

MÜHENDİSLİK ALANINDA ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

CİLT 2

EDİTÖRLER

DOÇ. DR. MİHRİBAN KALKANCI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ABDURRAHMAN GÜNDAY

İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı

Editörler / Editors • Doç. Dr. Mihriban KALKANCI

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY

Birinci Basım / First Edition • © Şubat 2021

ISBN • 978-625-7342-73-5

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin
almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı.

Citation can not be shown without the source, reproduced in any way
without permission.

Gece Kitaplığı / Gece Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt. No: 22/A Çankaya / Ankara / TR

Telefon / Phone: +90 312 384 80 40

web: www.gecekitapligi.com

e-mail: gecekitapligi@gmail.com



Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler

CİLT 2

EDİTÖRLER

DOÇ. DR. MİHRİBAN KALKANCI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ABDURRAHMAN GÜNDAY

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 9

YAYA-KÖPRÜ DİNAMİK ETKİLEŞİMLERİ VE ANALİZ İÇİN KULLANILAN ULUSLARARASI KÖPRÜ YÖNETMELİKLERE GENEL BİR BAKIŞ

Aliye Ebru TAZE & Savaş ERDEM..... 1

BÖLÜM 10

GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ELDESİNDE KULLANILAN FOTOVOLTAİK PANELLERDE (PV)HÜCRE VERİMİ VE PV YÜZEY SICAKLIĞININ ETKİSİ

Diğer AKAL 25

BÖLÜM 11

KESME KUVVETLERİ VE KESİCİ TAKIM ÜZERİNDE OLUŞAN GERİLMELERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Mustafa SEKMEN 39

BÖLÜM 12

MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ KULLANILARAK EPİLEPSİ TEŞHİSİ

Mustafa ÇALIŞKAN & Hasan BADEM 61

BÖLÜM 13

ÇALIŞAN DURUŞLARININ REBA ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Mehmet Ali ZENGİN & Ömer ASAL 77

BÖLÜM 14

5G VE ÖTESİ YENİ NESİL KABLOSUZ İLETİŞİMDE GÖRÜNÜR IŞIKLA HABERLEŞME

Asuman SAVAŞCIHABEŞ 95

BÖLÜM 15

BÜYÜK VERİLERDE BİRLİKTELİK KURALI İLE SATIŞ
YÖNETİMİ: HAVAALANI ÖRNEĞİ

Mesut ZERMAN & Faruk BULUT 113

BÖLÜM 16

POLİMER MODİFİYE BİTÜMLERDE BİTÜM-POLİMER
UYUMUNU GELİŞTİRMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Havanur Ebru GÜRBÜZ & Erol İSKENDER..... 147

Bölüm 9

YAYA-KÖPRÜ DİNAMİK ETKİLEŞİMLERİ VE ANALİZ İÇİN KULLANILAN ULUSLARARASI KÖPRÜ YÖNETMELİKLERE GENEL BİR BAKIŞ¹

*Aliye Ebru TAZE²
Savaş ERDEM³*

1 Bu makale, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doç. Dr. Savaş Erdem danışmanlığında Aliye Ebru Taze'nin "Kompozit Bir Yaya Köprüsünün Dinamik Analizi ve Yaya Köprü Titreşim Etkileşimi" Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

2 Aliye Ebru Taze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, E-mail: aliyebrutaze@gmail.com

3 Savaş Erdem, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, E-mail: savas.erdem@istanbul.edu.tr

1. GİRİŞ

İnşaat malzemeleri ve teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, son zamanlarda köprü üst yapıları, köprülerin daha uzun açıklıklar geçebilmesine imkan veren daha hafif ve daha esnek elemanlar kullanılarak tasarlanıp üretilmektedir. Bu uygulama ile birlikte, yaya köprülerinde üst yapılar ağırlık olarak daha hafif inşa edilmekte, böylece hareketli yüklerin ölü (zati) yüklere oranında da ciddi bir artış ortaya çıkmaktadır. Ancak ağırlık ve köprü kütlesindeki bu azalma, köprünün dinamik karakterini değiştirerek rezonansa girmesine hatta tamamen çökmesine neden olabilecek ciddi titreşim problemlerini de beraberinde getirmektedir (Lee ve diğ., 2019; Caprani ve Ahmadi, 2016; Racic ve diğ., 2009; Zivanovic ve diğ., 2005; Mácal ve Štěpánek, 2017). Buna ek olarak, istenmeyen ve rahatsız edici derecedeki bu titreşimlerden dolayı köprüyü kullanan yayaların konfor seviyesini de azalmaktadır.

Özellikle asma ve eğik askılı yaya köprüleri bahsedilen bu aşırı titreşim problemlerine karşı daha hassastırlar. Yakın zamanda Londra'da yer alan "Millennium Bridge" ve Paris' de yer alan "Pont du Solferion", köprülerinde (Şekil 1) yaya kaynaklı olarak ortaya çıkan titreşim sorunları sadece yaya konforunu ciddi manada etkilememiş aynı zamanda beraberinde ciddi stabilite problemlerini de getirmiştir. Böylece tasarım mühendislerinin yapım aşamasında statik ve deprem yüklerine ek olarak bu tarz yüklemeleri de dikkate almasının ne denli önemli olduğu da ortaya çıkmıştır.

Yaya köprülerinin tasarımında BS5400 (1978), Eurocode 1 (2003), Eurocode 5 (2004), ISO 10137 (2005) gibi kodlar FIB (2005), SETRA (2006) ve SYNPEX (2008) gibi tasarım yöntemleriyle birlikte kullanılmıştır. Çağdaş kodlarda, yaya yüklerinden kaynaklanan titreşim problemlerini önlemek için dikey ve yatay ivme değerlerine sınırlar getirilmiştir. Köprünün gerekli konfor seviyesini sağlayıp sağlamadığını değerlendirmek için doğal / temel frekans, sönüm oranı, kütle ve yaya yükü yoğunluğu gibi köprüye ait dinamik faktörler kullanılarak dinamik analiz yapılır. İstenilen konfor seviyesi karşılanmazsa, köprüde yapısal değişiklikler yapmak veya sönümleme oranını seviyesini değiştirecek sismik izolatörler kullanmak mümkündür.



Şekil 1: Solferino Köprüsü (solda) ve Millenium Köprüsü(sağda)
(Altememy, 2015)

Bu tez çalışmasında Hatay ilimizde yer alan eğik askılı bir çelik yaya köprüsünde yaya yüklerinden kaynaklanan dinamik etkiler incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle yaya köprüsünün sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve modal özellikleri belirlenmiştir. Ardından, yaya yükleri ile köprü arasındaki dinamik etkileşimler SYNPEX (2008) tasarım metodu ve British National Annex (1991) yönetmeliği kullanılarak incelenmiştir. Son olarak incelenen yaya köprüsünün deprem analizi de gerçekleştirilmiştir. SYNPEX tasarım metodu kapsamında meydana gelen maksimum düşey ve yatay ivme değerleri belirlenmiş ve farklı trafik durumları için konfor seviyeleri tespit edilmiştir. British National Annex yönetmeliği kullanılarak da yürüme, koşma ve kalabalık durumlar için yükleme fonksiyonları oluşturularak açıklık ortasındaki maksimum düşey ivme değerleri tespit edilmiştir.

2. YAYA KÖPRÜLERİNİN DİNAMIĞI

2.1. Köprü Yapıları ve Dinamik Tepkisi

Yaya yüklemesi, yaya köprüsünün taşıyıcı sistem yapısı ile desteklenmelidir. Köprü yapısının insan kaynaklı yükleme altında tepkisinin değerlendirilmesinde yaya köprüsünün taşıyıcı sistem yapısı ve malzeme özellikleri büyük önem arz etmektedir.

2.1.1. Yaya Köprülerinin Türleri

Yaya köprüsü türleri arasındaki ayrım, aşağıda özetlenen farklı karakteristikler dikkate alınarak yapılabilmektedir (Reimert, 2014):

Uzunluk - Bir yaya köprüsünün toplam uzunluğu, yaklaşık 3 m gibi küçük bir açıklıktan, örneğin, 750 m uzunluğa ve 170 m orta alana sahip olan Hollanda'daki en büyük yaya köprüsüne kadar değişebilir.

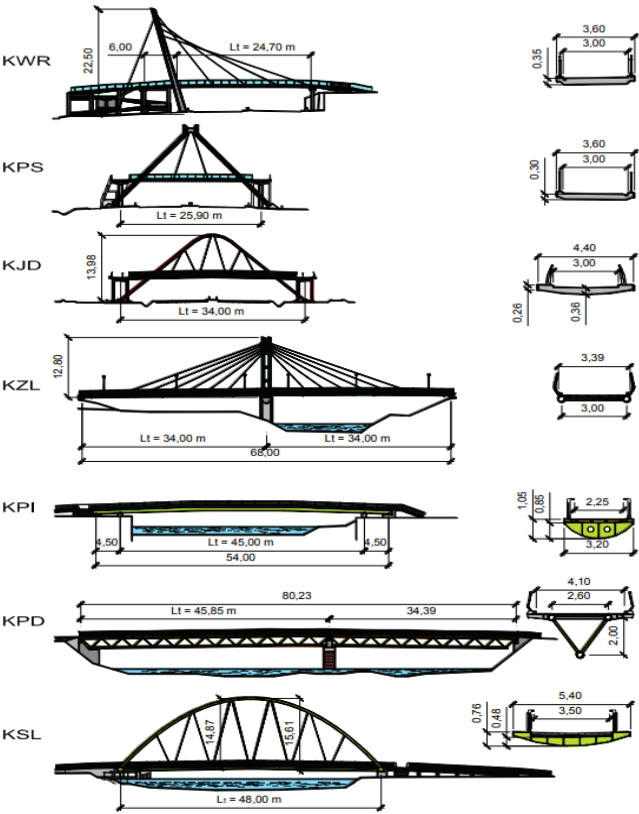
Taşıyıcı sistem tipi - Bu kapsamda birkaç alt sınıfa ayrılabilir: eğik askılı, kemerli, kiriş, asma ve çerçeve türü taşıyıcı sistemli köprüler. Buna ek olarak; bir yaya köprüsü, bir konsol kirişi olarak başka bir köprüye de bağlanabilir.

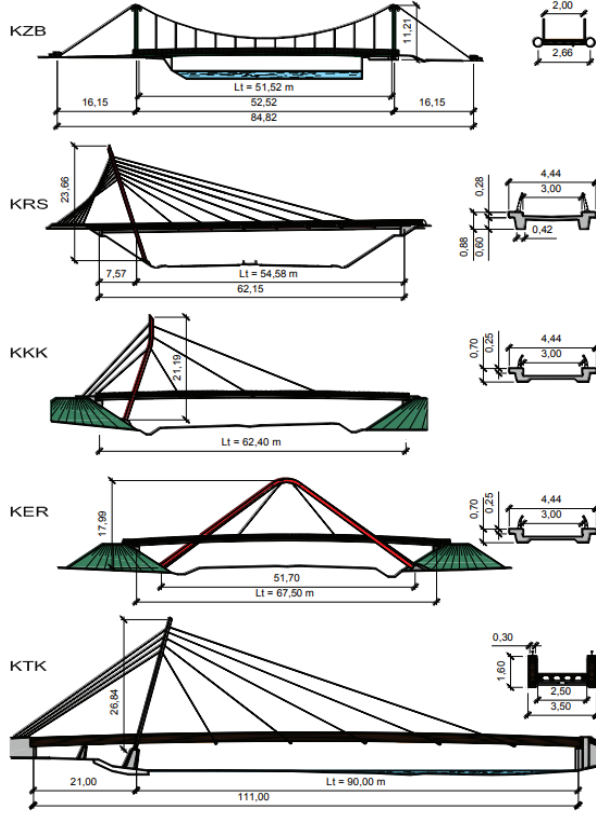
Kullanım amacı - Köprünün amacı, beklenen trafik yoğunluk türünü gösterir.

Kullanım ömrü - Köprünün iki ömrü arasında kabaca bir ayrım yapılabilir: kalıcı veya geçici.

Yapısal malzeme - Köprünün malzemesi köprünün titreşime karakteristiği için son derece etkilidir. Yapımında genel olarak kullanılan malzemeler çelik, beton, ahşap, FRP veya bu malzemelerin kombinasyonundan oluşmaktadır.

Hawryszków (2014) tarafından da belirtildiği üzere yaya köprüleri pek çok sınıfa ayrılabilir. Şekil 2' de bu sınıflandırmaya örnek eden köprülerin yandan görünimleri ve kesitleri gösterilmiştir.





Şekil 2: Yaya köprüsü türlerine ait örnekler (Hawryszków, 2014)

2.1.1. Yaya Köprülerinin Dinamik Davranışını Etkileyen Parametreler

2.1.1.1. Sönümleme

Sönümleme, titreşimli bir yapıdaki enerji yayılımıdır ve salınan sistemin titreşim genliğini azaltır. Bir yapının genel sönümü (genellikle etkili sönümleme olarak adlandırılır); malzeme ve yapısal sönümleme; ve enerji yayılımı sağlayan özel cihazlar oluşur. Modal sönümleme de olarak adlandırılan bu toplam sönümlemeyi uygulamada doğru olarak tahmin etmek kolay değildir. Genel olarak, hızın bir fonksiyonu olarak modellenen doğrusal sönümlendirme varsayımı altında viskoz bir sönümleme modeli kullanılmaktadır. Yapı sistemlerinin sönüm oranları artışlar ayarlanmış kütle sönümleyiciler kullanılarak artırılabilir ve bu durumda özellikle şiddetli depremler altında yapı güvenliği açısından oldukça olumlu katkılar sunar (Reimert, 2014; Hoang ve diğ., 2008).

2.1.1.2. Rijitliği ve Kütlesi

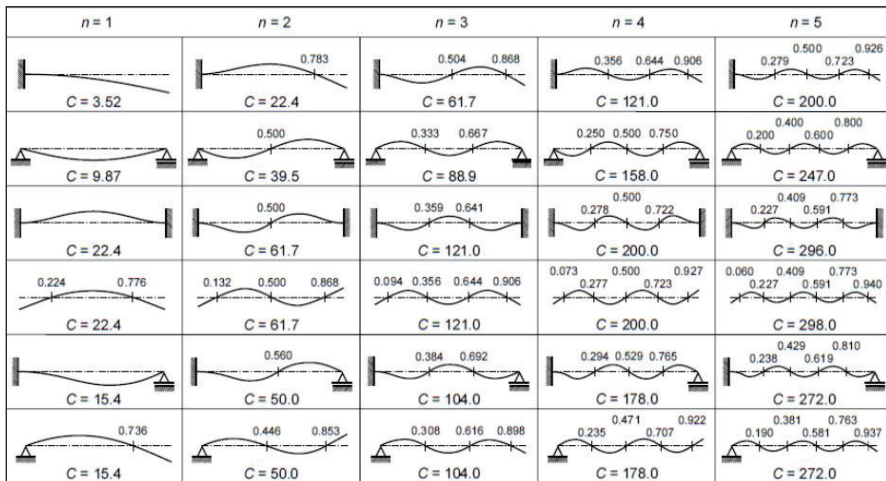
Yaya köprüsünün kütlesi temel olarak kg / m olarak ifade edilir ve yapının uzunluğu (L) boyunca değişebilir. Kütle yapının geometrisine (kesit alanı, A) ve malzeme özelliklerine (hacimsel kütle yoğunluğu, ρ) bağlıdır. Kütleye benzer şekilde, rijitlik de köprü uzunluğu boyunca değişebilir ve köprü yapısının geometrisine (atalet momenti, I) ve malzeme özelliklerine (elastisite modülü, E) bağlıdır (Reimert, 2014).

2.1.1.3. Mesnet Koşulları

Yaya yükü altındaki köprünün yapısının davranışı köprünün mesnet koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Uygulamada sıklıkla tercih edilen üç temel mesnet koşulu; basit mesnetli, serbest uç ve ankastre uçlardır.

2.1.1.4. Mod Şekilleri

Dinamik yüklemeler altında yapının yapabileceği hareket olarak tanımlanabilecek olan mod şekli de köprünün mesnet koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 3'te tipik mod şekilleri gösterilmiş olup her mod şeklinin de kendi doğal frekansına sahip olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 3: Mesnet koşullarına bağlı olarak mod şekilleri (Reimert, 2014)

2.1.1.5. Doğal frekans

Yaya köprülerinin doğal frekansları yaya köprüsünün insan kaynaklı titreşimlere duyarlı olup olmayacağını gösterir. Köprünün doğal

frekansının yayaların yürüme frekansının kritik aralığında olması durumunda yani frekansların çakışması durumunda köprü yaya yükü nedeniyle rezonansa girebilir. Şekil 3'te mesnetlenme koşulları verilen köprü yapılarının doğal frekansları (uzunluk boyunca kütle ve rijitliğin sabit kalması koşuluyla) aşağıda verilen, denklem (1) ile hesaplanabilmektedir (Spijkers ve diğ., 2004).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_n^*}{M_n^*}} = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (1)$$

Denklemden K_n^* modal rijitliği, M_n^* modal kütle ve C de Şekil 3'te verilen mesnetlenme koşulları durumunda oluşan doğal frekanslarının oranını ifade etmektedir.

2.3. Yaya-Köprü Titreşim Davranışı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Günümüzde genellikle insan kaynaklı titreşimin, insan vücudu 0,001 mm'ye kadar olan titreşim yer değiştirme genliklerine karşı çok hassas olduğundan, güvenlik (yani kuvvet ile ilgili) meselesinden ziyade genellikle bir servis kolaylığı olduğu kabul edilmektedir. Bu yüksek hassasiyet genellikle çevredeki yapının zarar görmesine yol açacak kadar uzaktan bile yeterli olan titreşim seviyesinden çok önce titreşim servis problemine neden olur (Zivanovic ve diğ., 2005).

Bu alandaki öncü çalışmaları (Zivanovic ve diğ., 2006; Zivanovic ve diğ., 2007; Zivanovic ve Aleksandar, 2014) İngiltere Warwick Üniversitesinden Prof. Zivanovic ve ekibinin yaptığı bilinmektedir. Bu kapsamda Üniversite laboratuvarlarında inşaa edilen prototip bir yaya köprüsü (Şekil 4) üzerinde yaya hareketi kaynaklı köprü tabliyesinde meydana gelen düşey ve yatay titreşimleri detaylıca incelemişlerdir. Son zamanlarda gerçekleştirdikleri bir çalışmada (Zivanovic ve diğ., 2014) ise cam elyaf takviyeli kompozitler ile (FRP) yapılmış yaya köprülerinin nominal olarak aynı dinamik yükler altında çelik ve betonarme köprülere göre bir kat daha büyük titreşim tepkisi gösterebildiklerini bulmuşlardır.

Nimmen ve diğ., (2014) bir yaya köprüsü inşa edildikten sonra, titreşim servisinin tekrar değerlendirilebilmesi ve yayaların beklenen titreşim konforunun daha güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi için yerinde modal parametrelerin tanımlanması gerektiğini gösterdi. Bununla birlikte, her ikisini de içeren bir çalışma sonlu elemanlar modeline dayanır ve HiVoSS kılavuzuna göre bir çelik asma yaya köprüsünün hizmet verilebilirliğinin deneysel olarak değerlendirilmesi, sayısal modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir (Lai, 2017). Diğer çalışmalarda (Zivanovic, 2012), sert yüzeyler üzerinde

yürümek için geliştirilen bir kuvvet modelinin, köprü hareketinin karşısına girerek titreşimleri durdurabilecek yayaların varlığı nedeniyle, hareketli yaya köprüsü üzerindeki titreşimleri değerlendirmek için uygun olmadığı vurgulanmıştır. Bu da beklenen titreşim seviyelerinin altında sonuçlanır. Boş yapının sönümlemesine kıyasla, köprüdeki insan işgalcileri nedeniyle artan sönümleme oranına eşittir. Sönümleme oranındaki artış ve dikey insan-yapı etkileşimi nedeniyle yapısal cevabın azalması, başka bir çalışmada kalabalık model kullanılarak kanıtlanmıştır (Nimmen ve diğ., 2012). Yayalar ve titreşimli yaya köprüsü arasındaki etkileşimi göz önüne almadığı için, yakın tarihli bir çalışmada analitik ve sayısal olarak eşdeğer bir hareketli kuvvet modeli geliştirilmiştir (Ahmadi ve diğ., 2017).

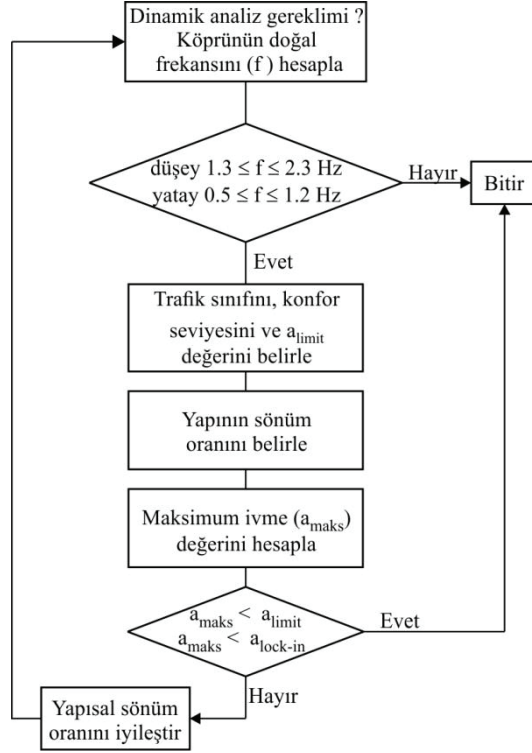


Şekil 4: Warwick Üniversitesi prototip yaya köprüsü (Živanovic, 2012)

3. YÖNETMELİK VE TASARIM METOTLARI

3.1. Synpex Tasarım Metodu

SYNPEX (2008) tasarım metodu yaya yüklerinin dinamik etkilerinin hesabında kullanılan en geniş ve kapsamlı hesap yöntemlerinden biridir. Şekil 5'te bu yöntemde kullanılan tasarımın akış şeması sistematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5: SYNPEX yöntemine göre hesap akış şeması

Bu yöntemde öncelikle köprüde dinamik analizin gerekli olup olmadığının saptanması gerekmektedir. Bunun için de köprü'nün düşey ve yatay doğrultudaki doğal titreşim frekansları hesaplanmasıyla olmaktadır. Elde edilen düşey yöndeki doğal titreşim frekansı 1.3~2.3 Hz ya da yatay yöndeki doğal titreşim frekansı 0.5~1.2 arasında bulunmuş ise köprüde dinamik analizin yapılması gerekmektedir. Bunu takiben, köprü'nün yaya yükü yoğunluğu, trafik sınıfı, ve konfor seviyesi talebinin belirlenmesi işlemleri yapılır. Konfor seviyesine belirlenmesinden sonra buna bağlı olarak düşey ve yatay yöndeki ivmelenmelerin limit değeri bulunur. Bir

sonraki aşamada, belirtilen yöntemle uygun olarak hesaplanan yaya yükleri uygulanır köprüye uygulanır ve oluşan maksimum ivmeler hesaplanır. Her iki doğrultuda oluşan maksimum ivme değerleri, konfor seviyesine bağlı olarak belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılarak köprünün gereken konfor seviyesini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Gereken koşulların sağlanamaması durumunda köprünün doğal titreşim frekansını değiştirecek yapısal değişiklikler veya sönümleyiciler kullanmak gibi çözümler bulunmaktadır (Gunes ,2013).

3.1.1 Trafik Sınıfı ve Yaya Yoğunluğu

SYNPEX (2008) tasarım metodunda yaya köprüleri, köprünün yerine ve yayaların yoğunluğuna bağlı olarak beş farklı trafik olarak sınıflandırılmıştır. Bunlar Tablo 1’de gösterildiği üzere, köprü üzerinde 15 kişiden oluşan bir yaya grubunun bulunduğu çok zayıf trafik ile metrekarede 1.5 yayanın bulunduğu olağandışı yoğun trafik olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 1: Yaya köprülerinin trafik sınıfları

Trafik Sınıfı	Yoğunluk d (P=Yaya)	Tanım
TC1	15P yaya grubu $d=15 \text{ P/S (S=Alan)}$	Çok zayıf trafik
TC2	$d=0.2 \text{ P /m}^2$	Zayıf trafik
TC3	$d=0.5 \text{ P /m}^2$	Yoğun trafik
TC4	$d=1.0 \text{ P /m}^2$	Çok yoğun trafik
TC5	$d=1.5 \text{ P /m}^2$	Olağandışı yoğun trafik

SYNPEX (2008) tasarım metoduna göre oluşabilecek trafik sınıflarının bazılarına ait görselde ayrıca Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6: SYNPEX yöntemine göre tipik trafik yoğunlukları
(Reimert, 2014)

3.1.2 Konfor Seviyeleri

SYNPEX (2008) tasarım metodunda bir diğer sınıflandırma yaya köprülerinin yatay ve düşey doğrultudaki ivme sınır değerlerini dikkate alarak yapılmış olan dört farklı konfor seviyesidir. Bunlar Tablo 2’de verildiği üzere, maksimum konfor seviyesi olan CL1 ile konforsuz olarak nitelendirilen CL4 arasında değişkenlik göstermektedir.

Tablo 2: Yaya köprülerinin konfor seviyeleri

Konfor Sınıfı	Konfor Seviyesi	Düşey İvme	Yatay İvme
CL1	Maks.	$< 0.50 \text{ m/s}^2$	$< 0.10 \text{ m/s}^2$
CL2	Ort.	$0.50 - 1.00 \text{ m/s}^2$	$0.10 - 0.30 \text{ m/s}^2$
CL3	Min.	$1.00 - 2.50 \text{ m/s}^2$	$0.30 - 0.80 \text{ m/s}^2$
CL4	Konforsuz	$> 2.50 \text{ m/s}^2$	$> 0.80 \text{ m/s}^2$

3.1.3 Sönüm Oranları

Yaya yüklerinden kaynaklı titreşimlerin genliğinin değerlendirilmesinde mevcut yapının sönüm miktarı çok önemlidir. Tablo 3'te farklı yapısal malzemelerle üretilmiş sistemler için SYNPEX (2008), SETRA (2006) ve Bachmann ve Amman (1987) tarafından önerilen yapısal sönüm oranları özetlenmiştir.

Tablo 3: Farklı yapı malzemelerine göre sönüm oranları

Yapı tipi	Minimum ξ	Ortalama ξ
Betonarme	0.80%	1.30%
Öngermeli betonarme	0.50%	1.00%
Çelik-betonarme komp.	0.30%	0.60%
Çelik	0.20%	0.40%
Ahşap	1.50%	3.00%
Gerilmiş şerit	0.70%	1.00%

3.1.4 Yaya Yükü Modeli

SYNPEX (2008) tasarım metodunda yaya yüklerinden kaynaklanan düşey ve yatay dinamik etkilerin hesabı için Denklem (2)'de gösterilen harmonik yük fonksiyonu dikkate alınmaktadır. Bu tekrarlı harmonik

yükün değeri, köprüde üzerinde bulunan yayaların yoğunluğu ve yürüme davranışlarına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; yaya yoğunluğu 1.0 P/m² değerinin altında ise insanlar serbest olarak yürümekte ve birbiri ile etkileşime geçmemektedir. Ancak bu değerin üzerine çıkıldığında ise insanların serbest yürüyüşü kısıtlanmaktadır ve birbiri ile etkileşiminin söz konusu olduğu kabul edilmektedir (Caprani ve Ahmadi, 2016). Bahsedilen bu nedenlerden dolayı da yük hesaplarında yayaların yoğunluğuna bağlı olarak trafik sınıfları iki gruba ayrılmıştır. Tablo 4'te harmonik yaya yükü modeli parametrelerinin değerleri verilmiştir.

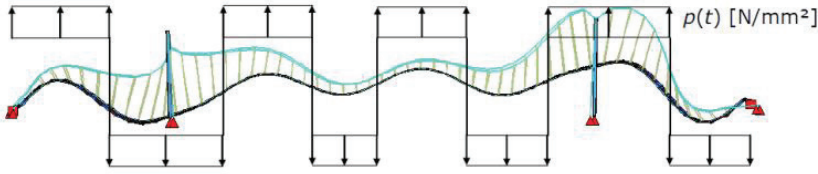
$$P(t) = G \cdot \cos(2\pi ft) \cdot n' \cdot \psi \quad (2)$$

- $G \cdot \cos(2\pi ft)$: tek bir yaya için harmonik yük
 f : köprünün doğal titreşim frekansı.
 n : yüklenebilen yüzeydeki yaya adeti.
 n' : yüklenebilen yüzeydeki eşdeğer yaya yoğunluğu.
 S : yüklenebilen yüzey alanı.
 ψ : yayanın yürüme frekansının köprünün titreşim frekansına yakınlığına bağlı azaltma katsayısı.

Tablo 4: Yaya yükü parametreleri

G [N]		
Düşey	Boyuna	Yatay
280	140	35
$n' [1/m^2]$		
TC1, TC2 ve TC3		TC4 ve TC5
$n' = \frac{10.8\sqrt{\xi \cdot n}}{S}$		$n' = \frac{1.0 \cdot 1.85\sqrt{n}}{S}$
Azaltma katsayısı ψ		
Düşey Doğrultu		Yatay Doğrultu

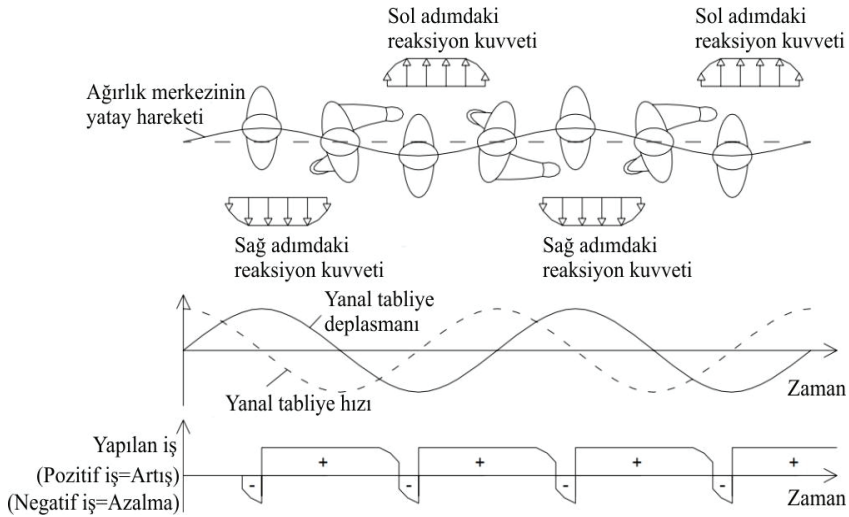
Denklem (2) ile hesaplanan harmonik yaya yükü, sistemin farklı doğrultulardaki doğal titreşim frekansındaki yerdeğiştirme moduna göre, Şekil 7'de gösterildiği gibi uygulanır.



Şekil 7: Harmonik yaya yükünün uygulanması (Altememy, 2015)

3.1.5 Yaya Köprü Kenetlenme Etkisi, "Lock-in"

İnsanlar hissedilebilir seviyede titreşimin olduğu bir köprü tabliyesi üzerinde yürürken bu titreşimlere adapte olup dengelerini korumaya çalışırlar. Düşey doğrultudaki titreşimler genelde insanların bacakları ve eklemleri ile sönümlenip absorbe edilebildiği için bu doğrultuda bir etkileşim fazla olmaz. Yatay doğrultu ise bunun zıttı olarak çok daha hassastır. Yayalar doğal titreşim frekansında yatayda hareket eden bir tabliye üzerinde yürürken dengelerini sağlamak amacıyla kendi yatay frekanslarını, tabliyenin frekansına kısmi olarak adapte ettikleri için ve bu sırada köprüye yatayda bir kuvvet uygular. Şekil 8’de gösterilen köprü ile yaya arasındaki bu senkronizasyon literatürde “Lock-in” etkisi olarak tanımlanan bir kenetlenme etkisi ortaya çıkarır (Gunes, 2013).



Şekil 8: Yaya-köprü senkronizasyonun şematik gösterimi (Gunes, 2013).

3.2. British National Annex

Yaya-köprü dinamik etkileşiminin analizinde SYNPEX metodu kadar bilinene ve yaygın olarak kullanılan bir metotta British National Annex for Eurocode 1 of EN 1991-2 şartnamesidir.

Bu yöntemde öncelikle yaya köprüleri için Tablo 5'te verilen düşey ve yatay doğal titreşim frekansı sınır değerleri kontrol edilir. Köprünün düşey ve yatay titreşim frekansı değerleri bu değerlerden küçük ise titreşim analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Tablo 5: Titreşim kontrol sınır değerleri

Düşey titreşimler	< 5 Hz
Yatay ve burulma titreşimleri	< 2.5 Hz

SYNPEX tasarım metoduna benzer şekilde bu yönetmelikte de yaya-köprü dinamik etkileşim analizlerinde köprü üst yapısının türüne göre sönüm değerleri belirtilmiştir. Bu sönüm değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6: British National Annex göre sönüm oranları

Yapı tipi	ξ
Betonarme	0.05
Aluminyum alaşım	0.02
Çelik-betonarme komp.	0.04
Çelik	0.03
Ahşap	0.06-0.12
Lif takviyeli kompozitler	0.04-0.08

3.2.1. Düşey Doğrultudaki Kontrol

UK National Annex to EN1991-2'de yaya köprüsü yük modeli olarak 4 farklı sınıf mevcuttur. Bu yük modelleri Tablo 7'de özetlenmiştir. Bu tabloda ayrıca yaya köprü yük durumu olarak da 3 farklı durum mevcuttur.

- Yürüme Durumu (walking)
- Koşma Durumu (jogging)
- Kalabalık Durumu (crowded)

Örneğin; C sınıfı bir köprü için yürüme durumu yaya adeti $N=8$, koşma durumu yaya adeti $N=2$, kalabalık durum yaya adeti 0.8 kişi/ m^2 olarak tanımlanmıştır.

Tablo 7: Yaya köprüsü yük modelleri

Köprü Sınıfı	Köprü kullanımı	Yürüme	Koşma	Kalabalık Yoğunluğu, ρ (pers./ m^2)
A	Kırsal bölgelerde ve seyrek nüfuslu alanlarda	$N = 2$	$N = 0$	0
B	Yaya yükü yoğunluğundaki değişimin az olduğu şehir çevresindeki yerler (banliyöler)	$N = 4$	$N = 1$	0.4
C	Günlük yoğunlukta önemli değişimlerin olduğu şehir içerisindeki yerler	$N = 8$	$N = 2$	0.8
D	Spor stadyumu ya da ana toplu taşıma duraklarına bağlantıyı sağlayan yerlerde	$N = 16$	$N = 4$	1.5

Yürüme ve koşma durumu için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$F = F_0 k(f_v) \sqrt{1 + \gamma(N - 1)} \sin(2\pi f_v t) \quad (3)$$

Burada;

F_0 : Referans yük değeri
 $k(f_v)$: Kalabalık katsayısı
 γ : Senkronizasyon katsayısı
 N : Yaya adedi
 f_v : Köprü frekansı
olarak tanımlanmıştır.

Kalabalık durumu için ise aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$w = 1.8 \left(\frac{F_0}{A} \right) k(f_v) \sqrt{\frac{\gamma N}{\lambda}} \sin(2\pi f_v t) \quad (4)$$

Burada;

F_0 : Referans yük değeri

A : Köprü yürünebilir alanı

$k(f_v)$: Kalabalık katsayısı

γ : Senkronizasyon katsayısı

N : Yaya adedi

f_v : Köprü frekansı

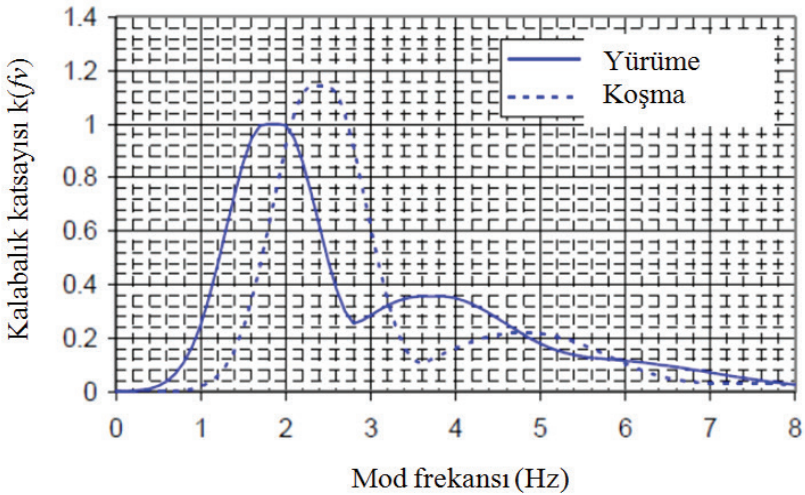
λ : Azaltma katsayısı

olarak tanımlanmıştır.

Bu denklemlerde bahsedilen yürüme ve koşma durumları için referans yük ve hız değerleri Tablo 8’de gösterilmiştir. Benzer şekilde yürüme ve koşma durumları için kalabalık katsayısı değerleri de Şekil 9’dan elde edilebilmektedir.

Tablo 8: Yürüme ve koşma durumları için referans yük ve hız değerleri

Yük Parametresi	Yürüme	Koşma
Referans yükü, F (N)	280	910
Yaya geçme hızı, V (m/sn)	1.7	3



Şekil 9: Yürüme ve koşma durumları için kalabalık katsayısı değerleri

Son olarak ilgili yönetmelikte maksimum düşey tasarım ivmelenme değeri için bir sınır değeri tanımlanmıştır.

$$\alpha_{\text{limit}} = 1.0 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \text{ (m/sn}^2\text{) ve } 0.5 \text{ m/sn}^2 < \alpha_{\text{limit}} < 1.0 \text{ m/sn}^2 \quad (5)$$

Bu denklemde;

k_1 = Köprü fonksiyon katsayısı

k_2 = Hat, güzergah katsayısı

k_3 = Köprü yükseklik katsayısı olarak tanımlanmış olup ilgili yönetmelikte değerleri sunulmuştur.

3.2.2. Yatay doğrultudaki kontrol

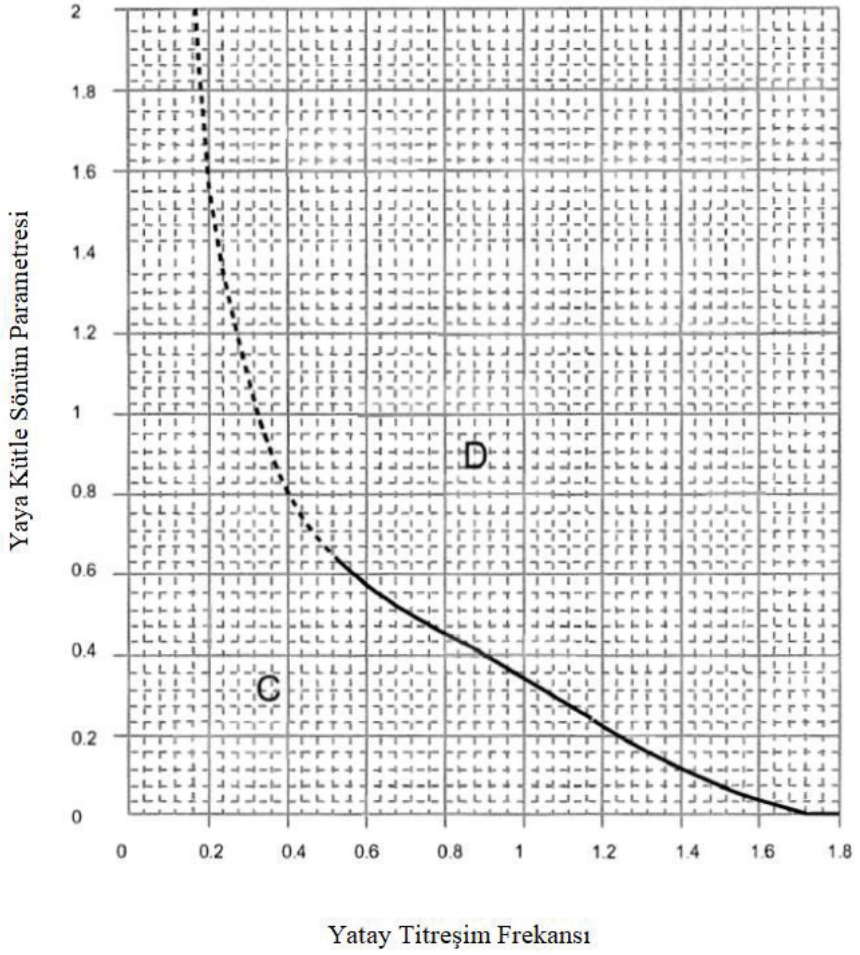
Köprünün yatay titreşim frekans değerinin 2.5Hz sınırının altında kaldığı durumlarda, bu yönetmelikte yer alan köprüde meydana gelebilecek yanal titreşimlerden kaçınılması için yatay frekans limit değerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu limit değeri;

$$f_{\text{limit}} = 1.5 \text{ Hz} \quad (6)$$

olarak belirtilmiştir. Köprünün yatay titreşim frekans değerlerinden en az birinin bu limit değerin altında kalması durumunda, kalabalık yürüme koşulunda stabil olmayan yanal ötelenmeler meydana gelebilmektedir. Limit değerin altında kalmadığı durumda ise yapıda yanal ötelenme olmayacağı varsayılabilir. Bu limit değerin altında kaldığı tüm durumlarda, yatay ötelenmenin gerçekleşip gerçekleşmeyeceğine karar verilmesi gerekmektedir. Yönetmelikte, bu durumu değerlendirmek üzere yaya kütle sönümleme parametresi yer almaktadır. Bu parametre, köprü kütlesi, yayaların kütlesi ve yapısal sönümlemeye bağlıdır. Bu yaya kütle sönümleme parametresi;

$$D = \frac{m_{\text{köprü}} \cdot \xi}{m_{\text{yaya}}} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada yer alan yaya kütesinin değeri 700 N/m'dir. Yanal ötelenme gözlenen köprünün, stabil kabul edilip edilmeyeceği Şekil 10'a göre karar verilir. Yapının yatay titreşim frekansı ve yaya kütle sönüm parametresi değerleri stabil sınır eğrisinin altında kalıyorsa (C bölgesi), bu durum yapının stabil olmadığını göstermektedir.



Şekil 10: Yatay kenetlenme stabil sınırları

KAYNAKLAR

- Ahmadi E., Caprani C.C., Heidarpour A., An equivalent moving force model for consideration of human-structure interaction, *Applied Mathematical Modelling* 51, 526–545, 2017.
- Altememy, O.A.N., Vibration behaviour of slender footbridges due to synchronized pedestrian loading, Yüksek Lisans Tezi, Eindhoven University of Technology, 2015.
- Butz E.C., Feldmann M., Heinemeyer C.H., Sedlacek G., Chabrolin B., Lemaire A., Lukic M., Martin P.O., Caetano E., Cunha A., Goldack A., Keil A. ve Schlaich, M., Advanced load models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimized Design Guidelines for Steel Footbridges (SYNPEX), RFCS-Research Project RFSR-CT-2003-00019, 2008.
- Caprani C.C., ve Ahmadi E. Formulation of Human–Structure Interaction System Models for Vertical Vibration, *Journal of Sound and Vibration* 377, 2016, p.346–367.
- Eurocode 1, General Actions Traffic loads on bridges. EN1991-2: 2003. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium 2003.
- Eurocode 5, Design of Timber Structures Part 2: Bridges, EN1995-2, 2004.
- Fédération Internationale du Béton (FIB), Guidelines for the design of footbridges. fib bulletin 32, November 2005.
- Güneş B., "Dynamic Analysis Of Cable-Stayed Steel Footbridge Under The Pedestrian Loads And Its Application", 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), Türkiye, 1-6, 30 October-1 November 2013.
- Hawryszków, P., Analysis of human induced vibrations on footbridges, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN* 2014.
- Hoang, N., Fujino, Y., ve Warnitchai, P., Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas, *Engineering Structures*, 30, 707-715, 2008.

Iervolino, I., De Luca, F., Cosenza, E., “ Spectral shape-based assessment of SDOF nonlinear response to real, adjusted and artificial accelerograms”, Engineering Structures ,32, 2776–2792, 2010.

International Standardization Organization (ISO), Bases for design of structures Serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration, ISO/CD 10137, Geneva, Switzerland, 2005.

Kayhan, A.H., “Armoni Araştırması ile İvme Kaydı Seçimi ve Ölçeklendirme”, İMO Teknik Dergi, 5751-5775, Yazı 368, 2012.

Lai E., Gentile C., Mulas M.G. Experimental and numerical serviceability assessment of a steel suspension footbridge, Journal of Constructional Steel Research 132 , 2017, p.16–28.

Lee Y. S., Kim S.H ve Skibniewski M. Analytical and Experimental Approach for Assessing Vibration Serviceability of Highway Bridges Due to Heavy Vehicle Traffic, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. Vol. 4, Issue 3, 2009, p.123-133.

Mácal J., Štěpánek J. Pedestrian load models of footbridges, MATEC Web of Conferences, Vol. 107, Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND’2017, 2017.

Nimmen V.K., Lombaert G., De Roeck G., Van den Broeck P., Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the current codes of practice, Engineering Structures, 59, 448–461 , 2014.

Racic V., Pavic A., ve Brownjohn J.M.V. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review, Journal of Sound and Vibration 326, 2009, p.1–49.

Reimert, Z., Human-Induced Vibrations On Footbridges A Probability-Based Approach Of The Vibration Serviceability Of Footbridges Under Vertical Pedestrian Loading, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, 2014.

Service d’Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Footbridges: Assessment of Vibration Behaviour of Footbridges Under Pedestrian Loading, Technical Guide, Service d’Etudes Technique des Routes et Autoroutes, Paris, 2006.

Spijkers, J., Vrouwenvelder, A., ve Klaver, E., Dynamics of structures: Part 1 - Vibration of structures , TU Delft, 2006.

Steel, Concrete and Composite Bridges—Part 2: Specification for Loads; Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges, BS 5400. UK: British Standards Association, London, 1978.

Živanović S., Aleksandar, P., Quantification of dynamic excitation potential of pedestrian population crossing footbridges, *Shock and Vibration*, 18 (4), 563-577, 2011.

Živanović S. Benchmark Footbridge for Vibration Serviceability Assessment under Vertical Component of Pedestrian Load, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 138 (10), 1193-1202., 2012.

Živanović S., Feltrin G., Mottram J.T., Brownjohn J.M.W., Vibration Performance of Bridges Made of Fibre Reinforced Polymer, In: Catbas F. (eds) *Dynamics of Civil Structures*, Volume 4. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham, 2014.

Živanović, S., Pavic, A., ve Reynolds, P., Finite element modelling and updating of a lively footbridge: The complete process, *Journal of Sound and Vibration*, 301 (1-2), 2007.

Živanović, S., Pavic, A., ve Reynolds, P., Modal testing and FE model tuning of a lively footbridge structure, *Engineering Structures*, 28 (6), 857-868, 2006.

Živanović S., Pavic A., ve Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review, *Journal of Sound and Vibration* 279, 2005, p.1–74.

Bölüm 10

GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ELDESİNDE KULLANILAN FOTOVOLTAİK PANELLERDE (PV)HÜCRE VERİMİ VE PV YÜZEY SICAKLIĞININ ETKİSİ

Dinçer AKAL¹

¹ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye, e-mail: dincerakal@trakya.edu.tr, OrcID:0000-0003-0055-5471

Giriş

Dünya nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte enerjiye olan talep de artmaktadır. Enerji kavramı tarih boyunca Dünyanın en önemli konularından ve sorunlarından biri olmuştur. Enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, geçmişten bu güne kadar hala petrol, kömür gibi fosil kaynakların bilinçsizce kullanımı ile çevreye ve tüm canlılara zararlı etkilerde her geçen gün artmaktadır. Gelişmiş ülkelerde fosil yakıtlar yerine nükleer enerji kullanımı tercih edilmiş olsa da nükleer santrallerde olası bir sızıntı endişesi ve atıklarla ilgili problemler insanları tedirgin etmektedir. Nükleer enerjideki bu endişe ve tehlikeli durumdan dolayı çoğu ülke bu santralleri kapatma kararı almıştır (Ay, 2020). Her ülke artan enerji talebini karşılayabilmek için alternatif kaynaklar arayışına girmiştir. Bu kaynakların temiz enerji kaynağı olması yolunda büyük çabalar sarf edilmektedir. Alternatif yenilenebilir enerji kaynakları temiz enerji gibi görülse de doğaya ve canlılara az da olsa çeşitli olumsuz etkileri vardır. Örneğin rüzgâr enerjisinde kullanılan türbinler kuşlar için önemli tehlike ve bulundukları ortamdan göç etmelerine sebep olmaktadır. Ayrıca rüzgâr türbinlerinden çıkan ses frekansı da bazı canlıları rahatsız etmektedir. Denizlerdeki akıntıdan faydalanarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılan türbinlerde deniz kirliliğine ve içinde yaşayan canlılara zarar vermektedir. Benzer olumsuz etkiler güneş enerji sistemleri içinde söylenebilir. Büyük sahalara kurulan Güneş Enerji Santralleri(RES) tarım arazilerinin azalmasına ayrıca fotovoltaiik yüzeylerden yansıyan ışınların toprak yüzeyinde sıcaklık değişimlerine sebep olmaktadır (Ay, 2020).Bu durumlar ileride çevre ve canlılar için daha anlaşılabilir hale gelecektir. Ancak güneş enerjisinin tükenmeyen (sonsuz) ve diğer enerji türlerine göre daha temiz, sistem kurulumlarında hareketli parçaların olması sebebi ile daha fazla tercih edilmektedir (Yiğit & Atmaca, 2018).Diğer taraftan güneş enerjisinden elektrik elde edilmesinde kullanılan panel veriminin mevcut şartlarda %20 civarındadır. Bu sebeple başta insan sağlığı olmak üzere sürdürülebilirlik, küresel ısınmanın önlenmesi ve gelecek nesiller için daha iyi bir Dünya bırakmak temel hedeflerimiz arasında olmak zorundadır. Ayrıca tüm Dünyada elektrik enerjisi üretmek için doğaya ve canlılara en az zararı verecek alternatif enerjiler araştırılmalı ve tasarruf tedbirleri alınmalıdır. İlerleyen süreçte sözü edilen bu olumsuz etkilerin azaltılması için tarım arazilerinin kullanılması yerine daha kullanılmayan arazilerin, ev, işyeri çatılarında kurulum yapılması daha uygun olacaktır (Ay,

2020).Tüm bunların yanında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisine dönüşümü için iyi bir fizibilite çalışmasının yapılması, yatırımın amortisman süresi, teknolojik alt yapı, enerji üretim maliyeti, sistem kurulumlarının doğru projelendirilmesi, işletme şartlarındaki kayıpların minimize edilmesi (verimlilik) ve sistemin kullanım ömrü, gibi faktörler büyük önem arz etmektedir. Teorik olarak güneş hücrelerinde gerçek verim öncelikle üç faktöre bağlıdır. İlk olarak, foto dönüşüm verimi dalga boyunun ya da yarı iletken maddenin spektral olarak verdiği değere bağlıdır. Üretilen tüm foto-elektronların devreye taşınabildiği varsayımına dayanarak sınır değeri teorik olarak 0.46 dır. İkinci olarak ise gelen ışınım miktarı ile birlikte dalga frekans değeridir. Optik kayıplardan dolayı gelen ışıınımdan tamamen yararlanmak mümkün değildir. Her durumda güneş hücreleri belirli bir spektral aralığa cevap vermektedir. Bu aralık sadece dar bir bant aralığında %50 den daha büyük verime ulaşabilmektedir. Verimlilik için slikon,induyum fosfür,galyum arsenür,kadmiyum ve bakır induyum diselenür gibi malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir. Son olarak da fotovoltaiik hücredeki ısı büyük öneme sahiptir. Sıcaklık arttıkça yarı iletkenin bant aralığı azalmaktadır. Üretilen akımda parazit dirençlerin joule etkisi sebebiyle oluşan ısı dönüşüm verimini azaltmaktadır. Slikon hücrenin sıcaklığındaki her 1° C lik artışta dönüşüm verimi % 0,50 azalırken aynı şartlarda galyum arsenür hücrelerde % 0,25 azalmaktadır (Adreolli, 2015).Hücre sıcaklığının incelenmesi ile ilgili bir çalışmada polikristalin hücre yapısına sahip 75W gücündeki fotovoltaiik panellerin Elazığ iklim koşullarındaki performansını deneysel olarak incelenmiştir. Fotovoltaiik panellere 10 farklı kanat ölçüsündeki alüminyum kanatçıklı tasarımlar uygulayarak sıcaklık, güç ve verimliliği analiz etmişlerdir.Fotovoltaiik panelde oluşan sıcaklığın homojen dağılmadığını ve fotovoltaiik paneldeki verimlilik için yüzeydeki en iyi soğumayı 7 cm × 20 cm boyutundaki kanatçıklardan elde ettiklerini ifade etmişlerdir (Bayrak, Oztop, & Selimefendigil, 2019) .Suudi Arabistan'da yaptıkları bir çalışmada Fotovoltaiik panelin arka yüzeyine bir ısı eşanjörü ekleyerek soğutmanın etkisi ve verimliliği deneysel olarak araştırılmıştır. Sayısal modelin sonuçları, Suudi Arabistan'ın iklim koşulları için iyi sonuçlar vermiştir. Aktif su soğutmayla, modül sıcaklığı önemli ölçüde yaklaşık % 20'ye düşürülmüş ve fotovoltaiik panel verimliliğinde % 9 artış sağlanmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada soğutma için kullanılan suyun kütsel debisi arttıkça panel sıcaklığının azaldığı görülmüştür (Bahaidarah , Subhan, Gandhidasan, & Rehman, 2013). Avustralya'da

yapılan bir çalışmada , fotovoltaiik panelin su ile soğutulması için panelin üst yüzeyine su damlatma konfigürasyonu için deneysel bir donanım geliştirilmiştir.. Su ile fotovoltaiik panelin üst yüzeyi arasındaki konveksiyonla ısı kaybına bağlı olarak, en yüksek radyasyon koşullarında sistemde yaklaşık% 15'lik bir artış sağlamıştır. Geliştirilen bu sistemin yıllık uzun vadeli performansının benzetim sonuçları, kurak ve sıcak mevsimlerde fotovoltaiik panelden sağlanan enerjide % 5'lik bir artış elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca tasarlanan bu sistemde sürekli su akışı olduğu için fotovoltaiik panel yüzeyinin temiz tutulduğu ve suyun panel yüzeyine akışı yerçekimine bağlı olarak yükseklik farkı ile sağlandığı için sirkülasyon pompası gerekmediği ifade edilmektedir (Odeh & Behnia, 2009).Fransa da yapılan farklı bir çalışmada fotovoltaiik panelin arka yüzeyine uygulanacak faz değıştiren malzeme ile ısı ve kütle transferinin CFD modellemesi yapılmıştır. Buradaki amaç fotovoltaiik panelin bir süre verimli çalışma sıcaklığında tutulabilmesidir. Yapılan bu parametrik çalışma da güneş ışıını 1000W/m² değerinde iken fotovoltaiik panel sıcaklığı 40° C sabit sıcaklıkta 2 saat süre tutulabilmiştir. Ayrıca fotovoltaiik panel sıcaklığını azaltmada kullanılacak faz değışim malzemesinin yüksekliğinden daha çok geniş yüzeye yayılmasının etkili olduğu ifade edilmiştir (Biwale, Eclache, & Kuznik, 2011).Fotovoltaiik sistemlerin soğutulmasında farklı bir yöntem olarak Medine sahasında ortam sıcaklığı yaz aylarında 40° C ile 50° C arasında iken bazen 50° C nin üzerindedir. Hücre sıcaklığının anlık olarak 83° C değerine ulaştığı da görölmüştür. Fotovoltaiik panellerin arka tarafında termoelektrik elemanlar kullanılarak her 1° C sıcaklık düşüşü için verimin 0,5 arttığı ancak bu sistemin % 6 ek maliyet getirdiği ifade edilmiştir (Benghanem, Al-Mashraqi, & Daffallah, 2016).

1.Fotovoltaiik Hücre Verimi ve Sıcaklık Etkisi

Güneş hücresinin verimliliği gelen güneş ışınlarını elektriğe dönüştürme oranına göre ifade edilmektedir. Bir başka tanım ile hücrenin elektrik enerji çıktısının hücre üzerine gelen güneş enerjisine oranıdır. Hücre verimi matematiksel olarak;

$$\eta = P_{mx} / (E * A) \quad (1)$$

İfade edilebilir (Gökeri, 2019).

Burada;

η : Verim

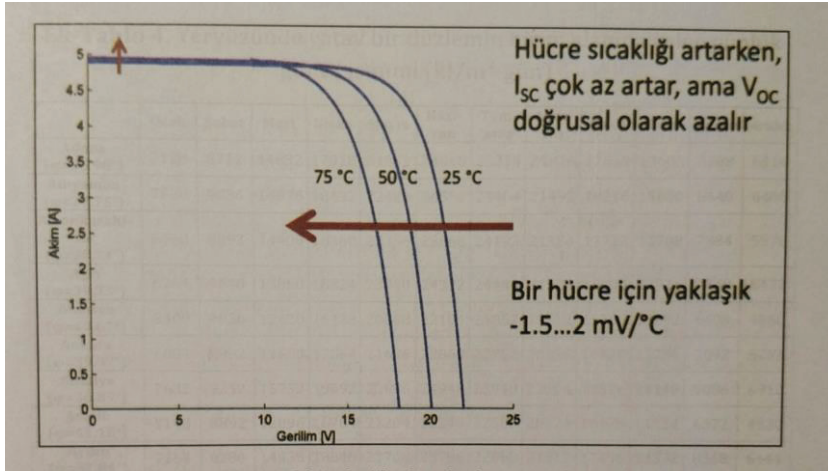
P_{mx} : Üretilen azami elektrik güç çıktısı(W)

E : Güneş ışıyım gücü (W/m^2)

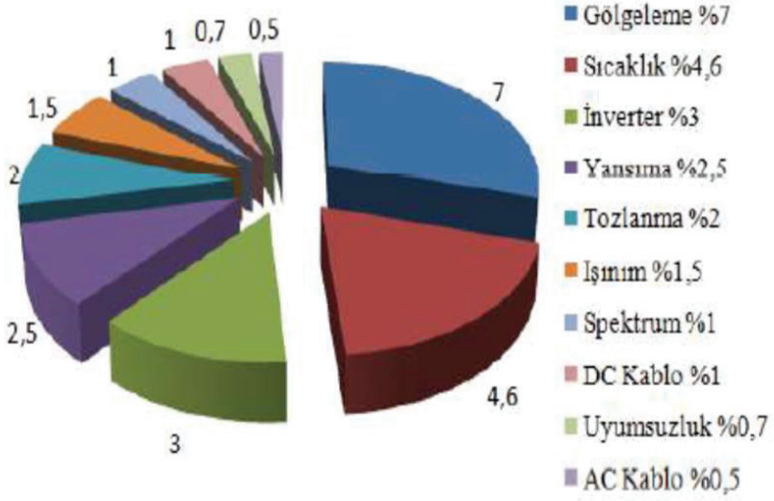
A : Hücrenin güneşe bakan yüzey alanı(m^2)

η enerji dönüşüm verimi, Standart Test Koşullarında (Sıcaklık $25^\circ C$ de, ışık şiddeti $1000 W/m^2$ ve hava kütle 1-1.5 spektrumuna karşılık gelen SR-Standard Rating ve NOCT –Nominal Operating Cell Temperature) gerçekleştirilmektedir.

PV hücresinde kullanılan yarı iletken maddeler sıcaklığa karşı hassas olmaları sebebiyle kısa devre akım değeri ısıya bağlı olarak $\% 0,05 / ^\circ C$ I_{sc} artarken, açık devre voltajı V_{oc} $\% 0,5 / ^\circ C$ önemli miktarda azalır.Fotovoltaik hücrelerin diğer kayıpları ile birlikte panel verimliliği önemli ölçüde düşmüş olur. Bu durum pek çok kişi tarafından bilinmesine rağmen net bir çözüm bulunamamış ancak araştırmalar tüm Ülkelerde devam etmektedir.



Şekil 1:Fotovoltaik Hücrenin Sıcaklığa Bağlı Olarak Akım ve Gerilim Değişimi (Ceylan & Gürel, 2017).



Şekil 2: Fotovoltaik Sistemlerde Oluşan Diğer Kayıplar (Çarkıt & Alçı, 2017).

Hücre verimini olumsuz etkileyen iki önemli faktör vardır.

Bunlardan ilki doğal faktörleri açıklayacak olursak (Ay, 2020) ;

- 1-Güneş hücreleri bazı dalga boylarındaki ışınları soğuramazlar,
- 2-Foton enerjisinin büyük bir kısmı hücrenin ısınmasına sebep olur,
- 3-Hücreye gelen ışınım arttıkça akımın az miktarda artmasına ancak gerilim daha büyük miktarda düşmesine sebep olur,
- 4-Fotovoltaik yüzeydeki toz ve kirlenme ışınımı engellediği için hücre verimini düşürür,
- 5- Gölgeleme olduğunda hücre elektrik üretemez. En büyük kayıp bu durumda oluşur.

Hücre verimini etkileyen diğer teknolojik faktörler ise (Ay, 2020);

- 1-Hücre yapımında kullanılan seri ve paralel dirençler dolum faktörünün etkilenmesine sebep olur,

2-Hücrenin yapıldığı maddelere bağlı olarak yansıma kayıpları meydana gelir,

3-Hücrede oluşan bazı elektron-hole çiftlerinde toplanma kayıplarının oluşması,

4-Hücrenin kalın malzemeden yapılmış olması ısınmaya, gereğinden ince olması da ışıınının soğurulmasına engel olup verimin düşmesine sebep olur.

Fotovoltaik verim ; hücresinin üzerine gelen güneş ışıınının şiddetine ,spektrumuna ve hücre sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.Hücre sıcaklığı ΔT kadar arttığında hücresinin **akım (I)ve gerilim (V)değerleri** ; (2-3)İfadeleri ile hesaplanabilir (Ceylan & Gürel, 2017) .

$$I = I_0 * (1 + \alpha * \Delta T) \quad (2)$$

$$V = V_o * (1 - \beta * \Delta T) \quad (3)$$

I_0 Referans sıcaklıktaki akım değeri (A)

V_o Referans sıcaklıktaki gerilim değeri (V)

α ve β ise akım ve gerilimin sıcaklık katsayılarıdır.

Hücre sıcaklığı ($T_{hücre, (°C)}$) ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu şiddetine bağlı olarak değişmektedir.Hücre sıcaklığı (4) İfadesi ile hesaplanabilir. (Ay, 2020)

$$(T_{hücre}) = T_{ortam} + \left[\frac{T_{nom} - 20}{0.8} \right] * G \quad (4)$$

T_{nom} = Modül üzerine gelen güneş radyasyonunun elektriğe dönüşmeyen kısmının hücrede ki ısıya neden olan sıcaklık değeridir.(°C)

T_{ortam} = Standart şartlardaki 20 °C ortam sıcaklığıdır .

G = Güneş ışıyım yoğunluğudur.(kW/ m²)

Artan sıcaklığa bağlı olarak fotovoltaiik hücrelerin verimi de azalmaktadır. Bu değişimi ait hücre verimini hesaplamak için;

$$\eta_h = \eta_{stk} [1 - \beta(T_h - 25)] \quad (5)$$

eşitliğinden yararlanılmaktadır (Ceylan & Gürel, 2017). Burada;

η_h = Hücre verimi

η_{stk} = Standart test koşullarındaki verimi

β =Elektriksel verim sıcaklık katsayısıdır. Hücre yapısına bağlı olarak 0.0020-0.0045 arasında bir katsayıdır.

T_h =Ölçülen andaki Fotovoltaiik hücre sıcaklık değeridir(° C).

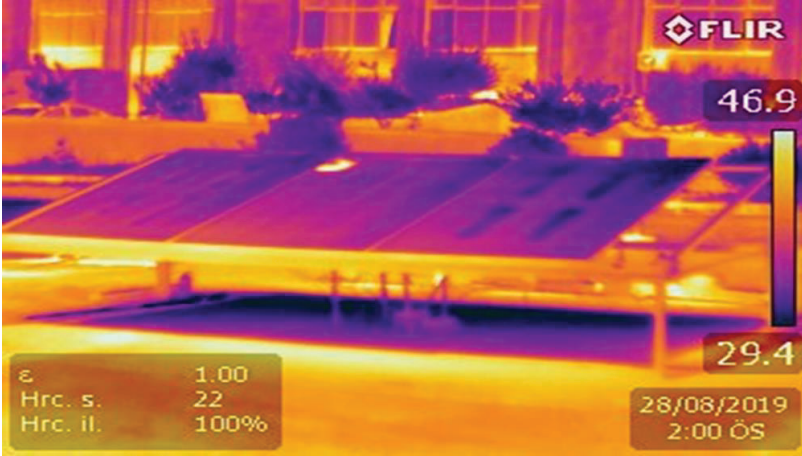
2.Deneysel Yöntem

Güneş Enerjisinden elektrik üretimi için kullanılan, 3 adet Jinko marka Polikristal 260 W gücünde max akım değeri 8.37 A ve max voltağı 31.1 V, fotovoltaiik panellerden oluşan deney düzeneğı kurulmuştur. Taşıyıcı sistem üzerindeki 2 adet fotovoltaiik panelin alt yüzeyine şekildeki görüldüğü gibi alüminyum malzemeden yapılmış 500mm uzunlukta şekil 7 de görülen teknik ölçülerde 4 adet pasif soğutucu uygulanmıştır. Buradaki amaç kanatçıklar vasıtası ile fotovoltaiik (hücre) sıcaklığındaki ısı transferini iletim ve taşınım yolu arttırmak ve panelin bir miktar soğumasını sağlamaktır. Böylece fotovoltaiik yüzeydeki hücrelerin sıcaklığı düşürülerek güneş panelinden daha fazla elektrik enerjisi üretilmiş olacaktır. Sistem üzerindeki diğer fotovoltaiik panele herhangi bir işlem yapılmamıştır. Kurulumu yapılan bu deney düzeneğindeki fotovoltaiik panellerin üst ve alt yüzey sıcaklıkları, pasif soğutuculu panellerin kanat ucu sıcaklıkları, ortam sıcaklığı, üretilen gerilim ve akım değerleri eş zamanlı olarak ağustos ayı boyunca sistem üzerindeki datalogger SD karta 10 dakikalık periyotlarla kaydedilmiştir. Ayrıca 2 panelde pasif soğutucu kullanılması ile standart panele göre yüzey

sıcaklığındaki azalmayı kontrol etmek için ay içinde bazı günlerde termal kamera ile ölçümler ve rüzgâr hızı ölçümleri yapılmıştır. Deney dataları alındıktan sonra toplam enerji miktarları hesaplanarak grafikleri çizilmiştir.



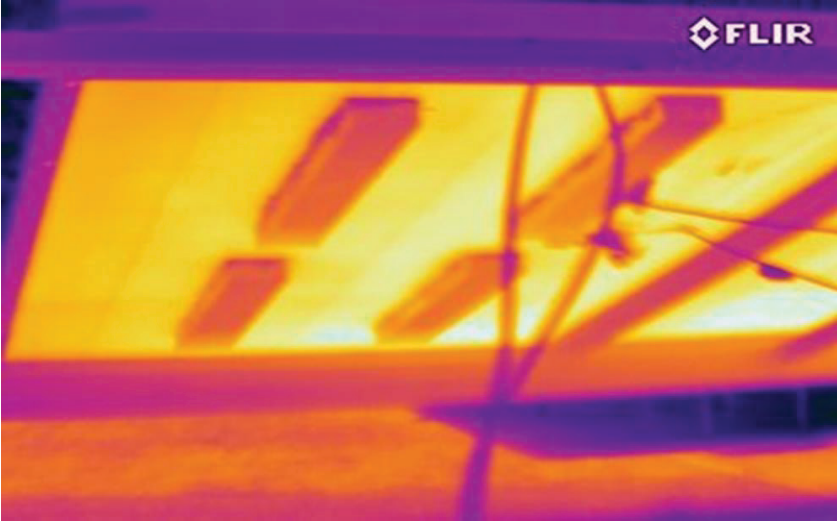
Şekil 3:Fotovoltaik Sistem Kurulumu



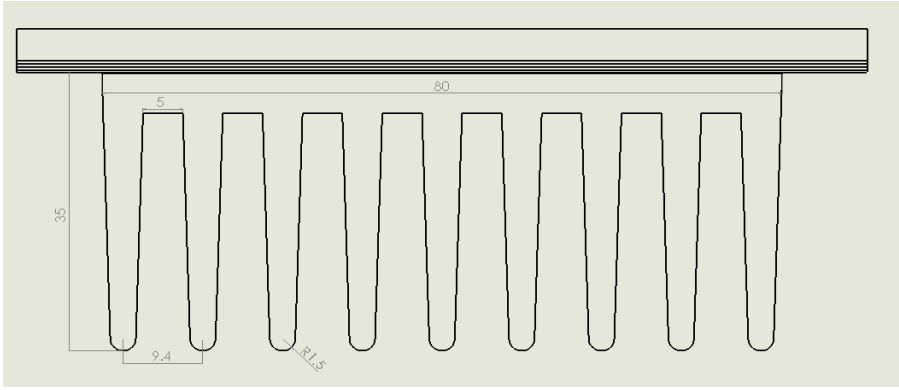
Şekil 4: Fotovoltaik Panellerin Yüzey Sıcaklıklarının Termal Kamera Görüntüsü



Şekil 5: Fotovoltaik Panel Alt Yüzeyine Pasif Soğutucu Uygulaması

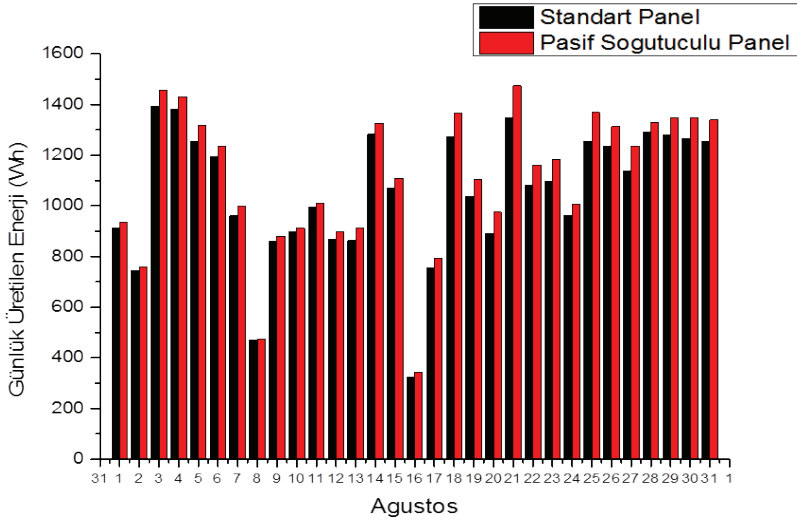


Şekil 6: Pasif Soğutucu Uygulanmış Panelde Sıcaklık Değişiminin Termal Kamera Görüntüsü

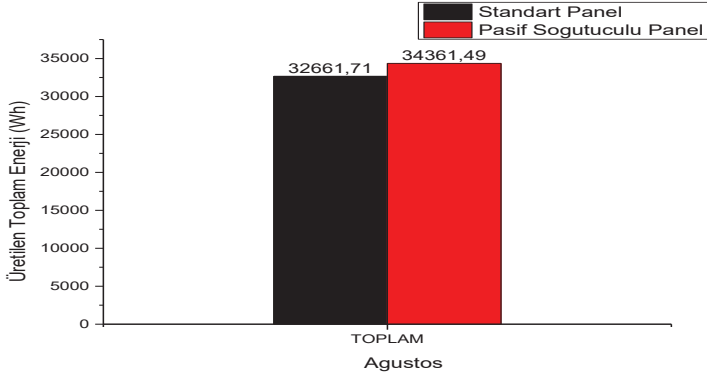


Şekil 7: Panel Alt Yüzeyine Alüminyum Malzemeden Üretilmiş Olan Pasif Soğutucu Ölçüleri

3.Deneysel Veriler



Şekil 8: Standart ve Pasif Soğutuculu Panelin Ağustos Ayı Günlük Enerji Değerleri



Şekil 9: Standart ve Pasif Soğutuculu Panelde Üretilen Ağustos Ayı Toplam Enerji Değerleri

4.Sonuç ve Değerlendirme

Kurulumu yapılan sistem üzerinden alınan sonuçlara göre, ağustos ayı sonunda 260 W/h güce sahip standart bir polikristal panelden 32.661 kW/h enerji elde edilirken aynı teknik özelliklerdeki diğer panelin alt yüzüne alüminyum malzemedan yapılmış pasif soğutucu uygulandığında 34.361kW/h toplam enerji elde edilmiştir. Aradaki 1.7 kW/h lık fazla üretim sadece bir tek panelden ve bir aylık süre sonunda elde edilmiştir. Saha kurulumlarında yüzlerce panel üzerinde bu pasif soğutma uygulaması ile uzun dönemde çok daha fazla elektrik enerjisi elde edilmiş olacaktır. Diğer önemli bir konu ise, kurulumunu yaptığımız deney sahasında rüzgâr hızı ağustos ayı boyunca 0-1.6 m/s arasında ölçülmüştür. Rüzgâr hızı sıfır değerinde iken (0 m/s),panel yüzey sıcaklığı maksimum 70.2° C ölçülmüş ve rüzgâr hızının 1.6 m/s olduğu şartlarda ise fotovoltaik panel yüzey sıcaklığının minimum 38.4° C olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler anlık olup panel güç çıkışını etkileyen diğer parametrelerle birlikte dikkate alınmalıdır. Rüzgâr hızının artması ile pasif soğutucuların kanat ucu sıcaklığı ve panel yüzey sıcaklığı önemli derecede azalmaktadır. Bu sebeple rüzgâr hızlarının yüksek olduğu bölgelerde güneş enerji santrallerinin kurulması halinde daha fazla enerji elde edileceği anlaşılmıştır. Ayrıca sistem üzerinde kullanılan alüminyum malzemedan yapılmış pasif soğutucular sabit (hareketsiz) bir parça olması sebebiyle panellerin kullanım ömrü boyunca arıza, bakım ve onarım gerektirmemektedir. Tüm bunların yanında fotovoltaik hücrelerin dönüşüm verimliliğini arttırmak için, ileride yapılacak çalışmalarda, farklı pasif soğutucu modellerinin uygulanarak karşılaştırılması çok daha faydalı olacaktır.

Kaynaklar

- Adreolli, F. (2015). *Yeni Nesil Fotovoltaikler* (Cilt Aydın Bodur). (Ç. Özşar, & A. Bodur, Çev.) Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası.
- Ay, İ. (2020). *Fotovoltaik Enerji Sistemlerinin Temelleri*. Ankara: Nobel Yayınevi.
- Bahaidarah , H., Subhan, A., Gandhidasan, p., & Rehman, S. (2013). Performance evaluation of a photovoltaic module by back water cooling for hot climatic conditions. *Energy* 59, 445-453.
- Bayrak, F., Oztop, H. F., & Selimefendigil, F. (2019). Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Solar Energy* 188, 484 - 494.
- Benghanem, M., Al-Mashraqi, A. A., & Daffallah, O. K. (2016). Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites. *Renewable Energy* 89, 51-59.
- Biwole, P., Eclache, P., & Kuznik, F. (2011). Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials. *World Renewable Energy Congress*. Sweden.
- Ceylan, İ., & Gürel, E. A. (2017). *Güneş Enerji Sistemleri ve Tasarımı*. Bursa: Dora Basım Yayın.
- Çarkıt, T., & Alçı, M. (2017). Fotovoltaik Panellerde Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. *8.Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı*. Ankara: T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü.
- Gökeri, A. M. (2019). *Güneşten Elektrik Üretimi*. İzmir: Etki Yayınları.
- Odeh, S., & Behnia, M. (2009). Improving photovoltaic module efficiency using water cooling . *Heat transfer engineering*, 30(6):499-505.
- Yiğit, A., & Atmaca, İ. (2018). *Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları*. Bursa: Dora Basın Yayın Dağıtım.

Bölüm 11

KESME KUVVETLERİ VE KESİCİ TAKIM ÜZERİNDE OLUŞAN GERİLMELERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ



*Mustafa SEKMEN*¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SEKMEN, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza Meslek Yüksekokulu, Samsun, Türkiye, ORCID:0000-0003-4361-3117.

1. GİRİŞ

Metal kesme veya diğer adıyla talaşlı imalat endüstride en yaygın kullanılan imalat yöntemlerinden biridir. Üretimde kaliteyi düşürmeden maliyeti minimize etmek temel hedeflerden biridir. Talaşlı üretim yöntemlerinde kullanılan makinelerin tasarımı, boyutlandırılması ve üretim esnasında makinelerin rijitliğini koruması ve talaş kaldırma sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin analizi sürekli bir araştırma konusu olmuştur. Talaş kaldırma işleminde oluşan kesme kuvvetleri, üretim kalitesi ve üretim maliyetine doğrudan etki etmektedir. İşlenebilirlik üzerine yapılan çalışmaların pahalı ve zaman alıcı olması, nümerik analizleri bu araştırmalar için alternatif olarak sunmuştur. Metal kesmeyi modellemede en çok tercih edilen yöntem ise sonlu eleman metodudur. Nümerik analizlerle tahmin edilen kesme parametreleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak nümerik çalışmaların doğruluğu kontrol edilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar verdiği, ayrıca sonlu elemanlar yöntemi sıcaklık, gerilme, kesme kuvvetleri gibi değişkenlerin tahmininde ve talaş oluşumu sürecinin analizinde etkili bir teknik olduğunu kanıtlamıştır (Beg vd., 2012). Sonlu elemanlar metodu endüstri uygulamalarında etkili bir araçtır. Farklı malzeme ve işlenebilirlik parametrelerinin etkisini araştırmak için pek çok araştırma yapılmıştır. Komvopoulos ve Erpenbeck (1991), ortogonal talaş oluşumunu sonlu eleman metodu kullanarak kesici takım ve iş parçası ara yüzeyindeki sürtünme, kesici takım aşınması ve talaş yüzeyindeki gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Bil ve vd. (2004), ortogonal kesme işlemini literatürde bulunan çeşitli deney sonuçlarıyla ve farklı simülasyon modellerini de birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada *MSC. Marc*, *DEFORM 2D* ve *Third wave Advant Edge* sonlu eleman kodlarını kullanmışlardır. Özel ve Altan (2000), sementit karbür kesici takımlarla P20 kalıp çeliğinin frezeleme işleminde *DEFORM 2D* yazılımını kullanmışlardır. Kesme işlemini simüle ederek, kesme kuvvetleri, talaş akışı, sıcaklıklar ve takım gerilmelerini kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin etmişlerdir.

Ceretti vd. (2000), tornalamada *DEFORM 3D* yazılımı kullanarak kesme işleminin optimize edilmesi ve yeni takımların tasarlanması konusunda simülasyon sonuçlarının kullanılabileceğini göstermişlerdir. Kose vd. (2008), nikel bazlı süper alaşım Inconel 718'in işlenebilirliğinde ilerleme oranının kesici takım gerilmelerine olan etkilerini *ANSYS* kullanılarak analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, kesici takım gerilmelerine etki eden en önemli kesme parametresinin ilerleme hızı

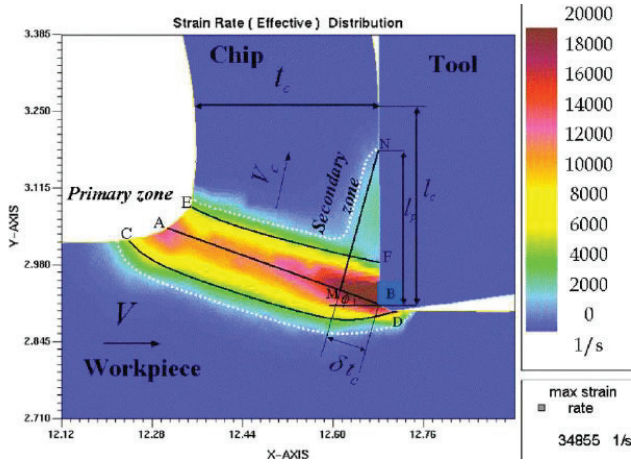
olduğunu göstermişlerdir. Carroll ve Strenkowski (1988), tarafından yapılan çalışmada, talaş ve iş parçasındaki gerilme ve gerinme bölgeleri, talaş geometrisi ve kesici takıma etkiyen kesme kuvvetlerin belirlenebildiği geliştirilmiş Lagrangian ve Eulerian formülasyonlarına dayalı iki ayrı ortogonal sonlu eleman modelinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Özel ve Zeren (2005), sonlu eleman analizi ile kesme işleminin simülasyonu, kesme kuvvetleri, sıcaklık ve gerilme dağılımı gibi önemli işleme parametrelerini tahmin edebilmişlerdir. Çalışmada Johnson-Cook mevcut iş parçası malzemesi akma gerilmesi modelini, deformasyon bölgelerindeki akma gerilmesini karakterize etmek için kullanmışlardır. Özel (2009), AISI 4340 çeliğin tornalanmasında polikristalin kübik boron nitrit (PCBN) kesici takımların *DEFORM3D* programıyla analizini yapmıştır. Deneylerde alaşımlı talaş geometrisi, kesme kuvvetleri, talaş ve iş parçasındaki gerilme alanları, sıcaklık dağılımları, kesici takım gerilmeleri, talaş oluşumları ve takım aşınmasını belirlemiştir. Monaghan ve Mac Ginley (1999), sementit karbür kaplanmış ve kaplanmamış kesici takımlarla Inconel 718'in işlenmesindeki farklı kaplamaların ve kesme parametrelerinin takım üzerinde oluşan gerilme dağılım etkilerini hem deneysel hem de *FORGE 2* programı kullanarak FEM yardımıyla araştırmışlar ve birbirleriyle karşılaştırmışlardır. FEM'den alınan takım aşınması ve gerilmeleri deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve aralarındaki uyumluluk gösterilmiştir.

Uhlmann ve arkadaşları (2007), Inconel 718'in işlenebilirliğinde talaş oluşumunun iki ve üç boyutlu simülasyonunu yapmışlar; kesme kuvveti ve talaş sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Simülasyonları *ABAQUS* ve *DEFORM* olmak üzere iki ayrı FEM programı kullanarak yapmışlardır. Farklı simülasyonlardaki kesme kuvvet farklılıklarını modellemeyle ilgili farklılıklara bağlamışlardır. Bäker (2006), ortogonal metal kesme işleminde kesme hızının, kesme kuvveti ve talaş oluşum sürecine olan etkisini iki boyutlu FEM ile araştırmıştır. Budak ve Özlü (2008), Kesme bölgesinin deformasyonunda iş parçası için Johnson-Cook akma malzeme modeli seçilmiştir. Modelleme ile kesme kuvveti, kesici takım gerilme dağılımı, talaş yüzeyindeki temas uzunluğu ve ısı dağılımı gibi parametreleri tahmin edebilmişlerdir.

Jaharahve vd. (2009), AISI 1045 çeliğinin tornalanmasında efektif gerilme ve sıcaklık yükselmesinin kesici takım geometrisi üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Dechjarer (2008), talaş açısının kesme performansı üzerine etkilerini araştırmıştır. Uzun ve Aslantaş (2011), kaplama tipinin sıcaklık, kesme kuvvetleri, ve takım gerilmeleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Gök vd. (2013), AISI 1040 çeliğinin

delinmesinde DEFORM 3D programı Lagrangian Incremental modelini seçerek delme işleminin analizini yaparak oluşan kuvvet değerlerini deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Özel ve Zeren (2004), Oxley tarafından geliştirilen metal kesme işleminde birincil ve ikincil deformasyon bölgesini karakterize etmek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Analizler neticesinde kesme işleminin simülasyonu, kesme kuvvetlerinin tahmini, sıcaklık ve gerilme dağılımı, işlenebilirlik, yüzeydeki kalıntı gerilmeler, takım aşınma bölgeleri tahmini, kesme koşullarının optimizasyonu ve kesici takım geometrisi gibi önemli işlenebilirlik parametrelerini tahminine yönelik önemli veriler elde etmişlerdir. Şekil 1’de dik kesmedeki deformasyon bölgelerinin FEM simülasyonu verilmiştir.



Şekil 1. Ortogonal kesme işleminde deformasyon bölgeleri (Özel ve Zeren, 2004)

Gökçe vd. (2019), ticari saflıktaki molibden sementit karbür kesici takım kullanarak frezeleme işleminde oluşan kesme kuvvetlerini ölçmüşlerdir. Aynı işlemleri Deform-3D yazılımı kullanarak analiz etmişlerdir. Deneyler sonucu elde edilen sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada %10 seviyesinde bir fark ile sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Günay vd. (2016), karbür kesici takımlarla AISI P20 çeliğinin işlenmesinde oluşan kesme kuvvetlerini deneysel olarak ölçerek, sonrasında simülasyon analizi yapmışlardır. Deneysel olarak elde edile veriler ile analizler sonucunda elde edilen kesme kuvveti verileri arasında %8’lik bir fark olduğunu belirlemişlerdir.

Talaş kaldırma mekaniğinin anlaşılması için yapılan deneysel çalışmaların maliyetli ve zaman alıcı olması sebebiyle bilgisayar paket

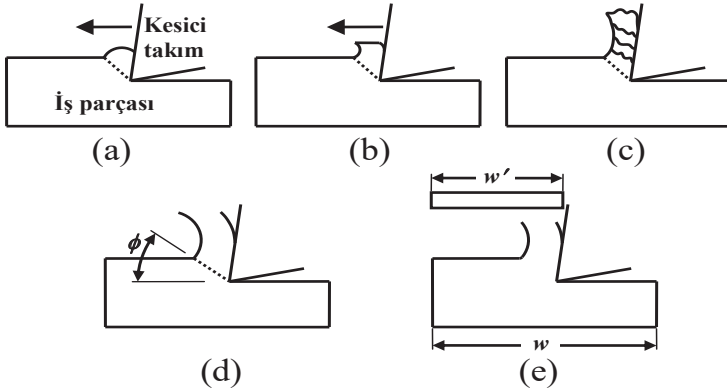
programları kullanılmaktadır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle kesme kuvvetleri ve kesici takım gerilmelerinin önceden tahmin edilmesinde ve talaş kaldırma mekanizmasının anlaşılmasında çok büyük gelişmeler sağlanmıştır (Şeker, 1997). Bu yaklaşımdan hareketle hedeflenen bu çalışmanın amacı;

- Deneyssel parametreler referans alınarak talaş kaldırma işleminin DEFORM 3D paket programı kullanılarak simülasyonu,
- Simülasyonla elde edilen kesme kuvvetlerinin deneyssel sonuçlarla karşılaştırması
- Kesici takımda meydana gelen mekanik gerilmelere kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme hızının etkilerinin incelenmesi,
- Deney maliyetlerini de göz önüne alarak; kesme parametrelerindeki değişimin kesici takım üzerindeki etkilerinin incelenmesinde, DEFORM 3D paket programından yararlanılabilmek; olarak belirlenmiştir.

2. KAVRAMSAL TEMELLER

2.1. Talaş oluşumu ve geometrisi

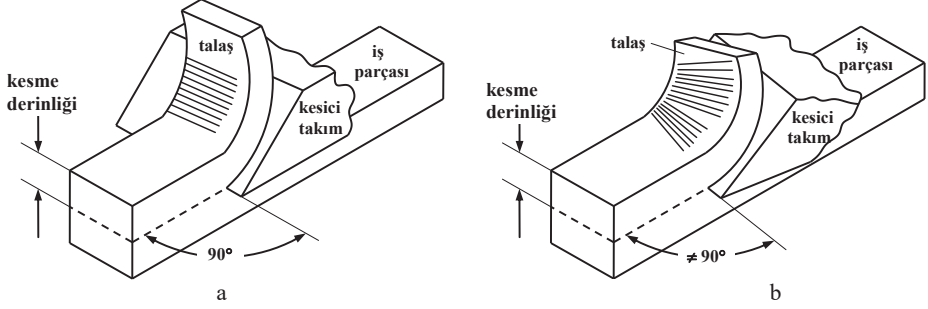
Kesme işlemi sırasında gerçekleşen talaş oluşumu safhaları Şekil 2’de verilmiştir. Plastik şekil değiştirme ile elde edilen talaş açınımlı ($w' > w$) iş parçasının gerçek boyundan (w) daha küçük olacaktır ($w' < w$, Şekil 2e).



Şekil 2. Talaş oluşumu (Şeker, 1997)

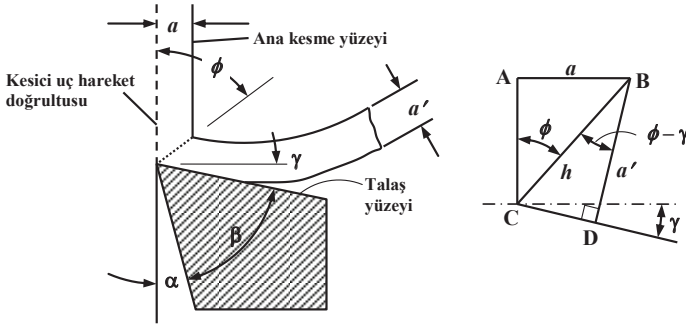
a) Takımın iş parçasına dalması, b) Kesme işleminin başlaması (yığılma), c) Talaşın akışı, d) Talaşın parçadan ayrılması, e) Çıkan talaş uzunluğu

Kesme işleminin analizinde iki metot vardır: Dik (*ortogonal*) (Şekil 3a) ve eğik (*oblique*) kesmedir (Şekil 3b). Dik kesme, iki boyutlu bir problem davranışı gösterdiğinden kesme eşitliklerinin çıkarılmasında deneysel ve teorik çalışmalarda yaygın olarak kullanılır.



Şekil 3. Dik ve eğik kesme metotları (Şeker, 1997)

Talaş kaldırma işlemi, kesici kenarda talaşın oluştuğu bölgeden alınan düzlemsel kesitle açıklanır (Şekil 4).



Şekil 4. Talaş oluşma düzlemi (Şeker, 1997)

Kesme açısı etkisiyle oluşan yığılma faktörü Şekil 4'ten (λ) için;

$$\lambda = a'/a \quad (2.1)$$

yazılabilir. Şekil 4'teki ABC ve BCD üçgenlerinden;

$$\sin \phi = a/h \Rightarrow a = h \cdot \sin \phi \quad (2.2a)$$

$$\cos (\phi - \gamma) = a' / h \Rightarrow a' = h \cdot \cos (\phi - \gamma) \quad (2.2b)$$

elde edilir. Talaş kaldırmada talaş kayma açısının talaş kaldırmada önemli bir rolü vardır ve talaş yığılma faktörünün hesaplanmasında kullanılır. Buna göre Eş. 2.2’de verilenler Eş. 2.1’de yerine yazılırsa, λ ;

$$\lambda = \cos (\phi - \gamma) / \sin \phi \quad (2.3)$$

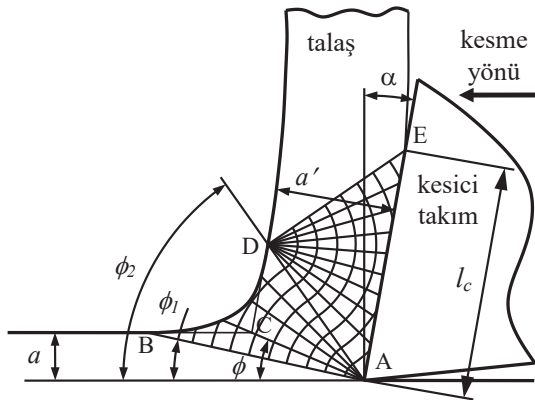
olacaktır. Talaş kaldırma işleminde kesiciye etki eden kesme kuvvetlerinin dağılımı ile talaş akışı üzerinde önemli bir etkisi olan parametre de talaş-takım temas boyu (l_c)’dir (Şekil 5). Bu parametre özellikle kayma açısı ve esas kayma bölgesi ile doğrudan ilgilidir. Literatürde l_c ’yi belirlemek üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Toropov ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda l_c ;

$$l_c = 2 \cdot \lambda \cdot a \quad (2.4)$$

ifadesi ile tanımlanmış ve çeşitli deneysel çalışmalar yapılarak doğrulanmıştır. Kayma yüzeyinin konumu ϕ ile belirlenebileceğine göre; ϕ için

$$\tan \phi = \cos \gamma / (\lambda - \sin \gamma) \quad (2.5)$$

yazılabilir.



Şekil 5. Talaş-takım temas boyu (Kurt, 2006)

2.2. Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method-FEM)

Günümüzde karmaşık ve zor mühendislik problemlerinin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi, etkin olarak kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir. FEM'deki temel mantık karmaşık bir problemi daha basite indirgeyerek çözümü tekniğidir. İlk olarak 1956 yılında havacılık sanayisinde uçak gövdelerinin gerilme analizini yapmak için geliştirilmiş olan bu yöntemin, daha sonraki yıllarda uygulamalı bilim ve karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılabileceği görülmüştür. Günümüzde ise bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle sonlu elemanlar yönteminde hızla gelişmeler olmuş ve birçok probleme ekonomik ve hızlı çözüm bulmak için kullanılan yöntemlerden biri olmayı başarmıştır (Arıkan, 2002).

3. METARYAL VE METOD

3.1. Deneyel Parametreler

Deneylerde AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak Tablo 1'de verilen beş farklı kesme hızı, iki farklı kesme derinliği ve üç farklı ilerleme hızı seçilmiştir. Deney numunelerinin işlenmesinde titanyum karbür kaplı, SNMG 120408-MS US735 kesici uç formu ve takım tutucu olarak $\chi=75^\circ$ yanaşma açısına sahip SSBCR122525 kullanılmıştır. Deneyler Tablo 1'de verilen parametrelere göre CNC torna (TC 35 Johnford) tezgahın da yapılmıştır. Deneylerde kesme kuvvetleri KISTLER 9257B Piezokristal dinamometre kullanılarak ölçülmüştür (Tekaslan vd, 2007)

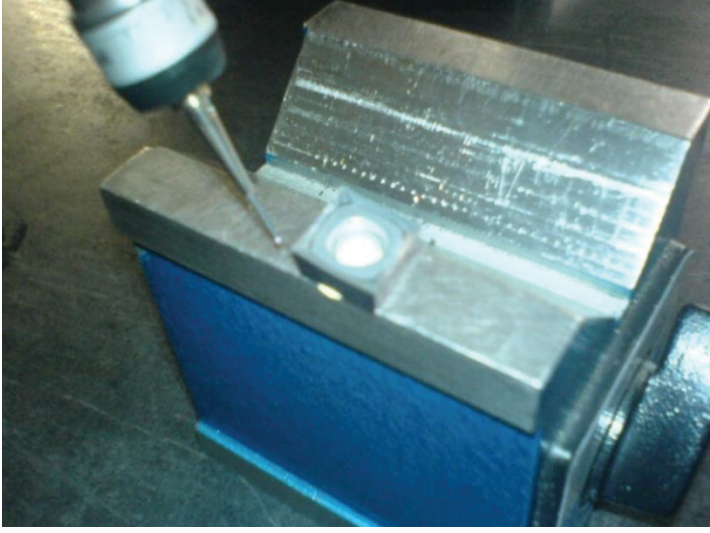
Tablo 1. AISI 304 paslanmaz çeliği için kullanılan kesme parametreleri (Tekaslan vd, 2007)

Takım tutucu	: SSBCR122525
Kesici takım	: SNMG 120408-MS US735
Kesme parametreleri	
V (m/min)	: 50-75-100-125-150
f (mm/rev)	: 0,15-0,2-0,25
a (mm)	: 1,5-2

3.2. Sonlu Elemanlar Metoduyla Modelleme

Simülasyonlar *DEFORM-3D* paket programı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon öncesinde kesici takım katı modelin oluşturulması, kesici takım ve iş parçası malzeme özelliklerinin tanımlanması olarak ifade edilebilen bazı ön hazırlıklar yapılmıştır. SNMG 120408-MS US735 formundaki kesici takım program veri tabanında/kütüphanesinde bulunmayan kesici takımdır. Kesici takım

modellemesinde kesici takım katalogundan alınan ölçüler ve Hexagon ölçüm cihazında tanımlanan boyutlara göre *SolidWorks* modelleme programında çizilmiştir. Tasarım için boyutları elde edilen kesici takımın modellenmesinde kesici takıma ait özellikler (yanaşma açısı, talaş açısı, kesici uç burun yarıçapı, talaş kırıcı formları, boşluk açıları, vb.) dikkate alınmıştır. Simülasyon programından “*STL*” dosya uzantısı verilerek çağrılmıştır. Şekil 6’da kesici takım geometrisinin (boyut ve açıları) hassas ölçüm cihazında (Mitutoyo CV 3000 Hexagon ölçüm cihazı) ölçümü görülmektedir.



Şekil 6. Kesici takımın Mitutoyo CV 3000 Hexagon ölçüm cihazı ölçülendirmesi

AISI 304 çeliği için Johnson Cook akma modeli kullanmıştır.

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\epsilon}^n) \cdot [1 + C \cdot \ln(\dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\bar{\epsilon}}_0)] \cdot (\dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\bar{\epsilon}}_0)^\alpha \cdot [D - E \cdot (T^*)^m] \quad (3.1)$$

Eş. 3.1’deki D , T^* değerleri için programda

$$\delta = k \cdot (T - T_b)^\beta \text{ olup } D = D_0^\delta \text{ ve } T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r) \quad (3.2a)$$

$$\alpha = \beta = k = T_b = 0 \text{ ve } \dot{\bar{\epsilon}}_0 = D_0 = E = 1 \quad (3.2b)$$

olduğuna göre, Eş. 3.2a-2b'deki tanımlamalar Eş. 3.1'de düzenlendiğinde; Eş. 3.3'teki Johnson Cook eşitliğinin son hali elde edilir:

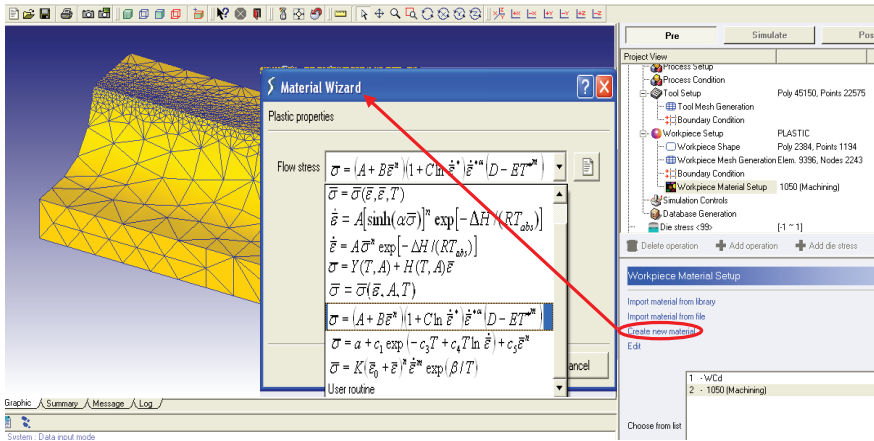
$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\epsilon}^n) \cdot [1 + C \cdot \ln(\dot{\bar{\epsilon}} / \dot{\bar{\epsilon}}_0)] \cdot [1 - \{(T - T_r) / (T_m - T_r)\}^m] \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'teki A , oda sıcaklığındaki (T_r) akma gerilmesi sabiti; B , gerinme sertleşmesi sabiti; n , gerinme sertleşmesi üssü; C , gerinme hızı sertleşme üssü; $\dot{\bar{\epsilon}}_0$, referans gerinme hızı; T , deney parçası sıcaklığı; T_m iş parçası malzemesi ergime sıcaklığı ve m , sıcaklığa bağlı sabit olarak tanımlanmaktadır. AISI 304 iş parçası malzemesi için Eş.3.3'teki A (MPa), B (MPa), n , C , m ve T_m (°K) parametre değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. AISI 304 malzemesi için Johnson-Cook parametreleri (Ocana vd.,2008)

Malzeme	A	B	n	C	m
AISI 304	350	275	0,36	0,022	1

AISI 304 çeliği malzeme veri tabanından bulunmayan bir malzeme olduğu için yeni malzeme tanımlaması (*Create new material*) yapılmıştır. Programdaki simülasyonlarda değişik gerinme, gerinme hızı ve sıcaklıklardaki malzemenin akma davranışı dikkate alındığından yeni malzeme tanımlaması, Şekil 7'de gösterildiği gibi iş parçası malzemesi için uygun akma gerilmesinin seçilmesiyle oluşturulmuştur.



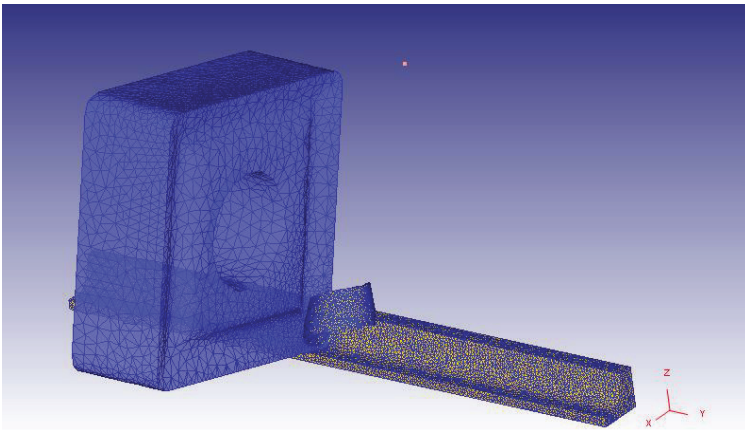
Şekil 7. İş parçası malzemesi için akma davranışının tanımlanması

DEFORM programında simülasyonlarda üç boyutlu mesh için Lagrangian Incremental modeli uygulanmıştır. Her bir analiz Tablo 1’de verilen kesme parametrelerine göre yapılmıştır. İş parçası ve kesici takım için malzeme özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. İşlenebilirlik simülasyonlarında *Machining (Cutting)* modülü üzerinde, işleme tipi olarak tornalama (*turning*) ve *SI* birim sistemi seçilerek yapılmıştır. Kesici takım- iş parçası ara yüzü için ısı transfer sabiti de 45 N/s mm°C (Gök vd., 2013), kayma sürtünme faktörü 0,5 (Gopalakrishna vd., 2014), ve iş parçası ilk sıcaklığı 20°C olarak girilmiştir.

Tablo 3. *Similasyon modeli için iş parçası-kesici takım malzeme parametreleri*

Malzeme	AISI 304 (Mori vd.,	WC (Lorentzon vd.,
Yoğunluk (kg/m ³)	7 900	11 900
Elastikiyet modülü	200	650
Poisson oranı	0,3	0,25
Isıl genleşme	$1,73 \times 10^{-5}$	5×10^{-6}
Özgül ısı (J/kg°C)	440	334
$T_{melt}(K)$	1673	-

Simülasyonlarda kesici takım ağ sayısı kesici uçta daha yoğun olacak şekilde Min. eleman boyutu 0.1 mm ve 32582 elemandan oluşmuştur. İş parçası için ise Min. eleman boyutu 0.06 mm alınmıştır. Şekil 7’de iş parçası ve kesici takım için belirlenen parametreler oluşan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 7. *Kesici takım ve iş parçası ağ yapısı*

Simülasyonlarda kayma bölgesi için Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır. Denklem 3.4'te verilen Coulomb modeli, kayma bölgesinin parabolik olarak değiştiği varsayımına dayanır. Denklemden kayma gerilmesi, normal gerilme ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Coulomb kayma gerilmesi denklemi;

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (3.4)$$

şeklinde dir. Burada, τ , kayma gerilmesini; σ_n , normal gerilmeyi, μ , sürtünme katsayısını tanımlamaktadır.

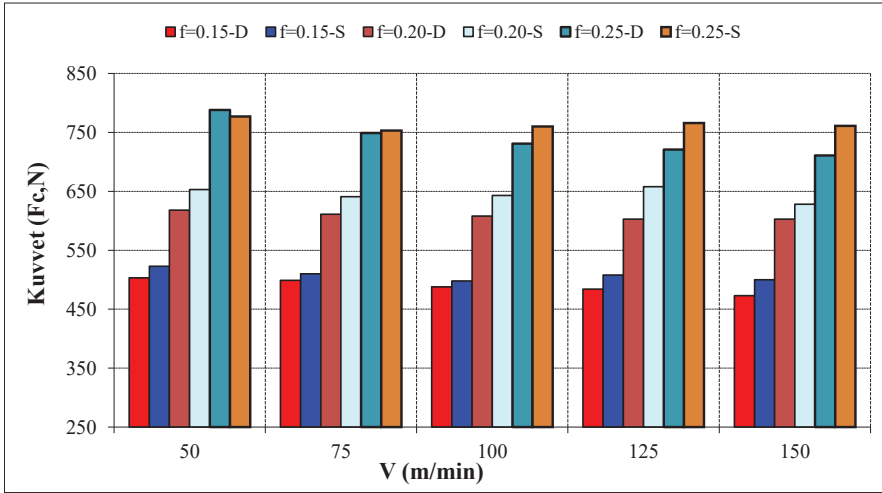
4. BULGULAR

Kesme kuvvetleri deneysel yöntemlerle ölçülebildiği gibi, simülasyon analizleriyle de elde edilebilmektedir. Ancak simülasyon analizleri, kesme esnasında oluşabilecek birçok etkiyi tam olarak dikkate alabildiği ölçüde doğru sonuçlar vermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçların benzerlik sergilediği görülmektedir. Deneysel yöntemlerle elde edilen kesme kuvveti sonuçları simülasyon sonuçlarına göre % 5'daha düşük çıktığı Şekil 8'deki grafiklerden görülmektedir.

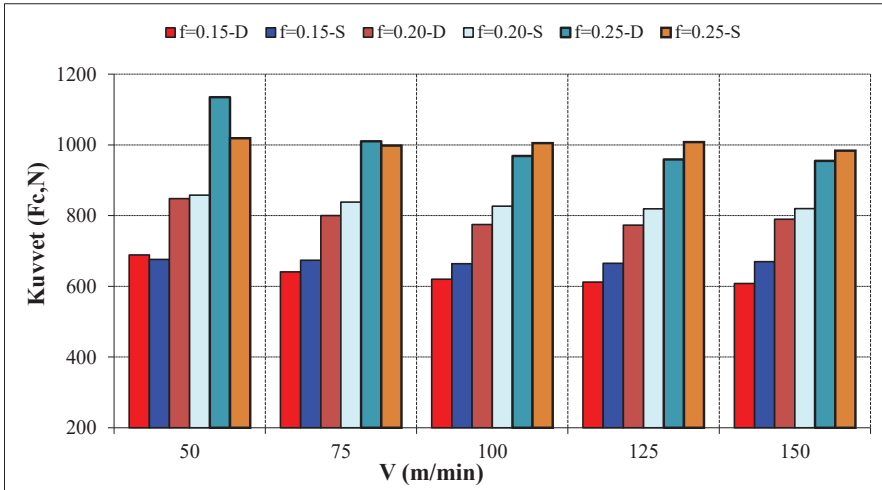
Şekil 8'deki grafiklerden anlaşıldığı gibi kesme kuvvetlerinin, kesme hızının yükselmesiyle hem deneysel sonuçlarda hem de simülasyon sonuçlarında azaldığı görülmüştür (Lorentzon vd., 2009). Deneysel sonuçlarda kesme hızının etkisi daha belirgin olurken analiz sonuçlarında azalma deney sonuçlarına göre daha az düzeyde gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarında kesme hızının 50 m/min'den, 150 m/min yükselmesiyle % 11'lük bir azalma olurken, analiz sonuçlarında ise % 3'lük bir azalma olmuştur. Kesme hızının kesme kuvveti üzerindeki etkisi, kesme hızının artmasıyla kesici takım üzerinden akan talaş sıcaklığının artmasıyla açıklanabilir. Kesme hızının artmasıyla birincil ve ikincil deformasyon bölgelerinde yükselen sıcaklık, iş parçası malzemesinin akma mukavemetini düşürecek ve asıl kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olacaktır.

İlerleme hızı ve talaş derinliğinin artmasıyla kesme kuvvetlerinde deneysel ve simülasyon sonuçlarında aynı oranda belirgin bir artış gözlenmiştir (Köse vd., 2008, Özel, 2009). Deneysel sonuçlara göre ilerleme hızının 0,15mm/dev'den 0,25mm/dev artmasıyla %36'lık, analiz sonuçlarında ise %34'lük bir artış olmuştur. Talaş derinliğinin 1mm'den 2mm'ye çıkmasıyla ise deneysel verilerde %26'lık, simülasyon verilerinde %24'lük bir artış gerçekleşmiştir. Deneysel ve simülasyon

sonuçlarında en yüksek kesme kuvveti değerleri 2 mm talaş derinliği, 0,25mm/dev ilerleme ve 50 m/min kesme hızında 1135N ve 1019N olarak gerçekleşmiştir. En düşük kesme kuvveti ise 1,5 mm talaş derinliği, 0,15mm/dev ilerlemede deneysel sonuçlar için 150m/min kesme hızında 473N olarak, simülasyon sonuçlarında ise 100m/min kesme hızında 498N olarak gerçekleşmiştir. Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları arasındaki en büyük fark 50 m/min kesme hızı ve 0,25mm/dev ilerleme oranında %11 olarak oluşmuştur.



a



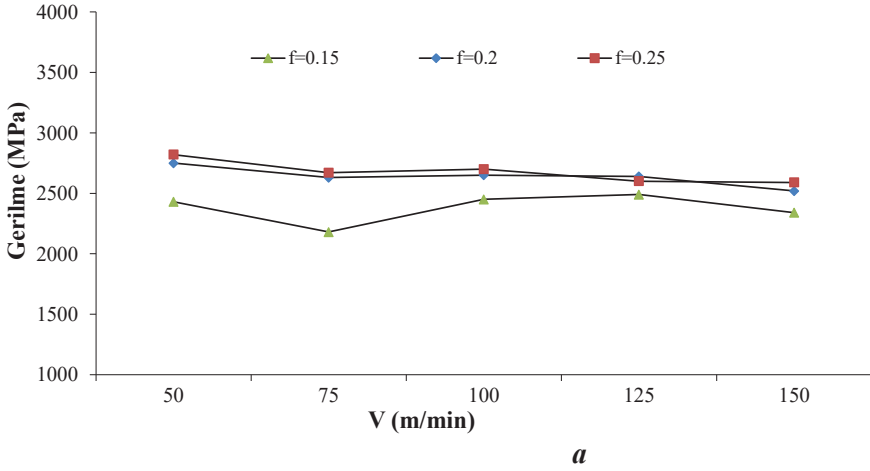
b

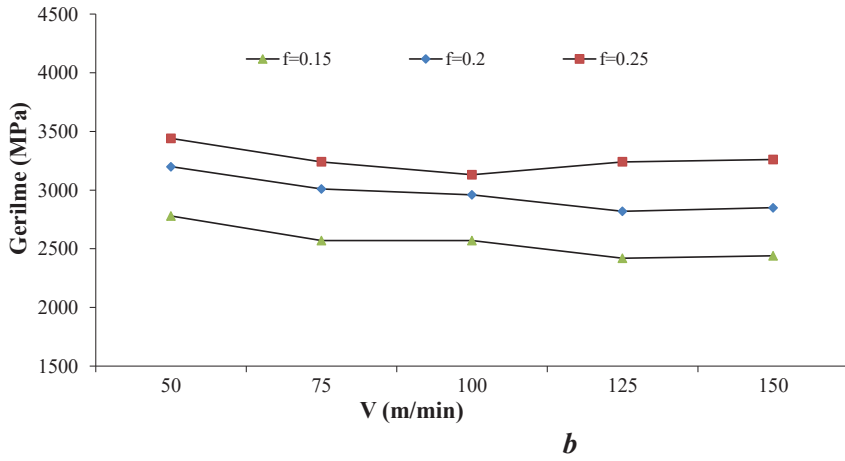
Şekil 8. Farklı kesme hızlarında oluşan deneysel ve simülasyon kesme kuvvetleri

a= 1,5mm, b= 2mm talaş derinliği

Efektif gerilme değerleri Şekil 9'da görüldüğü gibi ilerleme hızı ve talaş derinliğinin yükselmesiyle artmaktadır (Kurt, 2009). En yüksek efektif gerilme değerleri 0,25mm/dev ve 2mm talaş derinliğinde 3440MPa olarak analiz edilmiştir. En düşük efektif gerilme değeri ise 0,15mm/dev ilerleme hızı ve 1,5mm talaş derinliği değerin de 2180MPa olarak analiz edilmiştir. Şekil 9a-b'de aynı şartlarda 2mm talaş derinliğinde elde edilen efektif gerilme değerleri 1,5mm talaş derinliğinde elde edilen gerilme değerlerinden %14 daha büyük çıkmıştır. Yine aynı talaş derinliği ve kesme hızı şartlarında ilerleme hızının 0,15mm/dev'den 0,20mm/dev'e artmasıyla efektif gerilme değerlerinde %13, 0,20mm/dev'den 0,25mm/dev'e artmasıyla ise %5'lik bir yükselme olduğu analiz edilmiştir. 2mm talaş derinliğinde elde edilen efektif gerilme değerleri, ilerleme hızının değişimine daha fazla tepki gösterirken 1,5mm talaş derinliğinde bu tepki daha az olmuştur.

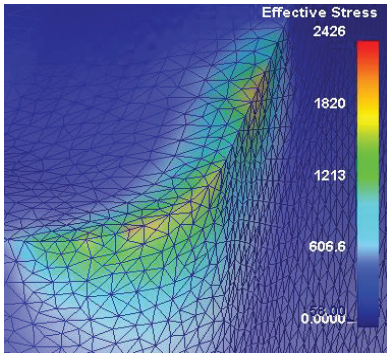
Kesme hızının artması efektif gerilme değerleri üzerinde bir miktar azalmaya sebep olsa da, bu değişim ilerleme hızı ve talaş derinliğinin etkisi kadar belirgin değildir. 2mm talaş derinliği 0,15mm/dev ve 0,20mm/dev ilerleme hızlarında kesme hızının artmasıyla efektif gerilme değerlerinde diğer analizlere göre daha fazla bir azalmanın olduğu görülmüştür.



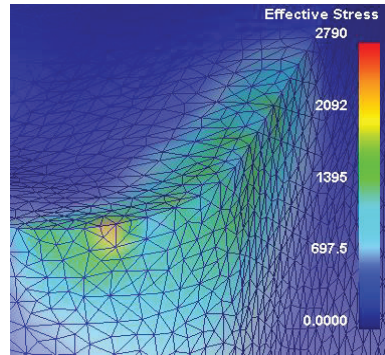


Şekil 9. Farklı kesme hızlarında oluşan efektif gerilme değerleri
 $a = 1,5\text{mm}$, $b = 2\text{mm}$ talaş derinliği

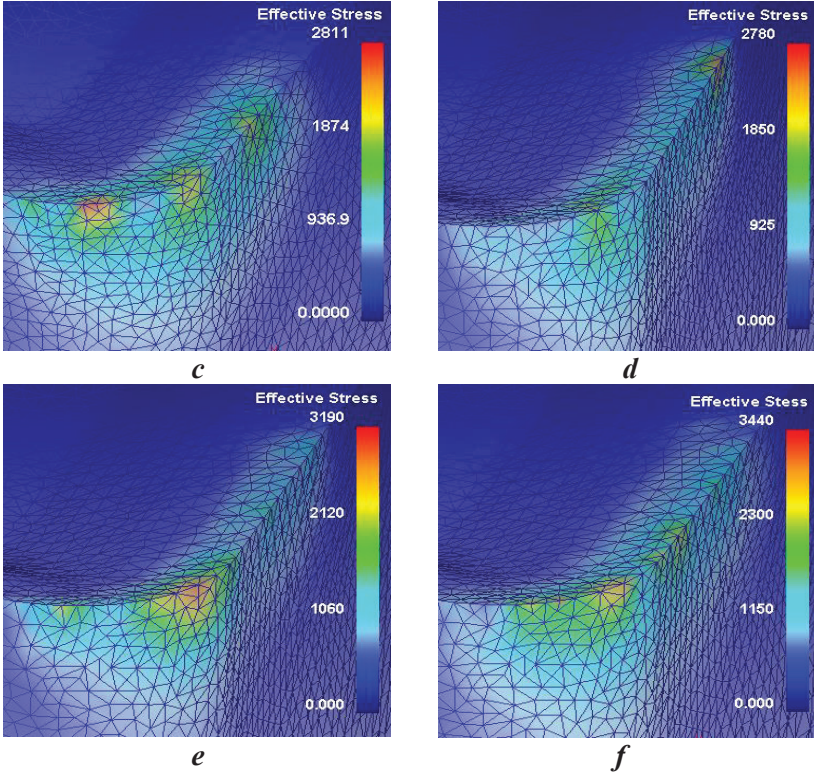
Kesici takım üzerinde oluşan efektif gerilmeler analiz edildiğinde Şekil 10'da görüldüğü efektif gerilmelerin talaş derinliği ve ilerleme hızının artmasıyla yükseldiği, kesici takım ucu ve kesme kenar uzunluğu mesafesince kesici takım talaş yüzeyi ve alt kenar yüzeyinde etkili olduğu görülmektedir (Özel, 2009). Özellikle kesici takım üzerindeki Max. gerilmelerin kesici takım burun yarıçapı bölgesinde daha etkili olduğu ve hem talaş yüzeyinde hem de takım uç burun yarıçapı alt kenar yüzeyinde 0,3 mm derinlikte yüksek düzeyde olduğu, kesme kenar uzunluğu mesafesince talaş yüzeyinde 0,5 mm derinlikte, takım uç burun yarıçapı alt boşluğunda 1,1 mm genişlikte ve kesme kenar mesafesince alt yüzeyde ise 0,9 mm genişlikte bir alanda efektif gerilmelerin olduğu gözlenmiştir.



a



b



Şekil 10. Kesici takım üzerinde oluşan efektif gerilmeler ($V=50\text{m/min}$)

- a) $f=0,15\text{mm}$, $a=1,5\text{mm}$ b) $f=0,2\text{mm}$, $a=1,5\text{mm}$
c) $f=0,25\text{mm}$, $a=1,5\text{mm}$
d) $f=0,15\text{mm}$, $a=2\text{mm}$ e) $f=0,2\text{mm}$, $a=2\text{mm}$ f) $f=0,25\text{mm}$, $a=2\text{mm}$

5. SONUÇLAR

AISI 304 çeliğinin titanyum kaplı kesici takımlarla işlenmesi sonucu elde edilen kesme kuvvetleri Deform 3D simülasyon programıyla elde edilen kesme kuvvetleriyle karşılaştırılmış ve takım üzerindeki gerilmeler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

DeneySEL sonuçlarla simülasyon sonuçların benzer bir eğilim sergilediği deneySEL yöntemlerle elde edilen kesme kuvveti sonuçları simülasyon sonuçlarına göre % 5'daha düşük çıktığı görülmüştür. DeneySEL ve simülasyon sonuçlarında, kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinin azaldığı, deney sonuçlarında kesme hızının 50 m/min'den, 150 m/min yükselmesiyle % 11'lük bir azalma olurken, analiz sonuçlarında ise % 3'lük bir azalma olmuştur. İlerleme hızı ve talaş derinliğinin artmasıyla kesme kuvvetlerinde deneySEL ve simülasyon

sonuçlarında aşağı yukarı aynı oranda bir artış gözlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre ilerleme hızının 0,15 mm/dev'den 0,25 mm/dev artmasıyla % 36'lık, analiz sonuçlarında ise %34'lük bir artış olmuştur. Talaş derinliğinin 1 mm'den 2 mm'ye artmasıyla ise deneysel sonuçlarda % 26'lık, simülasyon sonuçlarında % 24'lük bir artış gerçekleşmiştir. Efektif gerilme değerleri ilerleme hızı ve talaş derinliğinin yükselmesiyle artmaktadır. En yüksek efektif gerilme değerleri 0,25mm/dev ve 2mm talaş derinliğinde 3440MPa olarak analiz edilmiştir. En düşük efektif gerilme değeri ise 0,15mm/dev ilerleme hızı ve 1,5mm talaş derinliği değerin de 2180MPa olarak analiz edilmiştir.

Kesme hızının artması efektif gerilme değerleri üzerinde bir miktar azalmaya sebep olsa da, bu değişim ilerleme hızı ve talaş derinliğinin etkisi kadar belirgin değildir. Kesici takım üzerinde oluşan efektif gerilmeler analiz edildiğinde efektif gerilmelerin talaş derinliği ve ilerleme hızının artmasıyla yükseldiği, kesici takım ucu ve kesme kenar uzunluğu mesafesince kesici takım talaş yüzeyi ve alt kenar yüzeyinde etkili olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Arıkan, S. M. A. (2002). Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, 1-3.
- Bäker, M. (2006). Finite Element Simulation of High-Speed Cutting Forces. *J. Mater. Pro. Techno*, 176 (1-3), 117-126.
- Beg, O. A., Makinde, O. D., Swapan, J. Z., Ghosh, S. K. (2012). Hydromagnetic viscous flow in a Rotating Annularhigh-Porositymedium with nonlinear for chheimerdrageffects: Numerical Study. *World Journal of Modellingand Simulation*, 8(2), 83–95.
- Bil H., Kılıç S. E., Tekkaya A. E. (2004). A comparison of Orthogonal Cutting Data from Experiments with Three Different Finite Element Models. *Int. J. Machine Tools andManuf*, 44 (9), 933-944.
- Budak, E., Ozlu, E. (2008). Development of a Thermo Mechanical Cutting Process Model for Machining Process Simulations. *CIRP Annals – Manuf. Techno*, 57 (1), 97-100.
- Carroll, T., Strenkowski, J. S. (1988). Finite Element Models of Orthogonal Cutting with Application to Single Point Diamond Turning. *Int. J. MechanicalSciences*, 30 (12), 899-920
- Ceretti, E., Lazzaroni C., Menegardo L., Atlan T. (2000). Turning Simulations Using a Three-Dimensional FEM Code, *J. Mater. Pro. Techno*, 98 (1), 99-103.
- Dechjarern, S. (2008). 3D Finite Element Investigations of Theinfluence of Tool Rake Angle on Cutting Performance, *Asian International Journal of Scienceand Technology in Production and Manufacturing*, 1, 149.
- Gopalakrishna, H. D., Rao, J. S., Kumar, S. N., Shetty V. V., Rai K. (2014). Effect of Frictionon the Cutting Forces in High Speed Orthogonal Turning of Al 6061-T6. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(2), 78-83.
- Gök K., Türkes, E., Neseli, S., Sağlam, H., Gök, A. (2013). The Validation as Experimental and Numerical of the Values of Thrust Force and Torque in Drilling Process. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 6 (3), 93 – 99.
- Gökçe H., Çiftçi İ., Gökçe H. (2019). Frezeleme Operasyonlarında Kesme Kuvvetlerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi: Saf Molibdenin İşlenmesi Üzerine Bir Çalışma Araştırma Makalesi. *Politeknik Dergisi*, 22 (4), 947-954.

- Günay M., Yaşar N., Sekmen M., Korkmaz M. E. (2016). AISI P20 Çeliğinin İşlenmesinde Kesme Kuvvetinin Deneysel Ve Nümerik Analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4(1), 13-19.
- Jaharah A. G., Wahid S. W., Che Hassan C. H., Nuawi M. Z., Ab Rahman M. N. (2009). The Effect of Uncoated Carbide Tool Geometries in Turning AISI 1045 Using Finite Element Analysis. *European Journal of Scientific Research*, 28, 271.
- Komvopoulos, K., Erpenbeck, S.A. (1991). Finite Element of Ortogonal Metal Cutting. *J. Eng. for Industry*, 113, 253–267.
- Kose E., Kurt A., Seker U. (2008). The effects of The feed Rate on The Cutting Tools Tresses in Machining of Inconel 718. *J. Mater. Pro. Techno*, 196 (1-3), 165-173.
- Kurt A. (2009). Modelling of the Cutting Tools Tresses in Machining of Inconel 718 Using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 36 (6), 9645-9657.
- Kurt, A., (2006). Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması. Doktora Tezi, *G.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Lorentzon J., Järvstrat N., Josefson B.L. (2009). Modelling Chip Formation of Alloy 718. *J. Mater. Pro. Techno*, 209, 4645-4653.
- Monaghan, J., MacGinley, T. (1999). Modelling the Orthogonal Machining Process Using Coated Carbide Cutting Tools. *Computational Materials Science*, 16 (1-4), 275-284.
- Mori, L. F., Lee, S., Xue Z. Y., Vaziri A., Queheillalt D. T., Dharmasena, K. P., Wadley, H. N. G., Hutchinson, J. W., Espinosa, H. D. (2007). Deformation and Fracture Modes of Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(10).
- Ocana, J.L., Morales, M., Molpeceres, C., García, O., Porro, J.A., García-Ballester, J.J. (2008). Numerical Modelling and Experimental Characterization of Short Pulse Laser Microforming of Thin Metal Sheets. Multi-Material Micro Manufacture, Cardiff University, Cardiff, UK. Published by Whittles Publishing Ltd. All rights reserved.
- Özel T. (2009). Computational Modelling of 3D turning: Influence of Edge micro-Geometry on Forces, Stresses, Friction and Tool Wear in PCBN Tooling. *J. Mater. Pro. Techno*, 209 (11), 5167-5177.
- Özel T., Altan T. (2000). Process Simulation Using Finite Element Method - Prediction of Cutting Forces, Tools Stresses and Temperatures in High-Speed Flat End Milling. *Int. J. Machine Tools and Manuf*, 40 (5), 713-738.
- Özel, T., Zeren, E. (2004). Determination of Work Material Flow Stress and Friction for FEA of Machining Using Orthogonal Cutting Tests. *J. Mater. Pro. Techno*, 153-154 (10), 1019-1025.

- Şeker, U. (1997). Takım Tasarımı Ders Notları. *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi*, Ankara.
- Tekaslan Ö., Gerger N., Günay M., Şeker U. (2007). AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Titanyum Karbür Kaplamalı Kesici Takım İle Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 135-144.
- Ucun, İ., Aslantas, K. (2011). Numerical Simulation of Orthogonal Machining Process Using Multilayer and Single-Layer Coated Tools. *Int J AdvManufTechnol*, 54, 899.
- Uhlmann, E., Schulenburg, M. G., Zettier, R. (2007). Finite Element Modeling and Cutting Simulation of Incone 1718. *CIRP Annals - ManufacturingTechnology*, 56 (1), 61-64.

Bölüm 12

MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ

KULLANILARAK EPİLEPSİ TEŞHİSİ



Mustafa ÇALIŞKAN¹

Hasan BADEM²

1 Mustafa ÇALIŞKAN, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enformatik A.B.D. Kahramanmaraş, Türkiye. mustafa7536@gmail.com

2 Dr. Öğr. Üyesi Hasan BADEM, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, hbadem@ksu.edu.tr

1. GİRİŞ

Epilepsi, her yaştan insanı etkileyen beyinde ortaya çıkan nörolojik bir hastalıktır (Andrzejak ve ark., 2001). Dünya genelinde yaklaşık 50 milyon insan epilepsi hastasıdır. Bu veri epilepsi hastalığının, dünyanın en yaygın hastalıklarından biri olduğunu göstermektedir. Epilepsili kişilerin yaklaşık %80'i düşük ve orta gelirli ülkelerde yaşamaktadır. Epilepsi ile yaşayan insanların %70'i, uygun şekilde teşhis ve tedavi edilirse nöbet geçirmeden yaşayabileceği tahmin edilmektedir. Epilepsili kişilerde erken ölüm riski, genel popülasyondan üç kat daha fazladır. Düşük gelirli ülkelerde yaşayan epilepsili kişilerin dörtte üçü ihtiyaç duydukları tedaviyi alamamaktadır (WHO, 2019). Bu sebeplerden dolayı epilepsi teşhisi ve tedavisi ciddi önem arz etmektedir. Ancak epilepsi tedavisi ve teşhisi için tam donanımlı hastanelere ihtiyaç vardır. Bunun yanında hastalığın teşhisini yapabilecek eğitimli uzmanların olması gerekmektedir. Ancak bu tarz imkanlara dünya genelinde her insan ulaşamamaktadır. Bu sebeple alternatif teşhis ve takip yöntemleri son derece önemlidir.

Günümüzde makine öğrenme teknikleri kullanılarak birçok hastalığın teşhisi ve takibi yapılmaktadır (Caliskan ve ark., 2017; Vishwanath ve ark., 2020; Kobler ve ark., 2020; Ieracitano ve ark., 2020; Buettner, Rieg, ve Frick, 2020; Mardini ve ark., 2020). Çünkü bu yöntemler, kolay uygulanabilmeleri ve hızlı sonuç üretmeleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Diğer hastalıklar gibi epilepsi teşhisi de makine öğrenme algoritmaları yardımıyla yapılabilir. Bu alanda yapılan uygulamalar, genel olarak makine öğrenme yöntemleri ile bir veri seti üzerinden hastalıklı ve sağlıklı bireyin sınıflandırılması sürecini içermektedir (Ieracitano ve ark., 2020).

Bu çalışmada EEG sinyalleri yardımıyla elde edilen dalga formları üzerinden, hastalıklı veya sağlıklı olan bireyleri sınıflandıran model önerilmiştir. Genel olarak EEG sinyalleri son derece karmaşık yapıdadır. EEG sinyalleri hem çok kanallı hem de son derece gürültülü sinyallerdir. Bu nedenle, EEG sinyallerin sınıflandırılması üç ana temel işlemden oluşmaktadır. İlk işlem, sinyalin gürültüden arındırılmasıdır. Bu işlemde sinyal uygun bir filtre yardımıyla gürültüden arındırılır. Bu gürültüler genellikle şebeke gürültüsü, elektronik cihazlardan kaynaklanan gürültüler ve girişim olarak sayılabilir. Bir sonraki işlemde sinyal uygun pencerelere ayrılır. Her bir pencerenin içerisinde ne kadar sinyal örneği olması gerektiği ve bu pencerelerin ne kadar kaydırılması gerektiği belirlenmelidir (Vishwanath ve ark., 2020; Kobler ve ark., 2020; Ieracitano ve ark., 2020).

Son işlemde ise her bir pencereden öznitelik çıkarma işlemidir. Bu işlem son derece önemlidir. Çünkü çıkarılan öznitelikler doğrudan

sınıflandırıcının performansını etkilemektedir (Andrzejak ve ark., 2001). EEG sinyalleri için bir çok öznelik çıkarma yöntemi önerilmiştir. EEG sinyal işlemede en son aşama ise sınıflandırma aşamasıdır. Bu aşamada elde edilen öznelikler bir sınıflandırıcıya gönderilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. Bu çalışmada EEG sinyallerinin sınıflandırılması için en uygun sınıflandırıcının bulunması amaçlanmaktadır.

Bu amaç için

- Lojistik Regresyon (LR, Logistic Regression) (Tomioka, Aihara ve Muller, 2007),
- Lineer Diskriminant Analizi (LDA, Linear Discriminant Analysis) (Mitchell, 1997; Bishop 2006),
- Karar ağacı (CART, Decision Tree Classifier) (Safavian ve Landgrebe, 1991),
- En yakın komşu algoritması (KNN, K Neighbors Classifier) (Peterson, 2009),
- Navie Bayes (NB, Navie Bayes) (Mitchell, 1997; Bishop, 2006),
- Destek vektör makineleri (SVM, Support Vector Machine) (Suykens ve Vandewalle, 1999),
- Adaboost Sınıflandırıcı (AB, Adaboost Classifier) (Hastie ve ark., 2009)],
- Gradyan Arttırıcı Sınıflandırıcı (GBM, Gradient Boosting Classifier) (Friedman, 2002),
- Rasgele Orman Sınıflandırıcısı (RF, Random Forest Classifier) (Safavain ve Landgrebe, 1991)
- Ekstra Ağaç Sınıflandırıcısı (ET, Extra Trees Classifier) (Mitchell, 1997; Bishop, 2006; Safavain ve Landgrebe, 1991),

olmak üzere 10 farklı makine öğrenmesi sınıflandırıcısının performansı ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Kitap bölümünün ikinci kısmında veri seti, sınıflandırma, sınıflandırıcıların değerlendirilme işlemi ve önerilen yöntem bulunmaktadır. Üçüncü bölümde ise, makine öğrenmesi yöntemlerinden elde edilen karşılaştırmalı deneysel sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca, kullanılan veri seti üzerinden elde edilmiş sonuçlar, literatür ile karşılaştırılmıştır. Sonuç ve öneriler ile kitap bölümü tamamlanmıştır.

2. YÖNTEM

Makine öğrenmesi yöntemleri; hesaplamalı biyoloji, doğal dil işleme, örüntü anlamlandırma, sinyal sınıflandırma vb. birçok alanda başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, kompleks sınıflandırma problemlerini çözmek için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır (Caliskan, ve

ark. 2017). Makine öğrenmesi yöntemleri, problemin matematiksel modeline ihtiyaç duymadan, giriş verisi ile çıkış verisi arasında ki ilişkiyi ve bağlantıları öğrenmektedir. Bu özelliği nedeniyle makine öğrenmesi yöntemleri, siyah-kutu yöntemler olarak tanımlanmaktadırlar.

Literatürde, karar ağacı (Decision Tree- DT), KNN, SVM başta olmak üzere önerilmiş pek çok makine öğrenmesi yöntemi bulunmaktadır. Her bir yöntemin doğası gereği kendine özgü bazı üstünlük ve sınırlılıkları bulunmaktadır. Fakat, probleme özgü etkin olan makine öğrenmesi yönteminin seçilebilmesi için herhangi bir analitik bir yaklaşım bulunmamaktadır. Uzmanın deneyimlerine göre, karar verilmektedir. (Caliskan ve ark. 2017).

Bu çalışmada, EEG sinyalleri üzerinden epilepsi teşhisi; önileme, işlem ve sınıflandırma aşamalarından oluşan bir model önerilmektedir. Önilemede pencereleme işlemleri gerçekleştirilmektedir. EEG sinyallerinin pencerelenmesi neticesinde elde edilen veriler makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

2.1 Veri Seti

Bu çalışmada, UCI makine öğrenmesi deposunda erişime açılan “*Epilepsi Nöbet Tanıma (Epileptic Seizure Recognition Data Set)*” veri seti kullanılmıştır. (Dua ve Graff, 2019). Çalışmamızda kullanılan veri seti, epilepsili hasta verileri ve sağlıklı kişilerin verilerinden olmak üzere toplam 500 kişinin beyin sinyallerinden oluşmaktadır. Veri setinde, her biri 100 dosya içeren 5 farklı klasörden oluşmaktadır. (Andrzejak ve ark., 2001). Her dosya tek bir kişiyi temsil edecek şekilde organize edilmiştir. Her dosyada 23,6 saniyelik beyin aktivitesi kaydı vardır. Bu EEG sinyalleri 4097 veri noktasına sahip zaman serisidir. Her veri noktası, EEG kaydının farklı bir zamandaki değeridir. Yani her biri 23,6 saniye boyunca 4097 veri noktasına sahip olan toplamda 500 kişi vardır. Bu orijinal veri seti her 4097 veri noktasını 23 parçaya bölünüp ve karıştırılmıştır. Her parça 1 saniye boyunca 178 veri noktası içerecek şekilde ve her veri noktası EEG kaydının farklı bir zamandaki değerini gösterecek şekilde pencerelere ayrılmıştır (Dua ve Graff, 2019). Veri setinde, $23 \times 500 = 11500$ parça örnek (satır), her örnek ise 1 saniye boyunca 178 öznitelik içermektedir. Buna karşılık her bir örnek epilepsi ya da normal olarak etiketlenen çıkış verisinden oluşmaktadır.

2.2. Sınıflandırma

Bu çalışmada, EEG sinyallerinden epilepsi teşhisinde en etkin makine öğrenmesi yönteminin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç için

bölüm 2.1’de sunulan veri seti üzerinden LR, LDA, CART, KNN, NB, SVM, AB, GBM, RF ve ET makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin giriş verisi aşağıda gibi oluşturulmuştur.

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{x}_3 \ \dots \ \mathbf{x}_n] \quad (1)$$

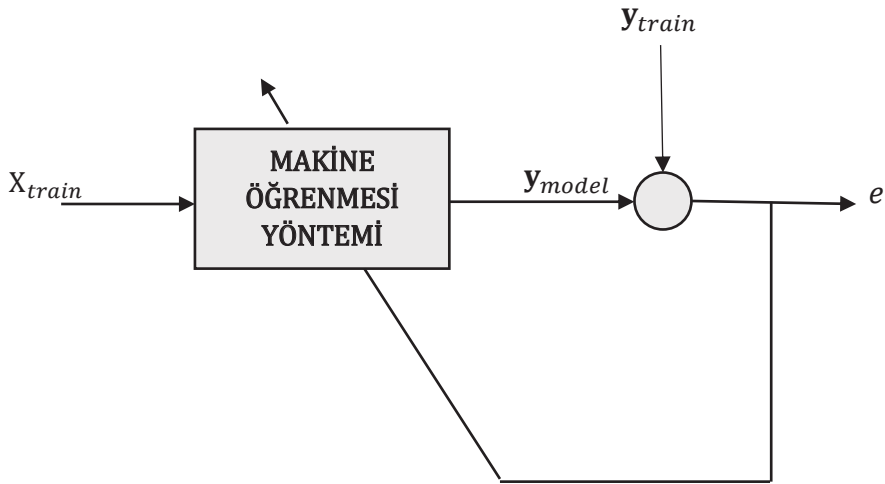
Burada $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3 \dots \mathbf{x}_n$ öznelik vektörlerine karşılık gelmektedir. Sistemin çıkışı ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_m]^T \quad (2)$$

Burada $y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_m$ her bir giriş verisi için etiketlenmiş çıkış verisine karşılık gelmektedir.

Makine öğrenmesi yöntemlerinde probleme uygun sistemin elde edilebilmesi (öğretilmesi) için eğitim verisi $\{\mathbf{X}_{train}, \mathbf{y}_{train}\}$ ve test verisi $\{\mathbf{X}_{test}, \mathbf{y}_{test}\}$ olmak üzere veriyi ($\mathbf{X}$ ve $\mathbf{y}$) iki parçaya ayırılmaktadır.

Sınıflandırma işlemleri, sistemin eğitilmesi ve test edilmesi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Eğitim süreci, Şekil 1’de görülmektedir. Eğitim işleminde $\mathbf{y}_{model}$ ve $\mathbf{y}_{train}$ arasındaki toplam hata (e) azaltılmaya çalışılmaktadır. $\mathbf{y}_{model}$ sistemin çıkışını ifade etmektedir. Şekil 2’de ise, eğitilmiş sistemin performansını ölçmek için kullanılan süreç görülmektedir. Eğitilmiş model için giriş verisi üzerinden sistemin çıkışı ($\mathbf{y}_{predicted}$) ile ilgili verinin etiketi ($\mathbf{y}_{test}$) arasındaki ilişki sistemin doğruluğu olarak tanımlanmaktadır (Mitchell, 1997; Bishop, 2006).



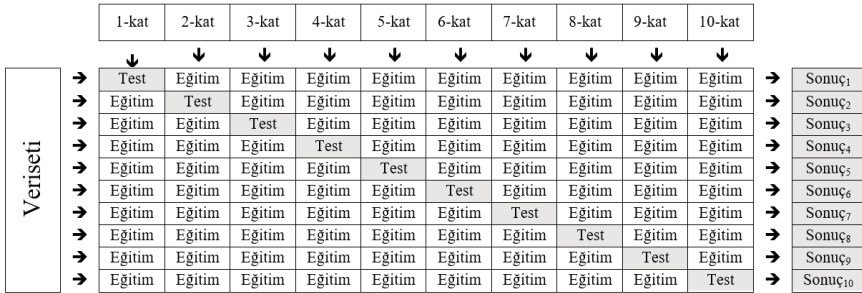
Şekil 1. Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Eğitim Süreci



Şekil 2. Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Test Süreci

2.3 Sınıflandırıcıların Değerlendirilmesi

Bir sınıflandırıcının performans ölçümü, son derece önemlidir. Veri setinin bir kısmı eğitim bir diğer kısmı test amacıyla kullanılır. Burada, model eğitim setiyle eğitilir başka bir değişle iç parametreleri uygun biçimde ayarlanır. Eğitilmiş modelin başarımı test verisiyle sınanır. Böylece önerilen model daha önce karşılaşmadığı verilerle test edilmiş olur. Bunun için veri seti genellikle %30 test %70 eğitim verisi olacak şekilde iki kısma ayrılır. Ancak bu yaklaşımın bazı dezavantajları vardır. Veri setinde koşulları zorlaştıran örnekler eğitim setine denk gelirse bu modelin performansını olduğundan daha iyi gösterebilir. Öte yandan tersi durumda ise modelin performansı olduğundan daha kötü görünebilir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için n-kat çapraz doğrulama tekniği kullanılmaktadır. 10-kat çapraz doğrulama tekniğinde uygulanan süreç, Şekil 2.'de sunulmuştur. Bu süreçte, veri seti on eşit parçaya bölünür. Parçalardan dokuz tanesi eğitim için kullanılırken, geri kalan parça ise test amacıyla kullanılmaktadır. Bu işlem her bir parça en az bir kere test amacıyla kullanılına kadar yani 10 kere tekrar edilir. Sistemin doğruluk değeri, elde edilen sonuçlar üzerinden eşitlik 1'e göre hesaplanmaktadır. (Çil ve Caliskan, 2020).

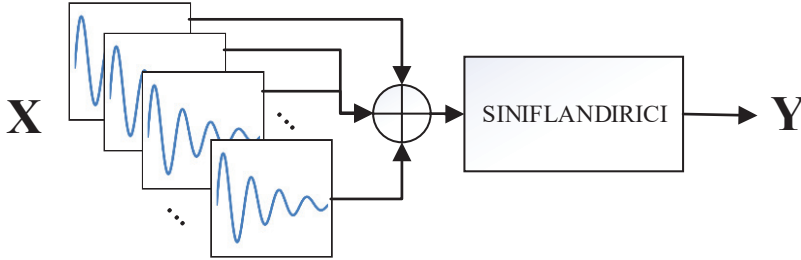


Şekil 2. 10-Kat Çapraz Doğrulama Tekniği

$$Dogruluk = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (sonuc_i) \quad (2)$$

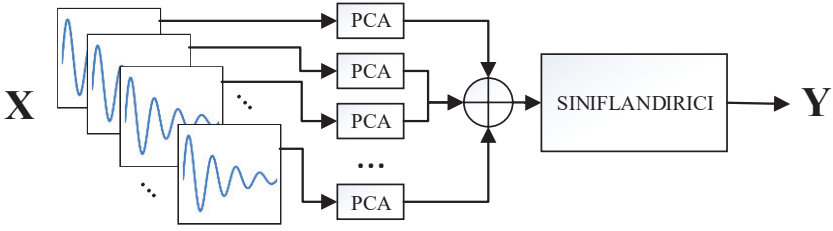
2.4. Önerilen Yöntem

Çalışmada kullanılan veri setinde, Andrzejak RG ve ark. tarafından ham EEG sinyalleri 1 sn lik pencereleme işlemine tabi tutulmuş, her pencerelemekten 178 adet noktalı ham sinyal elde edilmiştir. Araştırmacılar elde edilen 178 ham sinyal bilgisine karşılık gelen epilepsi bilgisini etiketlemiştir. Bu çalışmada, araştırmacıların paylaştığı veri doğrudan öznitelik olarak kullanılmıştır. Şekil 3’de epilepsi hastalığının EEG sinyalleri üzerinden sınıflandırılması amacıyla önerdiğimiz sistemin genel blok şeması bulunmaktadır. Önerilen sistemde ham EEG sinyal bilgisi doğrudan sınıflandırıcıya giriş olarak uygulanmaktadır. Sınıflandırıcı olarak, LR, LDA, CART, KNN, NB, SVM, AB, GBM, RF ve ET 10 farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3. Epilepsi Hastalığının Teşhisi için Önerilen Sistem

Veri sınıflandırma problemleri için veri boyutu sistemin başarımını etkileyen en önemli parametrelerden birisi olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, 178 adet öznitelik üzerinden veri sınıflandırması gerçekleştirilmektedir. Bu veri boyutu, makine öğrenmesi yöntemlerinin başarımı için oldukça yüksektir. Bu problemin üstesinden gelmek için literatürde temel bileşen analizi (principal component analysis-PCA) yöntemi kullanılmaktadır (Wold, Esbensen ve Geladi, 1987; Howley ve ark. 2005, Cao ve ark., 2018, Badem 2019). EEG sinyallerinden epilepsi teşhisinde veri boyutunun analiz edilmesi için blok şeması Şekil 4’ de verilen sistem önerilmiştir.

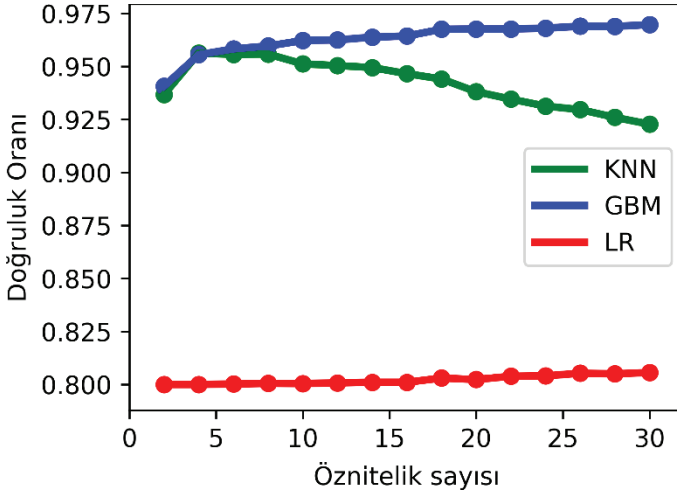


Şekil 4. Boyut indirgeme ile epilepsi hastalığının teşhisi için önerilen sistem

3. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada LR, LDA, CART, KNN, NB, SVM, AB, GBM, RF ve ET olmak üzere 10 farklı sınıflandırıcı kullanılarak epilepsi teşhisi yapılmıştır. Tüm yöntemler 10 kat çapraz doğrulama tekniği kullanılarak koşturulmuştur. Öznitelik sayısının 178’den 2,4,6,...,30 olacak şekilde 15 farklı boyutta azaltılmış özniteliklere sahip veriler üzerinden elde edilen sonuçlar, veri boyutu azaltılmadan (178 öznitelik) elde edilen sonuçlar ve diğer literatür sonuçları ile karşılaştırma olmak üzere deneysel kısım üç alt bölümden oluşmaktadır.

Farklı veri boyutların sınıflandırma başarımına etkisini gözlemlemek LR, KNN ve GBM yöntemleri seçilmiştir. İndirgenen öznitelikler üzerinden, bu yöntemler için 10 kat çapraz doğrulama tekniği ile elde edilen doğruluk değerleri Şekil 5’te görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde. GBM’nin performansının artan öznitelik sayısı ile birlikte arttığı gözlenmiştir. Ancak KNN’nin performansında belli bir seviyeye kadar artışı sonrasında ise azaldığı görülmektedir. Bu durum KNN algoritmasının artan öznitelik sayısı ile yeterince baş edemediğini göstermektedir. Aynı zamanda, LR yönteminin başarımı ise veri boyutundan etkilenmemiştir. Buna ek olarak, veri setinde epilepsi hastaları ile normal hastalar doğru teşhis etmesi arasındaki başarımı dikkate alındığında bu algoritmanın öznitelik sayısından bağımsız son derece kötü bir performans sergilediği söylenebilir.



Şekil 5. Artan Öznitelik Sayısına Karşın Değişen Performans

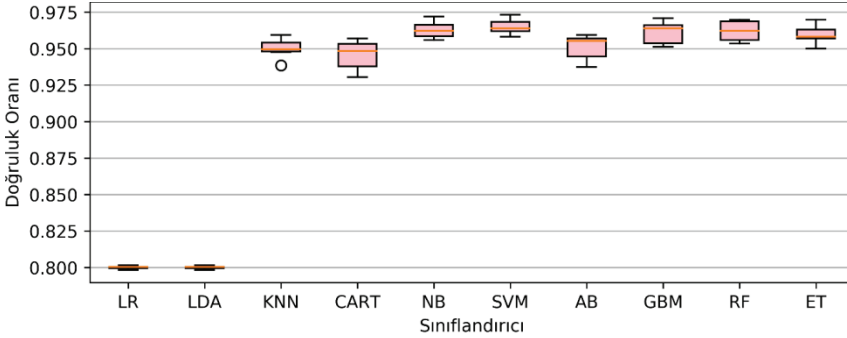
Makine öğrenmesi yöntemlerinde veri boyutu arttıkça hesaplama maliyeti de artmaktadır. Bu nedenle Şekil 5 incelendiğinde öznitelik sayısının sekizden fazla olduğu durumda sistem başarımının veri boyutuna oranla artmadığı gözlenmektedir. Bu gerekçeyle öznitelik sayısı sekiz ile sınırlandırılarak LR, LDA, CART, KNN, NB, SVM, AB, GBM, RF ve ET yöntemlerine ait deneysel sonuçlar elde edilmiş ve Tablo 1’de sunulmuştur. Öznitelik sayısı sekize düşürüldüğünde en iyi performansın SVM ait olduğu görülmektedir. Ancak SVM’nin yanında NB, ET, RF ve GBM de oldukça iyi bir performansa sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, Tablo 1’de standart sapma bilgileri de mevcuttur. LR ve LDA yöntemlerinin doğruluk değerleri düşük olduğundan, bu yöntemler dikkate alınmadığında standart sapma değerleri bakımında en düşük değerin ET yöntemine ait olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan Makine öğrenmesi Sınıflandırıcıların Doğruluk Oranları

Yöntem	Doğruluk Oranı	Standart Sapma
LR	0,800522	0,000696
LDA	0,800609	0,000679
KNN:	0,955652	0,008599
CART	0,942609	0,006758
NB	0,961478	0,003458
SVM	0,965739	0,004522
AB	0,952783	0,004261
GBM	0,960348	0,004488
RF	0,961043	0,004256
ET	0,961217	0,003281

Bu sonuçlara ek olarak, kullanılan tüm yöntemlerin 10 kat- çapraz doğrulama ile elde edilen sonuçlar Şekil 6'da kutu grafiği olarak verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde, SVM'nin en iyi performansa sahip olduğu görülmektedir.

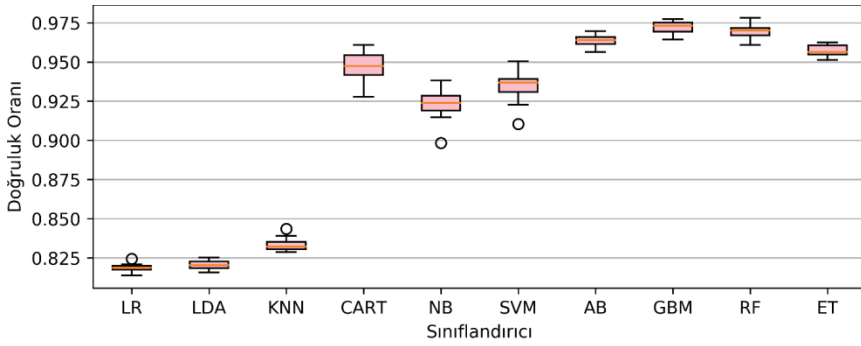
Deneyssel kısmın ikinci bölümünde ise, PCA ile öznelilik boyutu azaltılmadan deneyssel sonuçlar elde edilmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde, GBM yönteminin başarısını yaklaşık %1,1 kadar artırarak en iyi sınıflandırıcı olduğu görülmektedir. Sonuçlara göre öznelilik sayının artması SVM yönteminin başarısının düşmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum özellikle KNN'de çok daha çarpıcıdır. KNN göz önüne alındığında sınıflandırma performansında yaklaşık %12 bir azalış söz konusudur. KNN algoritmasının az sayıda özneliliğe sahip veri setlerinde daha başarılı olduğu gerçeği düşünülürse bu şaşırtıcı bir sonuç değildir. Öte yandan deneyssel sonuçların daha iyi anlaşılması açısından kutu grafikleri Şekil 7'de sunulmuştur. Buna göre GBM'nin en iyi bir sınıflandırma performansına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Sınıflandırıcıların Kutu Grafikleri

Tablo 2. Sınıflandırıcıların doğruluk oranları (Boyut Azaltmadan)

Yöntem	Doğruluk Oranı	Standart Sapma
LR	0,81887	0,00261
LDA	0,820522	0,002941
KNN	0,833478	0,004523
CART	0,946174	0,010047
NB	0,922957	0,010855
SVM	0,934261	0,010594
AB	0,963478	0,003985
GBM	0,971739	0,00437
RF	0,96913	0,004877
ET	0,957217	0,003706



Şekil 7. Sınıflandırıcıların Kutu Grafikleri (Boyut Azaltmadan)

Önerilen yöntemin literatür ile karşılaştırılması için Tablo 2 deki en iyi sınıflandırma başarımı veren GBM yöntemi seçilmiştir. GBM yönteminin başarımı ile literatürden derlenen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 3’de sunulmuştur. Tablo 3 incelendiğinde, elde edilen %97,2’lik doğruluk oranı, RUSBoost ve AdaBoost yöntemlerinden nispeten geride kalırken, diğer sınıflandırıcılarla kıyaslandığında literatüre göre daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Hassan ve ark., ham EEG sinyalleri üzerinde CEEMDAN metodunu geliştirerek filtre ön işlemi gerçekleştirmişlerdir. Filtrelenmiş veriyi RUSBoost ve AdaBoost yöntemleriyle sınıflanmışlardır. Bu ön işlemenin sistem performansını artırdığı görülmektedir. Fakat, ön işlemenin hesaplama maliyeti dikkate alındığında %2 lik farkın ihmal edilebileceği düşünülmektedir.

Tablo 3. En İyi Sınıflandırıcının Literatürdeki Diğer Sınıflandırıcılarla Karşılaştırılması

Yöntem	Doğruluk Yüzdesi	Veri Bölme
GBM	97,2	10-Kat Çapraz Doğrulama
Naive Bayes (Hassan ve ark, 2020)	92,4	10-Kat Çapraz Doğrulama
DA (Linear) (Hassan ve ark, 2020)	95,2	10-Kat Çapraz Doğrulama
DA (Quadratic) (Hassan ve ark, 2020)	93,2	10-Kat Çapraz Doğrulama
DA (Mahalanobis) (Hassan ve ark, 2020)	95,6	10-Kat Çapraz Doğrulama
ANN (Hassan ve ark, 2020)	96,6	10-Kat Çapraz Doğrulama
kNN (Hassan ve ark, 2020)	94,4	10-Kat Çapraz

		Doğrulama
ELM (Hassan ve ark, 2020)	83	10-Kat Çapraz Doğrulama
LS-SVM (Hassan ve ark, 2020)	83,6	10-Kat Çapraz Doğrulama
RUSBoost (Hassan ve ark, 2020)	98,4	10-Kat Çapraz Doğrulama
Adabust (Hassan ve ark, 2020)	99,2	10-Kat Çapraz Doğrulama
DNN (M1) (Peiris, 2021)	90	Eğitim %75 Test %75
DNN (M1) (Peiris, 2021)	85	Eğitim %75 Test %75
ME (Subaşı, 2007)	94,5	Eğitim %62,5 Test %37,5
MLPNN (Subaşı, 2007)	93,2	Eğitim %62,5 Test %37,5
RNN (Guler, Ubeyli, Guler 2006)	96,8	Eğitim %50 Test %50
ANFIS classifier (Kanathal 2005)	95	Eğitim %60 Test %40

SONUÇ

Bu çalışmada, EEG sinyalleri üzerinden epilepsi hastalığının teşhisinde makine öğrenmesi yöntemlerinin başarımının analizi amaçlanmıştır. Literatürde yaygın kullanılan 10 farklı makine öğrenmesi yöntemleri üzerinden karşılaştırmalı olarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Elde Deneysel sonuçlar incelendiğinde göre en başarılı makine öğrenme algoritmasının GBM olduğu görülmüştür. Ayrıca, veri boyut azaltma yöntemi olan PCA'nin sistemin genel başarımına etkisi de incelenmiştir. PCA ile veri boyut azaltma işleminin GBM'nin performansında azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Epilepsi hastalığının teşhisinde, EEG sinyallerinin etkinliği ve ham veri yerine öznitelik çıkarma veya öznitelik seçme yöntemlerinin sistem başarımına etkisi üzerine yeni çalışmalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Andrzejak, R. G., Lehnertz, K., Mormann, F., Rieke, C., David, P., & Elger, C. E. (2001). Indications of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state. *Physical Review E*, 64(6), 061907.
- Badem, H. (2019). Parkinson Hastalığının Ses Sinyalleri Üzerinden Makine Öğrenmesi Teknikleri İle Tanımlanması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 630-637.
- Bishop, C. M. (2006). Pattern recognition and machine learning. springer.
- Buettner, R., Rieg, T., & Frick, J. (2020). Machine Learning based Diagnosis of Diseases Using the Unfolded EEG Spectra: Towards an Intelligent Software Sensor. *In Information Systems and Neuroscience* (pp. 165-172). Springer, Cham.
- Cao, W., Czarnek, N., Shan, J., & Li, L. (2018). Microaneurysm detection using principal component analysis and machine learning methods. *IEEE transactions on nanobioscience*, 17(3), 191-198.
- Caliskan, A., Yuksel, M. E., Badem, H., & Basturk, A. (2017). A deep neural network classifier for decoding human brain activity based on magnetoencephalography. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 23(2), 63-67.
- Çil, Z. A., & Caliskan, A. (2020). Machine Learning Applications for Classification Emergency and Non-Emergency Patients. *In Computational Intelligence and Soft Computing Applications in Healthcare Management Science* (pp. 104-120). IGI Global.
- Dua, D. and Graff, C. (2019). UCI Machine Learning Repository [<http://archive.ics.uci.edu/ml>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. Mitchell, T. M. (1997). Machine learning.
- Friedman, J. H. (2002). Stochastic gradient boosting. *Computational statistics & data analysis*, 38(4), 367-378.
- Güler, N. F., Übeyli, E. D., & Güler, I. (2005). Recurrent neural networks employing Lyapunov exponents for EEG signals classification. *Expert systems with applications*, 29(3), 506-514.
- Hassan, A. R., Subasi, A., & Zhang, Y. (2020). Epilepsy seizure detection using complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. *Knowledge-Based Systems*, 191, 105333.
- Hastie, T., Rosset, S., Zhu, J., & Zou, H. (2009). Multi-class adaboost , *Statistics and its Interface* 2(3), 349-360.

- Howley, T., Madden, M. G., O'Connell, M. L., & Ryder, A. G. (2005, December). The effect of principal component analysis on machine learning accuracy with high dimensional spectral data. *In International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence* (pp. 209-222). Springer, London.
- Ieracitano, C., Mammone, N., Hussain, A., & Morabito, F. C. (2020). A novel multi-modal machine learning based approach for automatic classification of EEG recordings in dementia. *Neural Networks*, 123, 176-190.
- Kannathal, N., Choo, M. L., Acharya, U. R., & Sadasivan, P. K. (2005). Entropies for detection of epilepsy in EEG. *Computer Methods And Programs In Biomedicine*, 80(3), 187-194.
- Kobler, R. J., Almeida, I., Sburlea, A. I., & Müller-Putz, G. R. (2020). Using machine learning to reveal the population vector from EEG signals. *Journal of neural engineering*, 17(2), 026002.
- Mardini, W., Yassein, M. M. B., Al-Rawashdeh, R., Aljawarneh, S., Khamayseh, Y., & Meqdadi, O. (2020). Enhanced Detection of Epileptic Seizure Using EEG Signals in Combination With Machine Learning Classifiers. *IEEE Access*, 8, 24046-24055.
- Safavian, S. R., & Landgrebe, D. (1991). A survey of decision tree classifier methodology. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 21(3), 660-674.
- Subasi, A. (2007). EEG signal classification using wavelet feature extraction and a mixture of expert model. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1084-1093.
- Suykens, J. A., & Vandewalle, J. (1999). Least squares support vector machine classifiers. *Neural processing letters*, 9(3), 293-300.
- Tomioka, R., Aihara, K., & Muller, K. R. (2007). Logistic regression for single trial EEG classification. *In Advances in neural information processing systems* (pp. 1377-1384).
- Peterson, L. E. (2009). K-nearest neighbor. *Scholarpedia*, 4(2), 1883.
- Vishwanath, M., Jafarlou, S., Shin, I., Lim, M. M., Dutt, N., Rahmani, A. M., & Cao, H. (2020). Investigation of machine learning approaches for traumatic brain injury classification via EEG assessment in mice. *Sensors*, 20(7), 2027.
- World Health Organization. (2019). Epilepsy: a public health imperative. World Health Organization.
- Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 2(1-3), 37-52.

Bölüm 13

ÇALIŞAN DURUŞLARININ REBA ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ İLE ANALİZİ



Mehmet Ali ZENGİN¹

Ömer ASAL²

¹ Öğr. Gör. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza MYO, İş Sağlığı ve Güvenliği, Samsun, Türkiye, mehmetali.zengin@omu.edu.tr, 0000-0001-6718-3364

² Dr. Öğr. Üyesi, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Ankara, Türkiye, omerasal@gazi.edu.tr, 0000-0002-6339-9202

1. GİRİŞ

Günümüz çalışma hayatında iş yoğunluğunun ve çalışana verilen önemin artması işyerindeki ergonomi çalışmalarının da önemini arttırmaktadır. En genel anlamı ile ergonomi işin çalışana uydurulması olarak tanımlanabilir. Bu nedenle ergonomi uygunluk, uyum olarak kabul edilir. Çalışanlarla, kullandıkları eşyalar/aletler, yaptıkları işler, işleri yaptıkları ortamlar gibi çalışma hayatının içinde bulunan çeşitli ortamlar arasında uygunluk olmasıdır. Böylece kişiler yaptıkları görevler sırasında daha rahat olurlar ve işlerini hem daha kolay hem de daha hızlı bir şekilde yaparlar. Bu durum hataları ve dolayısıyla iş kazalarını ve meslek hastalıklarını da azaltır. Ergonomik çalışmalarda sadece fiziksel uygunluk değil aynı zamanda psikolojik vb. gibi çeşitli bakımlardan da uygunluk aranmaktadır. Bu sebeple ergonomiye insan faktörleri de denebilir (Güler ve Akın, 2006).

Ergonomi çalışmaları sadece iş hayatında değil insan faaliyetlerinin olduğu tüm alanlarda (ev, sosyal faaliyet alanları vb.) önem arz etmektedir. İşyeri dışındaki yaşam alanlarının ergonomik olarak tasarlanmaması işyerindeki faaliyetler nedeni ile meydana gelebilecek kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını daha da arttırmaktadır. Özellikle günümüz çalışma hayatının ve boş zamanlardaki sosyal aktivitelerin (Online oyun vb.) ayrılmaz bir parçası haline gelen bilgisayarın kullanımına dikkat edilmesi gerekmektedir. Uzun süre benzer pozisyonda durağan bir çalışma yada aktivite yapan çalışanların kas-iskelet sistemlerinde rahatsızlıklar meydana gelebilir (Akıncı, vd., 2018).

Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları(KİSR) dünyada özellikle sanayileşmiş ülke çalışanlarında yaygın biçimde görülmektedir (Chiasson, vd., 2012). Genel olarak çalışma hayatındaki riskler analiz edildiğinde kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ile ilgili problemlerin diğer risklere göre daha fazla olduğu görülmektedir (Buckle ve Devereux, 2002). Güney Kore’de 2011 yılında yapılan çalışmalar, uzun süreli ve yanlış çalışma postüründe gerçekleştirilen çalışmaların çalışanlarda meydana gelen kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının temel nedenleri olduğunu ortaya koymuştur (Choi, vd., 2014). Finlandiya’da 6.500 kişinin yer aldığı bir çalışmada kişilerin %35.1’de kronik ağrılar tespit edilmiştir (Cımbız, vd., 2007). Benzer şekilde, Avrupa’daki çalışanların yaklaşık % 25’inde kas ve bel ağrıları rapor edilmiştir. Bu yakınmaların temel sebepleri, malzemelerin elle yüklenmesi-boşaltılması, sıklıkla vücudun öne doğru eğilmesi ve sağa-sola rotasyon, tüm vücudu etkileyen titreşimler ve diğer ağır fiziksel işlerdir. Amerika’da çalışma hayatındaki

22.4 milyon kişi sadece bel bölgesinde olan ağrıdan yakınmaktadır (Dıraçoğlu, 2006). Türkiye’de de inşaat sektöründe çalışanlar ağırlıklı olarak bel bölgesindeki yakınmalardan şikayet etmektedirler (Zengin ve Asal, 2020). İşe bağlı olarak gelişen bu rahatsızlıkların % 50’sini işle ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları oluşturmaktadır ve günümüzde bu rahatsızlıklardan dolayı bir sağlık kurumuna başvurma durumu açısından 3. sıraya yükselmiştir (Dilek, vd., 2016).

Türkiye’de SGK tarafından 2019 yılına ait yayımlanan kaza/hastalık raporuna göre genel olarak meslek hastalıklarının %6,6’sı (M Grubu), iş kazalarının ise %2’si kas iskelet sistemi yakınmaları hakkındadır. Dünyada kas iskelet sistemi rahatsızlıkları (KİSR) ile ilgili farkındalık çok daha yüksek düzeyde olmasına rağmen ülkemizde bu konunun ciddiyeti yeteri kadar anlaşılmaması ve bu alanda yeterli çalışma yapılmaması çalışmanın bu alanda yapılmasının temel nedenini oluşturmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları

İşyerlerinde meydana gelen mesleki kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını ilk olarak işyeri hekimlerinin babası olarak sayılan İtalyan hekim Bernardino Ramazzini tarafından dile getirilmiştir. Ramazzini, çalışanlarda meydana gelen bu yakınmaların temel sebebinin yanlış postür ile uzun süre gerçekleştirilen görevlerden kaynaklı olduğunu belirtmiştir. Yanlış postür ile uzun süre yapılan çalışmalar, çalışanların farklı vücut bölgelerini (Bel, boyun, omuz, bilek, bacak, ayak vd.) farklı derecelerde etkilemektedir. Kas iskelet sistemine ait yakınmalar kısa dönemde dinlenmeler vb. basit uygulamalar ile geçebilirken uzun dönemde kalıcı ve şiddetli ağrılar şeklinde seyredebilir. Meydana gelen yakınmalar çalışanın iş verimini etkileyeceği gibi yaşam kalitesini de önemli ölçüde düşürecektir. Bu durum da hem işyeri, hem çalışan hem de devlet için kayıplara yol açabilir (Silverstein, vd., 1997).

Dünyada belirlenmiş kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının yaklaşık %30’unun işle ilgili olduğu bilinmektedir. Bunula birlikte kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, iş kazaları ve meslek hastalıklarından kaynaklı iş günü kayıplarının yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır ve işverenlere yıllık 15-20 milyar dolar maliyete sebep olmaktadır (Zengin ve Asal, 2020). İşverenler açısından önemli maliyetlere sebep olan kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının giderilmesindeki en büyük anahtar işyerinde ergonomik ilkelere göre hareket edilmesidir. Bu sayede gerek

işyerindeki meslek hastalıklarının gerekse iş kazalarının azalmasına fayda sağlayacaktır (Sünter, 2017).

İnşaat sektöründeki çalışanlarda kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının (KİSR) daha fazla görülme sebeplerinden biri de elle taşıma işlerinin fazla olmasıdır (Zengin ve Asal, 2020). Malzemelerin elle taşıma işleri sırasında (itme-çekme, kaldırma-indirme, hareket ettirme vb.) çalışanların ani ve aşırı güç uygulamaları, psikososyal stresler, uzun süre ayakta kalma, malzemelerin kaldırılması veya indirilmesi sırasında vücudun öne eğilmesi ve sağa-sola rotasyon yapması gibi nedenler kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını oluşturmaktadır. Özellikle malzemelerin kaldırılmasının veya indirilmesinin yanlış postürle yapılması bel bölgesine binen yükü yaklaşık 10 kat arttırarak eklem ve disk dejenerasyonları nedeniyle bu bölgedeki yakınmaları daha da arttırmaktadır. Gerçekleştirilen görevlerin omuz hizasının üzerinde olduğu durumlarda (tavana yakın bölgelerde tuğla örme, sıva yapma vb.) ise üst ekstremitede (omuz, kol, önkol, el bileği, el) Karpal Tünel Sendromu, Epikondilit, Boyun Gerilmesi Sendromu, Pronator Teres Sendromu, Rotator Kılıf Sendromu, Tetikçi Parmağı, Beyaz Parmak Sendromu vb. gibi çeşitli KİSR'ler meydana gelmektedir (Yılmaz, vd., 2006).

Meydana gelebilecek kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını engellemek için çalışanlara doğru postürde elle taşıma işlerinin nasıl yapılması gerektiği eğitimlerde uygulamalı ve teorik olarak anlatılmalıdır. Bununla birlikte işyerinin ergonomik kurullar dikkate alınarak tasarlanması, ekipman seçiminde çalışan antropometrik ölçülerinin dikkate alınması, kullanılan makine, tezgah boylarının çalışan boyuna göre ayarlanabiliyor olması, çalışma sürelerinin ve molaların doğru bir şekilde planlanması çalışanlarda görülen KİSR azalmasında önem arz etmektedir (Deros, vd., 2015)

2.2. Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme (Rapid Entire Body Assessment- REBA) Yönteminin Uygulanması

REBA metodu, Sue Hignett, Lynn McAtamney liderliğindeki bir ekiple sağlık ve diğer hizmet sektöründeki çalışanların görevlerini gerçekleştirmeleri sırasındaki postürel duruşlarının değerlendirilmesi için geliştirilmiştir. Çalışmada yeni bir analiz yöntemi oluşturmak için 600 den fazla farklı görevlerdeki postür örnekleri analiz edilmiştir (Hignett ve McAtamney, 2000). REBA yönteminde vücuttaki, gövde, boyun, bacaklar, üst kollar, alt kollar, bilek gibi farklı noktalar üzerinde oluşan ergonomik riskler analiz edilmektedir (Esen, Fırlı, 2013). Sue ve

McAtamney, REBA yönteminin uygulamasının anlık gözlem sırasında yapılmasından ziyade video/fotoğraf kayıtlarının alınarak sonrasında değerlendirilmesinin daha sağlıklı olacağını dile getirmişlerdir. Bununla birlikte analizi yapılacak duruşlar seçilirken çalışanların daha fazla zorlandığı, uzun zamanlarını alan, daha çok güç uyguladıkları, tekrarlı hareket içeren görevlerin olmasına dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Ayan, 2015).

Ergonomik risk değerlendirme yapılırken REBA yönteminin kullanılmasının en önemli avantajlarından biri, tüm sektörlere kolayca uygulanması ve uygulama sırasında direk ölçüm yöntemlerinde olduğu gibi pahalı ekipmanlara ihtiyacın bulunmamasıdır (Sağiroğlu, vd., 2015). Yöntemin bu alanda çok fazla tecrübesi olmayan kişiler tarafından da uygulanabilirliği sağlamak için analiz sırasında “REBA Çalışan Değerlendirme Formu” kullanılmaktadır (Ayan, 2015). Bu formda 3 aşamada işlem yapılmaktadır (Shanahan, 2010):

Aşama 1: A Grubu: Gövde, Boyun, Bacak duruşları ve B Grubu: Hem sağ hem sol için Üst Kol, Alt Kol, Bilek duruşları Hignett ve McAtamney tarafından geliştirilen çalışan değerlendirme formu doğrultusunda puanlanarak A ve B grubu skorlar elde edilir. Her bölge için duruş pozisyonuna ilave dikkate alınacak düzeltme notları bulunmaktadır.

Aşama 2: Belirlenen A Grubu skoruna çalışının görev sırasında tek elinin maruz kaldığı Yük/Kuvvet değeri, Belirlenen B Grubu skoruna da çalışının ilgili görevde yükü nasıl/hangi düzeyde kavrağını değerlendiren Kavrama değeri eklenerek nihai A ve B skorları elde edilir. Elde edilen nihai A ve B skorları C martis tablosunda yerine konularak tek bir skora dönüştürülür (Stedmon, 2014).

Aşama 3: Belirlenmiş olan C puanına, çalışının görev sırasında, bir ya da daha fazla vücut bölümü statik olması, tekrarlanan kısa aralıklı eylemler olması, eylem sırasında dengesiz duruşlar olması gibi faktörlere göre Aktivite Skoru eklenerek REBA skoru belirlenir.

Belirlenen REBA Skoru Tablo 1’de Risk eylem karar çizelgesinden kontrol edilerek risk için alınacak önlemin aciliyet durumuna karar verilir (Hignett ve McAtamney, 2000).

Tablo 1: REBA risk eylem karar çizelgesi

Eylem Seviyesi	REBA Skoru	Risk Seviyesi	Eylem Durumu
0	1	İhmal Edilebilir	Gerek Yok
1	2-3	Düşük	Gerekli Olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Yakın Zamanda Gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen Gerekli

3. UYGULAMA

3.1. Değerlendirilen Görevler

Çalışmada Samsun’da faaliyet gösteren bir müteahhitin farklı noktalarda yaptığı inşaatlarda tuğla/sıva faaliyetleri sırasındaki çalışan duruşları analiz edilerek gerçekleştirilmiştir. Kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ile ilgili literatür incelendiğinde inşaat faaliyetlerinde sırasındaki farklı görevler arasında, çalışanlarda gövdenin öne eğilmesi, rotasyonu, omuz seviyesinin üzerinde uzun süre çalışma vb. nedenlerden dolayı kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına en fazla neden olan görevlerden birinin tuğla/sıva işleri olduğu belirlenmiştir (Zengin ve Asal, 2020). Bu nedenle çalışmamızda, tuğla/sıva işleri sırasındaki farklı görevlerde zemin hizasında, bel hizasında ve omuz seviyesinin üstündeki çalışan duruşları analiz edilmiştir. Bina inşaatlarında tuğla/sıva işleri kapsamında genel olarak 3 görev gerçekleştirilmektedir. Bu görevler:

- Tuğla/sıva malzemelerinin hazırlanması/ manuel taşınması
- Tuğla örülmesi
- Sıva yapılması

Tuğla/sıva faaliyetleri sırasında görevlerin gerçekleştirilme seviyeleri (zemin hizasında, bel hizasında, omuz seviyesinin üstünde) çalışanlarda farklı seviyelerde kas-iskelet sistemi yakınmalarına neden olmaktadır. Bu nedenle görevler değerlendirirken 3 farklı çalışma pozisyonu (en alt seviye, orta seviye, en üst seviye) dikkate alınmıştır.

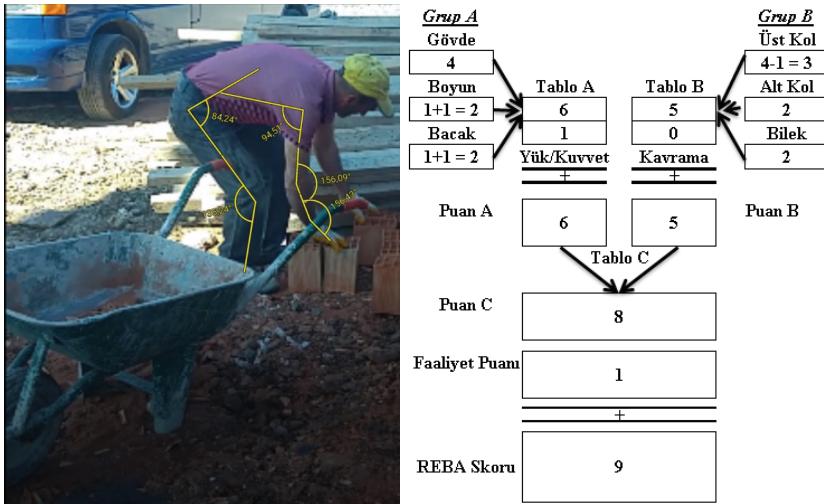
3.2. Bulgular ve Değerlendirme

Tuğla/sıva faaliyetlerindeki belirlenen görevler 3 farklı bina inşaatlarındaki çalışan faaliyetleri sırasında gözlemlenerek fotoğraflar/video kayıtları alınmıştır. Video kayıtları ve fotoğrafları alınan her görevdeki REBA analizi sırasında verilen puanların doğru belirlenmesi için çalışanların görevleri sırasındaki farklı uzuv açıları “ImageMeter – photo measure” programı ile belirlenmiştir. Görsel kayıtları alınan her görev, en alt seviye, orta seviye, en üst seviye çalışma pozisyonları

dikkate alınarak ofis ortamında analiz edilmiş ve 9 farklı sonucun değerlendirilmesi yapılmıştır.

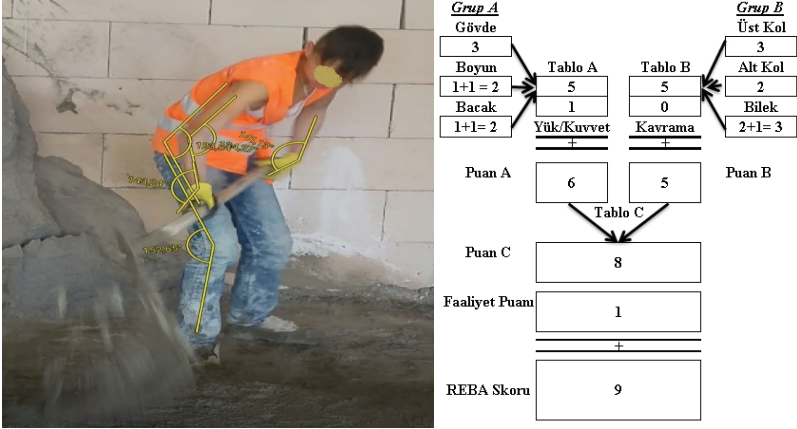
3.2.1. Tuğla/Sıva Malzemelerinin Hazırlanması/Manuel Taşınması Görevi

Tuğla örme veya sıva yapma işleminde ihtiyaç duyulacak malzemelerin ilgili noktaya taşınması için gerçekleştirilen görevdir. Görev sırasında elle taşıma işleri yoğun olduğu için özellikle malzemelerin alınması ve indirilmesi aşamasında “Bel” bölgesinde çeşitli kas iskelet sistemi rahatsızlıkları görülmektedir. Bununla birlikte özellikle vücut öne eğik durumdayken malzemelerin yüklenmesi ve boşaltılması sırasında sağa-sola rotasyon yapılmakta bu durum da bel üzerindeki yükü daha da arttırmaktadır. Alt seviyede gerçekleştirilen görev sırasındaki çalışan duruşuna ait uzuv açıları belirlenmiş resim ve REBA analiz detayları Resim 1’de verilmiştir.



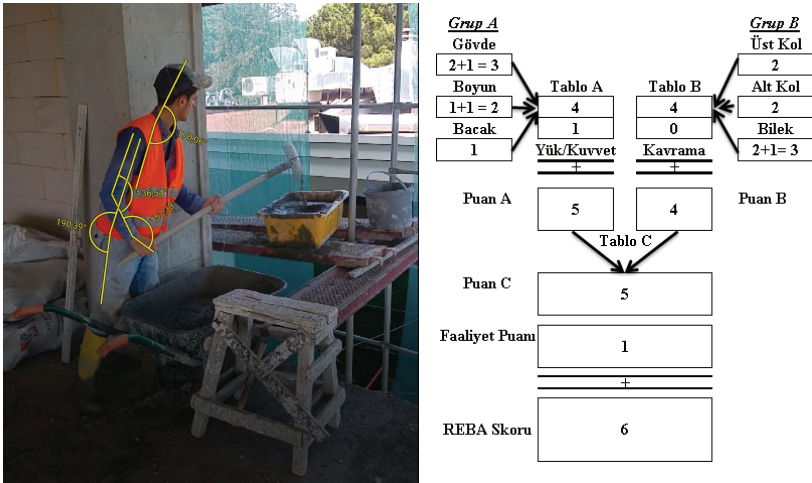
Resim 1: Tuğla / Sıva malzemelerinin elle taşınması görevi alt seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Tuğla/Harç malzemelerinin hazırlanması/taşınması görevleri alt seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 9 REBA puanı Tablo 1’e göre irdelendiğinde “Yüksek Risk” seviyesinde olduğu ve yakın zamanda iyileştirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.



Resim 2: Tuğla / Sıva malzemelerinin elle taşınması görevi orta seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Tuğla/Harç malzemelerinin hazırlanması/taşınması görevi orta seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 9 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Yüksek Risk" seviyesinde olduğu ve yakın zamanda iyileştirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

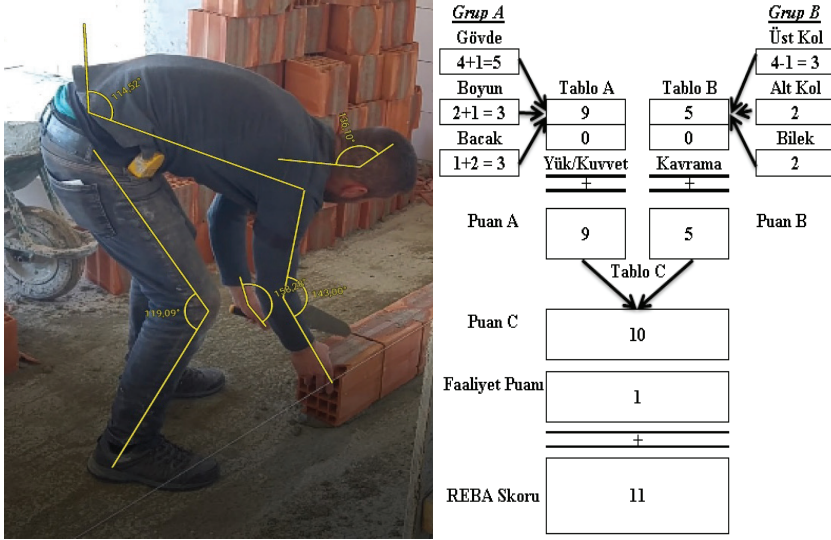


Resim 3: Tuğla / Sıva malzemelerinin elle taşınması görevi üst seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Tuğla/Harç malzemelerinin hazırlanması/taşınması görevi üst seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 6 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Orta Risk" seviyesinde olduğu ve iyileştirme yapılması gerekliliğini ortaya çıkmaktadır.

3.2.2. Tuğla Örülmesi Görevi

Tuğla örülmesi işleminde 20 delikli, 19x19x13,5 cm boyutlarında, yaklaşık 3 kg ağırlığında makine tuğları kullanılır. İşlem sırasında yer hizasında noktalar için vücudun eğilme ve tuğla alma için bükülmesi, benzer şekilde tavan hizasında noktalara ulaşma için uzanma ve yine bükülmeye ihtiyaç duyulması çalışanlarda kas iskelet sistemi rahatsızlıkları oluşturan pozisyonlardır.



Resim 4: Tuğla örme görevi alt seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Tuğla örülmesi görevi alt seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 11 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Çok Yüksek Risk" seviyesinde olduğu ve çalışma pozisyonunda hemen iyileştirme yapılması gerekliliğini ortaya çıkmaktadır.



Grup A			Grup B
Gövde			Üst Kol
3+1=4			2
Boyun	Tablo A	Tablo B	Alt Kol
1+1=2	5	3	2
Bacak	0	0	Bilek
1	Yük/Kuvvet	Kavrama	2
	+	+	
Puan A	5	3	Puan B
	Tablo C		
Puan C	4		
Faaliyet Puanı	1		
	+		
REBA Skoru	5		

Resim 5: Tuğla örme görevi orta seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Tuğla örülmesi görevi alt seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 5 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Orta Risk" seviyesinde olduğu ve çalışma pozisyonunda iyileştirme yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.



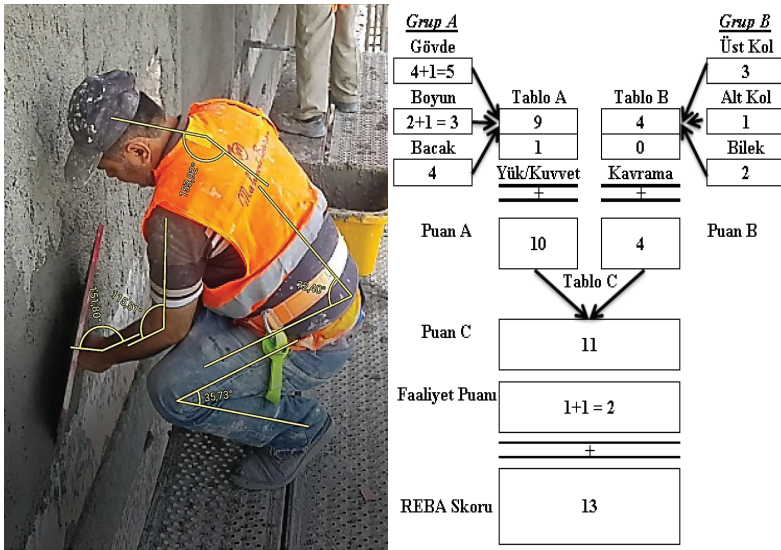
Grup A			Grup B
Gövde			Üst Kol
2+1=3			4+1=5
Boyun	Tablo A	Tablo B	Alt Kol
1+1=2	4	7	1
Bacak	0	0	Bilek
1	Yük/Kuvvet	Kavrama	2
	+	+	
Puan A	4	7	Puan B
	Tablo C		
Puan C	7		
Faaliyet Puanı	1		
	+		
REBA Skoru	8		

Resim 6: Tuğla örme görevi üst seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Tuğla örülmesi görevi alt seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 8 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Yüksek Risk" seviyesinde olduğu ve çalışma pozisyonunda yakın zamanda iyileştirme yapılması gerekliliğini ortaya çıkılmaktadır.

3.2.3. Sıva Yapılması Görevi

İşlem sırasında hazırlama birimi tarafından hazırlanan ve sıva teknesine konulan sıvalar önce sıvacı küreğine alınarak mala yardımı ile ya da bizzat sıvacı küreği ile duvara uygulanır. İşlemde alt noktaların sıvanması için eğilme ve sıva almak için belden dönme hareketinin yapılması benzer şekilde üst noktalara ulaşmak için uzanma ve sıva almak için belden dönme hareketinin yapılması riskli pozisyonlardır. Sıvanın duvara uygulanırken bilek hareketine ihtiyaç duyulması işlem sırasında bilek bölgesinde de çeşitli riskler oluşturmaktadır.



Resim 7: Sıva yapma görevi alt seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Sıva yapılması görevi alt seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 13 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Çok Yüksek Risk" seviyesinde olduğu ve çalışma pozisyonunda hemen iyileştirme yapılması gerekliliğini ortaya çıkılmaktadır.



<u>Grup A</u>			<u>Grup B</u>		
Gövde			Üst Kol		
1+1 = 2			3		
Boyun			Alt Kol		
2+1 = 3			2		
Bacak			Bilek		
1			2		
	Tablo A	Tablo B			
	4	5			
	1	0			
	Yük/Kuvvet	Kavrama			
	+	+			
Puan A	5	5	Puan B		
	Tablo C				
Puan C	6				
Faaliyet Puanı	1				
	+				
REBA Skoru	7				

Resim 8: Sıva yapma görevi orta seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Sıva yapılması görevi orta seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 7 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Orta Risk" seviyesinde olduğu ve çalışma pozisyonunda iyileştirme yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.



<u>Grup A</u>			<u>Grup B</u>		
Gövde			Üst Kol		
2+1 = 3			4+1 = 5		
Boyun			Alt Kol		
2+1 = 3			2		
Bacak			Bilek		
1			2		
	Tablo A	Tablo B			
	5	8			
	1	0			
	Yük/Kuvvet	Kavrama			
	+	+			
Puan A	6	8	Puan B		
	Tablo C				
Puan C	9				
Faaliyet Puanı	1				
	+				
REBA Skoru	10				

Resim 9: Sıva yapma görevi üst seviye çalışma pozisyonu ve REBA analizi skoru

Sıva yapılması görevi üst seviye çalışma pozisyonundaki çalışan postür değerlendirilmesi ile bulunan 10 REBA puanı Tablo 1'e göre irdelendiğinde "Yüksek Risk" seviyesinde olduğu ve çalışma pozisyonunda yakın zamanda iyileştirme yapılması gerekmektedir.

REBA ergonomik risk analiz skorlarına göre "Tuğla/Sıva İşleri" kapsamındaki tuğla örme görevi, çok yüksek risk seviyesindedir. Genel olarak görevin çok yüksek risk seviyesinde olmasının sebebi çalışanların tuğla ve onu diğer tuğlalara birleştirmek için kullandıkları harcı almak için vücudunu öne doğru eğmesi ve sağa-sola rotasyon yapmasıdır. Tuğlaların ebatlarının küçük olması bu hareketin gün içerisindeki tekrarını arttırmakta çalışanların kas iskelet sistemleri de daha fazla yük altında kalmaktadır. Bu sebeple bina inşaatlarında tuğla hacmine göre daha büyük ve hacmine göre oranlığında ağırlığı daha küçük olan gazbetonların kullanılması aynı alan büyüklüğüne sahip duvarların çok daha kısa sürede ve daha az tekrar ile tamamlanmasını sağlayacaktır. Bu durum çalışan kas iskelet sistemine daha az yük binmesini sağlayarak görevdeki ergonomik riskleri azaltacaktır (Balkema, 1992).

Değerlendirilen sıva yapma görevi REBA yöntemine göre yüksek riskli olduğu belirlenmiştir. Sıva yapma görevinin yüksek riskli çıkmasının temel sebebi görev sırasında harç hazırlanması, harçların sıva noktasına taşınması ve sıva yapılması faaliyetlerinin tamamının manuel olarak yapılmasıdır. Günümüz teknolojik gelişmeleri sayesinde sıva yapma işlemi tam otomatik veya yarı otomatik makineler ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu makineler sayesinde görev sırasında çalışan kas iskelet sistemi yüklerini arttıran eğilme, dönme, bükülme, bilek hareketleri gibi birçok hareketin sıklığı azalacaktır (Vatin ve Gamayunova, 2014).

4. SONUÇ

Çalışma ortamlarında ergonomik risk analiz skorları doğrultusunda belirlenen risk seviyelerine göre risk altında bulunan her bir vücut bölgesine yönelik iyileştirmeler ayrı ayrı planlanmalıdır. Gerçekleştirilen iyileştirme çalışmalarına çalışanların görüşlerinin alınarak dahil edilmesi belirlenen iyileştirmelerin çalışanlar tarafından daha fazla ve daha kısa sürede sahiplenilmesini sağlayacaktır.

İnşaat sektöründeki genel olarak görevler incelendiğinde diğer sektörlerle göre daha fazla ergonomik riskler barındırdığı söylenebilir. Bina inşaatındaki görevlerin doğası gereği dikkat gerektiren (Yüksekte çalışma vb.), malzemelerin yoğun olarak elle taşıma, farklı seviyelerde

çalışma(zemin, tavan vb.) gerektiren bir sektör olması sebebiyle, eller, boyun, bel, sırt gibi vücut bölümleri daha fazla kullanılmaktadır. Çalışma sırasında uzun süre benzer pozisyonda ve yanlış postürde çalışılması, tekrarlı hareketler vb. nedenlerle bel, boyun, bilek, sırt bölgelerinde daha fazla kas iskelet istemi rahatsızlıkları meydana gelmektedir. Bu nedenle planlanacak iyileştirme çalışmalarında bu bölgelerin önceliklendirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte inşaat sektöründeki tuğla/sıva işlerinde risk analizi çalışmaları sırasında, işyerinin ergonomik prensiplere göre tasarlanıp tasarlanmadığı, işyerinde bulunan makine/teçhizat/ ekipmanların çalışanlar ile uyumlu olup olmadığı, çalışanların elle taşıma görevleri mevcutsa vücutları nasıl kullanmaları gerektiği, işyerinde bulunan ergonomik tehlikelerin neler olduğu gibi konular risk analiz ekibi tarafından ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir. Tüm bu faaliyetler bütüncül bir sistemle uygulanmalı, belli periyodlarda veya oluşan ani olumsuzluklarda tekrarlanmalıdır.

İnşaat sektöründeki önemli sorunlardan bir diğeri de zaman baskısıdır. Kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını gidermek için yukarıda bahsettiğimiz iyileştirici faaliyetler sürekli uygulansa dahi çalışanlara işlerini gerçekleştirebilmek için yeterli zaman verilmediği takdirde çalışanların tek başlarına daha ağır yükler kaldırmaları, daha uzun saatler çalışmaları, tekrarlı hareketlerin artması, yetersiz mola/dinlenme gibi nedenlerden dolayı kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının yaşanmasına sebep olacaktır. Bu nedenle inşaat çalışmalarında personel sayısı, bina tamamlanma süresi, malzeme/ekipman gibi etmenlerde doğru planlamanın gerçekleştirilmesi kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının dolaylı olarak iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Akıncı, B., Zenginler, Y., Kara, B., Kurt, A., & Yeldan, İ.(2018) Beyaz Yakalı Çalışanlarda İşe Bağlı Boyun, Sırt ve Omuz Bölgelerine Ait Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarının ve İşe Devamsızlığa Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi. *Sakarya Tıp Dergisi*, 8(4), 712-719.
- Ayan, B. (2015). Montaj Hattında Ergonomik Risk Unsurlarının İncelenmesi: Otomotiv Sektörüne Yönelik Bir Uygulama, Uzmanlık Tezi, TC Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Balkema, A. (1992). Advances in autoclaved aerated concrete. F. H. Wittmann (Ed.). Germany: AA Balkema, 11-34
- Buckle, P. W., and Devereux, J. J. (2002). The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. *Applied ergonomics*, 33(3), 207-217.
- Güler, Ç., & Akın, L. (2006). Halk Sağlığı Temel Bilgiler, Hacettepe Üniversitesi Yayınları. Ankara.
- Chiasson, M. È., Imbeau, D., Aubry, K., and Delisle, A. (2012) Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5), 478-488.
- Choi, M., Kim, H. R., Lee, J., Lee, H. E., Byun, J., & Won, J. U. (2014). Workers' experiences with compensated sick leave due to musculoskeletal disorder: a qualitative study. *Annals of occupational and environmental medicine*, 26(1), 1-10.
- Cımbız, A., Uzgören, N., Aras, Ö., Öztürk, S., Elem, E., & Aksoy, C. C. (2007). Kas iskelet sisteminde ağrıya ait risk faktörlerinin lojistik regresyon analizi ile belirlenmesi: pilot çalışma. *Fizyoter Rehabil*, 18(1), 20-27.
- Deros, B. M., Daruis, D. D. I., & Basir, I. M. (2015). A study on ergonomic awareness among workers performing manual material handling activities. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 1666-1673.
- Dıraçoğlu, D. (2006). Sağlık Personelinde Kas-İskelet Sistemi Ağrıları. *Türkiye Klinikleri Tıp Bilimleri Dergisi*, 26, 132-139.
- Dilek, B., Korkmaz, F., Baş, G., Deniz, B., Yılmaz, N., Doğan, S., ... & Akalın, E. (2016). Bir üniversite hastanesinde çalışan hekimlerde kas iskelet sistemi problemleri ve yaşam kalitesinin değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 30(1), 25-30.
- Esen, H., & Fırlalı, N. (2013). Çalışma duruşu analiz yöntemleri ve çalışma duruşunun kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına etkileri. *Sakarya University Journal of Science*, 17(1), 41-51.

- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied ergonomics*, 31(2), 201-205.
- Özcan, E. (2011). İş Yerinde Ergonomik Risklerin Değerlendirilmesi ve Hızlı Maruziyet Değerlendirme(HMD) Yöntemi. *Engineer & the Machinery Magazine*, 52(616): 86-89.
- Sağıroğlu, H., Coşkun, M. B., ve Erginel, N. (2015) REBA ile bir üretim hattındaki iş istasyonlarının ergonomik analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 339-345.
- Shanahan, C. J. (2010). A comparison of six Ergonomic Assessment Tools to four psychophysical scales in the assessment of non-fixed work. (Master Thesis), Kinesiology and Health Science York University Toronto, Ontario, Canada.
- Silverstein, B. A., Stetson, D. S., Keyserling, W. M., & Fine, L. J. (1997). Work-related musculoskeletal disorders: Comparison of data sources for surveillance. *American journal of industrial medicine*, 31(5), 600-608.
- Stedmon, A. W. (2014). *Human factors methods: a practical guide for engineering and design* (Second edition). USA: CRC Press.
- Sünter, A. T. (2017). Sağlık çalışanlarında mesleki kas iskelet sistemi hastalıkları. *Türkiye Klinikleri Public Health-Special Topic*, 3(2), 85-95.
- Vatin, N. I., and Gamayunova, O. S. (2014). Using plastering machines to improve the efficiency of finishing works. In *Applied Mechanics and Materials*, 635, 2049-2053.
- Yılmaz, F., Şahin, F., & Kuran, B. (2006) İşe Bağlı Kas İskelet Hastalıkları ve Tedavisi. *Work Related Musculoskeletal Disorders and Therapy*, 2 (3), 15-22.
- Zengin, M. A., & Asal, Ö. (2020). Bina inşaatındaki çalışan duruşlarının farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 35(3), 1615-1630.

Bölüm 14

5G VE ÖTESİ YENİ NESİL KABLOSUZ

İLETİŞİMDE GÖRÜNÜR IŞIKLA

HABERLEŞME



Asuman SAVAŞCIHABEŞ¹

¹ Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye.

ORCID ID: 0000-0002-7261-1906

1. Giriş

Son yıllarda, kullanıcıların yüksek tanımlı TV, mobil görüntülü telefonlar, video konferans ve yüksek hızlı internet erişimi gibi geniş bantlı kablosuz hizmetleri desteklemek için bant genişliği talebinin arttığına tanık olmaktayız. Akıllı cihazların yaygın kullanımının yanı sıra yeni nesil nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) uygulamalarındaki hızlı büyümeyle birlikte, yeterli bant genişliği arayışı hızla artmaktadır. Erişim ağlarında (son metre ve son mil..vb.), bakır tel, hibrit koaksiyel ve fiber optik kablolar, eve kadar fiber dahil olmak üzere son kullanıcıların iletişim ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir dizi teknoloji ve ayrıca bir dizi radyo frekansı (RF) tabanlı kablosuz iletişim sistemi vardır. Bununla birlikte, bant genişliğine yönelik küresel talep hızlanmaya devam ettikçe, bakır / koaksiyel kabloların ve RF hücresel / mikro dalga Teknolojilerinin, sınırlı bant genişlikleri, yüksek düzeyde düzenlenmiş ve sıkışık spektrumları ve sınırlı erişilebilirlikleri nedeniyle yaklaşan ihtiyaçları karşılayamayacağı son derece açık hale gelmektedir. Ayrıca, bu teknolojiler yüksek maliyetli lisans ücretleri gerektirmekte, güvenlik sorunları ile karşı karşıya kalmakta ve yüksek kurulum maliyetine neden olmaktadır. Bazı ülkelerde, ağ (network) operatörleri, müşterilerine sunulan bant genişliğini artırmak için yeni fiber optik tabanlı erişim ağları kurmaktadır.

Optik Kablosuz Haberleşme (OWC: Optical Wireless Communications) sistemleri ve bunun bir uygulaması olan Görünür Işık Haberleşmesi (VLC: Visible Light Communications) uygulamalarda sahip olduğu yüksek band genişliği, yüksek veri iletim kapasitesi ve elektromanyetik girişimlere karşı dayanıklılığı gibi üstünlükleri ile radyo tabanlı iletişim uygulamalarına alternatif olarak ortaya çıkmıştır. VLC ile ilgili standartlaşma IEEE 802.17.7 çalışma grubu tarafından ortaya konulmuştur. Optik Kablosuz Haberleşmenin önemli uygulama temelleri arasında yer alan optik iletişimin temel ilkeleri; optik ışık kaynakları; modülasyon teknikleri; kanal modelleri VLC sistem tasarımında ve modellemede kullanılmaktadır. VLC sistemlerinin uygulama alanları arasında iç ortam haberleşme ağları, kablosuz yerel alan ağları (WLAN: Wireless Local Area Network) ve havalimanı istasyonlar gibi altyapı gerektiren iletişim ağları yer almaktadır.

Bu çalışmada, OWC sistemlerin kablosuz iletişimde uygulama temelleri araştırılmıştır. Fiziksel katman algoritmaları kullanılarak yüksek hızda veri iletimi sağlayan, dış etmenlerden çok etkilenmeyen ve görünür ışıkla iletişim sağlayan haberleşme sistemlerine ait temel yapılara ait araştırmalar sunulmuştur. İkinci bölümde, optik kablosuz iletişimin temel ilkeleri anlatılmıştır. Optik ışık kaynakları ve detektörler üçüncü bölümde

sunulmuştur. Dördüncü bölümde VLC kanal modelleri anlatılmış ve beşinci bölümde sonuç ve değerlendirme sunulmuştur.

2. Optik Kablosuz İletişimin Temel İlkeleri

Genellikle fiber optik tabanlı ağların sınırsız bant genişliği sunduğu düşünülse de, gerçekte mevcut mimari seçenekler, cihazların ve bileşenlerin uyumluluğu, ağ ekipmanının performans kısıtlamaları ve tüm sistemin konuşlandırılması, son kullanıcılara sınırlı kapasite sunulmasına neden olur. Küresel düzeyde insanlar ve cihazlar arasında her yerde bulunan bağlantı ile ilgili olarak, kablosuz iletişim teknolojisinde, heterojen nesneler arasında iletişim sağlamak için genişletilebilen ve böylece IoT' nin yaygın olarak uygulanmasını sağlayan kayda değer bir gelişme görülmektedir. Bu uygulamalar insandan insanlara, makineden makineye, terminalden terminale ve kişiden makineye iletişim şeklinde olabilir. Ancak, RF tabanlı kablosuz teknolojileri kullanarak; çoğunlukla kentsel alanlarda belirgin olan ve ağa sınırlı erişime yol açacak olan spektrum tıkanıklığı; özellikle oldukça yoğun alanlarda bağlantı performansını etkileyecek olan çok yollu indüklenen sönümlenme ve dağılma; ve üretilen kablosuz veri trafiğinin %70'inden fazlasının kapalı alan olduğu göz önünde bulundurulduğunda, iç ortamlarda heterojen cihazların verimli çalışması için yetersiz bant genişliği. RF spektrumu üzerindeki baskıyı azaltmak için, bazı mobil veri trafiği kablosuz uygunluk (Wi-Fi) ve femtocell tabanlı teknolojilere indirilebilir. Bununla birlikte, Wi-Fi bağlantı noktalarının yoğun konuşlandırılması da bant genişliği darboğazıyla karşı karşıyadır. Bu nedenle, yüksek veri hızları ve düşük gecikme süresiyle sorunsuz kablosuz iletişim sağlamak için, sağlanan hizmetin son derece güvenilir, düşük maliyetli ve yüksek hızlı teknolojileri benimsemesi gerekecektir (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari).

Ortaya çıkan beşinci nesil (5G) ve 5G'nin ötesinde RF tabanlı kablosuz teknolojilerin önümüzdeki yıllarda bu sorunları ele alması beklenmektedir. Bununla birlikte, 5G ve 5G'nin ötesinde kablosuz ağlarda, hücreler arası / katmanlar arası girişim, spektral kaynakların yeniden kullanımı gibi ek zorluklar olacaktır. Alternatif olarak, RF kablosuz sistemlerine yenilikçi bir tamamlayıcı teknoloji olan ve son otuz yıldır piyasada olan optik kablosuz iletişimler (Optical Wireless Communications, OWC), belirli iç ve dış ortam uygulamalarında düşük gecikme süresiyle ve düşük maliyetle yüksek kapasite sağlayacak şekilde uyarlanabilir. OWC, uygun maliyetli, fiziksel katmanda yüksek güvenli, yüksek hızlı, lisanssız, düşük güç kullanımı, RF tabanlı elektromanyetik parazite karşı bağışık ve yüksek derecede uzamsal

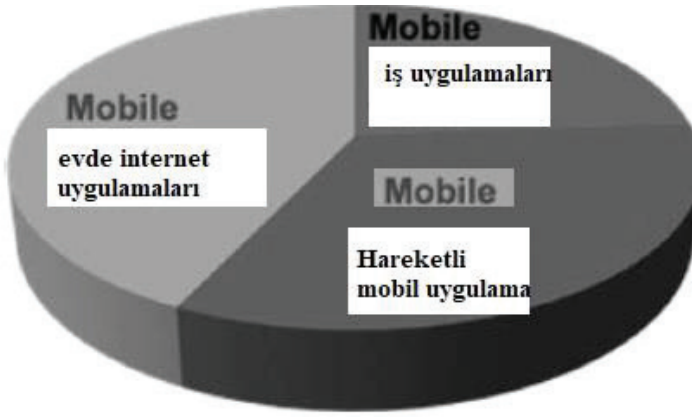
nedeniyle sınırsız frekans yeniden kullanımı olan esnek ve ölçeklenebilir kablosuz ağ çözümleri sunar. Ses ve veri, video ve eğlence, kurumsal bağlantı, uzaktan algılama, tıbbi ve üretim, felaket kurtarma, aydınlatma ve veri iletişimi, gözetim, yerelleştirme ve diğerleri dahil olmak üzere bir dizi uygulama için sınırlandırma ve dağıtım kolaylığı sağlamaktadır. OWC teknolojisinde, iletişim amacıyla yüksek bant genişliği sağlamak için üç bant ultraviyole (UV), görünür ışık (VL) ve kızılötesi (IR) kullanılabilir. Optik sinyalin benzersiz özelliklerinden dolayı, bir iç mekan ortamında, bir optik ayak izi kesin olarak tanımlanabilir ve bu nedenle küçük bir alan içinde bir dizi cihaz barındırılabilir. Bu nedenle, dış mekan uygulamaları için boş alan optik iletişim sistemleri olarak da adlandırılan optik kablosuz iletişim, gelecekteki enformasyon otobanlarında RF sistemlerine tamamlayıcı bir teknoloji olarak önemli bir rol oynayacağı gibi, 5G Altyapı Genel Altyapısına da uyum sağlayabilecektir.

Tablo 2.1.: Mevcut ve Gelecek Kablosuz Teknolojiler (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari)

Teknoloji	Veri Hızı (bps)
	<i>Kablosuz- Mevcut</i>
Wi-Fi (IEEE 802.11n)	150 Mbps
Bluetooth	3 Mbps
IrDa	4 Mbps
	<i>Kablosuz-Gelecek</i>
Wi-Gig(IEE 802.ad)	2 Gbps @60GHz; (10m iç ortam)
Beyaz Wi-Fi (IEEE 802.11af & IEEE 802.11ah)	24 Mbps @54 ve 790,900MHz
Giga-IR	1 Gbps
LiFi	>10 Gbps; (birkaç metre iç ortam)

Yeni veri hizmetleri ve uygulamalarının sayısı sürekli artarken, mobil iletişim bant genişliği için artan bir talep görüyoruz. Son yıllarda gördüğümüz şey, veri trafiğinin her beş yılda bir on kat arttığı Moore yasasının tahmininden çok daha hızlı ölçeklenen internet trafiği talebinde üstel bir büyümedir.

Küresel mobil veri trafiği, 2012'de aylık 820 petabayt (PB) ile %70 iken, aylık 1,5 eksabayt ile 2013'te %81'e ve 2014 sonunda aylık 2,5 eksabayt ile %69'a, yani 2014'ün sonunda 2000 yılındaki tüm küresel internetin 30 katı büyüklüğünde artış yaşamıştır .



Şekil.2.1 Mobil İnternet Servislerinin Dağılımı (Mobile-Global veri trafiği) (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari)

Küresel mobil cihazlar ve bağlantılar da 2013'te 6,9 milyardan 2014'te 7,4 milyara yükseldi ve büyümenin% 88'i akıllı telefonlardan kaynaklandı. 2016 yılına kadar 3,4 milyar internet kullanıcısı ve 19 milyar küresel ağ bağlantısının (sabit artı kablosuz) olması bekleniyordu. Genel mobil veri trafiğinin, 2012'ye kıyasla 14 kat artışla 2019 yılına kadar ayda 24,3 eksabayta çıkması bekleniyor. Mobil ağ (hücresel) bağlantısına gelince, aşağı akış hızları 2013'te 1,4 Mbps'den 2014'te 1,7 Mbps'ye yükseldi.

Şekil 2.1 mobil internet hizmetlerinin dağılımını göstermektedir (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari). 2020 yılına kadar, iletişim ağı ve hizmet ortamı bugünkünden önemli ölçüde daha zengin ve daha karmaşık hale gelecektir. 2020 yılında ise; her şey bir dizi uygulamaya özgü ihtiyaçlara (insanlar, nesnelerin interneti (IoT), makineden makineye (M2M), bilgi ve bilgiye) dayalı olarak gerçekten esnek, mobil ve güçlü bir yolla iletişim ağına bağlanacaktır. Dünya Bankası'na göre, artan genişbant penetrasyonu, düşük ve orta gelirli ve yüksek gelirli ekonomilerde sırasıyla% 1,38 ve% 1,21 puana varan ek GSYİH büyümesi yaratabilir. Buna ek olarak, mobil hizmetlerin geniş bant gerektiren uygulamalara taşınması, 1 km'den daha büyük sayıdaki küçük mikro hücrelere geçişle birlikte, mobil ağ altyapısına, özellikle de baz istasyonlarından gelen "ana taşıyıcı" bağlantılara (Base Station: BS). Mevcut sistemler ve yaklaşık 10-20 km'lik BS ayrımlarıyla, veri bağlantılarını veya "mobil ana taşıyıcı ağı" sağlayan öncelikli teknoloji mikrodalga radyo olmuştur.

Mevcut mikrodalga radyo, bireysel kullanıcılar için birkaç Mbps'ye kadar veri hızlarını idare edebilirken, öngörülen daha yüksek veri hızlarını idare edemeyecek ve bu da "ana taşıyıcı darboğazı" olarak adlandırılan duruma yol açacaktır.

Gelecekteki dördüncü nesil (4G) ve beşinci nesil (5G) ağlara geçiş, artık yalnızca taşıma ve yönlendirme / anahtarlama teknolojilerine dayanmakla kalmayacak, aynı zamanda hizmet sunumunu güvenli bir şekilde düzenlemek için birleşik bir altyapıda daha esnek ve açık olacak, gelişebilecek ve aynı zamanda algılama, bilgi işlem ve depolama kaynaklarını da içerecektir.

Geleceğin 5G ve ötesi 5G kablosuz teknolojilerinin, büyük kapasite ve düşük gecikme süresiyle 10 Gbps'nin üzerindeki veri hızlarında çalışması bekleniyor (Cisco, 2012), (Fiorarlı, 2014), (Xu, 2015). Bu zorlu gereksinimleri karşılamak için, mevcut operasyondaki makro hücrelerin bir dizi küçük hücreye bölünmesi gerekir. Picocells ve femtocells ile birlikte daha yüksek spektral verimlilik için gelişmiş modülasyon tekniklerini benimseyen 4G / 5G, daha fazla sayıda aboneye önemli ölçüde daha yüksek kapasite ve mobil geniş bant hizmetleri sağlayacaktır. Bu, BS'nin bağlanması için fiber üzerinden radyo (RoF) veya radyodan fazla boş alan optiği (FSO) aracılığıyla elde edilebilecek çok yüksek kapasiteli, daha güçlü ve enerji verimli çözümlerin geliştirilmesini gerektirecektir. Ana hat ağına ve son mil erişim ağlarına BS ve BS. Bu, ultra yüksek tanımlı TV (UHDTV 4–20 Mbps), yayın hizmetleri, bilgisayar ağı uygulamaları (100 Mbps'ye kadar), mobil video telefonlar gibi çok sayıda geniş bantlı kablosuz hizmeti desteklemek için çok yüksek bir kapasite sunacaktır. video konferans, ultra yüksek hızlı internet erişimi, cihazdan cihaza iletişim, oyun hizmetleri ve hareket halindeyken kablosuz bağlantı. 2019 itibariyle, 4G'nin toplam bağlantılarının% 26'sı olması ancak toplam trafiğin% 68'ini taşıması bekleniyor. 2019 itibariyle, mobil ağına bağlı tüm cihazların yarısından fazlası, mobil veri trafiğinin% 97'sini oluşturan "akıllı" cihazlar olacak (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari).

Bu eğilim, önümüzdeki birkaç yıl içinde aşağıdaki kilometre taşlarına ulaşmaya devam edecek ve bu da yanlışlıkla mevcut radyo frekansı (RF) spektrumunda ciddi tıkanıklığa neden olacaktır:

- Aylık küresel mobil veri trafiği 2019'a kadar 24,3 eksabayttan daha yüksek olacak.
- Mobil bağlantılı cihazların sayısı 2019'da dünya nüfusunun çok üzerinde olacak.
- 2016 yılına kadar, ortalama küresel mobil bağlantı hızının 2 Mbps'den daha yüksek olacağı tahmin ediliyordu.

- Akıllı telefonlar 2019 yılına kadar mobil veri trafiğinin dörtte üçüne ulaşacak.
- Aylık mobil tablet trafiği, 2018 yılına kadar ayda 2,0 eksabaytı aşacak.
- 4G bağlantıları, 4G olmayan bağlantılardan ortalama 10 kat daha fazla trafik oluşturacaktır 2019 yılına kadar.
- 2016 yılına kadar hücresel ağlardan daha fazla trafiğin boşaltılacağı tahmin edildi (Wi-Fi) hücresel ağlarda kalandan daha fazla.

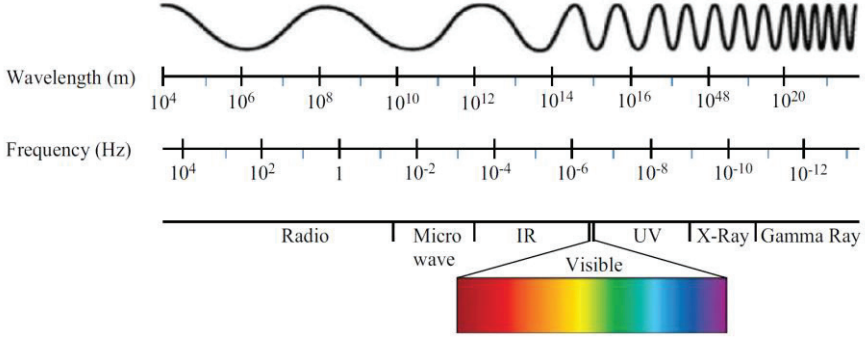
IoT, büyük veri ve bulut kullanımının ürettiği artan veri miktarı, mevcut iletişim kapasitesini dolduracaktır. Bu nedenle, daha kritik olan soru, telekomünikasyon altyapısının hızına ayak uydurup yetişemeyeceği ve hizmet sağlayıcıların, tüm kanallar tamamen sinyal spektrumu tarafından işgal edilmesi durumunda iletim kapasitesini artırıp artıramayacağıdır (Song, Princemin, Vgenopoulou, & Roudas, 2015). Erişim ağlarında, halihazırda kullanımda olan teknolojiler arasında bakır ve koaksiyel kablolar, kablosuz internet erişimi, geniş bantlı RF / mikrodalga ve optik fiber bulunmaktadır. Bu teknolojiler - özellikle bakır ve koaksiyel kablolar ve geniş bantlı RF / mikrodalga - sıkışık bir spektrum, daha düşük bir veri hızı, pahalı lisanslama, güvenlik sorunları ve herkes için yüksek kurulum ve erişilebilirlik gibi sınırlamalara sahiptir. Sabit fiber iletişimlerde, çok düzeyli modülasyon formatlarına dayalı olarak yüksek veri hızları (yani, fiber başına 100-400 Gbps) rapor edilmiştir. Uzun bölmeli çoğullama (SDM) teknolojileri kullanılarak daha yüksek veri hızları (onlarca Tbps ve ötesi) de rapor edilmiştir (Mizuno, 2016), (Zhang, 2017). Geniş dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM), uzun mesafeli iletimde veri hızını artırmak için yaygın olarak kullanılmıştır.

Alternatif seçenekler, en maliyetli ve zaman alıcı olan "son mil" erişim ağlarına kadar yeni fiberlerin konuşlandırılmasıdır. Diğer bir seçenek, sinyal bant genişliğinin önerilen 50 GHz ITU şebekeleri içinde kalması koşuluyla, fiber başına daha yüksek bant genişliği tüketimi pahasına iletim hızını artırmak olabilir. Kablosuz iletişim için 3 GHz'in üzerindeki milimetre (mmW) frekanslarda (özellikle 28 GHz ve 40 GHz frekans bantlarında) yüksek kapasiteli RF iletişimi önerilmiştir (Broadband wireless access over two-layer LMDS with an IEEE 802.16 Future), (Liaison and Coordination Work for International Standardization in the Business Year 2013).

60 GHz bandı lisanssız bir tahsis bandı olmasına rağmen, bu frekanstaki sinyaller büyük atmosferik zayıflamaya tabidir (Marcus & Pattan, 2005). Buna karşılık, radyo kaynaklarının etkin kullanımı nedeniyle çok çekici bir seçenek olan 90-110 GHz frekans bandında düşük atmosferik zayıflama beklenebilir.

3. Optik Işık Kaynakları ve Detektörler

OWC sistemlerinde kullanılabilen bir dizi ışık kaynağı ve fotodedektör (PD) vardır. En sık kullanılan ışık kaynakları, tutarsız ışık yayan diyotlar (LED'ler) ve uyumlu lazer diyotlardır (LD'ler). LED'ler esas olarak iç mekan OWC uygulamaları için kullanılır. Bununla birlikte, kısa bağlantılar (örn. Bir kilometreye kadar) ve orta veri hızları için, LD'ler yerine LED'leri kullanmak da mümkündür.



Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrumda ultraviyole, görünür ışık ve IR dalgaboyları (wavelength, m) ve frekansları (frequency, Hz), (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari).

LD' ler tek renkli, uyumlu ve yönlüdür ve bu nedenle çoğunlukla dış mekan uygulamaları için kullanılırlar. Özellikle uzun iletim bağlantıları için, iletilecek bilginin enerjisinin, yüksek zayıflama ile sonuçlanabilen atmosferik koşullara dayanacak şekilde hassas bir şekilde iyi ayarlanmış bir ışık huzmesi şeklinde yönlendirilmesi çok önemlidir.

Optik iletişim sistemleri için, benimsenen ışık kaynakları aşağıdaki temel özelliklere sahip olmalıdır:

- uygun dalga boyu ve dar bir çizgi genişliği (yani, yüksek bant genişliği);
- yüksek hızlı bağlantılar için hızlı yanıt süresi (geniş bant);
- yüksek parlaklık (yani güç) seviyesine ve çoğunlukla dış mekan uygulamaları için küçük bir yayma yüzey alanına sahip dar radyasyon modeli (ışın genişliği);
- yüksek enerji verimliliği, daha uzun ömür, kararlılık (çoğunlukla LD' ler için), yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet;
- doğrusal güç - analog sinyal aktarımı için önemli olan akım karakteristikleri;

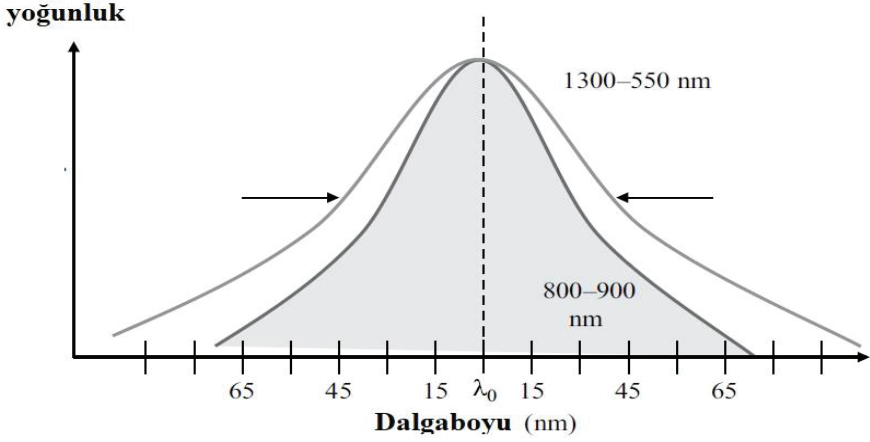
- değişen sürüş akımı ve yüksek modülasyon bant genişliği ile doğrudan modüle edilebilme yeteneği.

Çok sayıda ışık kaynağı mevcuttur, ancak optik iletişimde ve OWC' de en yaygın olarak kullanılanlar LED'ler ve LD' lerdir. Bunlar, çalışmaları için yarı iletken malzemelerin elektronik uyarımına dayanan katı hal cihazlardır (Sze & Ng, 2007). Bu ışıldayan cihazların (yani, LED ve lazer) optik radyasyonu, akkor ışık kaynaklarında olduğu gibi malzemenin sıcaklığından kaynaklanan herhangi bir termal radyasyonu hariç tutar. Hem LD' lerin hem de LED'lerin küçük boyutları vardır; daha düşük ileri voltaj ve dolayısıyla sürücü akımı; özellikle görünür dalga boylarında mükemmel parlaklık; ve tek bir dalga boyunda veya bir dalga boyu aralığında emisyon seçeneğine sahip. Hangi ışık kaynağının seçileceği temel olarak belirli uygulamalara ve bunların optik güç-akım özellikleri, anahtarlama hızı ve ışın profili gibi temel özelliklerine bağlıdır. Her iki cihaz tarafından sağlanan gücün benzer olduğu (yaklaşık 10-50 mW) bilinmektedir (yaklaşık 10-50 mW) (Senior, 2009). Hem LED'ler hem de LD'ler, elektromanyetik spektrumun görünürden kızılötesi (IR) bölgesine kadar çok çeşitli dalga boyları (renkler) boyunca ışık yayacak şekilde üretilebilir. Bu dalga boyları ve bunlara karşılık gelen enerjileri Şekil 3.1.'de gösterildiği gibidir. İnsan gözünün görme aralığı yalnızca 400 ila 700 nm arasındadır (Saulys, Matukas, Palenskis, Pralgauskait, Vysniauskas, & Saulys, 2010). Tüm bu dalga boyları OWC'de büyük ilgi görmektedir. Tablo 3.1.'de yaygın kullanılan LED malzemeler ve bunların optik ışıma dalga boyları yer almaktadır.

Tablo 3.1.: LED malzemeler ve ilgili optik ışıma dalgaboyu değerleri (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari)

LED malzeme / alttaş (substrat)	Dalga boyu (nm)
AlGaIn/GaN	230-350
InGaIn/GaN	360-525
ZnTe/ZnSe	459
SiC	470
GaP	470
GaAs _{0.15} P _{0.85}	589
AlGaInP/GaAs	625-700
GaAs _{0.35} P _{0.65} /GaAs	632
GaAs _{0.6} P _{0.4} /GaAs	650
GaAsP/GaAs	700
Ga _{1-x} Al _x As/GaAs	650-900
GaAs	910-1020
InGaAsP/InP	600-1600

LED'ler, elektronik uyarıma maruz kaldıklarında spontan emisyon yoluyla tutarsız ışık yayarlar. Elektronik uyarıma, p-n bağlantısı boyunca bir ileri öngerilim voltajı uygulanarak elde edilir.



Şekil 3.2. LED Spektral profili

Foton emisyon hızı ve dalga boyu aşağıdaki ifadeler ile hesaplanmaktadır (Ramaswami, 2002):

$$I(E = hf) \propto \sqrt{E - E_g} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), E = E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E(\text{eV})} \mu\text{m} \quad (3.2)$$

Burada, E_g yarı iletken elemanın oyuk-bant enerjisi ve k ise Boltzmann sabitini temsil eder ve T mutlak sıcaklıktır. Dalga boyu spektral genişliği ise:

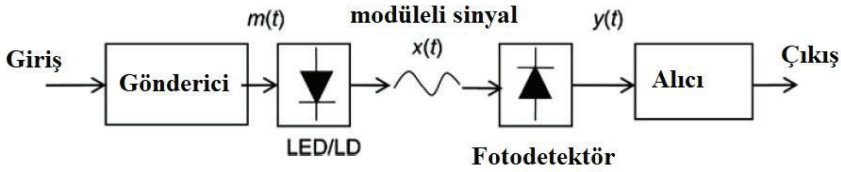
$$\Delta\lambda = \frac{1.8kT}{hc} \quad (3.3)$$

ile ifade edilir . Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi LED'ler nispeten geniş bir spektral genişliğe sahiptir (yani, 30–60 nm'lik $\Delta\lambda$ için 850 nm'lik λ 'da sırasıyla yaklaşık 170 nm ve 1300 nm'dir (Bergh & Copeland, 1980).

LED' lerde fotonlar rastgele yönlerde yayılır, bazıları istenilen doğrultuda ışık oluşturur. Emisyonun tepe dalga boyu (veya rengi) p-n jonksiyonun enerjisine ve yarıiletken materyale bağlıdır. Tablo 3.1 yaygın LED malzemeleri ve bunların ilgili tepe radyasyonunu dalga boyu cinsinden dalga boyu aralıklarını göstermektedir.

4. Kanal Modelleri

Tam çift yönlü modlu OWC sistemleri için, çok yollu girişim, çok kullanıcı erişim paraziti ve ağ şemaları ve doğru kanal modeli seçimi, kanal özelliklerini elde etmek için gereklidir. Verimli optik iletişim sistemlerini tasarlamak, uygulamak ve işletmek için, kanalın özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir (He, Cao, & Zou, 2011), (Hecht, 2005). İç ortam optik kablosuz iletişimde çok sayıda yaygın olarak kullanılan topoloji vardır. Bunlar iç ortam konfigürasyonlarında dikkate alınacak bir takım parametreler ile yapılandırılmaktadırlar. Örneğin vericilerin yönlülük derecesi, vericiler ve alıcılar arasındaki doğrudan görüş hattı (LOS: Line-of-sight) nın varlığına bağlı olarak şekillendirilebilmektedir. Doğrudan algılamalı yoğunluk modülasyonu (IM/DD) fiili uygulama yöntemidir ve temelde düşük maliyeti ve düşük karmaşıklığı nedeniyle optik kablosuz sistemlerde uygulanan bir metottur. Şekil 4.1.'de IM/DD OWC Sistemin blok diyagramı yer almaktadır (Davis, 2014).



Şekil 4.1. IM/DD OWC Sistemin blok diyagramı

IM/DD OWC sistemlerinde, bir optik kaynağın sürücü akımı I_{LED} , sırasıyla optik kaynağın $x(t)$ yoğunluğunu değiştiren modülasyon sinyali $m(t)$ tarafından doğrudan modüle edilir; yani iletim optik gücü (P_t), I_{LED} ile orantılıdır.

Alıcı, bir foto-akım çıkışı olan $y(t)$ üreten, yanıtı optik sinyalden on binlerce kat daha kısa dalga boyu entegrasyonunda olan bir foto detektör kullanır. Bu foto akım, anlık optik güç ile doğru orantılıdır. Yani, foto akım alınan elektrik alanın karesi ile doğru orantılıdır. Şekil 4.1.'de verilen IM/DD-tabanlı optik kablosuz sistem, eşdeğer bir temelband modele sahiptir ve optik taşıyıcının yüksek frekanslı yapısını korur. IM/DD OWC sistemine ait giriş-çıkış parametreleri:

$$y(t) = G_{oc} R x(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R h x(\tau) h(t - \tau) d(\tau) + n(t) \quad (4.2)$$

ifadeleri ile tanımlanmaktadır. Burada $\otimes$ konvolüsyon operatörü iken G_{oc} ise optik alıcıya ait kazançtır. R , fotodetektör üzerindeki ışık olayının spektral güç dağılımına bağlıdır ve fotodetektörün dalgaboyuna özgü bir yanıt fonksiyonudur. Yani R , fotodetektör tepkisi, $h(t)$ temel bant kanal dürtü tepkisi ve $n(t)$ çift taraflı güç spektral yoğunluğuna sahip eklenebilir Beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) olarak modellenen sinyalden bağımsız kanal gürültüsüdür (Keiser, 2011). Bu ifadelerde yer alan $h(t)$, kapalı iç ortam OWC kanallarda çok yollu dağılımın etkilerini analiz eden kanal fonksiyonu olup Gfeller ve Bapst tarafından tanımlanmıştır:

$$h(t) = f(x) = \begin{cases} \frac{2t_0}{t^3 \sin^2(FOV)} t_0 \leq t \leq \frac{t_0}{\cos(FOV)} \\ 0, \text{diğer} \end{cases} \quad (4.3)$$

Burada, t_0 kanalın minimum zaman gecikmesidir.

Şekil 4.2.'de verilen eşdeğer model temelband IM/DD OWC kanalını temsil etmektedir. Burada optik kanallarda $x(t)$ sinyal genliğinden ziyade sinyal gücünü temsil eder. Dolayısıyla gönderici tarafta sinyal gücü hesaplanırken $x(t)$ nin mutlaka pozitif olması gerekir:

$$P_{max-giriş} \geq x(t) \geq 0 \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4'te $P_{max-giriş}$ göndericinin maksimum anlık optik gücüdür. Ayrıca görünür ışık haberleşmesinde iletimde kullanılmasından kaynaklanan maksimum güç ifadesi geleneksel RF kanallardaki $|x(t)|^2$ ifadesinden farklı olarak P_{max} maksimum güç değerini aşmamalıdır:

$$P_{max} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (4.5)$$

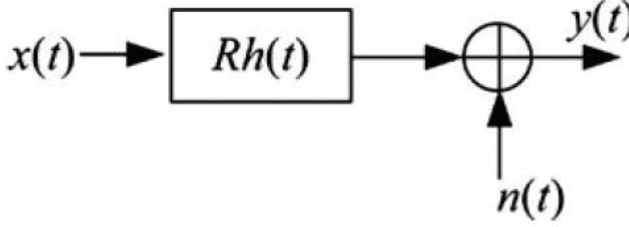
geleneksel RF kanallarda işaret-gürültü-oranı (SNR: Signal-to-noise ratio) ortalama alınan güç ile orantılıdır. Ancak optik kablosuz linklerde SNR ortalama alınan optik sinyal gücünün karesi ile orantılı olmaktadır. Yani,

$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P_r^2}{R_b N_0} \quad (4.6)$$

olarak tanımlanan ifadede N_0 spektral gürültü yoğunluğu ve $H(0)$ ise kanalın DC kazancını ifade etmekte olup Eşitlik (4.7) ile tanımlanmaktadır.

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (4.7)$$

Bir optik kanalda yüksek optik gönderici gücüne ihtiyaç duyulurken, sadece sınırlı yol kaybı tolere edilebilmektedir.



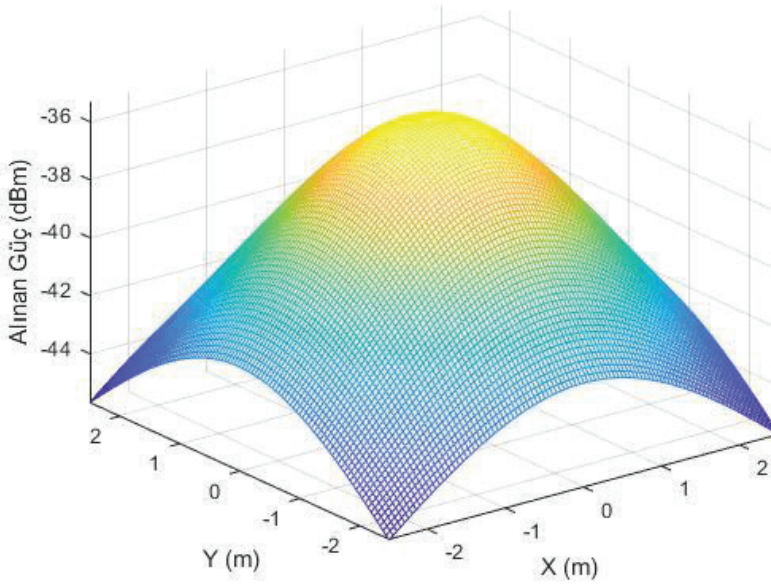
Şekil 4.2. IM/DD OWC linkinin temelband eşdeğer modeli

Kablosuz haberleşme sistemlerinde gönderici ve alıcı arasında LOS mevcutken, alınan sinyal LOS bileşen olarak bilinen karmaşık üstel ve darband Gauss yapısının toplamı olarak ifade edilmektedir:

$$H_{\text{optik kanal}} = H_{\text{LOS}}(f) + H_{\text{NLOS}}(f) \quad (4.8)$$

Böylece kanal transfer fonksiyonu kanalın LOS ve LOS olmayan (NLOS: Non-Line of Sight) bileşenleri ile Eşitlik (4.8)'deki gibi ifade edilmektedir. Bu ifadede yer alan ilk terim LOS katkısını ikinci terim ile NLOS kanal parametresini temsil etmektedir.

Şekil 4.3.'te MATLAB simülasyon programında yarım güç açısında koşturulan iç ortam OWC senaryosu için alınan güç grafiği çizdirilmiştir. Burada içortam senaryosunda $T_s=1$ kazanca sahip optik filtre ile (x,y,z) koordinatları sırasıyla (5,5,3) metre olan kapalı ortam için alçı düzlemde kaynak ile alıcı arasındaki sabit mesafe için düzlem üzerinde bulunan (X,Y)=[-2,+2],[-2,+2]) aralığındaki koordinatlarda konumlandırılmış LED kullanılarak elde edilen çizimde alınan güç değişiminin LED e ait X ve Y pozisyonlarına göre değişimi incelenmektedir.



Şekil 4.3. LOS kanal kazancının LED koordinatlarına göre değişimi.

Buna göre LOS propagasyon modelinde (0,0) noktasında alınan gücün maksimum değere ulaştığı Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.

5. Sonuçlar

Optik Kablosuz Haberleşme sistemleri (OWC) ve bunun bir uygulaması olan Görünür Işık Haberleşmesi (VLC) son yıllarda üzerinde çalışmalar yapılan haberleşme alanı araştırması olarak karşımıza çıkmaktadır. VLC nin radyo dalgaları yerine kullanılacak yeni bir görünür ışık altyapısına sahip olması, bu ayrıca sistemlerin kullanıcının artan band genişliği talebini karşılayacak yüksek frekans band genişliğine sahip olması nedeniyle ve yüksek iletim kapasitesine erişebilme avantajları ile yeni nesil haberleşme sistemlerinde umut vadeden uygulamalar arasında yer almaktadır. Kapalı ortamlarda LOS çizgisi yönünde iletim sağlayan veya saçılmış iletim linki oluşturan VLC, son yıllarda yeni bir kablosuz iletim teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır ve kablosuz RF uygulamalarına alternatif olarak yerini almıştır. Optik kablosuz iletimin temel ilkeleri, optik ışık kaynakları ve detektörler ile OWC kanal modeline ait araştırmalardan elde edilen bilgiler bu çalışma kapsamında sunulmuştur.

Kaynakça

- Bergh, A. A., & Copeland, J. A. (1980). Optical Sources for Fiber Transmission Systems. *Proc. IEEE*, 68(10), 1240-1247.
- Broadband wireless access over two-layer LMDS with an IEEE 802.16 Future.* (tarih yok). Temmuz 01, 2018 tarihinde <https://www.isoc.org/inet2000/cdproceedings/posters/168/index.htm> adresinden alındı
- Cisco. (2012). *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.pdf%0A>. adresinden alınmıştır
- Davis, C. (2014). *Lasers and Electro-Optics: Fundamentals and Engineering, 2nd ed.* Cambridge University Press.
- Fiorarlı, M. (2014). Challenges for 5G Transport Networks. *IEEE International Conf. on Adv. Networks Telecommunication Systems*, (s. 1-6).
- Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (tarih yok). *Optical Wireless Communications*. Taylor & Francis Group.
- He, X., Cao, G., & Zou, N. (2011). Simulation of White Light Based on Mixed RGB LEDs. *ICCTA, IET International Conference on Communication Technology and Application*.
- Hecht, J. (2005). *Understanding Fiber Optics, 5th Ed.* Prentice Hall.
- Keiser, G. (2011). *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill Companies.
- Liaison and Coordination Work for International Standardization in the Business Year 2013.* (tarih yok). 2013 tarihinde https://www.ituaj.jp/wpcontent/%0Auploads/2013/10/nb25-4_web-3_po-liaison.pdf%0A adresinden alındı
- Marcus, M., & Pattan, B. (2005). Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications. *IEEE Microw. Mag.*, 6(2), 54-62.
- Mizuno, T. (2016). 32-Core Dense SDM Unidirectional Transmission of PDM-16QAM Signals Over 1600 km Using Crosstalk-Managed Single-Mode

Heterogeneous Multicore Transmission Line. *Optical Fiber Communication conference*.

- Ramaswami, R. (2002). Optical Fiber Communication: From Transmission to Networking. *IEEE Commun. Mag.*, 40(Mayıs), 138-147.
- Saulys, B., Matukas, J., Palenskis, V., Pralgauskait, S., Vysniauskas, J., & Saulys, B. (2010). Analysis of Mode-Hopping Effect in Fabry-Perot Laser Diodes. *Radar and Wireless*, 9(Iii), 3-6.
- Senior, J. M. (2009). *Optical Fiber Communications Principles and Practice*, 3rd ed. Pearson Education Limited.
- Song, M., Princemin, E., Vgenopoulou, V., & Roudas, I. (2015). Transmission Performances of 400 Gbps Coherent 16-QAM Multi-Band OFDM Adopting Nonlinear Mitigation Techniques,. *Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications (TIWDC)*, (s. 46-48).
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc.
- Xu, X. (2015). Advanced Modulation Formats for 400-Gbps Short-reach Optical Inter-Connection. 23(1), 492.
- Zhang, S. (2017). Capacity-Approaching Transmission over 6375 km Using Hybrid Quasi-Single-Mode Fiber Spans. *J. Light Technology*, 35(3), 481-487.

Bölüm 15

BÜYÜK VERİLERDE BİRLİKTELİK KURALI İLE SATIŞ YÖNETİMİ: HAVAALANI ÖRNEĞİ



Mesut ZERMAN¹

Faruk BULUT²

¹ EAE Elektrik A.Ş., İstanbul, TÜRKİYE, mesut.zerman@eaegroup.com

² İstanbul Rumeli Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Silivri, İSTANBUL,
faruk.bulut@rumeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Sanal ortamda birikerek çok büyük boyutlara ulaşan veriler, bilişim teknolojisi alanındaki en uygun ve güncel algoritmalarla işlenmelidir. Bütün bu veriler işlenmeyi bekleyen maden yatağı gibidir. Veri madenciliği bu noktada devreye girmektedir ve büyük verilerde gizli olan ve önceden bilinmeyen saklı bilgilerin, farklı örüntülerin ve geleceğe yön veren fikirlerin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır (Hand ve Adams, 2014).

Rekabetin yoğun olarak yaşandığı sektörde firmalar, öncelikle sahip oldukları müşterileri rakip firmalara kaptırmamayı, daha sonra da kendi müşteri sayılarını arttırmayı amaçlamaktadırlar. Bu sebeple müşterileri mümkün olduğu kadar tanımak amacıyla, müşterilere ait bilgileri ve satın alma alışkanlıkları kayıt altına almaktadırlar. E-ticaret, manyetik kartlar, barkod okuma cihazlarındaki teknolojik gelişmeler ve bulut bilişim imkânları yapılan alışverişlerin izlenilebilirliğini kolaylaştırmıştır. Müşteri demografik verileriyle alışveriş verileri birleştirilerek müşteri alışkanlıkları ve veri birliktelikleri kolaylıkla analiz edilebilmektedir (Yan vd., 2020). Bir arada gerçekleşen olayları ele alarak ilişki kurallarını ortaya çıkaran veri madenciliği yöntemlerine “birliktelik kuralları” adı verilmektedir. Veri tabanlarında fark edilmeyen bilgilerden işe yarar tutarlı bilgiler elde etmeyi sağlayan veri madenciliği modellerinden bir tanesidir. Birliktelik-ilişki kuralları, hareket verileri içinde birlikte hareket eden verilerin keşfedilmesini, keşfedilen bu bağıntılar ile geleceğe yönelik tahminler üretilmesini sağlamaktadır. Müşterilerden elde edilen bu verilerden anlamlı bilgilere ulaşılması hedeflenmektedir. Veri madenciliğinde sık geçen verilerin keşfedilmesi için sıklıkla kullanılan bir birliktelik-ilişki kuralı algoritması da Apriori algoritmasıdır. Sık geçen verileri bulmak için birçok kez veri tabanı taranarak, toplama, budama gibi işlemleri ve minimum güven ve destek kriteriyle birliktelik ilişkisi bulunan veriler elde edilir (Özçakır ve Çamurcu, 2007).

Bu alanda, birliktelik kuralının uygulandığı alanlarda (Telikani vd., 2020) ve satış yönetimi alanında ticari ve akademik çalışmalar vardır (Fournier-Viger vd., 2017). Örneğin bir çalışmada (Kavitha ve Subbaiah, 2020) Apriori yöntemi kullanarak satış analizi yapmıştır. Hatta birliktelik kuralları tedarik zincirinin domine edilmesi ile ilgili bir çalışma da gerçekleştirilmiştir (Agarwal, 2020). Market sepet analizi ile ilgili bu alanda yapılmış bir çalışmada müşterilerin satın alma davranışları incelenmiştir (Gupta ve Mamtara, 2014).

Bu çalışma Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği bölümünde yapılmış olan yüksek lisans tezinden

türetilmiştir (Zerman, 2018). Bu tez çalışmasında konu detaylıca ele alınmıştır ve burada önemli kısımları güncellenerek kitap bölümü haline dönüştürülmüştür.

2. BİRLİKTELİK KURALLARI

Veri madenciliğinde kullanılan modeller tahmin edici (Predictive) ve tanımlayıcı (Descriptive) olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Bu veri madenciliği modelleri farklı amaçlara yönelik kullanılırken sahip oldukları birçok aloritmadan ve teknikten faydalanılmaktadır. Bu algoritmalar ve teknikler tanımlayıcı ve tahmin edici olabilir ya da her iki modeli de kapsayabilir (Olson, 2019).

Tanımlayıcı modellerde amaç, mevcut verilerdeki örüntülerle karar verme aşamasına yardım edebilmektir. İki farklı gelire sahip ailelerin düşük ve yüksek gelir sahibi olmalarına göre satın alma örüntülerinin birbirlerine benzerlik gösterdiğinin belirlenmesi tanımlayıcı modellere bir örnektir. Tanımlayıcı modeller ise karar vermeye rehberlik etmede kullanılabilecek mevcut verilerdeki örüntülerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Tanımlayıcı modellere örnek olarak Kümeleme (Clustering) ve Birliktelik Kuralları (Association Rules) sayılabilir.

Birliktelik analizi büyük bir veri tabanında altın aramak gibidir. Veri tabanındaki altın, bizim veri tabanı ile ilgili daha önce bilmediğimiz ve muhtemelen açıkça ifade edemediğimiz bir kuraldır. Bu yöntem bilim veri tabanındaki tüm ilginç örüntüleri bulur. Her taşın altına bakılır. Bu aynı zamanda modelin zayıflığıdır. Kullanıcı ortaya çıkan bilginin büyüklüğü karşısında zorlanabilir ve bu miktardaki bilginin kullanılabilirliğinin analizi zor ve zaman alıcıdır. Veri madenciliği sonucu ortaya çıkarılan ilişkiler birliktelik kuralları olarak gösterilebilir. Birliktelik analizi, satın alma eğilimlerinin tanımlanması ve bu yolla müşteriye daha fazla mal satılmasını sağlamak için sıklıkla başvurulmuş bir modeldir. Tipik bir örnek olarak simit ile çay arasında güçlü bir örnek vardır (Nithya vd., 2021).

Birliktelik kurallarıyla, müşterilerin alışveriş verilerine bakılarak ürünlerin birliktelik-ilişki bağlarını bulup, müşterilerin satın alma alışkanlıklarının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Birliktelik kuralı, bir ilişkide sahip olduğu bir özelliğe göre veriler arasındaki ilişkileri, diğer özelliklere göre gruplama yapılmış verilerin kullanılması ile elde edilir. Veri setinde fark edilen desenler, sıkça bir arada olan özelliklerin önemi arasında bulunan ilişkiyi gösterir.

Birliktelik kurallarının en sık kullanıldığı alan market sepeti analizidir. Bu analizle, müşterilerin alışveriş alışkanlıklarıyla ürünler arasındaki birlikte alınma oranlarını bularak müşterilerin satın alma davranışlarını analiz eder. Örneğin market sepeti analizi ile kahve alan müşterilerin %80 olasılıkla süt tozu aldığı şeklinde bir kural bulunabilir. Bunun üzerine market yöneticileri kahve ve süt tozu raflarını yeniden tasarlayarak ve indirim kampanyaları düzenleyerek satışlarını arttırabilir (Pillai vd., 2021).

Birliktelik kuralı analizi için kullanılan birçok algoritma bulunmaktadır. Bu algoritmalar ile destek ve minimum güven değerlerini sağlayan birliktelik kuralı çıkarımı sağlanmaktadır.

2.1. Önemli Parametreler

Birliktelik Kurallarının matematiksel modeline bu kitap bölümünde yer vererek alan işgali yapmak yerine; bu yöntemde kullanılan destek, güven ve ilgi önemli parametreleri sırasıyla incelemek istiyoruz (Lin vd., 2002).

2.1.1. Destek (Support) Ölçütü

Destek ölçütü, veriler arasında ne kadar sıklık olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle veri setinin içinde yer aldığı kümedeki birlikteliklerle toplam birliktelik sayısına oranıdır. Destek, veri seti üzerinde X ve Y ürünleri ile alakalı ($X \Rightarrow Y$) şeklinde gösterilmektedir. ($X \Rightarrow Y$) desteği şu şekildedir:

$$\text{Destek } (X \Rightarrow Y) = \frac{(X \text{ ve } Y\text{'nin bulunduğu satır sayısı})}{(\text{toplam satır sayısı})}$$

2.1.2. Güven (Confidence) Ölçütü

Kuralın destek ve güven ölçütleri ile öğeler arasındaki birlikteliği hesaplanır. Güven ölçütü X malını almış olan müşterinin hangi sıklıkta Y malını aldığını belirlemektedir. Bu miktarlar sırasıyla keşfedilen kuralların kullanışlılığını ve doğruluğunu gösterir. Güven ve destek ölçütlerinin formülü şu şekildedir:

$$\text{Güven } (X \Rightarrow Y) = \frac{(X \text{ ve } Y\text{'nin bulunduğu satır sayısı})}{(X\text{'nin bulunduğu satır sayısı})}$$

Güven ölçütünün kullanıldığı bazı alanlar vardır. Müşteri alım alışkanlıklarının incelenbilmesi, indirim yapılabilecek ürünlerin tespit edilmesi, ürün katalogların ve reyon düzeninin ey uygun şekilde

tasarlanabilmesi bunlardan bir kaçıdır. Ayrıca, birliktelik kuralı algoritmalarının performansını belirleyen ilk adımdır.

2.1.3. İlgili Ölçüsü

Simit-çay örneği, yüksek güven kurallarının bazen yanıltıcı olabileceğini göstermektedir, çünkü güven ölçüsü kuralda ortaya çıkan veri setinin desteğini göz ardı etmektedir. Bu sorunu çözmenin bir yolu, kaldıraç (lift) olarak bilinen bu metriğin uygulanmasıdır: Kaldıraç, olasılıklar açısından şu şekilde basitçe izah edilebilir:

$$\frac{P(x, y)}{P(X) \cdot P(Y)}$$

Eğer X ve Y bağımsızsa, Lift bire eşittir. Eğer bağımsız olduklarından daha sık ortaya çıkarlarsa, o zaman Lift birden büyüktür. Kaldıraç ayrıca $\frac{P(Y|X)}{P(Y)}$ olarak da yazılabilir, böylece Lift birden büyükse Y'nin daha önce Y'in meydana gelmesi ve Lift'in birden küçük olduğu durumda X'in verilme olasılığının daha düşük olacağı anlamına gelir. Birliktelik kuralı iki aşamalıdır:

- a) Tüm sık geçen veri setlerinin elde edilmesi:
Veri setinin sık geçenler kümesinde yer alabilmesi için, her verinin destek değerinin daha önceden belirlenen minimum destek değerinden büyük olması gereklidir.
- b) Sık geçen veri setlerinden güçlü ilişki kurallarının oluşturulması:
Tanıma göre, buradaki kurallar minimum güven ve minimum destek koşulunu sağlamalıdır.

Bu çalışmada, Birliktelik Kuralları algoritmalarından en bilinen ve en yüksek başarı gösteren Apriori, Apriori-TID, ECLAT, FP-Growth kullanılmıştır ve detaya girmeden açıklamaları aşağıda verilmiştir.

2.2. Apriori Algoritması

Apriori algoritması bağlantı analizi ve bağlantı kurallarının bulunmasıyla ilgili en fazla kullanılan ve bilinen algoritmadır. Sık veri seti madenciliği ve ilişkilendirme kuralı öğrenmek için kullanılır.

Algoritma, k-itemsets (k öğeleri içeren k öğelerden k-itemset olarak bilinir), (k + 1) -itemset'leri araştırmak için kullanılır ve Boolean ilişkilendirme kuralları için işlem veri tabanından sık kullanılan veri setlerini kümelemek için kullanılır. Bu algoritmada, sık kullanılan alt kümeler her seferinde bir öğe genişletilir ve bu adım aday oluşturma işlemi olarak bilinir. Daha sonra grup adayları verilere karşı test edilir.

Aday veri setlerini verimli bir şekilde saymak için Apriori birinci sınıf arama yöntemini ve bir karma ağaç yapısını kullanır (Trupti, 2014).

Apriori algoritmasına ilişkin bazı varsayımlar şu şekildedir: Bu algoritmada kullanılan market sepeti verilerindeki her işlemde yer alan veri kodları nümeriktir ve veri kodları küçükten büyüğe sıralıdır. Veri setleri eleman sayılarıyla belirtilir ve k birim veriye sahip bir veri seti ile temsil edilir (Yuan, 2017).

2.3. Apriori-TID Algoritması

Önceki konularda da bahsedildiği gibi Apriori, desteğin sayımını yapmak için her döngünün her aşamasında tüm veri tabanını taramaktadır. Tüm veri tabanını taramak, döngünün her aşaması için gerekli olmayabilir. Bu temele dayanarak, Apriori-TID adıyla yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Apriori'ye benzer bir şekilde Apriori-TID de, döngüye başlamadan önce aday veri kümelerini belirlemek için yine Apriori'nin aday kümeleri oluşturma algoritmasını kullanır. Apriori'den ana farkı, ilk döngüden sonra desteğin sayımı için veri tabanını kullanmıyor olmasıdır. Onun yerine, k olarak gösterilen bir önceki döngüde kullanılan aday veri kümelerinin bir kodlamasını kullanır (Yuan, 2017).

Bu algoritmada, ilk geçişten sonra aday veri setlerinin desteğini saymak için veri tabanı kullanılmamaktadır. Aday veri seti üretim süreci Apriori algoritması ile aynıdır. Her üyenin, her bir işlemin TID'sine ve bu işlemde bulunan büyük verilere sahip olduğu C 'nin bir başka seti oluşturulur. Oluşturulan küme, her aday verisetinin desteğini saymak için kullanılır. Bu algoritmanın avantajı, daha sonraki geçişlerde Aprioritid'in performansının Apriori'den daha iyi olmasıdır.

2.4. FP-Growth Algoritması

Apriori algoritmasının var olan iki dezavantajını ortadan kaldırmak için FP-growth algoritması tercih edilir. FP-growth, FP-tree yapılmasını gerektirir ve böl-fethet (divide-and-conquer) stratejisini kullanır. Bu durum veri tabanı üzerinde iki tarama gerektirir. İlk olarak, sıklığa göre sıralanmış sık veri setlerinin listesini azalan düzende sıralar (F-List) ve bunu ilk veri tabanı taraması sırasında yapar. İkinci taramada, veri tabanı bir FP-tree'ye sıkıştırılmıştır. Bu algoritma, FP-tree yinelemeli olarak madenciliği gerçekleştirir. Yinelenen ağaçların aranması ve inşasına dönüştürülen sık veri setlerini bulma problemi vardır. Sık kullanılan veri setleri, veri tabanı üzerinde sadece iki geçişle ve herhangi bir aday oluşturma işlemi olmadan üretilir (Tan, 2016).

2.5. ECLAT Algoritması

ECLAT yöntemi sık ürün kümelerini bulmak için çok basit bir algoritmadır. ECLAT (Equivalence Class Transformation) Eşdeğerlik Sınıfı Dönüşümü anlamına gelir ve derinlik öncelikli arama gibi yöntemlerle ilk önce alt kısımdaki öğelere ulaşır. Yerellik artırıcı özellikleri ile hem ardışık hem de paralel yürütme için uygun olan doğal bir algoritmadır (Zaki vd., 1997).

Bu algoritma dikey veri tabanı kullanır. Yatay veri tabanı kullanamaz. Herhangi bir yatay veri tabanı varsa, dikey veri tabanına dönüştürmemiz gerekir. Veri tabanını tekrar tekrar taramaya gerek yoktur. ECLAT algoritması veri tabanını sadece bir kez tarar. Bu algoritmada destek sadece sayılır. Bu algoritmada güven hesaplanmaz.

3. BÜYÜK VERİLER İLE VERİ MADENCİLİĞİ

Büyük veri, çoğunlukla farklı veri kaynaklarından toplanan geniş veri analiziyle, verilerin işlenmesi ve saklanmasıyla ilgili bir sahadır. Büyük veri çözümlerinin ve uygulamalarının kendine özgü bir karakteristiği olması gerekmektedir. Geleneksel veri analizleri, saklama teknolojileri ve teknikleri eksik kalmaktadır (Monino ve Sedkaoui, 2016).

Veri hacminin büyük verinin temel niteliği olduğu açıktır. Bu göz önünde bulundurulduğunda, çoğu insan terabaytlarda bazen de petabaytlarda büyük verileri tanımlar.

Büyük verilerin kapsamı da niceliğini etkiler. Örneğin, birçok kuruluştaki, genel veri ambarı için toplanan veriler, özellikle analiz için toplanan verilerden farklıdır.

Farklı analiz biçimleri farklı veri kümelerine sahip olabilir. Bazı analitik uygulamalar, analitik proje başına analitik veri setleri oluşturmak için bir iş analisti veya benzer bir kullanıcıya yol gösterir. Dahası, bu büyük veri miktarları sürekli olarak büyür. Tüm bunlar, analizler için niceliği zor olan hareketli bir hedef için büyük veri oluşturur (Oussous vd., 2018).

Yıllar içinde birçok sofistike sık veri madenciliği yöntemleri geliştirilmiştir. Hesaplama maliyetini azaltmak için bu yöntemlerden iki temel yöntem ortaya çıkar. İlk olarak, adayların sıkça rastlanan veri arama alanlarını belirlemek amaçlanırken; ikincisi, veri seti desteğini belirlemek için gerekli olan karşılaştırma sayısını azaltmaya odaklanmaktadır.

Büyük Veri ile çalışmanın zorlukları normal verilerin iki katıdır. İlk olarak, veri kümesi boyutları bir iş istasyonunun kullanılabilir belleğinden çok daha hızlı artmıştır. İkinci zorluk, bir çözüm bulmak için gereken hesaplama zamanıdır.

Hesaplamalı paralellik, bugünün verilerinin büyük ölçekte yönetilmesi için önemli bir araçtır. Tek bir makinede daha fazla veriye izin vermekle kalmaz, aynı zamanda hesaplama yoğunluklu uygulamalar için hızlandırma fırsatları da sunar. Bu bölümün geri kalanında, paralel algoritma tasarımının prensiplerini açıklamakta, sık sık desen madenciliği problemlerine ilişkin bazı zorlukları özetlemekte ve daha sonra paylaşılan ve dağıtılmış bellek sistemlerinde bu zorlukların ele alınması için genel yaklaşımlar detaylandırmaktadır (Grama vd., 2003).

4. HAVAALANI UYGULAMASI ÖRNEĞİ

Bu çalışmada Türkiye'deki havalimanlarında yiyecek içecek satış noktalarında satılan ürünlerden elde edilen büyük veriler kullanılmıştır. Veri setindeki ürünler arasındaki birliktelikler analiz edilmiştir. Bu analiz boyunca bir önceki bölümde ayrıntılı olarak anlatılan ve yaygın olarak kullanılan algoritmalar tercih edilmiştir. Bir firmaya ait satış verileri benzer ürün satışı olan satış noktalarının verilerinden seçilmiştir. İstanbul, Ankara ve İzmir'deki yurtiçi ve yurtdışı uçuşu yapan yolcuların alışveriş alışkanlıkları incelenmiştir.

Veri setinden sık birlikte satın alınan ürünler bulunarak birliktelik-ilişki kurallarından tespitiyle stokların planlanması, kampanyaların, indirimlerin, reyonların bu sonuçlara göre düzenlenerek satışlara etkisinin artırılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte havalimanındaki müşteri alışveriş davranışlarını analiz eden bir çalışma; oradaki işletmelere yön verecek, strateji geliştirmelerine, hedef kitleye uygun promosyonlar yapmalarına yardımcı olacak bir analiz çalışmasıdır.

4.1. Uygulamada Kullanılacak Teknolojiler

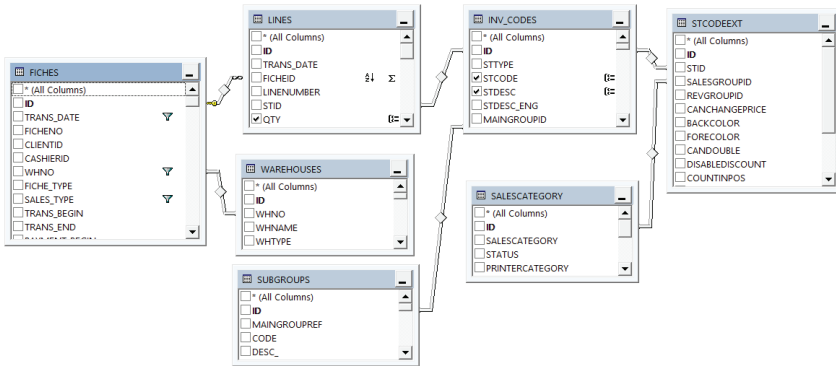
Uygulamada SQL Server 2014, PowerBI ve Visual Studio 2015 kullanılmıştır. Uygulama C# programı ile bir windows uygulaması olarak geliştirilmiştir. Veri tabanı ve tablolarda yapılan analiz sonrası satış tabloları ve bu tablolara bağlı ürün, kategori, satış birimi, şube gibi tablolardan veriler filtre edilmiştir. Çalışmada bulunan bilgisayar özellikleri, 2.7 GHz hızındaki i7-6820HQ işlemcili, 8 MB bellekli, Windows 10 işletim sistemli.

4.2. Veri Madenciliği Süreçleri

Bu çalışmada İstanbul, Ankara ve İzmir'deki havalimanlarında yurtiçi ve yurtdışı uçuşu yapan yolcuların alışveriş verileri seçilmiştir. Satış verilerinin bulunduğu veri seti 2015 – 2018 yıllarına ait satış verilerinden elde edilen büyük veriden oluşmaktadır

Bu bölümde uygulamada kullanılacak olan veri setleri için DWH (Data Warehouse) veri tabanı oluşturulmuştur. Veri indirgeme yöntemleriyle veri setleri elde edilerek DWH veri tabanında toplanmıştır. Daha sonra bu veriler flat file formatındaki bir dosyaya aktarılarak bu dosyalar üzerinden çalışılabilir amaca uygun bir veri seti oluşturulmuştur. Daha sonra bir Windows uygulaması geliştirilerek veri madenciliği algoritmaları ile veri seti üzerindeki ürünler arasındaki birliktelikler elde edilmiştir.

Şekil 1. Satış verileri tablolarına ait oluşturulan SQL View



Şekil 1’de görüldüğü üzere veri tabanı üzerinde incelemeler yapılarak satış verileri ile ilgili olan tablolar arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. “FICHES” ve “LINES” tablolarında satış hareketlerine ait veriler bulunmaktadır. “INV_CODES” tablosu ürünlere ait bilgileri kapsamaktadır. “INV_CODES” ile ilişkilendirilmiş olan “STCODEEXT” ve “SADESCATEGORY” tablolarında ürünlere ait ek özellikler bulunmaktadır. “WAREHOUSE” tablosu ise satış birimlerine ait masraf merkezi bilgilerine sahip olup ilgili satış birimlerine buradaki “ID” alanı filtre olarak kullanılarak ulaşılmıştır.

Tablo 1’de verilmiş olan SQL (Structured Query Language) ekleme sorgusuyla, satış verilerine ait alanlar analiz çalışması için oluşturulan DWH veri tabanındaki POS-SALES tablosuna eklenmiştir.

Tablo 1. DWH için oluşturulan POS_SALES Tablosu

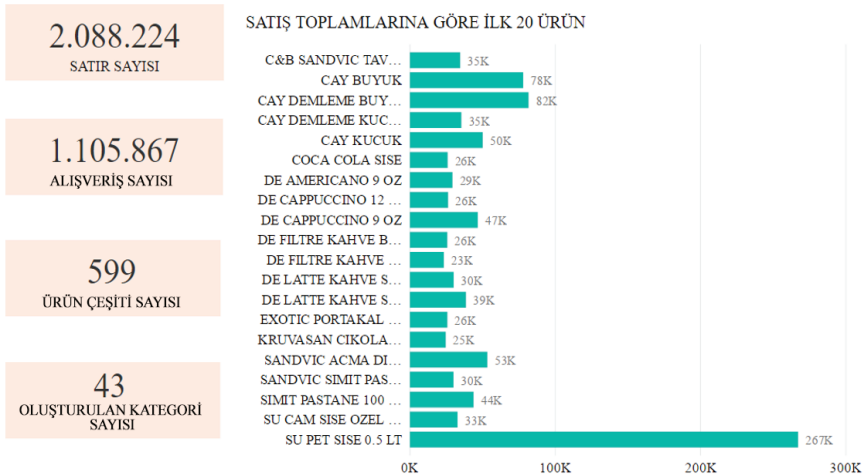
	Column Name	Data Type	Allow Nulls
	BRANCHID	int	☑
	WHNO	int	☑
	YEAR	int	☑
	FICHEID	int	☑
	SALESCATEGORYID	int	☑
	SALESCATEGORY	nvarchar(200)	☑
	STCODE	nvarchar(12)	☑
	STDESC	nvarchar(100)	☑
	UNITS	nvarchar(10)	☑
	QTY	decimal(18, 4)	☑

Tablo 1’de görüldüğü üzere POS_SALES tablosu elde edilerek veri seçimiyle sonraki veri madenciliği süreçlerine ait adımlar takip edilmiştir. Yukardaki örnek veri tabanı gibi iki tablo oluşturulmuştur. Bu tablolar POS_SALES_INT ve POS_SALES_DOM olmak üzere Dışhatlar (International Airpot) ve İç Hatlar’dan (Domestic Airport) seçilen satış noktalarına ait veriler bu tablolara ayrı ayrı aktarılmak üzere oluşturulmuştur.

4.3. Veri Setinin Oluşturulması

Veri seti 1 için toplanan veriler 2015-2018 yıllarına ait satışlardan oluşmaktadır. Havalimanlarında dış hatlar bulunan satış noktalarından elde edilen bu veriler Şekil 1.de detayları ile gösterilmiştir.

VERİ SETİ 1’E AİT BİLGİLER

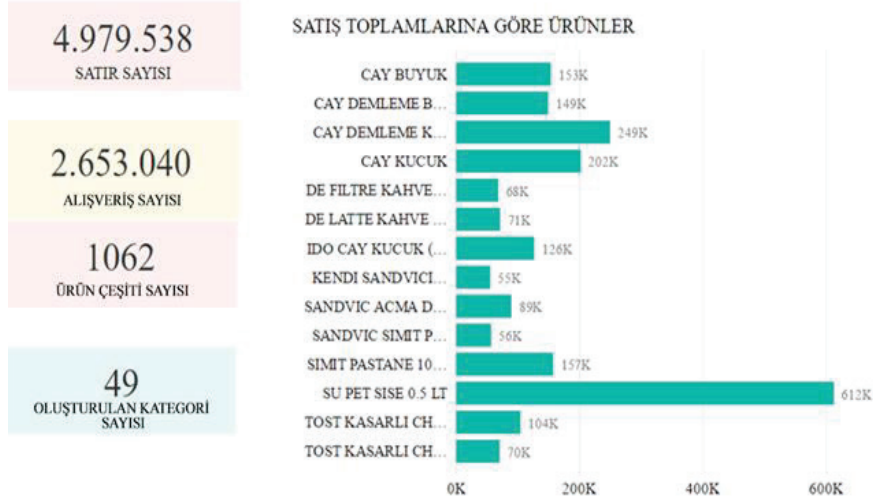


Şekil 2. Veri Seti 1’e ait bilgiler

Bu veri setindeki toplan satır sayısı 2.088.224 adet, üç yıllık zaman diliminde kesilen fiş sayısı 1.105.867 adettir. Bu satışlar toplam 43 ürün kategorisi ve 599 üründen oluşmaktadır.

Veri seti 2 için toplanan verilerde 2015-2018 dönemlerine ait satışlardan oluşmaktadır. Havalimanlarında içi hatlarda bulunan satış noktalarından seçilen sadece üç mağazanın verilerini kapsamaktadır. Bu satışlarında özet olarak bazı bilgileri 3’de paylaşılmıştır.

VERİ SETİ 2’YE AİT BİLGİLER



Şekil 3. Veri Seti 2’ye ait bilgiler

Şekil 3’de görüldüğü üzere geçmiş üç yıllık verilerinde toplam satır sayısı 4.979.538 adettir. Bu zaman dilimindeki kesilen fiş sayısı ise 2.653.040 adettir. Bu mağazalarda bu dönemde 49 ürün kategorisiyle 1062 adet ürün menülerde yer almıştır.

4.3.1. Veri Setinin Temizlenmesi

Verilerin temizlenmesi sürecinde veriler incelenerek aşağıdaki işlemler yapılarak verilerdeki analiz kapsamı dışındaki veriler temizlenmiştir.

Tablo 3’deki incelenen veriler Havalimanlarındaki uçuş iptalleri sonrasında havayolu (THY, Atlas Jet, Pegasus Havayolları vb.) şirketleri tarafından yolculara verilen menü toplamalarını göstermektedir. Bu satışlar veri tabanında çıkarılmıştır. Bazı dönemlerde uçuş iptalleri çok fazla sayıya ulaşmaktadır. Bu menülerde güçlü bir korelasyonun çıkması normaldir.

Tablo 3. Uçuş iptallerinde yolculara yapılan satış toplamı

STCODE	STDESC	QTY Sayısı
30.105.0018	DELAY KASAR PEYNIRLI BAGET SANDVIC	2919
30.105.0093	DELAY KARISIK BAGET SANDVIC	4909
30.105.0168	TAZE DELAY KASAR PEYNIRLI BAGET SANDVIC	144
30.105.0169	TAZE DELAY KARISIK BAGET SANDVIC	896
Toplam		8868

Tablo 4’de bulunan satışlar ise personele yapılan satışları göstermektedir. Bu satışların etkisini ortadan kaldırmak için veri setindeki bu kayıtlarda çıkarılmıştır. Bu çalışmada, gerçek müşteri davranışlarına ve alışkanlıklarına odaklandığı için bu tarz satışların ilave edilmemesinin daha mantıklı olduğu kanısına varılmıştır.

Tablo 4. Personele yapılan satış toplamı

STCODE	STDESC	QTY Sayısı
30.118.0279	PERSONEL CHEESECAKE VE SICAK ICECEK COMBO_CB	44
30.118.0281	PERSONEL MEYVELI TART VE SICAK ICECEK COMBO_CB	8
30.119.0029	PERSONEL POGACA	181
30.119.0030	PERSONEL POGACA PEYNIRLI	681
30.119.0056	PERSONEL POGACA PATATESLI	76
30.119.0057	PERSONEL POGACA SUSAMLI KASARLI	306
30.119.0058	PERSONEL POGACA KEPEKLI	320
30.119.0088	PERSONEL POGACA KASARLI_RESTRO+IH CB	5
30.119.0127	PERSONEL POGACA PEYNIRLI KEPEKLI_RESTRO	2
30.119.0129	PERSONEL POGACA SADE_RESTRO+IH+TA	3
30.119.0351	PERSONEL EKMEK LANDBROTH 600 G_CB	2
30.119.0411	PERSONEL ACMA SADE 90 G_%80 PISMISTEN	15
30.119.0412	PERSONEL ACMA ZEYTINLI 100 G_%80 PISMISTEN	12
30.120.0224	PERSONEL CHEESECAKE SOGUK DEVILS BUTUN_CB	23
30.120.0225	PERSONEL CHEESECAKE MARBLE BUTUN_CB	5
30.120.0226	PERSONEL CHEESECAKE FRAMBUAZ DOLGULU BUTUN_CB	6
30.120.0227	PERSONEL PASTA OREGO BUTUN_CB	3
30.120.0228	PERSONEL CHEESECAKE BROWNIE BUTUN_CB	1
30.120.0229	PERSONEL CHEESECAKE LIMONLU BUTUN_CB	9
30.120.0230	PERSONEL CHEESECAKE ELMALI BUTUN_CB	2
30.120.0231	PERSONEL CHEESECAKE TOFFIE KAREMELI BUTUN_CB	8
30.127.0001	IDO CAY KUCUK (PERSONEL)	181408
30.127.0142	CAY KUCUK PERSONEL	35
30.127.0143	CAY BUYUK PERSONEL	24
30.128.0016	DE FILTRE KAHVE PERSONEL	663
30.128.0092	PB DE FILTRE KAHVE PERSONEL	163
30.201.0006	SUJ PET SISE 0.5 LT PERSONEL	3004
Toplam		187009

Ayrıca veri setleri incelendiğinde görülen tek kalem satışa sahip fişlerde veri setinden çıkarılmıştır. Son olarak veri seti 1’den 532.548 adet, veri

seti 2’den ise 1.168.388 adet fiş veri setinden çıkarılarak veri seti daha güvenilir bir hale getirilmiştir.

Tablo 5. Veri seti 1’e ait tek ürün satışı olan fişlere ait liste

FICHEID	STDESC	TEK ÜRÜNE SAHİP FİŞLER
70705866	MINI BEYAZ PEYNIRLI SANDVIC	1
70705975	SAN PELEGRINO 200 ML	1
70770072	EKLER CİLEKLI 115 G_C&B	1
70785775	SU PET SISE 0.5 LT	1
70785864	DE FILTRE KAHVE KUCUK BOY	1
70786005	SANDVIC ACMA DIL PEYNIRLI _CB TAZE	1
70786217	KEK VISNELI 10 DILIM _C&B	1
70786253	COCA COLA SISE	1
70786366	CAPPY KARISIK MEYVE CAM SISE 250 ML	1
70786828	SU PET SISE 0.5 LT	1
70786890	DE CAPPUCCINO 9 OZ	1
70786952	SU PET SISE 0.5 LT	1
70787259	SAN PELEGRINO LIMON	1
70787402	DE CAPPUCCINO 9 OZ	1
70787492	MADEN SUYU MEYVELI _DAMLA ELMA	1
70787500	SIMIT PASTANE 100 G_CB	1
70787773	DE LATTE KAHVE STANDART-AU LAIT 9 OZ	1
70787901	DE LATTE KAHVE STANDART-AU LAIT 9 OZ	1
Total		532548

Tablo 6. Veri seti 2’e ait tek ürün satışı olan fişlere ait liste

FICHEID	TEK FİŞE SAHİP ÜRÜNLER
57091736	SIMIT SADE
57091848	TOST KASARLI CHEDDARLI
57091858	SU PET SISE 0.5 LT
57091913	SU PET SISE 0.5 LT
57091925	SU PET SISE 0.5 LT
57091931	KRUVASAN CİKOLATALI _C&B
57092132	CAY DEMLEME KUCUK _DOKMEDEN
57092133	DE FILTRE KAHVE KUCUK BOY
57092167	SU PET SISE 0.5 LT
57092221	SU PET SISE 0.5 LT
57092306	AYRAN KUTU BUYUK
57092407	KAHVALTI TABAGI SARKUTERILI _CB
57092438	DE FILTRE KAHVE KUCUK BOY
57092550	SIMIT PASTANE 100 G_CB
57092598	IDO CAY KUCUK (PERSONEL)
57092729	SIMIT PASTANE 100 G_CB
57092750	TOST PEYNIRLI _SPECIAL
57092751	SU PET SISE 0.5 LT
57092815	SU PET SISE 0.5 LT
Total	1168388

4.3.2. Veri Setinde İndirgeme İşlemi

Veri tabanından aktarılan veri seti, algoritmaların çalışmasında etkisi ve ilgisi olmayan tüm tablo ve alanlarından arındırılmıştır. Ayrıca fiş bazındaki hareketleri algoritmaların çalışma yapısına uygun şekle getirilerek tek satıra dönüştürülmüştür. Bu yapılan işlemlerle verinin boyutu indirgendiğinden kullanacağımız algoritmaların daha hızlı işlemler yapması ve kısa sürede sonuç üretmeleri sağlanmıştır. Tablo 7’de bulunan örnek tablodaki her bir fişe ait işlemlerin satırları görülmektedir.

Tablo 7. Veri tabanında bulunan fiş bazındaki kayıtlar

	FYEAR	FICHEID	SALESCATEGORY	STCODE	STDESC
1	2015	57087624	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
2	2015	57087945	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
3	2015	57088082	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
4	2015	57088427	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
5	2015	57089196	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
6	2015	57089228	Unlu Mamul Grubu	30.119.0318	SIMIT PASTANE 100 G_CB
7	2015	57089292	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
8	2015	57089628	Unlu Mamul Grubu	30.119.0313	ACMA SADE %80 PISMIS 90 G_CB
9	2015	57089628	Unlu Mamul Grubu	30.119.0602	POGACA EV DEREOTLU PEYNIRLI KEPEKLI CIG 100 GR_C&B
10	2015	57089628	Çay Grubu	30.127.0023	CAY DEMLEME KUCUK_DOKMEDEN
11	2015	57089730	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
12	2015	57089741	Çay Grubu	30.127.0030	CAY DEMLEME BUYUK_DOKMEDEN
13	2015	57089741	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
14	2015	57089866	Unlu Mamul Grubu	30.119.0318	SIMIT PASTANE 100 G_CB
15	2015	57089972	Sandviçler	30.105.0057	TOST JAMBON KASARLI_SPECIAL
16	2015	57090003	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
17	2015	57090021	Unlu Mamul Grubu	30.119.0318	SIMIT PASTANE 100 G_CB
18	2015	57090043	Sandviçler	30.105.0058	TOST PEYNIRLI_SPECIAL
19	2015	57090043	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT
20	2015	57090156	Su ve Maden Suları	30.201.0005	SU PET SISE 0.5 LT

Aşağıdaki SQL fonksiyonu verilerin tek satıra indirgenerek ITEMSETS isimli tabloya nasıl alındığını göstermektedir:

```

CREATE FUNCTION
[dbo].[fn_CreateOneRowStCode](@FICHEID INT)
RETURNS VARCHAR(MAX)
AS
BEGIN
DECLARE @STCODES VARCHAR(MAX)
SET @STCODES=''
SELECT @STCODES = @STCODES + ',' + STCODE FROM
POS_SALES_INT WHERE FICHEID=@FICHEID
RETURN @STCODES
END

```

Aşağıdaki T-SQL sorgusunda ise tüm kayıtlar için tek satıra indirgeme işlemi uygulanmış ve POS_SALES isimli tablolara yazılmıştır.

```
INSERT INTO ITEMSET_INT (FICHEID, STCODES,
    BRANCHID, WHNO, SALESYEAR)
SELECT DISTINCT FICHEID
    , SUBSTRING(dbo.fn_CreateOneRowStCode(FICHEID)
    , 2,
    DATALENGTH(dbo.fn_CreateOneRowStCodeInt(FICHEID))
    )
    AS STCODES, BRANCHID, WHNO, FYEAR
FROM [dbo].[POS_SALES_INT]
```

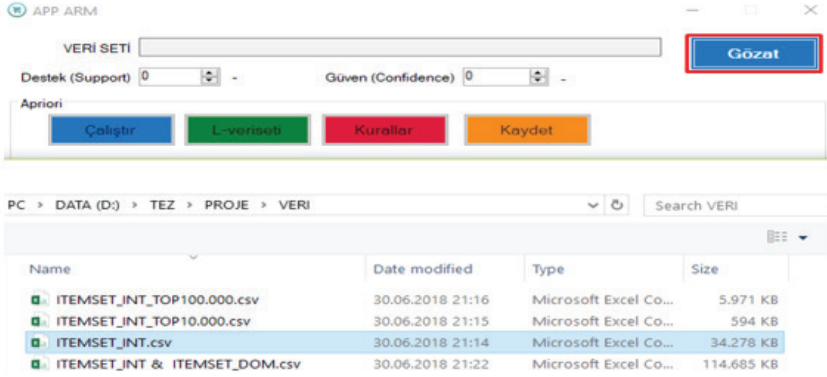
4.4. Veri Seti Üzerinde Algoritmaların Kullanılması

Veri madenciliği bilgi keşfinde algoritmaların kullanımı aşamasın Visual Studio 2015’de C# dili kullanılarak geliştirilen uygulama ile Apriori, AprioriTID, FP-Growth ve ECLAT algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmaların arasındaki farklılıklar ve performans analizlerinde bulunulmuştur. Daha sonra bu uygulama ile veri seti 1 ve veri seti 2 kullanılarak örnek çıktıları alınmıştır. İlk olarak algoritmaların çalışmalarını izlemek için veri seti 1 ve veri seti 2’deki 10.000 ve 100.000 kayıttan oluşan örnek verilerle çalışılmış ve sonuçları kayıt altına alınarak Destek ve Güven parametreleri için uygun bir değer seçilmiştir. Destek değerinin bire yakın olduğu durumlarda oluşan kurallar kümesi çok küçük olduğu görülmüştür. Destek değeri küçüldükçe kullanılan algoritmalarda kural sayıları artarken çalışma süreleri uzamıştır. Güven değeri ise örnek veriler üzerinde farklı değerler verilerek sonuçlar incelenmiştir. Güven değeri küçük oranlarda değiştirildiğinde kural sayılarının etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Çalışmada kullanılan algoritma sayısının fazla olması nedeni ile denemelerde kullanılan Destek ve Güven değerleri makul süreler ve kurallar için uygun birer değer seçilmiştir. Bu kullanılan değerlerin üstündeki değerlerde kural sayılarının çok az olduğu görülmüştür. Daha küçük değerler verildiğinde ise kullanılan veri setlerinin büyük olması nedeni ile kuralların elde edilmesinin çok uzun sürdüğü görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı tüm burada yer alan sık öğeler kümesi için Destek:0,005 ve Güven:0,05 olarak verilmesi ön görülmüştür.

İlk algoritma çıktısı için Apriori seçiyoruz, destek ve güven değerlerinin girişi yapıldıktan sonra “Çalıştır” butonuna tıklayarak C1 aday veri setini oluşturulur. Daha sonra L1 veri setinin oluşacağı ikinci adıma geçer. Bu adımda C2 aday veri setinin oluşturulmasıyla L2 veri seti oluşturulur. Son

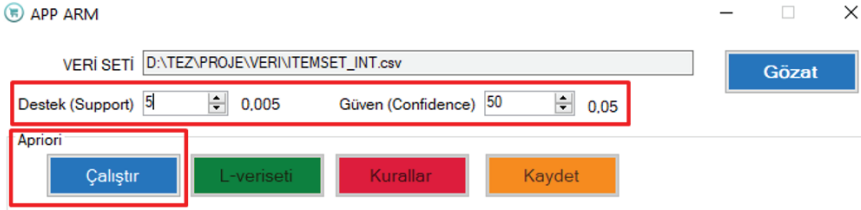
olarak L2 veri setinden C3 aday veri setinin ve L3 veri seti oluşturulur. Sık geçenler kümesi sıfıra eşit olduğunda algoritma döngüden çıkar. Kullanın oluşturulmasından sonra “Kurallar” butonuna tıklayarak sonuç ekranına gidilir.

Şekil 4’de APP ARM uygulaması ile algoritmaların uygulandığı ana ekranda ilk olarak “Gözet” butonu ile daha önce hazırladığımız text dosya formatındaki veri setlerinden birini seçiyoruz.



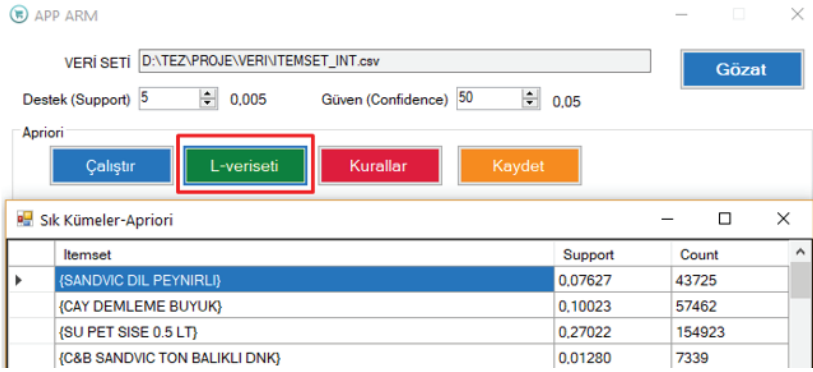
Şekil 4. APP ARM uygulaması Dosya seçimi

Şekil 5’da daha sonra destek ve support değerlerini ilgili kutulara giriyoruz. Çalışmak istediğimiz algoritmanın altında bulunan “Çalıştır” butonuna basıyoruz.



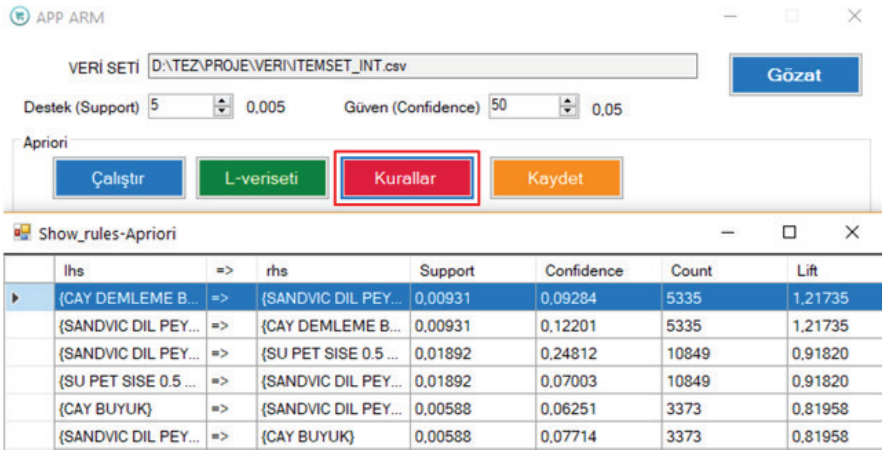
Şekil 5. Uygulamada Destek ve Güven değerleri ile algoritmanın başlatılması

Bu adımda veri seti üzerinde algoritma tüm öğelerin destek değerlerini bulmak için çalışmaya başlıyor. Daha sonra veri seti üzerindeki tüm veriler taranarak sık öğeler kümesi elde ediliyor.



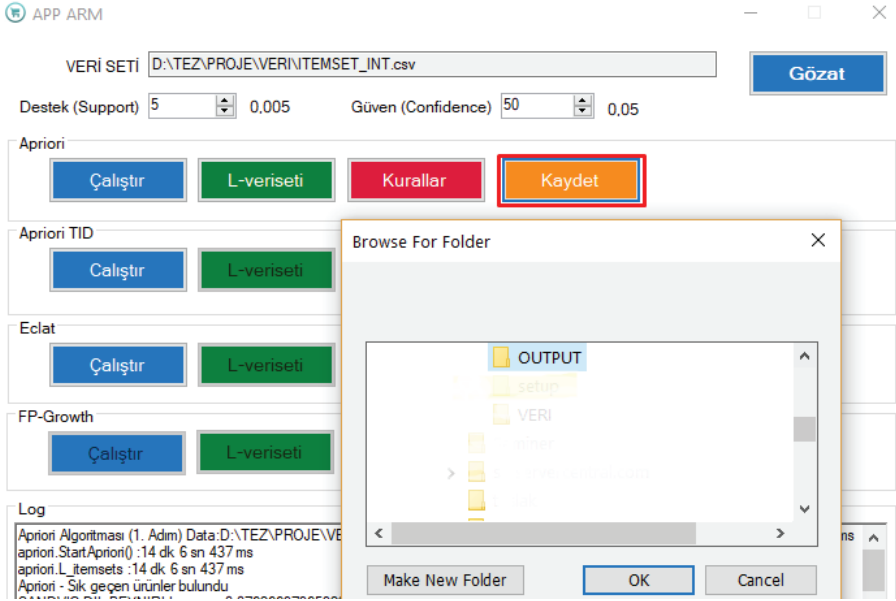
Şekil 6. Elde edilen sık veri kümelerinin gösterimi

Şekil 6'deki sık öğeler kümesinin oluşturulmasından sonra, kurallar listesi "L-veriseti" butonuna basılarak oluşturulması sağlanır.



Şekil 7. Apriori Algoritması ile elde edilen kurallar

Şekilde 7'de görüldüğü gibi elde edilen kural sonuçları metin formatında kaydetmek için "Kaydet" butonuna basılır.



Şekil 8. Kuralların metin dosya formatında kaydedilmesi

Şekil 8’de daha önce veri madenciliği bilgi keşfi sürecinde hazırlanan text dosyalar kullanılmıştır. APP ARM uygulamasındaki Apriori algoritması tüm veri setlerinde kullanılarak algoritmaların çalışma süreleri, kullandıkları bellek ve elde edilen kurallara ait destek, güven gibi değerlere bu tabloda yer verilmiştir.

Tablo 8. Apriori Algoritması çıktıları

İşlem No	Veri Seti	Veri seti Eleman Sayısı	Çalışma Süresi	Bellek Kullanım (KB)	Sık Öge Sayısı	Kural Sayısı	Destek	Güven
1	VERİ SETİ 1	10.000	1dk 23sn	34.850	253	50	0,005	0,05
2	VERİ SETİ 1	100.000	2dk 19sn	69.348	261	49	0,005	0,05
3	VERİ SETİ 1	573.315	12dk 37sn	211.345	262	52	0,005	0,05
4	VERİ SETİ 2	1.482.309	28dk 55sn	341.848	250	46	0,005	0,05
5	VERİ SETİ 1 VERİ SETİ 2	2.055.624	45dk 3sn	497.398	266	50	0,005	0,05

Apriori algoritması ile yapılan uygulamada veri seti boyutu büyüdükçe uygulamanın çalışma süresi ve bellek kullanımı artmıştır. Bu algoritma ile yapılan diğer testlerde destek sayısı 0,001 altında tanımlandığında algoritma kesintiye uğradığı görülmüştür. Güven değerinin artırılması yada azaltılması sadece elde edilen kural sayılarını etkilemiştir.

APP ARM uygulamasındaki Apriori-TID algoritması tüm veri setlerinde kullanılarak algoritmaların çalışma süreleri, kullandıkları bellek ve elde edilen kurallara ait destek, güven gibi değerlere Tablo 9’da yer verilmiştir. Veri setlerinin boyutu büyüdükçe uzayan süreler bir milyon üzerinde kayıtlara sahip veri setlerinde sonuç alınamamıştır.

Tablo 9. Apriori-TID Algoritması çıktıları

İşlem No	Veri Seti	Veri seti Eleman Sayısı	Çalışma Süresi	Bellek Kullanım (KB)	Sık Öğe Sayısı	Kural Sayısı	Destek	Güven
1	VERİ SETİ 1	10.000	35sn	27.808	144	50	0,005	0,05
2	VERİ SETİ 1	100.000	5dk 38sn	78.832	148	49	0,005	0,05
3	VERİ SETİ 1	573.315	25dk 53sn	346.220	150	52	0,005	0,05
4	VERİ SETİ 2	1.482.309	∞	778.140			0,005	0,05
5	VERİ SETİ 1 VERİ SETİ 2	2.055.624	∞	1.067.196			0,005	0,05

APP ARM uygulamasındaki ECLAT algoritması tüm veri setlerinde kullanılarak algoritmaların çalışma süreleri, kullandıkları bellek ve elde edilen kurallara ait destek, güven gibi değerlere Tablo 10’da yer verilmiştir.

Tablo 10. ECLAT Algoritması çıktıları

İşlem No	Veri Seti	Veri seti Eleman Sayısı	Çalışma Süresi	Bellek Kullanım (KB)	Sık Öğe Sayısı	Kural Sayısı	Destek	Güven
1	VERİ SETİ 1	10.000	1sn	21.164	147	52	0,005	0,05
2	VERİ SETİ 1	100.000	6sn	61.932	150	49	0,005	0,05
3	VERİ SETİ 1	573.315	46sn	185.720	150	52	0,005	0,05
4	VERİ SETİ 2	1.482.309	3dk 6sn	423758	139	46	0,005	0,05
5	VERİ SETİ 1 VERİ SETİ 2	2.055.624	5dk 32	693.872	148	50	0,005	0,05

Tablo 11. FP-Growth Algoritması çıktıları

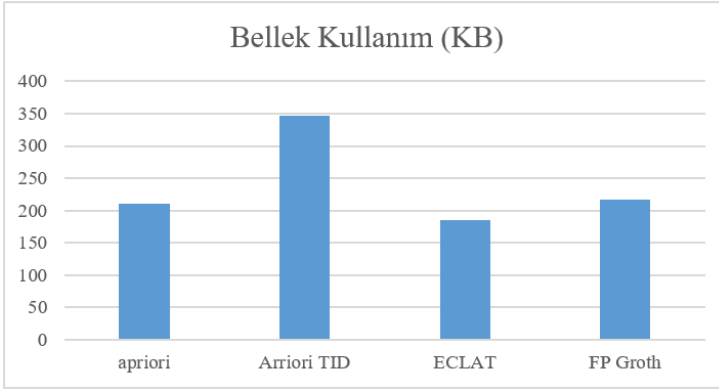
İşlem No	Veri Seti	Veri seti Eleman Sayısı	Çalışma Süresi	Bellek Kullanımı (KB)	Sık Öğe Sayısı	Kural Sayısı	Destek	Güven
1	VERİ SETİ 1	10.000	1sn	13.276	146	52	0,005	0,05
2	VERİ SETİ 1	100.000	8sn	43.052	150	49	0,005	0,05
3	VERİ SETİ 1	573.315	45sn	217.260	150	52	0,005	0,05
4	VERİ SETİ 2	1.482.309	3dk 10sn	475.264	139	46	0,005	0,05
5	VERİ SETİ 1 VERİ SETİ 2	2.055.624	5dk 17sn	672.172	148	50	0,005	0,05

Tablo 11'deki veriler FP-Growth algoritması uygulanarak Veri Seti 1'den elde edilen kurallar ile kurallara ait Destek, Güven, ürünlerin veri setindeki toplamı ve Kaldıraç değerleri elde edilmiştir. Tablo 12'de 573.315 eleman içeren VERİ SETİ 1 üzerinde 0,005 Destek ve 0,05 Güven değerlerine sahip 4 farklı algoritmanın performanslarına yer verilmiştir. Algoritmaların tümünde VERİ SETİ 1 deki kural sayısı 52 çıkmıştır.

Tablo 12. VERİ SETİ 1 ile uygulanan algoritmaların çıktıları

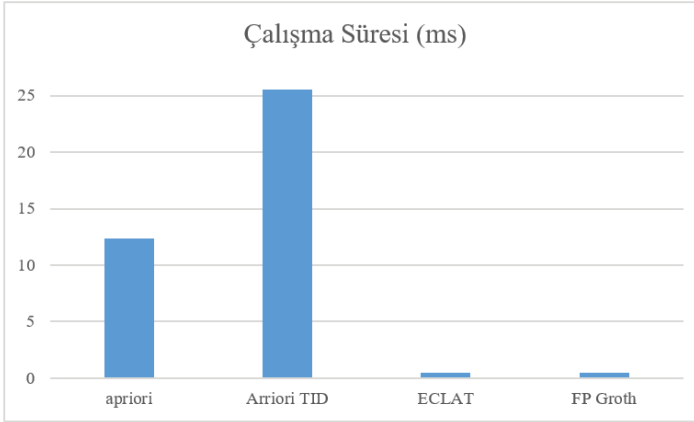
	Çalışma Süresi (ms)	Bellek Kullanımı (KB)	Sık Öğe Sayısı	Destek	Güven
Apriori	12dk 37sn	211.345	262	0,005	0,05
Arriori TID	25dk 53sn	346.220	150	0,005	0,05
ECLAT	46sn	185.720	150	0,005	0,05
FP Groth	45sn	217.260	150	0,005	0,05

Veri seti 1 üzerinde algoritmaların çalışmaları izlendiğinde bellek ihtiyacı en çok Apriori TID algoritmasının olduğu görülmüştür. En az bellek kullanımı ile ECLAT algoritması öne geçmiştir.



Şekil 9. VERİ SETİ 1’de Algoritmaların bellek kullanımı

Algoritmaların çalışma süreleri takip edildiğinde Apriori TID algoritmasının küçük veri setlerinde Apriori algoritmasından daha hızlı olduğu görülmüştür. Ancak veri seti boyutu büyüdükçe Apriori TID’in çalışma süreleri uzamaya başlamış 1 milyon kayıt bulunan veri setlerinde sonuç alınamamıştır. ECLAT ve FP Growth algoritmalarına süre olarak bakıldığında birbirlerine çok yakın sürelerde kuralları oluşturdukları görüşmüştür. Bellek kullanımı ve çalışma sürelerine bakılarak algoritmalar değerlendirildiğinde ECLAT ve FP Growth algoritmalarını daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 10. VERİ SETİ 1’de Algoritmaların çalışma süreleri

Tablo 13. Veri seti 1’deki Apriori algoritması sonucu oluşan ilk 10 kural

No	LHS (Left Hand Side)	Yön	RHS (Right Hand Side)	Destek	Güven	Toplam	Kaldıraç
1	{CAY DEMLEME BUYUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,009	0,093	5335	1,217
2	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY DEMLEME}	0,009	0,122	5335	1,217

			BUYUK}				
3	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{SU PET SISE 0.5 LT}	0,019	0,248	10849	0,918
4	{SU PET SISE 0.5 LT}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,019	0,07	10849	0,918
5	{CAY BUYUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,006	0,063	3373	0,82
6	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY BUYUK}	0,006	0,077	3373	0,82
7	{CAY DEMLEME BUYUK}	=>	{SU PET SISE 0.5 LT}	0,016	0,164	9401	0,605
8	{SU PET SISE 0.5 LT}	=>	{CAY DEMLEME BUYUK}	0,016	0,061	9401	0,605
9	{CAY DEMLEME BUYUK}	=>	{SIMIT EZINE PEYNIRLI}	0,006	0,063	3629	1,408
10	{SIMIT EZINE PEYNIRLI}	=>	{CAY DEMLEME BUYUK}	0,006	0,141	3629	1,408

Tablo 14'deki veriler Apriori algoritması uygulanarak Veri Seti 2'den elde edilen kurallar ile kurallara ait Destek, Güven, ürünlerin veri setindeki toplamı ve Kaldıraç değerleri elde edilmiştir.

Tablo 14. Veri seti 2'deki Apriori algoritması sonucu oluşan ilk 10 kural

No	LHS (Left Hand Side)	Yön	RHS (Right Hand Side)	Destek	Güven	Toplam	Kaldıraç
1	{CAY BUYUK}	=>	{SU PET SISE 0.5 LT}	0,012	0,146	17855	0,691
2	{SU PET SISE 0.5 LT}	=>	{CAY BUYUK}	0,012	0,057	17855	0,691
3	{CAY BUYUK}	=>	{TOST CHEDDARLI}	0,006	0,078	9548	1,261
4	{TOST CHEDDARLI}	=>	{CAY BUYUK}	0,006	0,104	9548	1,261
5	{CAY BUYUK}	=>	{SSIMIT PASTANE}	0,006	0,07	8594	1,05
6	{SSIMIT PASTANE}	=>	{CAY BUYUK}	0,006	0,087	8594	1,05
7	{CAY BUYUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,005	0,065	8004	1,278
8	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY BUYUK}	0,005	0,105	8004	1,278
9	{CAY KUCUK}	=>	{SU PET SISE 0.5 LT}	0,016	0,149	23589	0,706
10	{SU PET SISE 0.5 LT}	=>	{CAY KUCUK}	0,016	0,075	23589	0,706

Tablo 15'deki veriler Apriori algoritması uygulanarak Veri Seti 1 ile Veri Seti 2'nin bulunduğu text dosyadaki verilerden elde edilen kurallar ile kurallara ait Destek, Güven, ürünlerin veri setindeki toplamı ve Kaldıraç değerleri elde edilmiştir.

Tablo 15. Veri seti 1 ve 2'ye ait Apriori algoritması sonucu oluşan ilk 10 kural

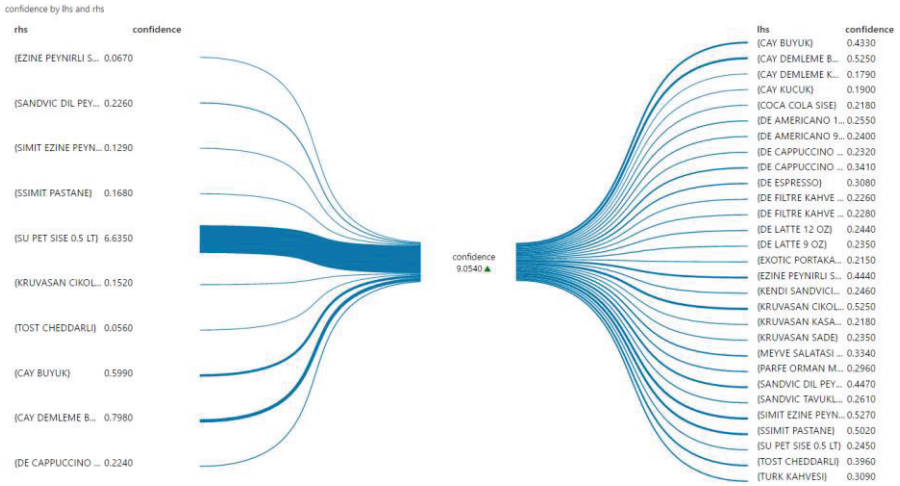
No	LHS (Left Hand Side)		RHS (Right Hand Side)	Destek	Güven	Toplam	Kaldıraç
1	{CAY DEMLEME BUYUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,006	0,073	12887	1,258
2	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY DEMLEME BUYUK}	0,006	0,108	12887	1,258
3	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{SU PET SISE 0.5 LT}	0,012	0,199	23806	0,874
4	{SU PET SISE 0.5 LT}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,012	0,051	23806	0,874
5	{CAY DEMLEME KUCUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,006	0,056	11909	0,97
6	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY DEMLEME KUCUK}	0,006	0,1	11909	0,97
7	{CAY KUCUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,005	0,055	10498	0,938
8	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY KUCUK}	0,005	0,088	10498	0,938
9	{CAY BUYUK}	=>	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	0,006	0,065	11377	1,109
10	{SANDVIC DIL PEYNIRLI}	=>	{CAY BUYUK}	0,006	0,095	11377	1,109

Tablo 16. Veri seti 1 ve 2'deki ürünlerin birliktelikleri ve değerlerinden birer kesit

İsim	(CAY BUYUK)			(CAY DEMLEME BUYUK)			(CAY DEMLEME KUCUK)			(CAY KUCUK)			(KENDİ SANDVICINI KENDİN YAP)			(SANDVIC DIL PEYNIRLI)			(SİMİT PASTANE)		
	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift
(TOST CHEDDARLI)	0.01	0.10	1.26	0.01	0.11	1.32	0.01	0.16	1.29	0.01	0.12	1.16									
(TOST CHEDDAR SUCUK)							0.01	0.14	1.14												
(SU PET SISE 0.5 LT)	0.01	0.06	0.69	0.01	0.05	0.63	0.02	0.08	0.65	0.02	0.08	0.71							0.01	0.07	1.00
(SİMİT PASTANE)	0.01	0.09	1.05	0.01	0.09	1.15	0.01	0.22	1.72	0.01	0.14	1.28									
(SİMİT EZİNE PEYNİRLİ)							0.01	0.17	1.36												
(SANDVIC DIL PEYNİRLİ)	0.01	0.11	1.28	0.01	0.10	1.24	0.01	0.13	1.04	0.01	0.12	1.08									
(KENDİ SANDVICINI KENDİN YAP)				0.01	0.20	2.45	0.01	0.20	1.57												
(DE LATTE 9 OZ)																					
(DE FİLTRE KAHVE KUCUK)																					
(CAY KUCUK)																					
(CAY DEMLEME KUCUK)																0.01	0.06	1.08	0.01	0.09	1.28
(CAY DEMLEME BUYUK)													0.01	0.07	2.45	0.01	0.05	1.04	0.01	0.12	1.72
(CAY BUYUK)																0.01	0.06	1.24	0.01	0.08	1.15
																0.01	0.07	1.28	0.01	0.07	1.05

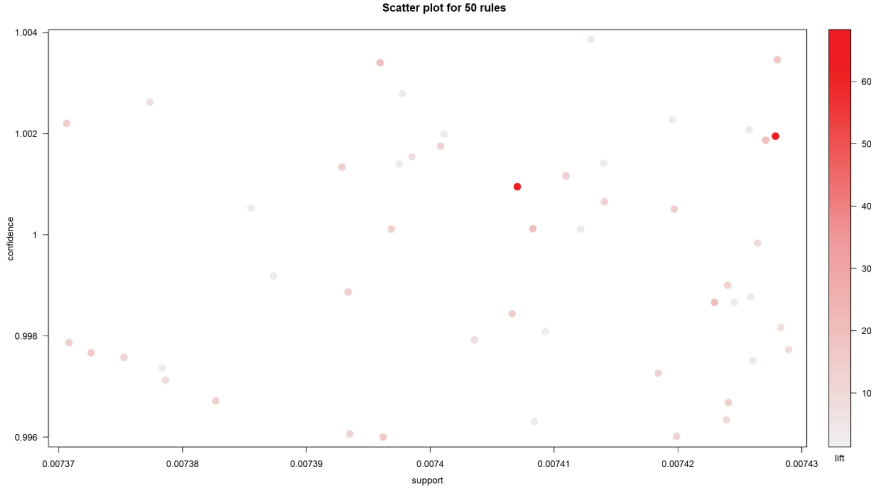
lhs	(CAY BUYUK)			(CAY DEMLEME BUTUK)			(CAY DEMLEME KUCUK)			(CAY KUCUK)			(KENDI SANDVICINI KENDIN YAP)			(SANDVIC DIL PEYNIRLI)			(SIMIT EZINE PEYNIRLI)		
rhs	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift	support	confidence	lift
(TOST CHEDDARLI)	0.01	0.11	1.28	0.01	0.12	1.36	0.01	0.15	1.44	0.01	0.12	1.26									
(TOST CHEDDAR SUÇUK)																					
(SU PET SISE 0.5 LT)	0.01	0.06	0.67	0.01	0.05	0.63	0.02	0.06	0.63	0.02	0.06	0.69				0.01	0.05	0.87			
(SIMIT PASTANE)	0.01	0.09	1.09	0.01	0.11	1.30	0.01	0.18	1.71	0.01	0.12	1.23									
(SIMIT EZINE PEYNIRLI)				0.01	0.14	1.65															
(SANDVIC TAVUKLU UÇGEN)																					
(SANDVIC DIL PEYNIRLI)	0.01	0.10	1.11	0.01	0.11	1.26	0.01	0.10	0.97	0.01	0.09	0.94									
(KENDI SANDVICINI KENDIN YAP)				0.01	0.19	2.24															
(EXOTIC PORTAKAL 330 ML.)																					
(DE LATTE 9 OZ)																					
(DE FILTRE KAHVE 12 OZ)																					
(DE CAPPUCCINO 9 OZ)																					
(DE AMERICANO 9 OZ)																					
(CAY KUCUK)																0.01	0.06	0.94			
(CAY DEMLEME KUCUK)																0.01	0.06	0.97			
(CAY DEMLEME BÜYÜK)													0.01	0.06	2.24				0.01	0.07	1.26
(CAY BÜYÜK)																0.01	0.07	1.11			

Tablo 16’de Apriori algoritması uygulanarak Veri Seti 1 ile Veri Seti 2’den elde edilen kurallar ile kurallara ait Destek, Güven, ürünlerin veri setindeki toplamı ve Kaldıraç değerleri tablodaki sütunlarda gösterilmiştir.



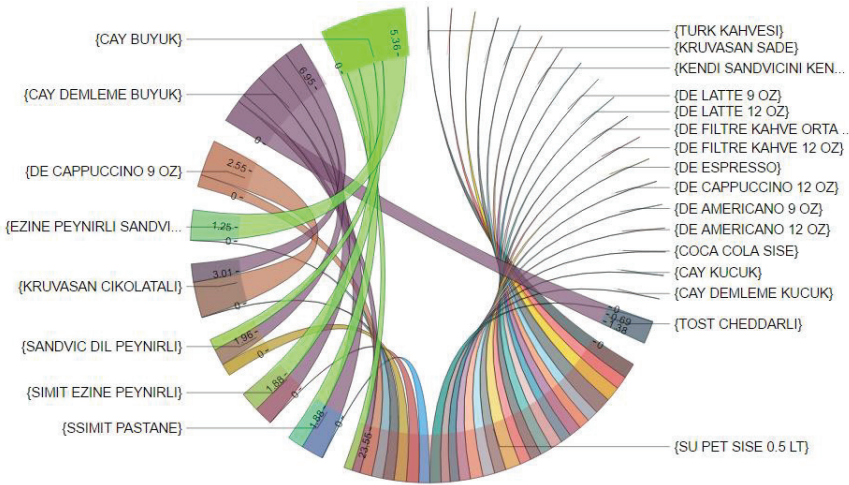
Şekil 11. Veri seti 1 kurallarının birliktelikleri ve güven değerleri

Şekil 11’de yer alan Power BI Bowtie grafiği ile veri seti 1 için yer alan kuralların Güven değerleri ile ürünler arasındaki birlikteliklere gösterilmiştir. Burada çizgilerin kalınlığı Güven değeri ile doğru orantılı olarak kalın yada ince olarak gösterilmektedir.



Şekil 12. Power BI Scarter ile kuralların grafiksel gösterimi

Şekil 12’de veri setlerinden elde edilen 50 kuralın Güven değerine göre sıralandıktan sonraki ürünlerin Power BI Scarter grafiği ile gösterimi yer almaktadır. Dikey düzlem Güven yatay düzlem Destek değerlerini göstermektedir. Grafik üzerindeki noktaların renkleri ise Kaldıraç değerine göre açık ya da koyu renkte gösterilmektedir.



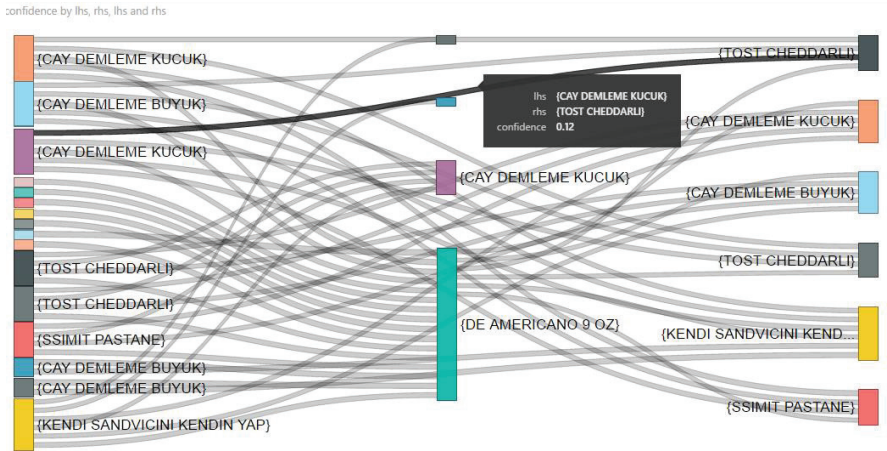
Şekil 13. Power BI Chord ile kuralların grafiksel gösterimi

Şekil 13’de Power BI Chord grafiği ile veri seti 1’deki kuralların kaldıraç değerleri ile ürünlerin birliktelikleri gösterilmektedir. Ürünler arasındaki birliktelikler farklı renklerle görüntülenmektedir. Kaldıraç değerlerine göre bu ilişkileri gösteren çizgi kalınlıkları Kaldıraç değerinin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak kalın ya da ince çizgilerle gösterilmektedir.



Şekil 14. Dot Plot grafiği ile kuralların ürün birliktelikleri

Şekil 14 yer alan Power BI Dot Plot grafiklerinde ürünlerin birliktelikleri güven ve destek değerleriyle görüntülenmektedir. Kaldıraç değeri ise noktaların LHS ve RHS arasındaki uzaklıklar ile ifade edilmektedir. Noktaların büyüklüğü Güven değeri ile doğru orantılı olarak artmakta ya da azalmaktadır. Noktaların renk yoğunluğu açıktan koyuya doğru destek değerinin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



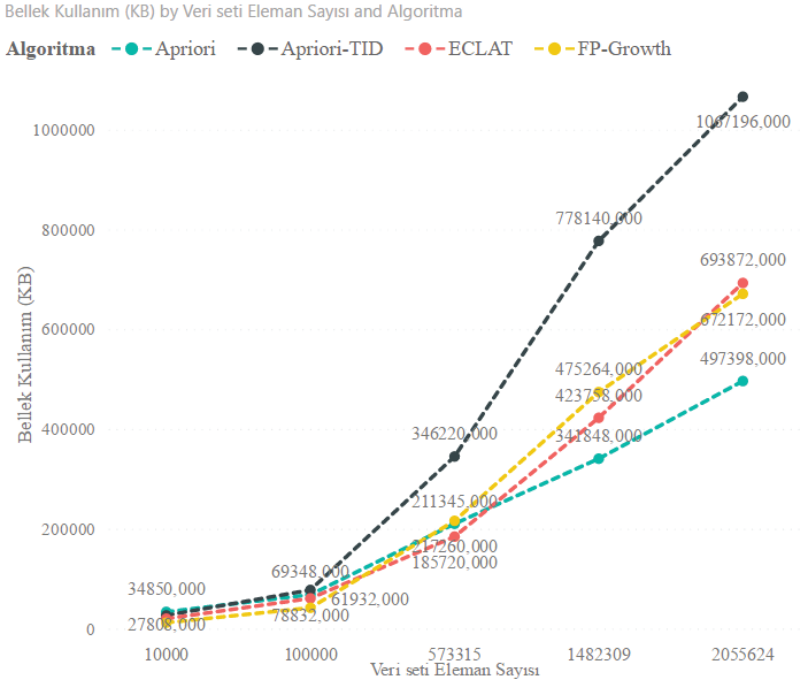
Şekil 15. Power BI Sankey grafiği ile kuralların grafiksel gösterimi

Şekil 15’de Power BI Sankey grafiği ile veri seti 1 ve veri seti 2’den elde edilen birliktelik kuralları gösterilmektedir. Grafikteki değerler Güven değerleri üzerinden aralarındaki birliktelikleri göstermektedir.

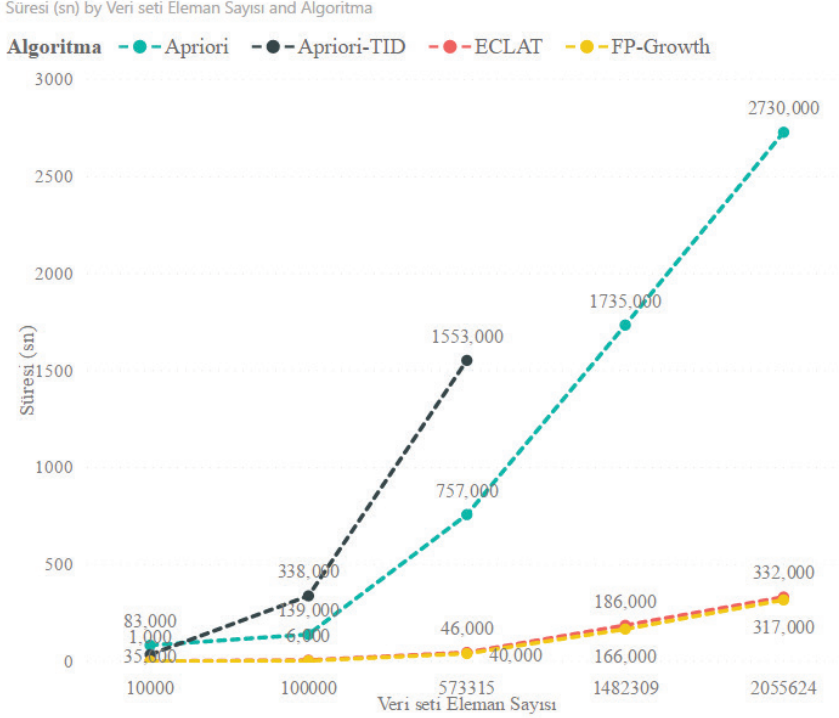
5. BULGULAR, DEĞERLENDİRMELER ve ÖNERİLER

Uygulamada kullanılan algoritmalar farklı yöntemlerle verilerde tarama yaptığı için çalışma sürelerinde farklılıklar görülmektedir. Aynı veri tabanı, destek ve güven değerleri kullanıldığında sık nesne kümelerinin farklı sayılarda olmasına rağmen oluşan kural sayılarının aynı olduğu görüşmüştür.

Algoritmaların çalışmaları sırasında elde edilen bellek kullanımlarına Şekil 18’de yer verilmiştir. Algoritmalar arasında bellek kullanımları açısından değerlendirildiğinde 10.000 satıra sahip veri setiyle çalışılırken en çok Apriori algoritması tarafında bellek kullanımı olduğu görülmüştür. Diğer yandan veri seti boyutları arttıkça Apriori-TID algoritmasının bellek kullanımı Apriori algoritmasından daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Eclat algoritmasının bellek kullanımının daha az olduğu ancak veri büyüdükçe Apriori algoritmasını bellek kullanımında geçtiği görüşmüştür.



Şekil 16. Algoritmaların kuralları oluştururken kullandıkları bellek değerleri (KB)



Şekil 17. Algoritmaların kuralları oluştururken geçen süre değerleri (sn)

Şekil 17’de Algoritmaların çalışma süreleri grafik eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Apriori algoritması veri setlerinin boyutları ile belirli bir oranda arttığı görüşmüştür. Apriori-TID algoritması veri seti boyutu büyüdükçe geçen sürelerde daha büyük artış olduğu görüldü. ECLAT algoritmasının diğer algoritmalarından oldukça hızlı olduğu bu çalışmada da görüldü. ECLAT algoritmasının hızlı olması avantajı yanında Güven değerini hesaplayamaması gibi bir dezavantajı olduğu görülmüştür.

Birliktelik kuralları, veri setlerinde sık tekrarlanan desenler arasındaki gizli bilgiyi bulan önemli veri madenciliği yöntemlerindendir. Son yirmi yılda bu alanda birçok algoritma literatürde önerilmiş, ancak çoğu yöntem günümüzdeki veri türüne uyarlanamamıştır. "Büyük Veri" olarak adlandırdığımız bu ortamlarda var olan eski yöntemler ile bellek ölçeklenebilirliği, iş bölümlene ve yük dengeleme gibi konularda tasarım ve uygulama zorlukları yaşanmıştır.

Bu çalışmada ARM algoritmaları incelenmiş en yaygın kullanılan algoritmalar ile bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulamalarda büyük veriler üzerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı çalışmada, kullanılan dört algoritmanın hepsi veri desteği, hız ve

doğruluk gibi üç önemli metrikle kıyaslanmıştır. Algoritmaların sergiledikleri performans iyiden kötüye doğru FP-Growth, ECLAT, Apriori-TID ve Apriori şeklinde gerçekleşmiştir. Hesaplama zamanına bağlı olarak, ECLAT algoritması, FP-Growth kadar eşit derecede iyidir.

Aynı zamanda kullanılan bu tekniklerin avantaj ve dezavantajları ayrı ayrı ilgili başlık altında detaylı olarak incelenmiştir. Apriori ve Apriori-TID aday kümeleri ve destek değerlerini hesaplarken veri setinde sürekli geçişler yaptığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışma süresi olması gerekenden daha uzun çıktığı test edilmiştir. ECLAT yöntemi, yatay özellikli bir veri tabanı ilk aşamada dikey bir veri tabanı yapısına dönüştürerek sadece bir kez tarar bu sayede kuralları daha hızlı üretebilir. FP-Growth ise iki defa veri setini tümünden taradığı için daha hızlı çalışmaktadır. Sonuç olarak Apriori ve Apriori-TID yöntemleri orta boy veri tabanlarında; ECLAT ve FP-Growth ise Büyük Veri platformunda başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca belirtmek isteriz ki çalışmamızda kullanılan algoritmaların koşuturulmaları sırasında parametre olarak girilen destek değerleri küçültüldükçe çalışma süreleri ile kural sayılarının arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, havalimanlarında yiyecek ve içecek hizmetleri dışındaki diğer hizmet türlerinde de kullanılabilir. Özellikle sanayi 4.0 ile hayatımıza giren IoT, NFC gibi teknolojilerle birleştirildiğinde çok katmanlı analizler yapılması da mümkün olabilmektedir. Diğer bir taraftan havalimanları gibi büyük alanlardaki mesafelerin yolcuların aldığı hizmetlere etkisi incelenebilir. Mevcut havalimanlarından elde edilen değerli bilgiler ile yeni havalimanları ve verilecek hizmetler bu veriler ışığında şekillendirilebilir ve hatta tasarlanabilir. Hizmet çeşitliğinin artması ile daha hassas ve güvenilir sonuçlar elde edilerek sektördeki sorunlara çözüm üretilmesiyle daha karlı alanlara kanalize edilebilir.

Şirket verilerinin elde edilmesindeki zorluk ve şirket içi bilgilerin ifşa edilmemesi hususundaki evrensel mahremiyet kuralları gibi nedenlerden ötürü gerçek piyasa verilerinin elde edilip güvenilir ve gerçekçi bir çalışmanın yapılabilmesi konusundaki zorluklar herkes tarafından bilinmektedir. Bu çalışmada verilerin elde edilmesi gibi zorlukların yanı sıra, elde edilen verilerin kullanılabilir hale getirilmesi için çeşitli aşamalardan geçirilmesi gibi engellerle karşılaşmıştır. Büyük veriler için uygun algoritmaların yazılıma adapte edilmesi, veri setleri ile çalışabilir hale getirilmesi, sistem özellikleri itibarıyla çok da iyi sayılmayan bilgisayarda büyük veriler üzerinde uygulamaların saatlerce sürmesi, elde edilen verilerin istiflenip düzenlenmesi gibi zorluklarla da karşılaşmıştır. Verilerin elde edilip tablolar halinde çalışmaya

yerleştirilmesi de yeterli olmayıp her bir sonucun nedenleri ve sonuçları üzerinde ilişkisel analizler de yapılmış ve varılan yargıların algoritmik temelleri araştırılmıştır.

Bu çalışma, havaalanı gibi sirkülasyonun ve işlem hacminin oldukça yüksek olduğu bir sektörde yapılmış olması bu çalışmanın önemli bir taslak niteliğine kavuştuğunu göstermektedir.

Veri Madenciliği algoritmalarını kullanarak ürünler arasındaki birliktelik kurallarını ortaya koyduğumuz bu çalışmayı biraz daha ileriye taşıyarak, ürün kategorileri arasındaki birliktelikleri de bularak daha farklı alanlarda planlamalar oluşturulabilir. Havalimanlarında yolcu alışkanlıklarını ürün ve kategori birliktelikleriyle inceleyerek yeni açılacak satış noktalarının ürün gamlarının belirlenmesi ve reyon tasarımlarının yeniden düzenlenmesi gibi vb. çalışmalarda bu veriler kullanılabilir. Yolcuların uçuş rotaları ile elde edilen kuralların yorumlanması ülke, bölge, kıta, uyruk, din gibi değişkenlerin etkisi araştırılabilir. Bu bilgiler İstanbul'da yeni açılması beklenen 3. Havalimanı içinde ayrıca yorumlanarak elde edilecek değerli bilgiler ile mağazaların tasarımı ve operasyonun planlanmasına olumlu etkileri olabilir. Ayrıca verilerin mevsimler olarak incelenmesi ile sıcak, soğuk içeceklerden elde edilecek kurallar ile farklı planlamalar yapılabilir. Örneğin yazın dondurma satışlarının artışı ile bu artışın diğer ürünlere etkisi araştırılabilir.

6. SONUÇLAR

Veri madenciliği günümüzde sıkça kullanılan veri madenciliği tekniklerinden ve bir veri madenciliği modeli olan birliktelik kurallarından bahsedilmiştir. Birliktelik kuralı ve birliktelik kuralı için kullanılan algoritmalara ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Veri tabanlarındaki her bir kayıttın diğer kayıtlarla olan ilişkisini inceleyen ve bununla birlikte ilgili kuralları üreten ilişki analizi ve birliktelik kuralları çıkarma yöntemlerine değinilmiştir. Verilerin tekrar tekrar taranması ile yapılan çalışmalarda türlü zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu tür zorlukları aşmak içinde en kullanışlı algoritmalar vurgulanmıştır. Bunlar arasında en çok bilinen ve kullanılan ise Apriori, AprioriTid, Eclat ve FP-Growth algoritmalarının avantaj ve dezavantajlarıyla incelenmiştir.

Yapılan çalışma sonuçlarından yola çıkılarak ikili ve üçlü olarak bulunan kurallara göre satış yöntemlerinde, üretim ve satınalma stratejilerinde farklı çalışmalar yapılabilir. Özellikle sıcak satış esnasında müşteri seçimlerine göre ürün birlikteliklerinden çıkan sonuçlar satış personeli ekranında yönlendirmeler yapabilir. Örneğin kahve alan müşterilerimiz bunun yanında makaron almayı tercih ediyor gibi yönlendirmeler yapılabilir. Oluşan kurallara göre ikili ya da üçlü menüler oluşturularak

satış performansı düşük olan ürünler bu kurallar eşliğinde satılabilir. Böylelikle ürünlerin zayi olması ya da raf ömrünü doldurmadan satışları artırılabilir. Yapılan tüm bu analitik çalışmalar ile elde edilen birliktelik kuralları firmaya tavsiye niteliğinde sunulmuş ve bu bilgiler ile verimlilik artırılmıştır.

KAYNAKLAR

- Agarwal, R. (2020). Modified Ranking With Temporal Association Rule Mining in Supply Chains. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology (IJSSMET)*, 11(4), 58-71.
- Fournier-Viger, P., Lin, J. C. W., Vo, B., Chi, T. T., Zhang, J., & Le, H. B. (2017). A survey of itemset mining. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 7(4), e1207.
- Grama, A., Kumar, V., Gupta, A., & Karypis, G. (2003). *Introduction to parallel computing*. Pearson Education.
- Gupta, S., & Mamtara, R. (2014). A survey on association rule mining in market basket analysis. *International Journal of Information and Computation Technology*, 4(4), 409-414.
- Hand, D. J., & Adams, N. M. (2014). Data mining. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 1-7.
- Kavitha, M., & Subbaiah, S. (2020). Association Rule Mining using Apriori Algorithm for Extracting Product Sales Patterns in Groceries. *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 8(03), 1-4.
- Kumbhare, T. A., & Chobe, S. V. (2014). An overview of association rule mining algorithms. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5(1), 927-930.
- Monino, J. L., & Sedkaoui, S. (2016). Big Data, Open Data and Data Development, vol. 3.
- Nithya, S., Sangeetha, M., Prethi, K. A., & Vellingiri, S. (2021). Impact factor based data sanitization in association rule mining. *Materials Today: Proceedings*.
- Lin, W. Y., Tseng, M. C., & Su, J. H. (2002, May). A confidence-lift support specification for interesting associations mining. In *Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 148-158). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pillai, A. R., & Jolhe, D. A. (2021). Market Basket Analysis: Case Study of a Supermarket. In *Advances in Mechanical Engineering* (pp. 727-734). Springer, Singapore.
- Olson, D. L., & Lauhoff, G. (2019). Descriptive data mining. In *Descriptive Data Mining* (pp. 129-130). Springer, Singapore.

- Oussous, A., Benjelloun, F. Z., Lahcen, A. A., & Belfkih, S. (2018). Big Data technologies: A survey. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 30(4), 431-448.
- Özçakır, F. C., & Çamurcu, A. Y. (2007). Birlikte lık kuralı yöntemi için bir veri madenciliği yazılımı tasarımı ve uygulaması, pp. 6.12: 21-37.
- Tan, P. N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2016). *Introduction to data mining*. Pearson Education India, pp. 359-370.
- Telikani, A., Gandomi, A. H., & Shahbahrami, A. (2020). A survey of evolutionary computation for association rule mining. *Information Sciences*, 524, 318-352.
- Yan, Y., Huang, C., Wang, Q., & Hu, B. (2020). Data mining of customer choice behavior in internet of things within relationship network. *International Journal of Information Management*, 50, 566-574.
- Yuan, X. (2017, March). An improved Apriori algorithm for mining association rules. In *AIP conference proceedings* (Vol. 1820, No. 1, p. 080005). AIP Publishing LLC.
- Zaki, M. J., Parthasarathy, S., Ogihara, M., & Li, W. (1997). Parallel algorithms for discovery of association rules. *Data mining and knowledge discovery*, 1(4), 343-373.
- Zerman, M. (2018). *Birlikte lık kuralı algoritmaları ile büyük veriler üzerinde analitik analizler: havaalanı örneği* (Yüksek Lisans Tezi), Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Programı.

Bölüm 16

POLİMER MODİFİYE BİTÜMLERDE BİTÜM-POLİMER UYUMUNU GELİŞTİRMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

*Havanur Ebru GÜRBÜZ¹
Erol İSKENDER²*

1 Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
h.ebrugurbuz@gmail.com ORCID ID: 000-0002-5928-1308

2 Doç. Dr., Yazar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi İnşaat
Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı eiskender@ktu.edu.tr; eroliskender@gmail.
com ORCID ID: 0000-0001-7934-839X

1. GİRİŞ

Airey'e (2002) göre son zamanlarda, karayollarında trafik hacminin artması, yeni aks tasarımlarına sahip daha büyük ve daha ağır vasıtaların kullanılması ve bununla beraber artan lastik basınçları karayolu üzerindeki deformasyonların artmasına neden olmaktadır (Golestani vd., 2015). Bu durum kaplamalarda kalıcı deformasyonlara, yorulma çatlaklarına, düşük sıcaklık çatlaklarına ve suya karşı duyarlılığa neden olmaktadır (Uncu, 2017). Sonuç olarak bu bozulmaların oluşumunu azaltmak ve kaplama performansını iyileştirmek için bitümlü bağlayıcılara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifikasyonlar yapılmaktadır (Gürbüz, 2018). Polimer modifikasyonu, bitümün denenene veya araştırılan tüm modifikasyon yöntemleri arasında, en popüler yaklaşımlardan biri olmuştur (Zhu vd., 2014).

Lu'ya (1997) göre bitümün polimer modifikasyonu, polimerlerin bitüme mekanik karıştırma veya kimyasal reaksiyonla birleştirilmesi (Zhu vd., 2014). Airey'e (2003) göre modifiyerlerin yaklaşık %75'i elastomerik, %15'i plastomeriktir ve geri kalan %10'u bu üç kategori altında kauçuk veya diğer katkılardır (Polacco vd., 2015). Polimerlerin, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek sertlik, düşük sıcaklıklarda daha yüksek çatlama direnci, daha iyi nem direnci veya daha uzun yorulma ömrü gibi bazı gelişmiş bitüm özelliklerine neden olduğu bildirilmiştir (Zhu vd., 2014). Polimer modifiye bitümlerin sağladığı yararlar karşın yüksek maliyet, düşük depolama stabilitesi ve zayıf yaşlanma direnci gibi sorunlar mevcuttur (İskender, 2019). Polimer modifiye bitüm endüstrisindeki temel zorluk, yüksek sıcaklıkta statik depolama sırasında veya kaplama sahasına nakliye sırasında ayrışma eğilimiyle ortaya çıkan, bitüm ve polimer arasındaki zayıf uyum ile ilgilidir (Polacco vd., 2015). Polimerler ile bitüm arasındaki uyumu arttırmak için doyurma, kükürt vulkanizasyonu, antioksidanların eklenmesi, hidroforik kil minerallerinin kullanılması, reaktif polimerlerin işlevselleştirilmesi ve uygulanması (yeni işlevselleştirilmiş ürünler olarak da düşünülebilir) gibi farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Zhu vd., 2014).

2. BİTÜM

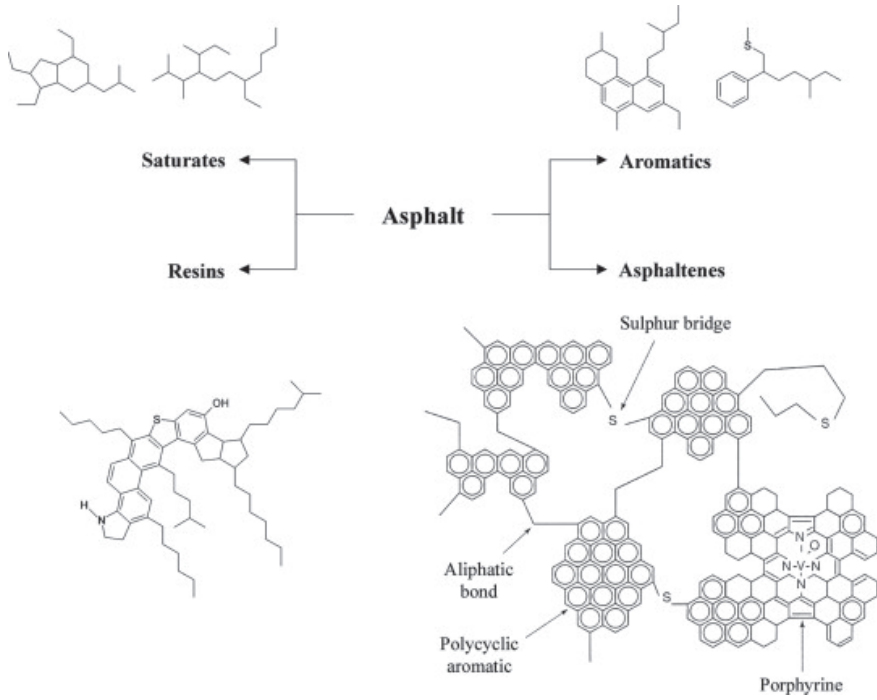
Bitüm, siyah veya koyu kahverengi renkli, temel olarak hidrokarbon ve türevlerinden meydana gelen, trikloretilende çözünebilir, kuvvetli yapışma özelliği olan, ham petrolün damıtılmasından elde edilen veya doğal halde bulunan, katı, yarı katı veya sıvı bir bağlayıcıdır (Kaya, 2011). Bitümlü bağlayıcılar, bitkisel kömürden elde edilen *katranlar* ve hayvansal kökenli petrolden elde edilen *asfaltlar* olmak üzere iki kısma

ayrılırlar. Asfaltlar, doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar; doğal asfaltlar ise mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasıyla elde edilirler (Gürbüz, 2018).

2.1. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bitüm, hidrokarbon moleküller (karbon, hidrojen) ile az miktarda da yapısal olarak benzer nitelikte heterosiklik türler (azot, kükürt, oksijen, nitrojen ve sülfür atomları) içeren fonksiyonel grupların kimyasal bir karışımıdır (Yılmaz, 2016; Uncu, 2017). Aynı zamanda bitüm, oksitler, inorganik tuzlar veya porfirin yapıları şeklinde ortaya çıkan vanadyum, nikel, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi metaller de içerir (Yılmaz, 2016). Farklı ham petrolerden elde edilen asfaltlar üzerinde yapılan analizler bitümün genel kimyasal bileşiminin, %82-88 karbon, %8-11 hidrojen, %0-6 sülfür, %0-1.5 oksijen ve %0-1 nitrojenle oluştuğunu göstermektedirler (Gökalp vd., 2019). Bitümlerin kimyasal bileşimi genel olarak benzerdir, ancak orijinal ham petrole ve rafine etme ve karıştırma sırasında kullanılan işlemlere bağlı olarak bazı değişiklikler gösterir (URL-1, 2021).

Bitümü, asfaltlar (A) ve maltenler olarak adlandırılan iki kimyasal gruba ayırmak mümkündür, ayrıca maltenler doygular (S), aromatikler (A) ve reçineler (R) olmak üzere alt gruplara ayrılırlar (Whiteoak, 2004). Bu nedenle, dört SARA fraksiyonu, molekül ağırlığı (MW), aromatiklik, polarite ve heteroatomik içerik ile $S < A < R < A$ sırasıyla artan doygular (S), aromatikler (A), reçineler (R) ve asfaltlar (A) olarak tanımlanabilir (Polacco vd., 2015). Şekil 1'de bitümün bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Bitümün bileşenleri (Gasthauer, 2008)

- *Asfaltener*, karbon ve hidrojene ek olarak bir miktar nitrojen, kükürt ve oksijen içeren, yüksek moleküler ağırlıklı (800–3500 g/mol), n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katılardır (Paliukaitė vd., 2014). Asfaltın toplam %5 - %25'ini oluştururlar (Yılmaz, 2016). Asfalt miktarının artırılması ile daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip, daha sert ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir (Whiteoak, 2004:102).

- *Reçineler*: n-heptan içerisinde çözünebilir olup, asfalt gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşurlar ve az miktarda sülfür, nitrojen ve oksijen içerirler (Yılmaz, 2016). Oda sıcaklığında yarı katı veya katı halde bulunurlar, ısıtıldıklarında akışkan ve soğutulduklarında ise kırılkan/gevrektiler, ayrıca moleküler ağırlıkları 300 ile 2000 g/mol arasında değişmektedir (Paliukaitė vd., 2014). Reçineler elektriksel olarak oldukça yüklüdürler ve bu özellikleri reçinelerin güçlü bir yapışkan olmalarını sağlamaktadır (Whiteoak, 2004).

- *Aromatikler*: Asfalt içerisindeki en düşük moleküler ağırlıklı bileşenler aromatiklerdir (Yılmaz, 2016). Aromatikler, toplam bitümün

%40 ile %65'ini oluşturan koyu kahverengi viskoz sıvılardır (Whiteoak, 2004).

- *Doygunlar*: Alkil-naftenler ve bazı alkil-aromatikler ile birlikte düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır (Whiteoak, 2004). Saman rengi veya beyaz renkte olan, ortalama molekül ağırlığı aromatlere benzeyen hem parafinli hem de parafinsiz bileşenlerden oluşan ve asfaltın toplam %5 ile %20'sini oluşturan polar olmayan viskoz yağlardır (Sağlık, 2009; Kaya, 2011).

2.2. Bitüm Modifikasyonu

Kaplamalarda artan trafik yüklerinden dolayı deformasyonlar oluşmakta ve hizmet ömrü azalmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için, saf bitümün; kimyası veya fiziksel özellikleri üzerinde etki oluşturacak şekilde, çeşitli katkı malzemeleriyle, ağırlıkça belirlenen miktarlarda ve belli şartlar gözetilerek karıştırılması, bitüm modifikasyonu olarak adlandırılır (Kaçaroğlu, 2019). Lewandonski'ye (1994) göre, bitüm modifikasyonunun genel amaçları şöyle sıralanmıştır (Gökalp vd., 2019):

- Düşük hizmet sıcaklıkları için daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlakları azaltmak,
- Yüksek sıcaklıklarda daha katı veya sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonları azaltmak,
- Yapım, bakım ve onarım zamanında viskoziteyi düşürmek, karışımların işlenebilirliğini ve sıkışmasını iyileştirmek,
- Karışımların dayanımını ve stabilitesini artırmak,
- Karışımların aşınma direncini artırmak, kaplamalarda bitüm ile agrega arasında daha iyi adezyonu sağlayarak agrega kayıplarını azaltmak,
- Kaplamalarda düşük sıcaklık çatlaklarını azaltmak,
- Karışımın yorulma direncini artırmak,
- Düşük performansa sahip bitümlü bağlayıcının kalitesini iyileştirmek, bu şekilde düşük performanslı bitümlü bağlayıcıların da kullanılmalarına imkân sağlamak,
- Yaşlanma ve oksitlenmeye karşı direnci artırmak, yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların yenilenmesini/gençleşmesini sağlamak,

- Agregalar üzerinde daha kalın bir film tabakası oluşturmak, bu şekilde aralarındaki soyulmayı azaltmak,
- Bitümlü bağlayıcının içinde bir katkı olarak kullanılabilirliği ortaya koymak,
- Terleme ve kuma olaylarını azaltmak,
- Kaplamaların tabaka kalınlığını azaltmak,
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak,
- Yakıt döküntülerine karşı dayanım artışı sağlamak ve
- Kaplamaların ömür döngü maliyetini azaltmaktır.

2.2.1. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerinin tipini, özelliklerini ve asfalt kıvamına etkilerini gösteren genel sınıflandırma Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. *Ilıca vd.ne (2001) göre bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması (Yılmaz, 2016)*

Tip	Örnek Katkı Maddeleri	Asfalt Kıvamına Etkisi
1. Filler	- Sülfür - Karbon siyahı - Mineral filler: - Taş tozu - Kireç - Portland çimentosu	Sertleştirme
2. Ekstender (Genleştirici)	- Sülfür - Lignin (Odun özütü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks b. Yapay lateks c. Blok kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	-
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		-
6. Fiber	- Doğal fiber - Asbest - Taş yünü - Yapay - Fiberglas - Polyester - Polipropilen	Sertleştirme
7. Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	- Karbon - Kalsiyum tuzu - Kurşun karışımları	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	- Sertleştirme ve doğal asfaltlar - Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları	Yumuşatma veya sertleştirme
10. Soyulma önleyici	- Kireç - Aminler	Yumuşatma

Polimer ve polimer olmayan şeklinde sınıflandırılan katkı maddeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. *Ilıcalı vd.ne (2001) göre polimer ve polimer olmayan katkı maddeleri ve örnekleri (Yılmaz, 2016)*

Modifikasyon Tipi		Örnekler
1. Polimer modifikasyon		
Plastikler	Termoplastikler	Poliyeten (PE), Polipropilen (PP), Polivinil- Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen-Vinil- Asetat (EVA)
	Termosetler	Epoksi reçine, polyester reçine
Elastomerler	Doğal kauçuklar	
	Yapay elastomerler	Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Stiren-Butadien-Rubber (SBR) İsobüten-İsopren kopolimer (IIR)
İşlenmiş kauçuklar		
Fiberler		Polyester fiberler, Polipropen fiberler
2. Polimer olmayan katkı ile modifikasyon		
Fillerler		Kil, uçucu kül, karbon siyahı
Soyulma önleyici katkılar		Amidler ve organik aminler
Ekstender (Genleştiriciler)		Sülfür, lignin
Antioksidanlar		Aminler, çinko antioksidanlar, kurşun antioksidanlar, fenolikler
Organo-metal bileşimleri		Organo-manganez bileşimleri
Diğerleri		Organo-karbon bileşimleri
3. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu		Katkı reaksiyonu (Asfalt+Monomer) Vulkanizasyon (Asfalt+Sülfür) Nitrasyon reaksiyonu (Asfalt+Nitrik asit)

2.2.2. Polimer Modifiye Bitümler

Polimerler, uzun zincirler oluşturmak için daha küçük moleküller (monomerler) arasında kimyasal reaksiyon yoluyla sentezlenen makromoleküllerdir (Porto vd., 2019). Polimer modifiye bitüm (PMB) ise, mekanik karıştırma ve/veya kimyasal bir reaksiyon sağlanarak polimerin bitüm ile karıştırılması ile elde edilen bir bitümlü bağlayıcı türüdür (Gökalp, 2019). PMB'nin başarısı, bazı polimerlerin, nispeten küçük miktarlarda ilave edilse bile bitümlerin reolojik özelliklerini güçlü bir şekilde etkileme ve iyileştirme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır (Polacco vd., 2015). Ayrıca başarılı bir modifikasyon gerçekleştirilebilmesi birçok parametreye bağlıdır: bitüm ve polimerin kimyasal yapısı, bitüm ve polimerin türü, polimer/bitüm oranı, polimer parçacık boyutu ve PMB üretim/işlem koşulları (sıcaklık, karıştırma hızı ve süresi) vb. (Gökalp, 2019). Tablo 3'te bazı polimer türlerinin sağladıkları avantaj ve dezavantajlar özetlenmiştir.

Tablo 3. *Modifiye bitümlerde kullanılan polimerlerin özellikleri (Becker vd., 2001)*

Polimer	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
Polietilen (PE)	• Yüksek sıcaklık direnci • Yaşlanma direnci • Düşük maliyet	• Bitüm içinde dağılması zor • Kararsızlık problemleri • Daha iyi özellikler elde etmek için yüksek polimer içeriği gerekli • Elastik geri dönme yok	Endüstriyel kullanımlar Birkaç yol uygulaması
Polipropilen (PP)	• Önemli viskozite artışı yok • Yüksek miktarda polimer gerekli olsa bile taşıma ve serme kolaylığı • Düşük penetrasyon • Plastisite aralığını genişletir ve bağlayıcının yük direncini iyileştirir	• Ayrışma problemleri • Elastikiyet veya mekanik özelliklerde iyileşme yok • Düşük termal yorulma çatlama direnci	Çatı kaplamaları için Ataktik PP kullanıldı İsotaktik PP ticari amaçlar için kullanılmazlar.
Etilen-vinil-asetet (EVA) Etilen-metilakrilat (EMA)	• Bazı durumlarda mükemmel uyum • Rakip ürünlere kıyasla minimum viskozite değişiklikleri • Normal karıştırma ve taşıma sıcaklıklarında termal olarak kararlı • Blok kopolimerlere kıyasla düşük maliyetli • Yapışmayı artırma	• Elastik geri dönmede iyileşme yok	Kaplama ve çatı kaplama
PVC	• Daha az çatlayan PVC kullanımı (disposal)	• Çoğunlukla filler gibi davranır	Ticari olarak kullanılmaz
Stiren-butadien blok kopolimer (SBS) Stiren-izopren blok kopolimer (SIS)	• Düşük sıcaklıklarda daha yüksek esneklik* • Yüksek sıcaklıklarda daha iyi akma ve deformasyon direnci • Mukavemet ve çok iyi esneklik • Tekerlek izi direncinde artış • Yüksek yaşlanma direnci • Daha iyi asfalt-agrega adezyonu • Düşük oranda kullanıldığında iyi karışım stabilitesi	• Yüksek maliyetli • Düşük penetrasyon direnci • Serme sıcaklıklarında daha yüksek viskozite • Isıya ve oksidasyona karşı direnç, poliolefinlere göre daha düşüktür (ana zincirdeki çift bağların varlığı nedeniyle) • SBS karışımlarına uygun asfaltlar, yüksek oranda aromatik ve düşük oranda asfaltın içerikli bir asfalta ihtiyaç duyar	Kaplama ve çatı kaplaması

EPDM	• PE'ye kıyasla daha yüksek dispersiyon kapasitesi (yanal olefinik grupları, çift bağları ve büyük hacimleri nedeniyle) ve geliştirilmiş elastik davranış • Performans iyileştirmesi için yüksek oranlara ihtiyaç vardır	• Asfaltla karışması kolay değil • Bazen daha az kararsız PMB üretmek için hava üfleme/oksidasyon gereklidir (bir miktar çapraz bağlanma oluşumu yoluyla)	Çatı kaplama
Epoksi reçineler	• Viskoz akma göstermezler Kimyasal saldırılara (attack) çok dayanıklı • Daha az sıcaklığa duyarlı • Daha yüksek esneklik • Çatlama direnci • Daha iyi yapışkanlık	• Yüksek maliyet • Asfaltlarla karıştırılan bağlayıcılar, asfaltlardan ziyade termoset reçinelerin davranışını gösterir	Havaalanı kaplaması ve köprü yüzey kaplaması gibi çeşitli özel uygulamalarda kullanılır
Doğal kauçuk	• Daha iyi tekerlek izi direnci • Daha yüksek duktilite • Döngüsel yükler altında daha yüksek elastikiyet ve özellikler	• Ayrışma ve oksijen absorpsiyonuna duyarlı • Çok yüksek moleküler ağırlık (düşük uyum). Bu nedenle kısmen ayrıştırılması ve mekanik olarak homojenleştirilmesi gerekir.	Kaplama
Polidiolefinler (polibutadien, poliizopren)	• Polimonoolefinlere göre daha kolay dağılır • Diğer termoplastik malzemelerden daha belirgin elastikiyet özellikleri verirler	• Tüm zincirlerdeki çift bağlar, ısıtılarak veya oksijen varlığında polimer zincirinin kısmi ayrışmasına neden olabilir.	Kaplama Çatı kaplaması
Geri dönüştürülmüş lastik kauçuğu	• Lastik bertarafı • Düşük malzeme maliyeti • Potansiyel yorulma direnci iyileştirmesi • Azaltılmış yansıtıcı çatlama • Daha ince kaplamalar (lifts) kullanılarak daha uzun durabilite • Düşük tekerlek izi direnci	• Genleştirici olarak kullanıldığında daha düşük fiziksel direnç • Tescilli ürünlerin kullanımı • Bitümde dağılabilmesi için yüksek T ve uzun sindirim sürelerine ihtiyaç duyar. Kısmen devulkanize edilmemişse, esasen esnek bir filler olarak işlev gören kauçuk ile heterojen bir bağlayıcı üretir.	Kaplama

Karışık sistemler (kullanılan sistemler, formülasyonlarında SBS'yi içerir (PE'li sistemler de kullanılmıştır))	• Tek bir modifiyerle mümkün olmayacak iyileştirmeler	• Uyumluluk ve kararsızlık sorunları	Kaplama
* Bazı yazarlar katılmayabilir			

2.2.3. Bitüm-Polimer Uyumu

Polimer modifiye bitümlerin özellikleri bitüm ile polimer arasındaki uyuma bağlıdır (İskender, 2019). Uyum, modifiye bitümün depolanması sırasında ayrışmama eğilimi olarak tarif edilebilir (İskender, 2019) ve modifiye bitümün arzulanan özelliklere sahip olmasını sağlayan, bitümün bileşenleri ve polimer türü ile yakından ilgili bir kavramdır (Gökalp vd., 2019). Bir polimer uyumsuz olabilir, biraz uyumlu olabilir veya bitümle uyumlu olabilir (Becker vd., 2001):

- *Uyumsuz polimerler*, bitümle karıştırıldığında, kohezyon veya duktilite içermeyen heterojen karışımlara neden olur. Polimer, bitümün koloidal dengesini ve dolayısıyla malzemenin kohezyonunu etkiler.

- *Biraz uyumlu polimerler*, bitümü başarılı bir şekilde iyileştirmek için özel mekanik, termal veya kimyasal işlemler gerektirir.

- *Uyumlu malzemeler*, geleneksel karıştırma teknikleri kullanılarak fiziksel olarak kararlı karışımlar verirler ve bitümün fiziksel özelliklerini iyileştirebilir veya iyileştirmeyebilirler.

2.2.4. Bitüm-Polimer Uyumu için Çözümler

Moleküler ağırlık, yoğunluk, viskozite ile asfalt ve polimer arasındaki çözünürlük katsayısı gibi özelliklerdeki farklılıklardan dolayı mekanik karıştırma ile elde edilen modifiye bitümlerin çoğunda iki ayrı faz oluşmaktadır (İskender, 2019). Bu fazların kimyasal olarak uyumsuz ve yüksek sıcaklık depolama süresince faz ayrışması eğiliminde olmaları nedeniyle modifiye bitümler özelliklerini kaybederler. Bu yüzden yıllar boyunca, yüksek sıcaklıklarda depolama sırasında faz ayrışması sorununu çözmek veya en azından azaltmak için çok sayıda çözüm önerilmiş ve patentlenmiştir. Bu çözümler, fiziksel veya kimyasal uyumun sağlanması için katkı maddelerinin kullanılmasının yanı sıra bitüm veya polimerik fazın işlevselleştirilmesini ve PMB yapısına kimyasal olarak çapraz bağlı bir ağ oluşturmak için vulkanizasyon ajanlarının kullanımını içerir (Polacco vd., 2015). Literatürde yer alan bazı uygulamalar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. *Polimer modifiye bitümlere yapılabilen uygulamaların avantaj ve dezavantajları (Zhu vd., 2014)*

Uygulama	Avantajları	Dezavantajları
Doyurma (Saturasyon)	Sıcaklığa, oksidasyona ve ultraviyoleye karşı yüksek direnç	- Faz ayrışması sorunları - Yüksek maliyet
Kükürt vulkanizasyonu	- İyileştirilmiş depolama stabilitesi - İyi yüksek sıcaklık özellikleri	- Yalnızca SBS gibi doymamış polimer modifiyerler için uygulanabilir - Oksidasyon yaşlanmasına ve dinamik kesmeye karşı yüksek hassasiyet - Hidrojen sülfür salınımı - Zayıf geri dönüştürülebilirlik
Antioksidanlar	• Düşük oksidasyon	• Yüksek maliyet
Hidrofobik kil mineralleri	- İyileştirilmiş depolama stabilitesi - Yüksek tekerlek izi direnci - Yüksek yaşlanma direnci	- Düşük sıcaklık özelliklerinde, düktilitede ve elastik geri dönüşümde sınırlı iyileşme - İdeal eksfoliye yapıyı elde etme zorluğu
İşlevselleştirme	• İyileştirilmiş uyum	- Bazı durumlarda kontrol edilememe - Yüksek maliyet
Reaktif polimerler	- İyileştirilmiş uyumluluk - Gelişmiş yüksek sıcaklık özellikleri	- Düşük sıcaklık özelliklerinde sınırlı iyileşme - Jelleşme sorunları

2.2.4.1. Kükürt Vulkanizasyonu

Wen vd.ne (2002) göre kükürtün iki şekilde çalıştığına inanılmaktadır: polimer moleküllerini kimyasal olarak çapraz bağlamak ve polimer ve bitümün sülfür ve/veya polisülfid/polisülfür bağları yoluyla kimyasal olarak birleştirilmesi (Zhu vd., 2014). Kükürtün polimer modifiyerlerle bağlanması, polimerdeki doymamış bağlarla kimyasal reaksiyonlara dayandığından, kükürt vulkanizasyonunun uygulanması, doymamış polimerlerle modifiye edilmiş PMB'ler ile sınırlıdır, bunlardan en yaygın kullanılanı SBS'dir (Zhu vd., 2014).

Kükürt ile bitüm arasındaki reaksiyonu kontrol eden faktörler arasında karışım sıcaklığı belirleyici rol oynar. 140 °C'nin altındaki sıcaklıklarda bitüm moleküllerine kükürt katılması veya hidrojen sülfid oluşumu ile dehidrojenasyon meydana gelebilir. Daha yüksek sıcaklıklarda, C – S bağlarının oluşumu, aromatik ve naftenik bileşenler içinde köprüler oluşturarak bitümün dinamik bir vulkanizasyonunu teşvik eder, böylece bitümün kimyasal bileşimini ve koloidal yapısını derinlemesine değiştirir (Polacco vd., 2015). Kükürt ilavesinden önce karışımın homojenliği de önemlidir. Bu açıdan, çok erken bir kükürt ilavesi gerçekleştirilirse, hızlı bir vulkanizasyon ve dolayısıyla işe yaramaz bir malzeme gözlemlenebilir. İyi bir kimyasal uyumluluk için uygun bir kükürt köprüsü dağılımı (sulfur bridge distribution) da önemlidir (Porto vd., 2019).

İyileştirilmiş depolama stabilitesinin yanı sıra, kükürt vulkanizasyonunun PMB'nin esnekliğini, deformasyon direncini ve bazı reolojik özelliklerini de iyileştirebilir (Zhu vd., 2014). Ancak bazı çalışmalar kükürt vulkanizasyonunun PMB'leri oksidatif yaşlanmaya daha duyarlı hale getirdiğini göstermiştir ve kükürtü tek ilave modifiye edici olarak kullanmanın iyi bir fikir olmadığı sonucuna varılmıştır (Porto vd., 2019). Bununla birlikte, bitüm/polimer karışımlarının hazırlanması sırasında tehlikeli sağlık gazı hidrojen sülfür emisyonu, elemental kükürt kullanımının ana dezavantajıdır (Polacco vd., 2015).

2.2.4.2. Antioksidanlar

Bazı PMB'ler oksidasyona duyarlıdır, örneğin; SBS modifiye bitüm. Bu durumlarda, antioksidanların kullanılması, PMB'nin oksidasyonunu geciktirmeye yardımcı olabilir. Antioksidanlar, hizmet sıcaklıklarında viskoz ortamda yetersiz hareketlilikleri gibi kullanım sırasında daha fazla sorunla karşılaşabilirler (Zhu vd., 2014).

2.2.4.3. İşlevselleştirme

Bitüm polimer modifikasyonu bakış açısından, işlevselleştirme, iyi depolama kararlılığı, mükemmel yaşlanma direnci, agregalarla güçlü adezyon, yüksek sıcaklıklarda yüksek sertlik ve düşük sıcaklıklarda iyi çatlama direnci gibi PMB'nin belirli işlevlerini elde etmek için belirli işlevsel/fonksiyonel grupların polimere kimyasal olarak eklenmesi anlamına gelir. Eklenen fonksiyonel grupların genellikle bazı bitüm bileşenleriyle hidrojen bağları veya kimyasal bağlar oluşturmak gibi çeşitli yollarla etkileşime girmesi beklenir, bu da uyumu bir dereceye kadar geliştirebilir. Elbette, halihazırda kullanılan polimer değiştiricilerin işlevselleştirilmesiyle ilgili olarak not edilebilecek bazı sorunlar da vardır.

Örneğin, depolama kararlılığının iyileştirilmesi durumunda, polimer modifiyerler ile bitüm arasındaki aşırı etkileşim, PMB'nin iki fazlı yapısını bozabilir ve ürünleri işe yaramaz hale getirebilir (Zhu vd., 2014).

2.2.4.4. Reaktif Polimerler

Bitüm modifikasyonunda kullanılan reaktif polimerler, reaktif etilen polimerleri ve izosiyanat bazlı polimerler gibi bitümün bazı bileşenleri ile kimyasal olarak reaksiyona girdiğine (fiziksel olarak karışmak veya etkileşime girmek yerine) inanılan polimer modifiye edicilerdir (Zhu vd., 2014). Bir başka tanım ise, “etilen bazlı yapıları nedeniyle reaktif etilen terpolimerleri (RET) olarak da bilinen reaktif polimerler, glisidil metakrilat (GMA), akrilik asit vb. den türetilen reaktif gruplar ile aşılınmış polimer bazlı bileşiklerdir.” şeklindedir (Porto vd. 2019). Bu tip polimerlerin kullanımı, kovalent bağlar oluşturarak poliolefin (örn., PE, PP, vb.) ve bitüm arasındaki uyumu artırmak için önerilmektedir.

2.2.4.5. Maleik Anhidrit

Maleik anhidrit (MAH), $C_4H_2O_3$ moleküler formülüne sahip doymamış bir halkalı (beş atom halka) bileşiktir (Porto vd., 2019) ve bitüm modifiyer veya bitüm-polimer uyumlaştırıcı olarak yaygın olarak kullanılır (Polacco vd., 2015). MAH-bitüm etkileşimi, karmaşık mekanizmalarla (bitüm molekülleri ile kopolimerizasyon veya Diels-Alder reaksiyonları) ile karakterize edilir (Porto vd., 2019). MAH'nin yüksek reaktivitesi, polimerler ile etkileşimlerini teşvik ederek bitüm özelliklerini geliştirmek için kullanılabilmesine rağmen, bu yüksek reaktivite, işlenmesi ve depolanmasıyla ilgili dezavantajları ortaya çıkarmaktadır (Porto vd., 2019). Bu nedenle, bu tür kimyasal bileşikler bir rafineri veya bitüm üretim tesisine sokmak yerine, polimer-MAH reaksiyonunun bir ön aşamasının uygulanması ve ardından bitümün MAH aşılı polimer ile modifiye edilmesi tercih edilir (Polacco vd., 2015).

2.2.4.6. Nanokompozit Modifiyerler

Polimer/tabakalı silikat nanokompozit (PLS) (diğer adıyla polimer/kil nanokompozitler), polimer bilimi araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Porto vd., 2019). Bir polimerin (genellikle hidrofobik) ve doğal bir hidrofilik tabakalı silikatın basitçe karıştırılması, mutlaka bir nanokompozit oluşumuna yol açmaz. Aksine, iki bileşen arasındaki zayıf fiziksel etkileşim genellikle neredeyse hiç geliştirilmemiş mekanik ve termal özelliklere sahip iki fazlı sistemlere yol açar. Polimer ve tabakalı silikat arasındaki etkileşimleri geliştirmenin en basit yolu,

silikat yüzeyini hidrofilikten organofilike dönüştürmektir. Saf tabakalı silikatlar genellikle hidratlanmış Na^+ veya K^+ iyonları içerdiğinden, bu, alkilamonyum katyonları gibi katyonik yüzey aktif maddelerle iyon değişim reaksiyonları yoluyla elde edilir. Nanometre seviyesinde dispersiyon elde edildiğinde, malzeme bir *nanokompozit* olarak tanımlanabilir” (Polacco vd., 2015). Çeşitli çalışmalarda killer, polimer karışımlarında uyumlaştırıcı ajanlar olarak kullanılmıştır (Porto vd., 2019). Çünkü organokil, tercihen en uyumlu polimerin kütlesi içinde yer alsa bile, ara yüzey bölgesinde de lokalize olabilir. Sonuç olarak, ara yüzey gerilimi azaltılır, ikincil fazda dağılmış parçacıklar, saf polimer karışımlarında sahip oldukları tipik yuvarlak şekli kaybeder, damlacıkların birleşmesi önlenir ve daha ince bir dağılım elde edilir (Polacco vd., 2015). Galooyak vd.ne (2010) göre özellikle PMB’lerde PLS kullanımının başlıca iki etkiye sahip olduğu iddia edilmiştir: 1) dağılmış kil levhacıklarının bariyer özellikleri ile PMB’nin yaşlanma direncini iyileştirmek ve 2) polimer modifiyerler ve bitüm arasındaki yoğunluk farkını azaltarak PMB’nin depolama stabilitesini artırmak (Porto vd., 2019).

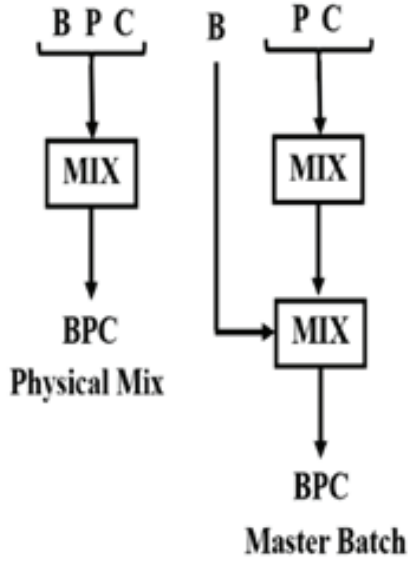
2.2.4.6.1. Bitüm-Kil İkili Sistemi

Bitüm olması durumunda, killerle olan etkileşimler, i) polar fonksiyonel grupların varlığını garanti eden asfaltenler ve ii) küçük boyutları nedeniyle kil levhacıkları arasına kolayca girebilen maltenlerin daha düşük molekül ağırlıklı bileşenleri tarafından az oranda tercih edilir. Ancak bu, asfaltın genel hidrofobik doğasına karşı koymak için yeterli değildir; ayrıca, bu durumda, organo-modifiye killerin kullanılması, interkalasyon/eksfoliasyon sürecine yardımcı olur (Polacco vd., 2015).

2.2.4.6.2. Bitüm-Polimer-Kil Üçlü Sistemi

Galooyak vd.ne (2010) göre PMB’de kil kullanımlarının esas olarak iki amaç için olduğu iddia edilmektedir: (1) dağıntık kil levhacıklarının bariyer özellikleri ile PMB’nin yaşlanma direncini iyileştirmek ve (2) polimer modifiyerler ve bitüm arasındaki yoğunluk farkını azaltarak PMB’nin depolama stabilitesini arttırmaktır (Zhu vd., 2014). Depolama stabilitesi sadece PRP (polimer zengin faz) ve ARP (asfaltın zengin faz) arasındaki yoğunluk farkındaki bir azalmadan kaynaklanmamaktadır. Birkaç çalışma, bitüm ve polimer arasındaki uyumun da temel bir rol oynadığını göstermiştir (Porto vd., 2019). “Birincisi, dağıntık fazın şekli ve boyutu kil varlığında büyük ölçüde değişir. Ayrıca kil, karışımların fiziko-mekanik özelliklerini, iç yapının tamamen yeniden düzenlenmesini önerecek şekilde etkiler. Bu nedenle, iyileştirilmiş depolama stabilitesi kesinlikle kil yoğunluğu ile ilişkilidir, bu da kilin PRP’de yaygın

olarak bulunduğunu gösterir, ancak gerçek/saf bir asfalt/polimer uyumu etkisine bağlı olması daha olasıdır” (Polacco vd., 2015). Ayrıca, hazırlık prosedürü de önemli bir rol oynar (Porto vd., 2019). Bitüm/polimer/kil (BPC) iki farklı şekilde hazırlanabilir. İlki “fiziksel karıştırma” (PM) olarak adlandırılabilir ve bitüme ayrı birimler olarak kil ve polimer eklenmesinden oluşur. İkincisi, bitüme bir PLS’nin eklenmesini içeren bir “ön karışım” (MB) prosedürüdür (Polacco vd., 2015). Bu iki prosedür Şekil 2’de şematize edilmiştir.



Şekil 2. Karıştırma süreçleri (fiziksel karıştırma ve ön karışım) (Porto vd., 2019)

Morfolojiden başlayarak, ikili BA/SBS harmanı tipik bir iki fazlı morfolojiye sahiptir, bu da yüksek sıcaklıkta depolama kararsızlığına neden olur ve daha hafif asfalt fraksiyonlarıyla sınırlı polimer şişmesini gösterir. PM üçlü karışımında durum önemli ölçüde farklıdır. Model hâlâ iki fazlı ve mikro alanların şekli bir şekilde öncekine benzer, ancak boyutlar daha küçüktür ve sistemin gelişmiş uyumunu ve stabilitesini gösterir (Polacco vd., 2015).

Fiziksel karıştırma prosedürde, kilin sadece küçük bir kısmı yüzey aktif madde görevi görür ve bitüm/polimer etkileşimlerini arttırırken, ön karışım prosedüründe, polimer/kil ön karışımı, sonraki bitümle karıştırma aşamasından sonra hayatta kalan kil ve polimer arasındaki etkileşimleri mümkün kılar (Polacco vd., 2015).

2.2.5. Yapılan Çalışmalar

Liang vd. (2015) tarafından SBS ile modifiye edilmiş asfaltlar, farklı bileşimlerdeki asfaltlar ve çeşitli stiren-bütadien yapılarına sahip stiren-bütadien-stiren (SBS) kopolimerleri ile hazırlanmış ve bunlar sırasıyla frekans tarama testleri, viskozite ölçümleri ve floresan mikroskopisine tabi tutulmuştur. İncelenen sistem için, stiren içeriklerinin artması ve polimer faz boyutları, stiren içeriklerinin ve bunların hacim oranlarının artmasıyla birlikte azaldığından uyumun zayıfladığı belirtilmiştir.

Liang vd. (2017) tarafından SBR ile modifiye edilmiş asfaltın uyumunu, yüksek ve düşük sıcaklık özelliklerini geliştirmek amacıyla, çalışmada daha ileri modifikasyon elde etmek için polifosforik asit (PPA) eklenmiştir. PPA, SBR ve asfalt arasındaki uyumu geliştirmiş ve dağılmış polimer faz boyutunu düşürmüştür, böylece daha istenen bir mikro yapı oluşturulmuştur. Sonuç olarak, PPA ile kimyasal reaksiyon, SBR ile modifiye edilmiş asfaltın uyumunu ve termo-reolojik davranışını kapsamlı bir şekilde iyileştirmenin etkili bir yoludur.

Yang vd. (2017) tarafından biyo-yag ile modifiye edilmiş biyo-asfaltın temel bileşimini, kimyasal bileşiklerini, oksidatif yaşlanmayı ve uyumunu karakterize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Petrol asfaltı, biyo-asfalt hazırlamak için sırasıyla ağırlıkça %2, %5 ve %10 işlenmiş ve işlenmemiş biyo-yag ile modifiye edilmiştir. Biyo-yagın petrol asfalt ile uyumu, flokülasyon stabilitesine dayalı otomatik çöktürme titrimetrisi (AFT) kullanılarak araştırılmıştır. AFT sonuçları %2 biyo-asfaltın kararlı ve uyumlu bir karışım olduğunu göstermiştir. Ayrıca biyo-yag oranındaki artışla petrol asfaltı ile uyumun azalacağı öne sürülmüştür.

Liang vd. (2019) tarafından polietilen yapısı ile asfalt performansı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), orta yoğunluklu polietilen (MDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) kullanılmıştır. Uyum, reolojik kriterler ve mikroskobik karakterizasyon ile değerlendirilmiştir. LLDPE modifiye asfaltın, tercih edilen düşük sıcaklık performansını gösterdiği ve asfaltla en yüksek uyumu gösterdiği belirtilmiştir.

Ren vd. (2019) tarafından yürütülen bir çalışmada, asfalt tipi ve SBS lateks dozajının, asfaltın reolojik özellikleri, uyumu ve depolama stabilitesi üzerindeki etkisi sıcaklık ve frekans taraması, kararlı durum akışı, çoklu gerilme sünme ve geri dönme (MSCR) Cole-Cole grafikleri ve ısı depolama testleri ile araştırılmıştır. Asfaltın kimyasal bileşiminin,

SBS lateksle modifiye edilmiş asfaltın özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve yüksek asfaltlar ve düşük reçinelerin, tekerlek izini önleme ve geri dönme özelliklerini geliştirmek için elverişli olduğu, ancak modifiye edilmiş asfaltın yorulma önleme, uyum ve depolama stabilitesini zayıflattığı belirtilmiştir.

Ma vd. (2020) tarafından modifiye edilmiş bağlayıcı karışımlarının uyumunu iyileştirmek için geri dönüştürülmüş kauçuk içeriğinin artırılması, uyumlaştırıcı eklenmesi ve önceden karıştırılmış geri dönüştürülmüş kauçuk-plastik karışımlarının kullanımı dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar test edilmiştir. Modifiye asfaltın reolojik özellikleri ve mikroyapısı sırasıyla dinamik kayma reometre testleri ve optik mikroskopisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı karışımlarının uyumu, puro tüpü testi kullanılarak karakterize edilmiştir. Plastik ve kauçuğun bağımsız olarak veya ek uyumlaştırıcıyla karşılaştırıldığında, önceden birleştirilmiş geri dönüştürülmüş kauçuk-plastik karışımları ile modifiye edilen asfalt, uyumda önemli bir iyileşme göstermiştir.

Ren vd. (2020) tarafından atık kızartma yağı (WCO), atık motor yağı (WEO) ve stiren bütadien kauçuğu (SBR) kullanımının yaşlandırılmış asfalt için performans onarma ve iyileştirme üzerindeki etkilerini tahmin etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırılmış ve gençleştirilmiş asfaltların reolojik özellikleri dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca gençleşmiş asfaltların uyumu, yaşlanma özellikleri ve gençleştirme mekanizması da araştırılmıştır. Sonuçlar hem WCO hem de WEO'nun viskoz özelliklerini, yorulma ve çatlama direncini güçlendirdiğini, ancak yenilenmiş asfaltın sıcaklık hassasiyetini, tekerlek izi direncini, elastik geri dönmelerini, uyumunu ve yaşlanma özelliklerini olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Bu arada, SBR'nin eklenmesi, yenilenen asfaltın sıcaklık hassasiyetini, yüksek ve düşük sıcaklık performansını, uyumunu ve yaşlanma direncini daha da artırdığı belirtilmiştir.

3. SONUÇLAR

Yüksek sıcaklıkta polimer modifiye bitümün depolama sırasında ayrışma eğilimi polimer ile bitüm arasındaki zayıf uyumla ilgilidir. Bu olay, asfalt bakımından zengin ve polimer bakımından zengin fazların ayrışmasına neden olur ve polimer bakımından zengin fazın kontrol edilmesi zordur. Bu nedenle, PMB uygulamalarında bu probleme odaklanılmıştır ve polimer-bitüm uyumunu arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır:

- Kükürt vulkanizasyonu depolama stabilitesini iyileştirmesine rağmen SBS gibi doymamış polimer modifiyerler için uygulanabilir olması ve hidrojen sülfür salınımına neden olması gibi dezavantajları vardır.

- İşlevselleştirme ile uyum bir dereceye kadar geliştirebilir ancak polimer modifiyerler ile bitüm arasındaki aşırı etkileşim, PMB'nin iki fazlı yapısını bozabilir ve ürünleri işe yaramaz hale getirebilir.

- Reaktif polimerlerin kullanımı bitüm-polimer arasındaki uyumu kovalent bağlar oluşturarak iyileştirebilir.

- PMB'de kil kullanımı polimer modifiyerler ve bitüm arasındaki yoğunluk farkını azaltarak PMB'nin depolama stabilitesini arttırmaktadır. Depolama stabilitesi sadece polimer zengin faz ve asfaltın zengin faz arasındaki yoğunluk farkındaki bir azalmadan kaynaklanmamaktadır. Bitüm ve polimer arasındaki uyum da temel bir rol oynamaktadır. Ayrıca, hazırlık prosedürü de önemli bir rol oynar. Fiziksel karıştırma prosedüründe, kilin sadece küçük bir kısmı yüzey aktif madde görevi görür ve bitüm/polimer etkileşimlerini arttırırken, ön karışım prosedüründe, polimer/kil ön karışımı, sonraki bitümle karıştırma aşamasından sonra hayatta kalan kil ve polimer arasındaki etkileşimleri mümkün kılar.

4. KAYNAKLAR

- Becker, Y., Méndez, M. P. ve Rodríguez, Y., 2001. Polymer Modified Asphalt, Vision Tecnologica, 9, 1, 39-50.
- Gasthauer, E., Mazé, M., Marchand, J. P. ve Amouroux, J., 2008. Characterization of Asphalt Fume Composition by GC/MS and Effect of Temperature, Fuel, 87, 1428-1434.
- Golestani, B., Nam, B. H., Nejad, F. M. ve Fallah, S., 2015. Nanoclay Application to Asphalt Concrete: Characterization of Polymer and Linear Nanocomposite-Modified Asphalt Binder and Mixture, Construction and Building Materials, 91, 32-38.
- Gökarp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H. ve Uz, V. E., 2019. Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8, 2, 954-964.
- Gürbüz, H. E., 2018. Nanokil Kullanılarak Asfalt Bağlayıcı Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt.
- İskender, E., 2019. Bentonit Nanokilinin Elastomerik ve Plastomerik Polimer Modifiye Bitümlerin Depolama Stabiliteleri Üzerindeki Etkisi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7, 1187-1203.
- Kaçaroglu, G., 2019. Cocamide Diethanolamide Kimyasalının Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kaya, M., 2011. Türkiye Coğrafi Bölgeleri için Bitümlü Bağlayıcıların Performans Derecelerinin Belirlenmesi ve SBS Katkılı Gözlem Yolu Yapılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Konya.
- Liang, M., Liang, P., Fan, W., Qian, C., Xin, X., Shi, J. ve Nan, G., 2015. Thermo-Rheological Behavior and Compatibility of Modified Asphalt with Various Styrene-Butadiene Structures in SBS Copolymers, Materials & Design, 88, 177-185.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Zhang, J., Jiang, H. ve Yao, Z., 2019, Comparison of Rheological Properties and Compatibility of Asphalt Modified with Various Polyethylene, International Journal of Pavement Engineering, 22, 2, 1-10.
- Liang P., Liang, M., Fan, W., Zhang, Y., Qian, C. ve Ren, S., 2017. Improving Thermo-Rheological Behavior and Compatibility of SBR Modified Asphalt by Addition of Polyphosphoric Acid (PPA), Construction and Building Materials, 139, 183-192.
- Ma, Y., Wang, S., Zhou, H., Hu, W., Polaczyk, P., Zhang, M. ve Huang, B., 2021. Compatibility and Rheological Characterization of Asphalt Modified with

Recycled Rubber-Plastic Blends, Construction and Building Materials, 270.

- Paliukaitė, M., Vaitkus, A. ve Zofka, A., 2014. Evaluation of Bitumen Fractional Composition Depending on The Crude Oil Type and Production Technology, The 9th International Conference “Environmental Engineering”, May, Selected Papers.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F. ve Stastna, G., 2015. A Review of The Fundamentals of Polymer-Modified Asphalts: Asphalt/Polymer Interactions and Principles of Compatibility, Advances in Colloid and Interface Science, 224, 72-112.
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B. and Rossi, C. O., 2019. Applied Sciences, 9, 4, 1-35.
- Ren, S., Liu, X., Fan, W., Wang, H. ve Erkens, S., 2019. Rheological Properties, Compatibility, and Storage Stability of SBS Latex-Modified Asphalt, Materials, 12, 1-16.
- Ren, S., Liu, X., Fan, W., Qian, C., Nan, G. ve Erkens, S., 2020. Investigating The Effects of Waste Oil and Styrene-Butadiene Rubber on Restoring and Improving The Viscoelastic, Compatibility, and Aging Properties of Aged Asphalt, Construction and Buildin Materials.
- Sağlık, A., 2009. Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı için Performans Sınıflarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uncu, D., 2017. Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- URL-1, https://www.eurobitume.eu/public_downloads/General/The%20Bitumen%20Industry%203rd%20edition.pdf The Bitumen Industry-A Global Perspective Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure, 15 Ocak 2021.
- Whiteoak, D., 2004. Shell Bitüm El Kitabı (Çev. A. H. Lav ve M. A. Lav), İSFALT Bilimsel Yayın, No: 3, İstanbul, 334s.
- Yang, X., Mills-Beale, J. ve You, Z., 2017. Chemical Characterization and Oxidative Aging of Bio-Asphalt and Its Compatibility wit Petroleum Asphalt, Journal of Cleaner Production, 142, 1837-1847.
- Yılmaz, B., 2016. Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K. T. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Zhu, J., Birgisson, B. ve Kringos, N., 2014. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges, European Polymer Journal, 54, 18-38.