., Van Deursen, A., ve Gousios, G., "Context-Aware Automated Sprint Plan Generation for Agile Software Development." Proceedings of the 39th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering. 2024.

[43] Park, D. S., ve Young Noh, J.,. "The Effect of Sprint Duration to the Velocity in a Large-Scale Embedded Software Project." 2023 ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM). IEEE, 2023.

[44] Meding, W. "Effective monitoring of progress of agile software development teams in modern software companies: an industrial case study." Proceedings of the 27th International Workshop on Software Measurement and 12th International Conference on Software Process and Product Measurement. 2017.

[45] Moe, N. B., Torgeir Dingsøyr, and Tore Dybå. "Overcoming barriers to self-management in software teams." IEEE software 26.6 (2009): 20-26.

[46] Sutherland, J., ve Sutherland, J. J.. Atak Yaklaşım: the art of doing twice the work in half the time. Crown Currency, 2014.

[47] Chow, T., ve Dac-Buu C.. "A survey study of critical success factors in agile software projects." Journal of systems and software 81.6 (2008): 961-971.

[48] Mathrani, A., Shanuka W., ve Palitha Jayamaha, N., "An evaluation of documentation requirements for ISO 9001 compliance in Atak Yaklaşım projects." The TQM Journal 34.5 (2022): 901-921.

[49] Derby, E., ve Larsen, D. (2006). Agile Retrospectives: Making Good Teams Great. Pragmatic Bookshelf.

[50] Mishra, A., ve Yehia I. A.. "Structured software development versus agile software development: a comparative analysis." International Journal of System Assurance Engineering and Management 14.4 (2023): 1504-1522.

[51] Sithambaram, J., Mohd H., Bin Md Nasir, N. ve Rodina A.. "Issues and challenges impacting the successful management of agile-hybrid projects: A grounded theory approach." International journal of project management 39.5 (2021): 474-495.

[52] Permana, B., Ridi F., ve Pratama, A.,. "Large Language Model Employment for Story Point Estimation Problems in AGILE Development." 2024 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS). IEEE, 2024.

[53] Strode, D., Torgeir D., ve Lindsjorn, Y.. "A teamwork effectiveness model for agile software development." Empirical Software Eng. 27.2 (2022): 56.

[54] Afshari, M., ve Javdani Gandomani, T. "A typical practical team structure and setup in agile software development." 2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE). IEEE, 2021.

[55] Steegh, R., K. Van De Voorde, ve Paauwe, J.. "Understanding how agile teams reach effectiveness: A systematic literature

review to take stock and look forward." Human Resource Management Review (2024): 101056.

[56] Aydıner, A.S., Muhammed F. E. ve Özlü, E.. "Türkiye'de Çevik Yazılım Geliştirme Süreçlerinde Atak Yaklaşım Yöntemini Uygulayan İşletmelerin Başarı Faktörleri." Bilişim Teknolojileri Dergisi 13.4 (2020): 463-477.

[57] Saiyad, S.. "Project Management and Jira with Agile Atak Yaklaşım Methodology." (2024).

[58] Paredes, J., Craig A., ve Maurer, F.. "Information visualization for agile software development." 2014 second ieee working conference on software visualization. IEEE, 2014.

[59] Perides, M. Novakoski, P., ve Vasconcellos. L., "Organizational changes in adopting agile approaches: A systematic literature review." The Journal of Applied Behavioral Science 61.1 (2025): 91-130.

[60] Reginaldo, F., ve Santos, G. "Challenges in agile transformation journey: a qualitative study." Proceedings of the XXXIV Brazilian Symposium on Software Engineering. 2020.

[61] Rikheim, A. S., ve Helgesen Schjølberg, E.. The use of Agile practices in regulatory evoked development: A case study of a large-scale inter-company project in the financial industry. MS thesis. NTNU, 2023.

[62] Gürsev, S., "Çevik Organizasyonel Dönüşümde Yol Haritası Önerisi." Tasarım Mimarlık Ve Mühendislik Dergisi 2.3 (2022): 265-274.

[63] Lai, Diane E. "Agile transformations, culture, and the canadian financial sector." (2024).

[64] Kakar, A. K.. "A Rhetorical Analysis of the Agile manifesto on its 20th Anniversary." The Journal of the Southern Association for Information Systems 10.1 (2023): 20-29.