



KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Dergi Sahibi

Prof. Dr. Nuh Zafer CANTÜRK - (Kocaeli Üniversitesi)

Baş Editör

Prof. Dr. K. Süleyman YİĞİT - (Kocaeli Üniversitesi)

Editörler

Prof. Dr. Beyhan PEKEY - (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Esra CAN DOĞAN - (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Mihriban CİVAN - (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Recep Kaya GÖKTAŞ- (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Murat HOŞÖZ - (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. H. Hakan GÜREL - (Kocaeli Üniversitesi)

Prodüksiyon Editörü

Öğr. Gör. Yusuf YAĞCI - (Kocaeli Üniversitesi)

Editör Asistanları

Arş. Gör. Züleyha Kübra ÇAPIN - (Kocaeli Üniversitesi)

Dergi Sekreteri

Hüsnü TEMKİNER - (Kocaeli Üniversitesi)

Editörler Kurulu

Prof. Dr. A. Nilgün AKIN (Kimya Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali Bekir YILDIZ (Elektrik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN (Makine Mühendisliği) (Hitit Üniversitesi)

Prof. Dr. Bülent KAYPAK (Jeofizik Mühendisliği) (Ankara Üniversitesi)

Prof. Dr. Cenk SAYIN (Otomotiv Mühendisliği) (Marmara Üniversitesi)

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU (Bilgisayar Bil. ve Müh.) (Bilecik Şeyh Edebali Üniv.)

Prof. Dr. Fatma GÜLTEKİN (Jeoloji Müh.) (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. Halim Aytekin ERGÜL (Biyoloji) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Mehmet ARIK (Özyeğin Üniversitesi – Makine Mühendisliği)

Prof. Dr. Müslüm ARICI (Makine Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Tahsin ENGIN (Makine Mühendisliği) (İstanbul Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ (Biyomedikal Mühendisliği) (Kocaeli Üniv.)

Prof. Dr. Zerrin ALADAĞ (Endüstri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Canan Dilek EREN (Fen Bilgisi Eğitimi) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Çağla AKGÜL (İnşaat Mühendisliği) (ODTÜ)

Doç. Dr. Emre KİSHALI (Mimarlık) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Halil YİĞİT (Bilişim Sistemleri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. İrem BAĞLAN (Matematik) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Kasım BAYNAL (Endüstri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Murat Selim ÇEPNİ (Harita Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN (Metalurji ve Malzeme Müh.) (Gebze Teknik Üniv.)

Doç. Dr. Osman GÜNAY (Biyomedikal Mühendisliği) (YTÜ)

Doç. Dr. Ş.Hakan ATAPEK (Metalurji ve Malzeme Müh.) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Ünal UYSAL (Makine Mühendisliği) (Sakarya Üniversitesi)

Doç. Dr. Ümit ÜNVER (Makine Mühendisliği) (Yalova Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Arzu ARI (Matematik Eğitimi) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Erkan AKPINAR (İnşaat Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Aytaç ÇINAR (İş Sağlığı ve Güvenliği) (Kocaeli Üniv.)

Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK (İnşaat Müh.) (Eskişehir Osmangazi Üniv.)

Danışma Kurulu

Prof. Dr. Adnan SÖZEN (Makine Mühendisliği) (Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN (Kimya Mühendisliği) (Atatürk Üniversitesi)

Prof. Dr. Bülent ORUÇ (Jeofizik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Elşen VELİ (Fizik) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR (Enerji Sistemleri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Güralp ÖZKOÇ (Kimya Mühendisliği) (İstinye Üniversitesi)

Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ (Mekatronik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. İlyas KANDEMİR (Makine Mühendisliği) (Gebze Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. M. Ufuk KASIM (Bahçe Bitkileri Yetiştirme ve Islahı) (Kocaeli Üniv.)

Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI (Otomotiv Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Nil Pembe ÖZER (Su Ürünleri) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. R.Taygun GÜRAY (Fizik) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Serdar KÜÇÜK (Biyomedikal Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK (Makine Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Sema YURDAKUL (Çevre Mühendisliği) (Süleyman Demirel Üniv.)

Doç. Dr. Vildan ÇETKİN (Matematik) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU (İnşaat Mühendisliği) (Erzurum Teknik Üniv.)

İletişim

Kocaeli Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü Umuttepe Yerleşkesi 41001, Kocaeli/TÜRKİYE
Tel: +090 (262) 303 30 32 Fax: +090 (262) 303 30 33 E-mail: koufbd@kocaeli.edu.tr



YAYIN VE DANIŞMA KURULLARI I

İÇİNDEKİLER II

Cem SARI, Muhammet BAYRAM, Bayram KESMEN, Çınar ULUSOY, Hasan KARABAY
Termoplastik Film Mühürleme Aparatının Deneysel Yöntemle İncelenmesi 1-5
(*Araştırma Makalesi*)

Ahmet Han Furkan KAHVECİ, Adnan SONDAŞ
Eğitimde Sanal Gerçeklik Teknolojisine Genel Bakış 6-13
(*Derleme Makale*)

Fatma Şevval SÖNMEZ, Barış GÜZEL, Oltan CANLI
Polibromlu Dibenzo-p-Dioksinler/Furanlar (PBDD/F'lar) ve Hegzabromosiklo
dodekanlar (HBCDD'lar): Kimyasal Oluşum, İzleme, Etki ve Ölçüm 14-26
(*Derleme Makale*)

A. Oral SALMAN, Furkan ALPER
R-Bant Boşluk Rezonatörü ile Bazı Mikrodalga Malzemelerinin Karmaşık
Dielektrik ve Manyetik Geçirgenliklerinin Belirlenmesi 27-35
(*Araştırma Makalesi*)

Nazife ERARSLAN
Asfalt Beton Malzemelerin Karma Mod (I-II) Kırılma Özelliklerinin Araştırılması 36-46
(*Araştırma Makalesi*)

Serhat YILMAZ
Beyin Tümörü Tanıları İçin YOLOv7 Algoritması Tabanlı Karar Destek Sistemi Tasarımı 47-56
(*Araştırma Makalesi*)

Serkan BİÇİCİ, Yusuf TOLA
Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri ve Dayanıklılığı 57-67
(*Derleme Makale*)

Emre AKDOĞAN, Yunus BÜYÜKTEPE, Nihan ERCİOĞLU AKDOĞAN
Yer Karosu Uygulamaları İçin Konya Bölgesinden (Türkiye) Temin Edilen
Kil Minerallerinin Zenginleştirilmesi ve Karakterizasyonuna Genel Bir Bakış 68-77
(*Araştırma Makalesi*)



Termoplastik Film Mühürleme Aparatının Deneysel Yöntemle İncelenmesi

Investigation of the Thermoplastic Film Sealing Apparatus by Experimental Method

Cem SARI^{1*} , Muhammet BAYRAM² , Bayram KESMEN³ , Çınar ULUSOY⁴ , Hasan KARABAY⁵ 

¹ ICM Makine ve Mühendislik, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-7277-1021

² ICM Makine ve Mühendislik, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-6697-8747

³ ICM Makine ve Mühendislik, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-1636-9676

⁴ ICM Makine ve Mühendislik, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1049-748X

⁵ Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-4556-6636

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 20/09/2022

Kabul Tarihi : 29/11/2022

Anahtar Kelimeler

Film Mühürleme
Isı Tabancası
Mühürleme Aparatı
Sıcak Hava Nozulu
Termoplastik Film Mühürleme

Research Paper

Received Date : 20/09/2022

Accepted Date : 29/11/2022

Keywords

Film sealLing
Heat Gun
Sealing Device
Hot Air Nozzle
Sealing of Thermoplastic Film

Özet

Bu çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen malzemeden yapılan termoplastik filmin sıcak hava ile mühürleme şartları deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu amaçla, üfleme havası sıcaklığı, debisi, film ilerleme hızı ve üfleme havasının değiştirilebildiği bir deney düzeyi ve ayrıca kaynak kalitesi değerlendirme amaçlı 75 cm ağız genişliği olan bir çekme deney düzeneği kurulmuştur. Bu makalede sabit debi (600 litre/dak) ve üfleme mesafesi (5 mm) ve 40-50 µm düşük yoğunluklu polietilen malzemeden termoplastik film kalınlığı için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. 50 metre/dk üretim hızında, 200 Newton'a kadar çekme kuvvetine dayanıklı mühürleme işlemi için üfleme havası sıcaklığının 260°C olması gerektiği tespit edilmiştir.

Abstract

In this study, an experimental study was carried out to determine the working conditions of the thermoplastic film sealing apparatus, which performs the sealing of low density polyethylene material thermoplastic film by hot air spraying method. For this purpose, a test rig was designed and constructed to measure the effect of blowing air temperature, air flow rate, film rolling speed, and hot air blowing distance. Also, a tensile test setup with specimen grips having 75 cm width was established for the purpose of evaluating the welding quality. In this article, the results obtained for constant flow rate (600 liters/min) and blowing distance (5 mm), and 40-50 µm low density polyethylene material thermoplastic film thickness are presented and discussed. It has been the main finding of the study that the blowing air temperature should be 260 oC to be resistant to tensile force up to 200 Newton at a production speed of 50 meters/min.

1. Giriş

Endüstriyel alanda imal edilen ürünlerin paketlenmesi/ambalajlanması için kullanılan birçok malzeme ve yöntem bulunmaktadır. Tüm yöntemlerin ortak özelliği paketin kolay şekillendirilmesi, doldurulması ve kapatılmasıdır [1]. Dayanım/ağırlık oranının yüksek olması ve maliyetinin diğer malzeme türlerine göre (kâğıt, kumaş vb) düşük olması plastiklerin paketlemede

hakimiyetine sebep olmuştur [2]. İşlenebilirlik kolaylığı, ergime sıcaklıklarının düşük olması, ısıtma ve basınçlandırma yöntemiyle kolaylıkla şekillendirilmesi gibi avantajlar termoplastik malzemelerin paketlenme işlemlerinde tercih edilmesinin başlıca sebepleridir. Bu tercih dünyada en fazla plastik tüketiminin (%30'luk pay ile) ambalaj sektöründe olmasıyla sonuçlanmıştır[3]. Termoplastikler malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak 54°C ile 120 °C arasında, bazen de yapılarına bağlı olarak 260 °C ile 270°C'ye varan sıcaklıklarda erirler. Bu nedenle termoplastiği işleme sırasında sıcaklık iyi kontrol

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): sariugurcem@gmail.com



edilmelidir[4]. Paketleme işlemlerinde en çok kullanılan termoplastik malzeme türlerini ise düşük yoğunluklu Polietilen (LDPE) ve Polipropilen(PP) oluşturmaktadır.[5].

Bu malzeme ısıtıldığında, kıvamını kolayca şekillendirilebilen ve birleştirilebilen plastiğe dönüştürür. Termoplastik malzemelerin türü, paketleme sırasında prosesin sıcaklığını etkiler [6].

Paketleme prosesi ürünün yeteri kalınlık ve büyüklükteki termoplastik kılıf ya da torba içine alınmasından sonra kılıfın açık uçlarının birbirleri üzerine ısıtılarak kaynak edilmesi ile tamamlanır. Bu kaynatma işlemi sektörde (ve bu çalışmada da) mühürleme olarak tabir edilmiştir. Mühürlemenin kalitesi uygulanan basınç, sıcaklık ve etki süresine bağlıdır [7].

Mühürlemede kullanılan yaygın ısıtma işlemleri arasında ısı çeneleriyle ısıtma, darbeli ısıtma, sıcak hava üflemeyle ısıtma, ultrasonik ısıtma, indüksiyon akımı ısıtma, elektrik alan kaybı ısıtma ve sıcak tel ısıtma bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanı ısı çeneleriyle ısıtma yöntemidir [8]. Yangın riskinin yüksek olduğu, cihaz yüzey sıcaklıklarının düşük olmasının istendiği yerlerde mesela tozlu ortam içinde yapılan paketleme sistemlerinde ise sıcak hava mühürleme sistemleri tercih edilmektedir.

Bu çalışmaya konu olan endüstriyel rulo temizlik kâğıdı üretim hattında bulunan paketleme makinesi sisteminde; sıcak hava mühürleme yöntemi kullanılmaktadır.

Bu yöntem; dakikada 20 metreye kadar polietilenin birleştirilmesine izin verdiği için çok hızlı bir birleştirme yöntemidir [9,10], bundan dolayı rulo kâğıt üretiminde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Sıcak hava üflemeyle mühürleme sisteminin en kritik parçası hava ısıtıcısıdır. Bu ısıtıcılar sıcak hava nozulları veya sıcak hava tabancaları olarak da adlandırılmaktadır. Endüstriyel alanda farklı paketleme makinelerinde kullanılan çok çeşitli mühürleme aparatları tasarımları mevcuttur ve bunlar patenle koruma altına alınmışlardır. US10583610B2 numaralı patent bunlara bir örnek olarak verilebilir [11].

Endüstriyel tip rulo kâğıt makinalarında kullanılacak mühürleme aparatının geliştirilmesi istenmiş ve tasarım için gerekli mühürleme sıcaklığı ve mühürleme hızları hakkında literatür bilgisinin bulunmadığı görülmüştür. Bu amaçla üst üste bindirilmiş 40-50 micron kalınlığında LDPE film kenarlarının kaynağı için gerekli hava sıcaklığı ve ilerleme hızının tespit edildiği deneysel çalışma başlatılmış ve sonuçları bu makalede sunulmuştur.

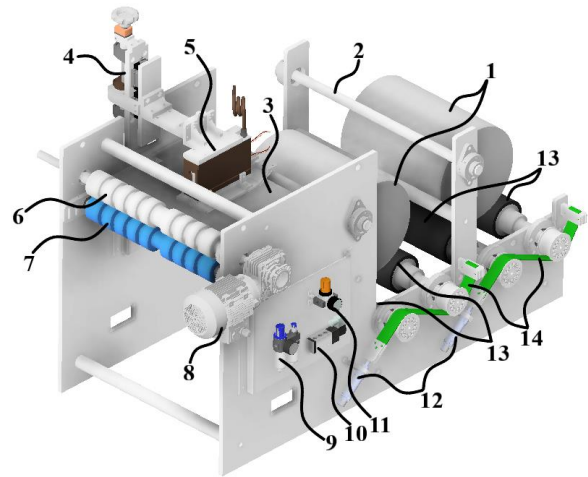
2. Termoplastik Film Mühürleme Aparatı Üzerine Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde üst üste bindirilmiş 40-50 micron kalınlığında LDPE film kenarlarının kaynağı için gerekli

şartların belirlenmesi amacıyla yürütülen deneysel çalışmalar ve sonuçları sunulmuştur.

Projede, öncelikle endüstriyel tip rulo kâğıt makinası paketleri için yeterli kaynak kalitesinin tanımlanması yapılmıştır. Bu amaçla ısıtıcının kullanılacağı makinanen çıkan ambalaj büyüklüğü ve ağırlığı dikkate alınmıştır. Proje konusu makine, endüstriyel rulo tip temizlik kâğıdı üretmekte ve ebatları Ø 100 mm ile Ø 400 mm arasında değişmektedir. Ürün ağırlıkları ise 0.75 kg ile 2 kg arasında değişmektedir. Bir paket içerisinde 2 kg'lık ürünlerden genellikle 6 adet bulunmaktadır. Yani bir ambalajlı paketin kütlesi yaklaşık 12 kg mertebelerinde; paketteki kaynak uzunluğu ise 750 mm mertebesindedir. Ambalajdaki kaynak, bu kütleyi yırtılmadan taşıyabilmelidir. Kaldırma indirme esnasındaki dinamik yüklerde dikkate alındığında bu değer 200 Newton mertebesinde olması gerektiği öngörülmüştür. Kaynak testleri ise, farklı hız ve sıcaklıklarda kaynak edilmiş üründen 750 mm uzunluğunda numuneler kesilmiş ve bu numune iki çene arasına bağlanarak çekme gerilimine maruz bırakılmıştır. Çekme deneyleri esnasında, 200 Newton ve altındaki yüklerde kaynak bölgesinde yırtılma/ayrılma tespit edilen denemeler başarısız, diğerleri başarılı olarak kabul edilmiştir. Çekme deneylerinde ölçüm aralığı 0-300 N ve doğruluğu ± 2 N olan Geratech dinamometresi kullanılmıştır. Çekme deneylerinin yürütüldüğü ortamda sıcaklık kontrolü bulunmamaktadır; deneyler boyunca ortam sıcaklıkları 20°-30° arasında kalmıştır.

Başarılı bir LDPE film kaynağı için gerekli: hava sıcaklığı, hava debisi, film ilerleme hızının tespiti ve üfleme mesafesi tespiti için Şekil 1 de gösterilen deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir.

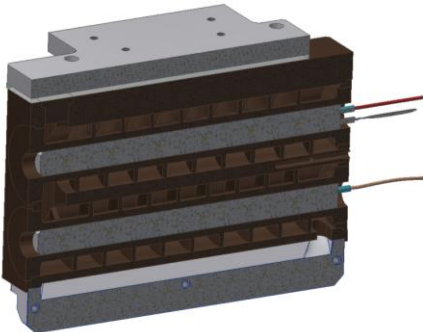


1	Film bobinleri	8	AC motor
2	Avare mil	9	Şarjlandırıcı
3	Destek sacı	10	Elektrovalf
4	Ayar mekanizması	11	Regulator
5	Mühürleme aparatı	12	Pnömatik piston
6	Çelik Çekme valsi	13	Avare kauçuk rulolar
7	Kauçuk Çekme valsi	14	Kayış

Şekil 1. Mühürleme aparatı deney düzeneği

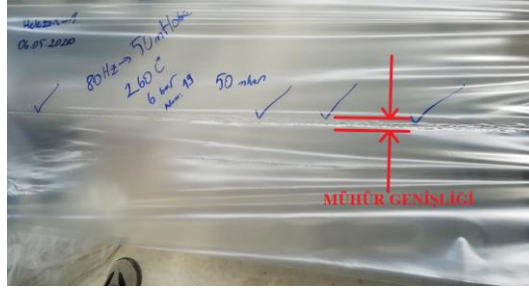
Düzenek, şekilde görüldüğü gibi esas olarak 14 ana elemandan oluşmaktadır. Düzenekte iki adet genişliği 700 mm olan, 40-50 μm LDPE termoplastik film malzemeden sarılmış bobin bulunmaktadır(1 numara). Bobinlerin her ikisinin de aynı hızda açılması asenkron motordan(8) tahrik alan çelik çekme valsleri(6) ve kauçuk kaplama çekme valsleri(7) ile gerçekleştirilmektedir. Bobinler kauçuk kaplı avare rulo silindirleri(13) üzerinde açılmaktadır. Açılan bobinlerin film akışı avare rulolar vasıtasıyla aynı eksene getirilmektedir. Aynı eksen hizasında üst üste gelen termoplastik film akışı çekme valsleri arasından geçirilmektedir. Mühürleme işlemi filmlerin çekme valslerine ulaşmalarından önce destek sacı(3) üzerinde gerçekleştirilmektedir. Mühürleme aparatının(5) termoplastik film yüzeyine olan mesafesi ayar mekanizmasında(4) yer alan volan vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu mekanizma üzerinde hassas numaratorle ölçüm yapılarak mesafe ayarlanmaktadır. Mühürleme aparatına giren hava şartlandırıcı vasıtasıyla düzenlenerek, basıncı bir regülatör sayesinde 0-6 bar arasında ayarlanarak hava debisi kontrol edilmektedir. Sistem kapatıldığında deney düzeneğinde yar alan kauçuk kaplama avare ruloları, elektrovalf(10) ile kumanda edilen pnömatik silindir(12) vasıtasıyla kayışların (14) gerdirilmesi sağlanarak durdurulmaktadır. Kumanda ünitesi içerisinde yer alan sürücü kontrolüyle 8 nolu motorun hız kontrolü ile deney düzeneğinin çalışma hızı yani mühürleme hızı değiştirilebilmektedir.

Düzenekte kullanılan mühürleme aparatı detay resmi Şekil 2 de gösterilmiştir. Aparatta 2×1.5 KW lık iki adet ısıtıcı rezistant bulunmakta ve üfleme havası sıcaklık ayarı ısıtıcıların besleme gerilimi değiştirilerek sağlanmaktadır. Sıcaklık ölçümleri 12 kanallı PCE-T 1200 marka sıcaklık ölçüm cihazı ve Cu-Constantan termo eleman çifti kullanılarak yapılmıştır. Isıtıcı girişi, çıkış (üfleme sıcaklığı) ve atmosfer sıcaklığı sürekli olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.



Şekil 2. Mühürleme aparatı modelinin kesit görünümü

Bu çalışmada sunulan sonuçlar, sabit hava debisi (600 litre/dakika) ve üfleme mesafesinde (5 mm), farklı üfleme sıcaklığı ve ilerleme hızında gerçekleştirilen deneylere aittir. Mühürleme deneyleri esnasında alınan bir görüntü Şekil-3'te, mühürlemeden sonraki numunenin dikiş bölgesi görüntüsü ise Şekil-4'te sunulmuştur. Tablo 1'de bu şartlarda yürütülen deneylerden bir kısmı için elde edilen deney sonuçları sunulmuştur. Literatürde benzer bir çalışma olmadığından, sektördeki mühürleme aparatlarının çalışma koşulları referans olarak deney esnasındaki şartlar belirlenmiştir. Üfleme sıcaklığının 125°C ' nin altında olduğu testlerde filmler arasında bir kaynama sağlanmamış ve burada sunulmamıştır. Kaynak işlemi 125°C ve üstü üfleme sıcaklığında gerçekleşmiştir.



Şekil 4'te görüldüğü gibi, başarılı kaynak için mühür genişliğinin 3-4 mm mertebelerinde ve kesintisiz olması gerektiği tespit edilmiştir. Yani, 3 mm-4 mm arası kaynak genişliğinin 200 Newton kuvvet için yeterli bir dayanım sağladığı görülmüştür.

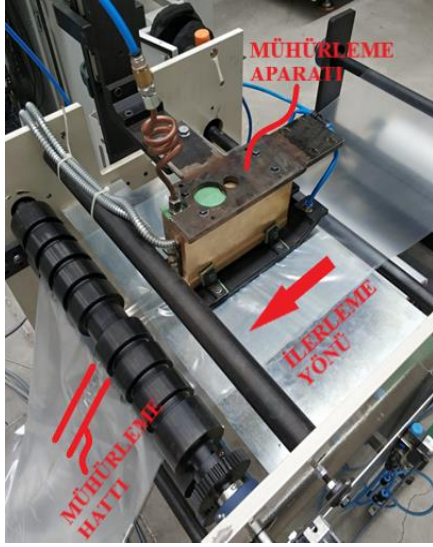
Bu genişlik sıcak havanın bölgede etki süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Etki süresi ve sıcaklığın gereğinden fazla olması kaynak genişliğinde artışın yanında, delinmelere sebep olarak kaliteyi bozmaktadır.

125°C sıcaklıkta, 20 m/d ve 30 m/d hızlarda yapılan mühürlemeler çekme deneylerinde başarısız olmuştur. Başarılı bir kaynama 125°C sıcaklık için 10 m/d hızında gerçekleşmiştir. Aynı sıcaklıkta ve 10 m/d den düşük hızlarda yapılan mühürlemelerde, mühür genişliğinin büyüdüğü ve mühür boyunca yer yer delinmelerin olduğu ve mühürlemedeki sürekliliğin bozulduğu gözlenmiştir. Çalışma hızının yükseltilmesiyle, üfleme sıcaklığının da artırılmasını gerektirdiği görülmüştür. Tablodan görüldüğü gibi 50 m/d çalışma hızında başarılı bir mühürleme için üfleme sıcaklığının 260°C olacağı tespit edilmiştir.

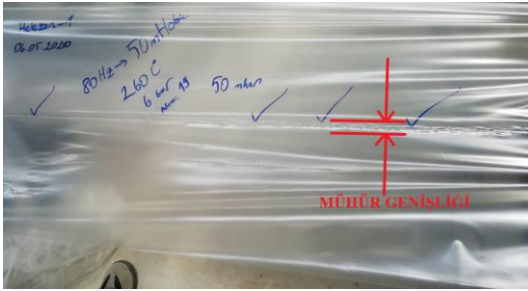
Tablo 1. Deney sonuçları

Çalışma Hızı	Mühür Genişliği	Üfleme Sıcaklığı	Mühürleme Durumu
10 m/d	1-2 mm	125°	Gerçekleşti
20 m/d	-	125°	Gerçekleşmedi
30 m/d	-	125°	Gerçekleşmedi
10 m/d	3 mm	135°	Gerçekleşti
20 m/d	3-4 mm	160°	Gerçekleşti

30 m/d	3 mm	190 °	Gerçekleşti
40 m/d	2-3 mm	230 °	Gerçekleşti
50 m/d	3 mm	260 °	Gerçekleşti



Şekil 3. Mühürleme işlemi



Şekil 4. Mühürlenmiş ürün

600 litre/dakika hava debisi ve 5 mm üfleme mesafesinde yapılan parametrik deneyler sonucunda 50 m/dakika çalışma hızında, 200 Newton çekme kuvvetine dayanıklı mühürleme işleminin yapılabilmesi için hava üfleme sıcaklığının 260°C olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

3.Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada endüstriyel rulo tip temizlik kâğıdı üretimi makinasının paketleme sisteminde kullanılacak mühürleme aparatı tasarım şartları deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu amaçla, üfleme havası sıcaklığı, debisi, film ilerleme hızı ve üfleme havasının değiştirilebildiği bir deney düzeyi ve ayrıca kaynak kalitesi değerlendirme amaçlı 75 cm ağız genişliği olan bir çekme deney düzeneği kurulmuştur.

Bu makalede sabit debi (600 litre/dak) ve üfleme mesafesi (5 mm) ve 40-50 µm LDPE termoplastik film kalınlığı için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Deney sonuçlarından hareketle:

- 200 Newton çekme dayanımı için mühürleme genişliğinin 3-4 mm aralığında olmasının yeterli olduğu görülmüştür.
- Üfleme havası etki süresinin veya sıcaklığının artması mühürleme genişliğini artırmaktadır.
- Mühürleme genişliğinin artmasıyla kaynak bölgesinde yer yer delinmeler oluşmakta ve kaynak dayanımı bozmaktadır.
- 40-50 µm kalınlıkta LDPE termoplastik film için gerekli en düşük kaynak sıcaklığı 125 °C ve en yüksek çekme hızı 10 m/d olarak tespit edilmiştir. Bu hızda sıcaklığın artırılması, ya da bu sıcaklıkta hızın azaltılması kaynak dikişinde delinmelere sebep olarak kaynak kalitesini bozmaktadır.
- Yüksek hızlarda paketleme yapabilmek için üfleme sıcaklığının da artırılması gerekmektedir.
- Çalışma konusu makinanın üretim hızı 50 m/dak hızda 200 Newton çekme dayanımına sahip mühürleme işlemi için, 260 °C üfleme sıcaklığı gerekmektedir.

Elde edilen bu sonuçlardan hareketle, proje konusu temizlik kâğıdı makinası için bir ısı tabancası tasarlanarak imal edilmiş ve saha testlerinde başarılı olduğu görülmüştür. Farklı debi, üfleme mesafesi, malzeme ve film kalınlığındaki deneyler sonraki çalışmaların konusu olacaktır.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

TEYDEB 1501 Sanayi Ar-Ge destek programı kapsamında 3190514 numaralı proje verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi bir borç biliriz. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında destekleri için ICM Makine ve Mühendislik limited şirketine ve Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar



- [1] Başarir, D. (2000). Paketleme malzemeleri, ilkeleri ve paketleme makinelerinin, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

- [2] Hüner, Ü. (2008). Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Sıcak Birleştirme İşlemlerinin İncelenmesi. Trakya Üniversitesi
- [3] Geyer, R. J., Jenna R; Law, Kara Lavender. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made, Science advances, 3: e1700782.
- [4] Aydın, H. (2004). PVC üretimi ve katkı maddeleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [5] Rubin, I. I. (1990). Handbook of Plastic Materials and Technology Wiley New York
- [6] Sikora, R. (1993) Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych. Warszawa: Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej.
- [7] Karger-Kocsis, J. & Siengchin, S. (2014) Single-Polymer Composites: Concepts, Realization and Outlook: Review. KMUTNB: IJAST, 7, 1, pp. 1–9.
- [8] Hishinuma, K., Heat Sealing Technology and Engineering for Packaging: Principles and Applications., DEStech Publications. 2009.
- [9] Józefczyk, J. (2018) Łączenie jednopolimerowych materia-łów kompozytowych za pomocą strumienia gorącego powietrza. Praca dyplomowa inżynierska, Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Szczecinie.
- [10] Klimpel, A. (2000) Spawanie i zgrzewanie tworzyw termoplastycznych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [11] TOSS R., (2020) US10583610B2.USA PATENTS



Eğitimde Sanal Gerçeklik Teknolojisine Genel Bakış

An Overview of Virtual Reality Technology in Education

Ahmet Han Furkan KAHVECİ^{1,*} , Adnan SONDAŞ² 

¹ Bilişim Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-0428-7286

² Bilişim Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-4559-3463

Derleme Makale

Gönderilme Tarihi : 24/06/2022

Kabul Tarihi : 20/12/2022

Anahtar Kelimeler

Eğitimde Sanal Gerçeklik
Eğitim Teknolojileri
VR (Sanal Gerçeklik)
Sanal Gerçeklik Eğitim Simülasyonu

Özet

Günümüzde, sanal gerçeklik (Virtual Reality: VR) teknolojisi kullanılarak, fiziksel ortamlarda bulunma zorunluluğu olmadan veya zaman fark etmeksizin eğitimler verilebilmektedir. Bu çalışmada, ilgili alanyazın taraması sonuçlarına göre derlenen bilgiler doğrultusunda VR teknolojisi ile gerçekleştirilen eğitimlerin; verimliliği hakkında ön bilgiler, farklı sektörlerde öğrenme sürecine katkıları, öğrenim kolaylığı, performans değerlendirmeleri açıklanmıştır. Ayrıca eğitim amaçlı VR uygulaması geliştirilmesinin fayda ve zorlukları da ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında, "Virtual Reality, Virtual Reality in Education, Sanal Gerçeklik, Eğitimde Sanal Gerçeklik" başlığı altında ScienceDirect, Google Scholar ve Ulusal Tez Merkezinden faydalanılarak araştırmalar yapılmıştır. İlgili anahtar kelimeler ile gerçekleştirilen tarama sonucunda incelenen çalışmalardan, bilgisayar bağlantılı VR başlığı ile eğitim konularında, alanında yenilikçi olduğuna karar verilmiş 2000-2010 yılları arasındaki döneme ait yayınlanmış 5 çalışma ve 2012-2020 yıllarındaki döneme ait alanında öne çıkan 5 çalışma içerisinde günümüze doğru sıralama yapılarak toplam 10 adet farklı çalışma seçilmiştir. İncelenen araştırmaların çoğunluğu, eğitimde sanal gerçeklik teknolojisi kullanmaya olumlu bakmaktadır. Gerçekleştirilen araştırmalar doğrultusunda sanal gerçekliğin eğitim alanında kullanılmasına katkı vermek ve literatürdeki uygulama bazlı çalışmalara ek bir uygulama yapmak amacıyla uçak kokpit eğitiminde kullanılabilecek yeni bir sanal gerçeklik uygulamasının geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Review Paper

Received Date : 24/06/2022

Accepted Date : 20/12/2022

Keywords

Virtual Reality in Education,
Educational Technologies,
VR (Virtual Reality),
Virtual Reality Training Simulation

Abstract

By using virtual reality (VR) technology, training can be given without having to be in a physical environment or regardless of time. In this study, training was conducted using VR technology, in accordance with the information compiled based on the results of the relevant literature review. Preliminary information about efficiency, contributions to the learning process in different sectors, ease of learning, and performance evaluations are explained. It also covers the benefits and challenges of developing an educational VR application. Within the scope of the study, research was conducted under the titles of "Virtual Reality, Virtual Reality in Education, Sanal Gerçeklik, Eğitimde Sanal Gerçeklik" using ScienceDirect, Google Scholar, and the Ulusal Tez Merkezi. Among the studies examined as a result of the keyword scanning, 5 studies published between 2000 and 2010, which were determined to be innovative in the field of education with a computer-connected VR headset, and 5 studies that stood out in the field between 2012 and 2020 are listed from past to present. A total of ten different studies were chosen. The majority of the reviewed studies are positive about using virtual reality technology in education. With the conducted research, the goal is to create a new virtual reality application that can be used in aircraft cockpit training to contribute to the use of virtual reality in education and to add to the application-based studies in the literature.

1. Giriş

Günümüzde, sanal gerçeklik (Virtual Reality: VR) teknolojisi kullanılarak, fiziksel ortamlarda bulunma zorunluluğu olmadan veya zaman fark etmeksizin eğitimler verilebilmektedir. Böylece hem etkileşimli ve

görsel bir eğitim yapılabilen hem de kaynak maliyetleri düşmektedir.

Bu çalışmada, eğitim amacıyla sanal gerçeklik uygulamaları geliştirmekte olan veya geliştirmeyi düşünen araştırmacılara, ilgili alanyazın taraması sonuçlarına göre genel bilgiler ve öneriler sunulmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda VR teknolojisi ile gerçekleştirilen eğitimlerin; verimliliği hakkında ön bilgiler, farklı sektörlerde öğrenme sürecine katkıları, öğrenim kolaylığı,

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): furkankahvecitube@gmail.com



performans değerlendirmeleri açıklanmıştır. Çalışmada eğitim amaçlı VR uygulaması geliştirmenin fayda ve zorlukları da ele alınmaktadır. Ayrıca VR uygulamasının eğitim performansını yükseltmek için öneriler de sunulmaktadır.

Eğitim ve teknoloji alanlarında yaşanan gelişmeler, insanlığa kolaylık ve ekonomik katkı sağlamaktadır. Yüksek teknolojileri geliştirebilmek ve daha fazla bireyin kullanılabilmesini sağlamak için üst düzey eğitimlerin verilmesi gerekir. Verimli bir eğitim için de yeni teknolojilerden faydalanmak gerekir.

Eğitim teknolojisi, verimli teknoloji ortamı aracılığıyla öğretme ve öğrenme kavramı şeklinde tanımlanmıştır. Eğitim teknolojisinin temel amaçları; eğitim kalitesinin iyileştirilmesi ve öğrenme sürecinin geliştirilmesi olarak belirtilmiştir. Teknolojinin, öğretme ve öğrenme sürecini büyütmeye aynı zamanda içerdiği verimlilik ve kolaylık ile de eğitim sistemlerinin performansına katkı sağlaması beklenmektedir [1].

Uzaktan eğitim, mobil öğrenme, sanal ve artırılmış gerçeklik, internet gibi dijital ortamların eğitim amaçlı kullanılması, eğitimde değişim ve dönüşümlere neden olurken; zaman, mekân gibi engelleri kaldırarak farklı özellikteki bireylerin bilgiye kolaylıkla ulaşması konusunda pek çok avantaj sağladığı belirtilmiştir [2]. Araştırmalarda sanal gerçeklik teknolojisinin bir eğitim aracı olarak kullanılmasının, öğrencileri sanal ortamlar hakkındaki bilgileri keşfederek ve etkileşime girerek öğrenmeye teşvik etmesi nedeniyle öğrencilerin ilgilerini, anlamalarını ve yaratıcı öğrenmelerini artırabileceği bildirilmektedir [3].

Sanal gerçeklik teknolojisi ilk çıkışından günümüze kadar geçen süreçte insan-bilgisayar etkileşimi ve kullanım alanları kapsamında sürekli gelişmektedir. Eğitim için kullanılan sanal gerçeklik teknolojisinin bilgisayar tabanlı eğitim araçlarına göre çok daha fazla tercih edildiği belirtilmiştir [4]. Mimarlık eğitimi alanında sanal gerçeklik teknolojisinin kullanılması, üç boyutlu tasarım, tasarım sürecini hızlandırma ve algılamayı kolaylaştırma konularında faydalar sağlamaktadır [5].

Eğitim alanında kullanılan sanal gerçeklik çalışmaları incelendiğinde cerrahi simülasyonlar, yapay ortam simülasyonları, mimari tasarımlar ve rehabilitasyon yöntemlerine yardımcı araçlar göze çarpmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen olumlu geri dönütler sayesinde sanal gerçekliğin eğitim alanında kullanılmasının ön planda olacağı düşünülmektedir.

Eğitim teknolojilerinde yeni eğilimler çalıştayında sanal gerçeklik uygulamalarının karmaşık düşünce ve yeteneklerin gelişmesine katkısı, motivasyon artışı, dış etkenlerden soyutlanarak, sadece bilginin üzerine seçici odaklanmanın sağlanması, öğrencilere dersi anlamada güçlü ortam sağlanması, sınırsız uygulamaya katılma hakkı

verilmesi, zaman ve mekândan bağımsız deneyim yaşanması, istenilen her ortamın sağlanması potansiyel avantajları olarak belirtilmiştir [6]. Günümüz teknolojisinin sağlamış olduğu donanımsal yeterlilikler ve bu donanımların daha ulaşılabilir olması sonucu bu teknolojiye olan ilgi ve ihtiyaç artmış olup sanal gerçeklik kavramı yaşantımıza girmiştir. Statista verilerine göre, 2024 yılına kadar bütün dünyada 34 milyon adet sanal gerçeklik başlığının satılması beklenmektedir [7].

Eğitimde sanal gerçeklik teknolojisi kullanılarak yapılan araştırmalar, ScienceDirect üzerinde “Virtual Reality, Virtual Reality in Education” anahtar kelimeleri kullanılarak arandığında, her yıl çoğaldığı ve çeşitlendiği görülmektedir.

2. Alanyazın Taraması

2.1.Yöntem

Bu çalışmada sanal gerçeklik başlığı ile eğitim alanında kullanılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları özetlenmiştir.

Çalışma kapsamında, “Virtual Reality, Virtual Reality in Education, Sanal Gerçeklik, Eğitimde Sanal Gerçeklik” başlığı altında ScienceDirect (Elsevier), Google Scholar (Akademik) ve Ulusal Tez Merkezinden faydalanılarak araştırmalar yapılmıştır. İlgili anahtar kelimeler ile gerçekleştirilen tarama sonucunda incelenen çalışmalardan, genellikle bilgisayar bağlantılı sanal gerçeklik başlığı ile eğitim konusunda, alanında yenilikçi olduğuna karar verilmiş 2000-2010 yılları arasındaki döneme ait yayınlanmış 5 çalışma ve 2012-2020 yıllarındaki döneme ait alanında öne çıkan farklı 5 çalışma içerisinde geçmişten günümüze doğru sıralama yapılarak toplam 10 adet farklı çalışma seçilmiştir. Alanyazın taramasına ait özet bilgiler aşağıda verildiği gibidir.

“Dermatolojik Cerrahi için Sanal Gerçeklik: 21. Yüzyılda Sanal Gerçeklik”, isimli çalışmada, sanal gerçekliğin etkili bir tıbbi eğitim aracı olma yolunda olduğu açıklanmış ve yumuşak doku cerrahisi simülatörü prototipi geliştirilmiştir. Bilgisayar üzerinden çalışan bu cihazın, gerçek zamanlı dokunsal geri bildirim ile üç boyutlu insan derisi deformasyonlarını simüle ettiği belirtilmiştir. Çözülmesi gereken birçok deri ve biyomekanik zorluk olmasına rağmen, tıp öğrencileri ve asistanlar için şu anda kullanılan modellerden daha gerçekçi dermatolojik cerrahi eğitimi sağlanacağı belirtilmiştir [8].

“Sanal Gerçeklik: Sürükleyici Karaciğer Cerrahisi Eğitim Ortamı”, isimli bu çalışmada cerrahi tedavi eğitimi verilirken, karaciğer hakkında bilgilerin verimli aktarılmasının önemi vurgulanmıştır. Bu eğitimi sanal gerçeklik teknolojisi ile daha iyi görselleştirip, cerrahi

prensipleri öğreten bir pilot çalışması yapılmıştır. Karaciğerin sanal modelleri ve diğer biyomedikal modelleri içeren eğitim ortamı geliştirilmiştir. Bu çalışmada 1 eğitmen 2 fiziki lokasyonda 6 kıdemli genel cerrahi asistanı ile atölye çalışmayı gerçekleştirmiştir. Çalıştay öncesi ve sonrası 24 soruluk bir anket uygulanmıştır. Sonuçlar, geliştirilen sanal gerçeklik tabanlı uygulamanın, cerrahların karmaşık cerrahi anatomik ilkeleri öğrenmedeki bazı engellerin üstesinden gelmelerine yardımcı olduğunu ve yeni bilgilerin tamamen akılda tutulduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada, sanal gerçeklik ile cerrahi eğitimciler ve asistanların farklı konulardan birbirleri ile etkileşim kurarak eğitim hedeflerine ulaşabilecekleri belirtilmiştir [9].

“Uçak Görsel İnceleme Eğitimi için Sanal Gerçeklik Teknolojisini Kullanma: Etki ve Karşılaştırma Çalışması”, isimli çalışmada sanal ortamın derinlik algısı ve etkisi ölçüme alınmıştır. Uçağın kargo kısmının sanal gerçeklik sistemi kullanarak görselleştirilmesi yapılmıştır. Görselleri sanallaştırmanın dışında projenin önemli amacı, görev performansının etkileri ve etkileyciliğini keşfetmektir. Çalışma sonucu sistemin etkileyici olduğuna dair derecelendirme yapılmıştır. Sonraki aşamada bilgisayar tabanlı uçak inceleme simülatörü ile karşılaştırma yapılmış; elde edilen sonuçlar eğitimde sanal gerçeklik kullanmanın bilgisayar üzerinde verilen eğitime göre daha iyi olduğunu ve tercih edildiğini göstermiştir [4].

“Kimya Eğitiminde Tam Kapsamlı Sanal Ortam”, isimli çalışmada 2B (İki boyutlu) bilgisayar üzerinde kimyasal animasyonlar ile 3B sanal gerçeklik üzerinde gösterilen animasyonların karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak öğrenciler konuyu 3B sanal gerçeklik ortamında gösterilen animasyonlar sayesinde 2B bilgisayar ortamındaki göre daha iyi kavramışlardır. Ayrıca öğrencilerin kendileri reaksiyonun içindeymiş gibi hissettikleri için heyecanlandıkları da belirtilmiştir. Kimyagerlerin geleneksel bir eğitimden elde edilmesi zor olan deneyim becerilerini elde etmek için ileride tam kapsamlı bir sanal gerçeklik laboratuvarında eğitim alacakları düşünülmektedir [10].

“Sanal Gerçeklik Uygulamasında Bilim Öğrenmek: Animasyonlu-Sanal Aktörlerin Görsel Karmaşıklığının Etkileri”, isimli çalışmada, görsel olarak karmaşık materyaller motive edici ve ilgi çekici olabilirken, öğrenmeyi olumsuz etkiler mi sorusuna cevap bulmak için ikinci sınıf psikoloji öğrencilerine düz, çizgi film veya gerçeğe yakın karakterlerle karıncaların gezinme davranışları hakkında bilgi veren sanal gerçeklik sunumu geliştirilmiştir. Öğrenme sonuçlarını değerlendirmek için, öğrenme algısını ve algılanan zorluğu ölçen program derecelendirmeleri ile kalıcılık ve aktarım testleri yapılmıştır. 200 öğrenciden elde edilen sonuçlara göre anlatım yapan sanal karakterin görsel karmaşıklığının bir

işlevi olarak öğrenme sonuçlarında önemli bir farklılık görülmemiştir. Sonuç olarak algılanan kalite ve öğrenme algısı arasında pozitif ilişki gözlemlenmiştir [11].

“Dinamik Yangın Verileri Entegre Edilmiş Sanal Gerçeklik Tabanlı Yangın Eğitim Simülatörü”, isimli çalışmada, deneyimsiz kullanıcıların yangın söndürme çalışmalarında faydalı bilgiler edinmesi sağlanmıştır. Yangın ısısının ve zararlı gazların verileri gerçek zamanlı olarak aktarılmıştır. Sanal gerçeklik tabanlı bir yangın eğitim simülatörü deneyimleyen kişilerin, gerçek yangın durumlarında hızlı kararlar verebilmeleri, güvenli ve organize müdahaleler yapabilmeleri sayesinde insan güvenliğini artırabilmeleri için ön bilgi sağlayacağı belirtilmiştir [12].

“Sanal Gerçeklik ve Kaza Simülasyonu Arasında Endüstriyel Eğitim Bağlantısı” isimli çalışmada, geleneksel eğitim sistemine kıyasla, durumun üç bileşenini ele alarak görevli çalışan kişinin bilişsel hazır olma potansiyeline sahip olması, tesisi ve birimlerini deneyimleyebilmesi, anlamları ve amaçları kavraması yakın gelecekte durum yaşandığında nasıl müdahale edebileceğinin farkında olması hedeflenmiştir. Araştırma sonucunda, sanal gerçeklik kullanılarak eğitilen çalışanların, anormal durumlara etkin bir şekilde yanıt vermeleri sağlanarak, sanayi alanında yaşanabilecek bir kazanın önceden gösterilmesi ile ileride gerçekleşebilecek kazalara müdahale etmek için daha deneyimli olacakları belirtilmiştir [13].

“Sanal Gerçeklik Araçlarının Kelime Öğrenimi ve Hafızada Tutmadaki Verimliliği”, isimli çalışmada deney grubuna sanal gerçeklik araçları ile öğretim uygulanırken, kontrol grubuna ise geleneksel öğretim yöntemleri uygulanmıştır. Katılımcıların sanal gerçeklik araçlarıyla yapılan öğretime ilişkin fikirleri alınmıştır. Yapılan araştırmanın sonuçlarında ise sanal gerçeklik araçlarının kelime öğrenmede ve akılda tutmada etkili olduğu gösterilmiştir [14].

“Yazılım Geliştirmenin Uygulama Deneyimi için Tasarlanmış Sanal Gerçeklik Tabanlı Eğitim Ortamı”, isimli çalışmada kişilere, gereksinim analizinden yazılım testine kadar devam eden süreçte, yazılım geliştirme görevlerine dayanan bir interaktif sanal gerçeklik tecrübesi deneyimleyebilecekleri bir ortam sunulmuştur. Sanal ortamda katılımcı, yapay zeka ile kontrol edilen beş karakterle birlikte çalışması gereken işe yeni başlamış bir yazılım geliştiricisi rolündedir. Böylelikle katılımcılar, gerçek olaylara dayanan sanal bir yazılım projesinde gezinirken, bu sanal karakterler gelişen olaylarla ilgili görüşlerini katılımcılara sunmaktadır. Bu sayede, katılımcılara 2B yaşanan klasik tecrübenin daha ilerisinde bir tecrübe yaşatılarak 3B sanal bir dünyada gerçek hayattakine benzer bir yazılım geliştirme dünyası sunulmuştur. Bu sayede katılımcılar, simülasyon için

yaratılmış olayları deneyimleyebilme imkanına sahip olmuşlardır. Geliştirilen ortamın başarısını anlamak için sistem, bilgisayar mühendisliği bölümünde öğrenim gören 32 öğrenci ile test edilmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlara göre, tasarlanan eğitim platformu, bireylerin yazılım geliştirme süreci hakkında eğitilmesinde kullanılabilecek verimli bir araç olduğu belirtilmiştir [15].

“Olay Yeri İncelemesinde Öğretme ve Öğrenme için Sanal Gerçeklik” isimli çalışmada, adli tıp eğitiminin maliyetli ve erişimi zor olması nedeniyle, sanal gerçeklik teknolojisinden faydalanarak özel pratik becerileri öğretme ve öğrenme amaçlı olay yeri uygulaması tasarlanmıştır. Sonuç olarak katılan her iki kullanıcı grubunun da uygulamayı kullanmaktan yüksek düzeyde memnuniyet duyduğu belirtilmiş ve sanal gerçekliğin yan etkilerinin minimum düzeyde olduğu raporlanmıştır. Kullanıcı geri bildirimlerine atıfta bulunarak, adli bilim eğitimine ek olarak sanal gerçekliğin büyük ölçekli uygulanmasıyla ilişkili ölçeklenebilirlik ve geliştirme zorluklarını değerlendirmeye devam edecekleri belirtilmiştir [16].

3. Sanal Gerçeklik ve Kullanım Alanları

Sanal gerçeklikle birlikte, farklı alanlarda kullanılan çeşitli “gerçeklik” kavramları hayatımıza girmiştir. “Gerçeklik” kavramı, ortamın dijital veya gerçek olma oranına göre ayrılmaktadır. Sanal Gerçeklik (Virtual Reality: VR), kullanılan gözlükler sayesinde kişinin kendisini dijital bir bilgisayar simülasyonunu içerisindeymiş gibi hissetmesini sağlayan deneyim olarak tanımlanmıştır [17]. Yapılan bir araştırmada, birçok öğretmen adayı, sanal gerçeklik teknolojisinin öğrencileri aktif olmaya teşvik ettiğini, ilgi çekici olduğunu ve bilgileri uygulamaya dökmekte kolaylık sağladığını düşünmektedir [18].

1960'lı yılların başlarında, Morton Heilig tarafından tasarlanan “Sensorama” ışık, ses, hareket ve hatta koku hislerini kullanarak kullanıcıya motosiklet yolculuğu deneyimi sunmaktadır. Bu yolculuk daha sonra modern havacılar için bir uçuş eğitim simülatörü teknolojisine dönüşmüştür. Uçuş simülatörleri sayesinde, bireylerin hayatını ve ekipmanları riske atmadan yeni nesil uçakları ve uzay araçlarını uygun maliyetli bir şekilde deneyimlenmesi sağlanmaktadır. 1965 yılında Ivan Sutherland, bilgisayarın bir gün sanal dünyalara nasıl "pencere" olacağını anlattığı "The Ultimate Display" isimli makalesi yayınladı. 1968 yılında Ivan Sutherland, kullanıcının kafa hareketlerini takip edebilen ve başa takılabilen bir bilgisayar grafik ekranını üretmiştir. Bu cihaz, kullanıcıya oluşturulan grafiklerin simülasyonlarını sol ve sağ açıdan görüntüleme imkânı sağlamıştır. Bu deneyim sayesinde, kullanıcının kafası hareket ettiğinde,

sanal sahneler 3 boyutlu gerçek bir nesneye bakıyormuş izlenimi yaratmıştır. Bu ekranlar VR teknolojisinin temeli kabul edilmektedir. 1980'li yılların ortasında NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), uçuş simülatörlerinde kullanılan ekipmanın yüksek maliyetini azaltmak için hazır LCD, TV ve diğer elektronik bileşenlerden nispeten daha düşük maliyetli sanal gerçeklik ekipmanı geliştirmeye başlamıştır. Aynı zamanda, bilgisayarların işlem gücü 1980'li yılların başlarında önemli ölçüde artmıştır. Bu da gerçek zamanlı simülasyonların ve etkileşimli grafiklerin masaüstü bilgisayarlarda kullanılmasına imkân sağlamıştır. Tüm bu gelişmeler, 1990'lı yılların başlarında sanal gerçekliğin ticari olarak kullanılmasını mümkün kılmaya yardımcı olmuştur [19]. Sanal gerçeklik teknolojisi 2000'li yılların başlarından itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır. Sanal gerçeklik uygulamaları ile ilgili çalışmaların Avrupa ve Amerika'da ağırlıklı olduğu görülmektedir.

Sanal gerçeklik deneyimi, kullanılan sistemin bileşenleri ve çevreleme/daldırma (immersion) düzeyine göre başlıca üç sınıfa ayrılmaktadır. Tam çevreleme (fully immersive), bilgisayar tarafından üç boyutlu oluşturulmuş tamamen sanal olan ortamın bir sanal gerçeklik başlığı üzerinden görüntülenmesi ve başlığın üzerinde bulunan donanımlar aracılığıyla kullanıcının kafa, el, hareketlerinden alınan konum bilgilerinin eş zamanlı biçimde sanal ortam üzerinde gösterilmesi aynı zamanda sanal ortamda bulunan nesnelere ile etkileşime geçilebilmesi yaşanan deneyim açısından en üst düzey çevreleme kabul edilmektedir. Yarı çevreleme (semi-immersive), kullanıcının sanal gerçeklik başlığı kullanmadan projeksiyon aracılığıyla gerçek mekâna yansıtılan sanal ortamın sesler ve bazı hareketler ile kullanıcıya yaşattığı deneyim kabul edilmektedir. Çevrelemeyen (non-immersive), bilgisayar tarafından oluşturulan sanal ortamın ekran üzerinden kullanıcıya sunulması ve kontrolcü donanım üzerinden kontrol edilmesidir [20]. Uçuş simülatörleri çevrelemeyen deneyime örnek olarak gösterilebilir. Sanal gerçeklik başlıklarını donanımsal özelliklerine göre sınıflandırmak mümkündür. Performans ve taşınabilirlik özellikleri farklılık göstermektedir. Bu başlıklar bilgisayar tabanlı, mobil tabanlı ve sanal gerçeklik için özelleştirilmiş bağımsız başlıklar olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. Bilgisayar tabanlı başlıklar genellikle kablo üzerinden bilgisayardan aldığı yüksek grafikli görüntüleri aktarmaktadırlar, başlıkların üzerinde bulunan donanım bağlı olduğu bilgisayara veri aktarmaktadır. Bu başlıklar ileri düzey gerçekçi grafiklere sahip simülasyon eğitimleri için tercih edilmektedirler. Mobil tabanlı başlıklar akıllı cep telefonunun yazılım ve donanımından faydalanmaktadır, bu başlıklar ekranı yaklaştırmak için çift lens içermektedir, grafik performansı cihazın sahip olduğu donanım ile sınırlıdır. Mobil tabanlı başlıkların kablosuz

esnek bir deneyim sağlaması ve maliyetinin düşük olması sanal gerçeklik deneyimi yaşamak isteyen kullanıcılar için yeterli olmaktadır. Mobil tabanlı başlıklar genellikle okullarda basit videolu sanal eğitimler için tercih edilmektedirler. Özelleştirilmiş bağımsız başlıklar kendi donanımlarına ve işletim sistemlerine sahiptirler. Kablosuz veya kablolu çalışabilmektedirler. Başlıklar kendi donanım üreticilerine ait sensörleri ve kameraları içermektedirler kullanıcının el, göz, vücut hareketlerini izleyebilirler. Mobil donanımlara göre sanal gerçeklik deneyimi sağlamak için güçlendirilmiş özel işlemcilerle sahiptirler. Eğlence ve eğitim amaçlı tercih edilmektedir. Mobil tabanlı başlıklara kıyasla uzun kablosuz kullanım süresi ve üzerinde bulunan sensörler ile daha derin sanal gerçeklik deneyimi sunması eğitimlerde özelleştirilmiş bağımsız başlıkların tercih edilmesini sağlamıştır [21].

Sanal gerçeklik teknolojisi sayesinde zamandan ve mekândan bağımsız uygulamalar geliştirmek mümkündür. Bu özelliğinden dolayı, sanal gerçeklik günümüzde oldukça revaçtadır ve geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu teknoloji, maliyetli ve zaman alan uygulamalarda benzetim ve ön izleme yapmak için kullanılır. Sanal Gerçeklik kavramının temelinde, günümüzde akıllı telefonlarla ismi geçmeye başlayan yeni nesil sanal gerçeklik gözlükleri bulunur. Bu gözlükler bizlere bir sanal gerçekliği gösterebilme, sanal sesleri duyurabilme, sanal nesnelere etkileşime geçebilme gibi özellikleri sunmaktadır [22]. Genellikle oyun ve eğlence amaçlı satılan sanal gerçeklik cihazları aynı zamanda farklı alanlardaki ihtiyaçları karşılamak için de kullanılmaktadır. Sanal gerçekliğin günümüzde eğitim amaçlı başlıca kullanıldığı alanlar sağlık (Genel Tıp, Cerrahi, Hemşirelik, Rehabilitasyon, Beslenme), mühendislik (Havacılık, Mimari, Robotik, İnşaat, Madencilik, Mekatronik, Kimya, Otomotiv), genel eğitimler (Sanal Eğitimler, Öğrenme Güçlükleri, Uzaktan Eğitim), bilim alanları (Astronomi, Bilgisayar Bil., Genel Fizik, Enerji Eğitimi, Geometri, Genel Matematik Konuları, Fen Bilimleri) olarak sayılabilir.

Eğitim amaçlı sanal gerçeklik uygulamaları ve araştırmalarının genel eğitim, genel sağlık (Tıp ve cerrahi ağırlıklı), güvenlik, bilim (Astronomi ve bilgisayar bilimleri ağırlıklı) ve mühendislik (Havacılık ve mimarlık ağırlıklı) alanlarında diğer eğitim amaçlı alanlara oranla daha fazla olduğu belirtilmektedir [23]. Havacılık ve diğer yüksek eğitim gerektiren ulaştırma sektörlerinde personellerin simülasyon eğitimlerinin hızlandırılması ve maliyetlerinin düşürülmesi için sanal gerçeklik teknolojisine yönelme olduğu görülmektedir. Bu eğitimlerle beraber bireylerin farklı değerlendirmeler ve zorluk düzeyleriyle daha donanımlı olması hedeflenmektedir. Literatür araştırması yapıldığında en fazla çalışmanın sağlık alanında olduğu sonucuna

varılmıştır. Sağlık personellerinin eğitim süreçlerinde cerrahi operasyon simülasyonları ve sanal bireyler ile birlikte ortak deneme çalışmaları tecrübeli ve hata payı düşük bireylerin yetişmesini sağlayabilmektedir. Sanal gerçekliğin sadece ameliyathanede kullanılması dışında, aynı zamanda ameliyat öncesi planlama ve eğitim araştırmalarında da kullanılabilmesine dair gelecek potansiyeli olduğu belirtilmiştir [24]. Günümüzde sanal gerçeklik teknolojileri iş güvenliği alanında da aktif olarak uygulanmaktadır. Sanal gerçeklik ile iş güvenliği alanında adayların başarı düzeyini değerlendirmesi ve eğitimi tamamladıklarında sertifika almaları sağlanmaktadır [25].

Son yıllarda büyük teknoloji şirketleri (Meta, Microsoft, HTC) sanal gerçeklik teknolojilerinin geliştirilmesi ve daha fazla kullanıcıya ulaştırılması için yatırımlar yapmaktadır. Bu şirketler kendi sanal gerçeklik teknolojilerini üretmekte ve geliştirmektedir [26]. Ayrıca oyun motoru yazılım şirketleri (Unity Technologies, Epic Games, Godot vb.) bu alanda büyük yatırımlar yapmaktadırlar [27].

“Türkiye’deki Sanal Gerçeklik Tezlerinin İncelenmesi” isimli çalışmada Türkiye’de 1996-2017 yılları arasındaki sanal gerçeklik kullanılarak yapılan tezlerin en fazla fen alanında yapıldığı, ardından sosyal ve sağlık bilimlerinde çalışmaların olduğu belirtilmiştir. Eğitim alanında yapılan çalışmaların çok az olduğuna dair bilgi verilmiştir [28].

4. Sanal Gerçeklik ve Eğitim

Teknoloji alanında araştırmaların ve geliştirmelerin her geçen gün daha ileriye gittiği bu dönemde genç bireylerin birden fazla akıllı cihaz sahibi olduğu görülmektedir. Eğlence ve sosyal medyaya olan ilginin artması ile pazarın genişlemesi, sanal gerçeklik alanında da büyük ilgi yaratmıştır. Büyümekte olan sanal gerçeklik pazarı için şirketler birçok ürün ve hizmet sunmaktadır. Bu gelişmeler ile birlikte sanal gerçekliğin eğitim alanında kullanımı yenilikçi ve verimli eğitimler vermek için de oldukça önemlidir. Bu alanda büyük girişimleri olan şirketlerden Google, öğrencilerin cep telefonları ve sanal gerçeklik gözlüğü (karton) kullanarak sanal gerçeklik deneyimini yüksek maliyetler olmadan keşfetmelerini sağlamıştır. Bir diğer büyük teknoloji şirketi olan Meta (Facebook) yaptığı yatırımlar ve hizmetleri sayesinde daha ileri teknolojiler sunan, yüksek çözünürlüklü ekran ve yüksek performanslı işlemci içeren, el hareket takibi sunan sanal gerçeklik cihazlarını (Oculus quest) üretmekte ve tüm kullanıcılara pazarlamaktadır. Bu cihazları kullanmak için günümüzde pahalı bir bilgisayara ihtiyaç olmaması önemli bir gelişme olarak görülmektedir. Sanal gerçeklik günümüzde eğitim ve değerlendirme amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Sanal gerçeklik eğitimleri birden fazla kişi ile eş zamanlı

yapılabilmektedir. Bu eğitimlerde ek donanımlar kullanılarak sanal ortama etkileşimler yansıtılmaktadır. Eğitim amaçlı çalışmalarda bireyler sınırlama olmadan tekrar aynı eğitimleri alabilmekte, eğitim esnasında katılımcılar etkileşimli ve anlık olarak hatalarını görebilmekte, adımlarının doğruluğu hakkında bilgi edinebilmektedirler. Literatür çalışmaları incelendiğinde, bilgisayar ile yapılan sanal eğitim simülatörü çalışmalarının günümüzün sanal gerçeklik çalışmalarının geliştirilmesine bir temel sağladığı görülmektedir. “Öğrencilerin sanal gerçeklik öğrenme ortamlarına yönelik tutumlarının araştırılması: Yapılandırıcı bir yaklaşıma dayalı”, isimli çalışmada web tabanlı 3B (üç boyutlu) teknolojilerin kullanımı ve sanal gerçeklik özellikleri vurgulanmıştır. Sanal gerçeklik ile öğrenme ortamı beş konuya ayrılıp sınıflandırılmıştır.

- Sanal gerçeklik ile arayüz tasarımının kullanılabilirliği için pratik eğitim uygulamalarında kullanım kolaylığından ziyade işlevsellik açısından tasarlanabilmesi önerilmiştir. Sanal gerçeklik içerisinde 3B arayüz kullanımında yol gösterici bulunması gerektiği belirtilmiştir.
- Eğitiminin sanal gerçeklik kursu tasarlamak için daha yüksek programlama becerilerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Programlama geçmişi olmayan öğretmenlerin kurumsal destek alması gerektiği belirtilmiştir.
- Sadece bilgisayar ortamında oluşturulan grafikler sunmakla kalınmaması, gerçek dünya ortamından sanal ortama gerçekliğin karışık aktarılması gerektiği belirtilmiştir.
- Geliştirme ve donanım gibi maliyetlerin düşürülmesi gerektiği belirtilmiştir.
- Öğrencinin değerlendirilmesi ve performansının nasıl daha fazla yükseltilebileceği konusunda sanal gerçeklik ile öğrenme ortamları üzerine daha fazla araştırmalar yapılması gerektiğine karar verilmiştir [29].

5. Bulgular ve Yorumlar

İncelenen bütün çalışmaların, bilgisayar bağlantılı sanal gerçeklik başlıklarında denenmiş olduğu görülmüştür.

İlgili alanyazın taramasından elde edilen 10 makalenin sonuçlarına bakıldığında, sanal gerçeklik teknolojisi kullanılarak yapılan eğitimlerin daha verimli, etkili ve akılda kalıcı olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca gerçekçi ortam sunduğu ve deneyim sağlandığı da belirtilmektedir. Tablo 1’de, incelenen bu çalışmaların kısa bir değerlendirmesi verilmektedir.

Öğrenimi kolay konular için sanal gerçeklik sadece daha çok ilgi çekici olabilmektedir. Daha karmaşık ve güvenlik gerektiren eğitimler içinse mutlaka sanal gerçeklik teknolojisinden faydalanılmalıdır.

Sanal gerçeklik ile eğitim simülasyonları kolay kavranabilir biçimde geliştirilmelidir. İleride eğitimlerin sanal gerçeklik teknolojisi kullanılarak verilmesi daha çok tercih edilecektir.

Tablo 1. Sektör, yıllar ve sonuçlar tablosu

Çalışma	Sektör	Sonuçlar
[8] (2000)	Sağlık	Tıp öğrencileri ve asistanlar için daha gerçekçi dermatolojik cerrahi eğitimi sağlayacağı belirtilmiştir.
[9] (2002)	Sağlık	Sanal gerçeklik uygulamasının, cerrahların karmaşık cerrahi anatomik ilkeleri öğrenmedeki bazı engellerin üstesinden gelmelerine yardımcı olduğunu ve yeni bilgilerin akılda tutulduğunu göstermiştir.
[4] (2002)	Havacılık	Sanal gerçekliğin bilgisayar üzerinde verilen eğitime göre daha iyi ve etkileyici olduğu belirtilmiştir.
[10] (2008)	Eğitim	Öğrencilerin, sanal gerçeklik sayesinde konuyu daha iyi kavradıkları ve reaksiyonun içinde hissederek heyecanlandıkları belirtilmiştir.
[11] (2010)	Eğitim	200 öğrenciden elde edilen sonuçlara göre algılanan kalite ve öğrenme algısı arasında pozitif bir ilişkinin gözlemlendiği belirtilmiştir.
[12] (2012)	Endüstri	Sanal gerçeklik tabanlı bir yangın eğitim simülatörü deneyimleyen kişilerin, gerçek yangın durumlarında hızlı kararlar verebilmeleri, güvenli ve organize müdahaleler yapabilmeleri sayesinde insan güvenliğini artırmak için ön bilgi sağlayacağı belirtilmiştir.
[13] (2013)	Endüstri	Sanal gerçeklik kullanılarak eğitilen çalışanların, anormal durumlara etkin bir şekilde yanıt vermeleri sağlanarak, sanayi alanında yaşanabilecek bir kazanın önceden gösterilmesi ile ileride gerçekleşecek kazalara müdahale etmek için daha deneyimli olacakları belirtilmiştir.
[14] (2018)	Eğitim	Yapılan araştırmanın sonucunda, sanal gerçeklik araçlarının kelime öğrenmede ve akılda tutmada etkili olduğu gösterilmiştir.
[15] (2018)	Yazılım	Testlerden elde edilen sonuçlara göre, tasarlanan sanal eğitim platformunun, bireylerin yazılım geliştirme süreci hakkında eğitilmesinde kullanılabilecek verimli bir araç olduğu belirtilmiştir.
[16] (2020)	Adli Bilimler	Katılan her iki kullanıcı grubunun da uygulamayı kullanmaktan yüksek düzeyde memnuniyet duyduğu belirtilmiştir. Ayrıca sanal gerçekliğin yan etkilerinin minimum düzeyde olduğu raporlanmıştır.

6. Sonuçlar

Eğitimde sanal gerçeklik teknolojisi kullanılarak yapılan araştırmaların, ScienceDirect üzerinde gerçekleştirilen “Virtual Reality, Virtual Reality in Education” anahtar kelime sonuçlarına göre her yıl çoğalarak arttığı ve çeşitlendiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, eğitimde sanal gerçeklik uygulamalarına yönelik farklı yıllarda ve alanlarda gerçekleştirilen araştırmalar incelenmiştir. İncelenen araştırmaların çoğunluğu, eğitimde sanal gerçeklik teknolojisi kullanmaya olumlu bakmaktadır. Sanal gerçeklik ile eğitime katılan kişilerin memnuniyet duyduğu belirtilmektedir. Bu şekilde gerçekleştirilen eğitimlerin akılda kalıcı, ilgi çekici ve ön bilgi sağladığı yönünde sonuçlar tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sanal gerçekliğin eğitim alanında daha fazla kullanılması gerektiğini göstermektedir. Eğitimcilerin sanal gerçeklik alanında programlama becerilerinin iyileştirilmesi ve programlama bilgisi olmayan öğretmenlerin kurumsal destek alması sanal gerçeklik eğitimlerinin çoğalmasına katkı sağlayacaktır. Sanal gerçeklik ile eğitim alacak personellerin ön bilgi sahibi olacağı ve gerçeğe daha yakın değerlendirmelerden geçerek deneyimli olacakları ve daha iyi öğrenmelerinin sağlanacağı belirtilmiştir. Sanal gerçeklik eğitimleri alan öğrencilerin, eğitimlere yönelik ilgi ve motivasyonlarının artacağı, öğrenilen bilgilerin akılda kalacağı ve eğitim güvenliğinin yüksek düzeyde tutulacağı belirtilmektedir. Sanal gerçeklikten faydalanarak eğitim maliyeti yüksek olan simülasyonlara bağlılığın düşürülmesi ve maliyetlerin düşmesi doğrultusunda daha çok sanal gerçeklik eğitimlerinin tercih edileceği sonucuna varılmıştır. Sağlık, mühendislik ve genel eğitim alanında sanal gerçeklik ile eğitim uygulamalarının daha da fazla kullanılacağı öngörülmektedir. İncelenen araştırmalar doğrultusunda, sanal gerçeklik ile eğitim uygulamaları geliştirilirken, maliyeti düşük donanımların tercih edilmesi, eğitimcilere yüksek programlama bilgisi gerektirmeyen uygulama tasarlamak ve uygulamanın kullanımını içeren doküman sağlanması önerilmektedir; sanal ortamda verilen eğitimin performans değerlendirilmesi için detaylı araştırma yapılması tavsiye edilmektedir, performansı yükseltmek için farklı zorluk düzeyleri eklenmesi de faydalı olacaktır.

Sanal gerçekliğin eğitim alanında kullanılmasına katkı vermek ve literatürdeki uygulama bazlı çalışmalara ek bir uygulama yapmak amacıyla, yüksek lisans tezi kapsamında, uçak kokpit eğitiminde kullanılabilecek yeni bir sanal gerçeklik uygulamasının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada uçuş eğitimi veya uçaklar hakkında teknik bilgiler alacak personellerin interaktif olarak değerlendirilmesi, tamamen kablosuz sanal gerçeklik başlığı ve kontrol cihazı kullanmadan el hareket

takibi ile etkileşime geçebilecekleri, aynı ortamda senaryolara göre testlere girebilecekleri bir uygulama yapılması hedeflenmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Objectives of Educational Technology, <https://leverageedu.com/blog/objectives-of-educational-technology/>, (Erişim tarihi: 22 Mart 2022).
- [2] Taylan G. Ö., 2020. Eğitim Amaçlı İnternet Kullanımı, Dijital Okuryazarlık: Araçlar, Metodolojiler, Uygulamalar ve Öneriler. Nobel Akademi, Ankara, Türkiye, 375-410.
- [3] Shin Y., 2003. Virtual experiment environments design for science education. Paper presented at the 2003 International Conference on Cyberworlds, Singapore, 5-5 December, 388-395.
- [4] Vora J., Nair S., Gramopadhye A. K., Duchowski A. T., Melloy B. J., Kanki B., 2002. Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies. *Applied Ergonomics*, 33(6), 559-570.
- [5] Aktaş O., 1997. İç Mimarlıkta Bir Eğitim Aracı Olarak Sanal Gerçeklik Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 64455.
- [6] Tepe T, Kaleci D., Tuzun H., (2016). Eğitim Teknolojilerinde Yeni Eğilimler: Sanal Gerçeklik Uygulamaları. 10. Uluslararası Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Sempozyumu, Rize, Türkiye, 16-18 Mayıs, 547-555.
- [7] Virtual reality (VR) headset unit sales worldwide from 2019 to 2024, <https://www.statista.com/statistics/677096/vr-headsets-worldwide/>, (Erişim tarihi: 12 Ekim 2022).
- [8] Gladstone H. B., Raugi G. J., Berg D., Berkley J., Weghorst S., Ganter M., 2000. Virtual reality for dermatologic surgery: Virtually a reality in the 21st

- century. *Journal of the American Academy of Dermatology* 42(1), 106-112.
- [9] Silverstein J. C., Dech F., Edison M, Jurek P., Helton W. S., Espat J. N., 2002. Virtual reality: Immersive hepatic surgery educational environment. *Surgery*, 132(2), 274-277.
- [10] Limniou M., Roberts D., Papadopoulos N., 2008. Full immersive virtual environment CAVETM in chemistry education. *Computers & Education*, 51(2), 584-593.
- [11] Kartiko I., Kavakli M., Cheng K., 2010. Learning science in a virtual reality application: The impacts of animated-virtual actors' visual complexity. *Computers & Education*, 55(2), 881-891.
- [12] Cha M., Han S., Lee J., Choi B., 2012. A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data. *Fire Safety Journal*, 50, 12-24.
- [13] Manca D., Brambilla S., Colombo S., 2013. Bridging between Virtual Reality and accident simulation for training of process-industry operators. *Advances in Engineering Software*, 55, 1-9.
- [14] Koçbuğ R., 2018. Sanal Gerçeklik Araçlarının Kelime Öğrenimi ve Hafızada Tutmadaki Verimliliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 511320.
- [15] Güleç U., 2018. Yazılım Geliştirmenin Uygulama Deneyimi için Tasarlanmış Sanal Gerçeklik Tabanlı Eğitim Ortamı, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 534242.
- [16] Mayne R., Green H., 2020. Virtual reality for teaching and learning in crime scene investigation. *Science & Justice*, 60(5), 466-472.
- [17] <https://unity3d.com/what-is-xr-glossary>, (Erişim tarihi: 22 Mart 2022).
- [18] Başaran F., 2010. Öğretmen adaylarının eğitimde sanal gerçeklik kullanımına ilişkin görüşleri (Sakarya Üniversitesi Böte örneği), Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 265872.
- [19] Lu S., Shpitalni M., Gadh R., 1999. Virtual and Augmented Reality Technologies for Product Realization. *CIRP Annals*, 48(2), 471-495.
- [20] Al-musawi R., Farzaneh F., 2016. Computer-Based Technologies in Dentistry: Types and Applications. *Journal of Dentistry*, 13(3), 215-222.
- [21] Akman E., 2019. İlkokul Matematik Dersi Kesirler Konusunda Geliştirilen Sanal Gerçeklik Uygulamasının Farklı Değişkenler Açısından Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Amasya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Amasya, Türkiye, 587141.
- [22] https://tr.wikipedia.org/wiki/Sanal_gerceklik, (Erişim tarihi: 22 Mart 2022).
- [23] Kavanagh S., Luxton-Reilly A., Wuensche B., Plimmer B., 2017. A systematic review of Virtual Reality in education. *Themes in Science & Technology Education*, 10(2), 85-119.
- [24] Meier A. H., Rawn C. L., Krummel T. M., (2001). Virtual reality: surgical application— challenge for the new millennium. *Journal of the American College of Surgeons*, 192(3), 372-384.
- [25] <https://www.iti.com/vr/construction-hazard-certification>, (Erişim tarihi: 22 Mart 2022).
- [26] The Worlds Largest Virtual Reality Companies: Meet The Studios Dominating The Industry, <https://www.gamedesigning.org/gaming/virtual-reality-companies/>, (Erişim tarihi: 12 Ekim 2022).
- [27] Vidra E, The Top 10 Companies Investing Billions In The Metaverse, <https://www.vccafe.com/2022/08/02/the-top-10-companies-investing-billions-in-the-metaverse/>, (Erişim tarihi: 12 Ekim 2022).
- [28] Hasancebi M., Yavuz M., Gündüz A., Tan S., Goktas Y., 2018. Türkiye'deki Sanal Gerçeklik Tezlerinin İncelenmesi. Paper presented at the DILET2018 The 2nd International Conference on Distance Learning and Innovative Educational Technologies , Ankara, 12-13 December, 147-157.
- [29] Huang H., Rauch U., Liaw S., 2010. Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments: Based on a constructivist approach. *Computers & Education*, 55(3), 1171-1182.



Polibromlu Dibenzo-p-Dioksinler/Furanlar (PBDD/F'lar) ve Hegzabromosiklo dodekanlar (HBCDD'lar): Kimyasal Oluşum, İzleme, Etki ve Ölçüm

Polybrominated Dibenzo-p-Dioxins/Furans (PBDD/Fs) and Hexabromocyclo dodecanes (HBCDDs): Chemical Formation, Monitoring, Effect and Measurement

Fatma Şevval SÖNMEZ¹ , Barış GÜZEL^{2,*} , Oltan CANLI³

¹ Çevre Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-6884-4686

² Su Yönetimi ve Arıtma Teknolojileri Araştırma Grubu, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Başkan Yardımcılığı, TUBITAK Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-6709-2339

³ Su Yönetimi ve Arıtma Teknolojileri Araştırma Grubu, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Başkan Yardımcılığı, TUBITAK Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-2652-844X

Derleme Makale

Gönderilme Tarihi : 22/09/2022

Kabul Tarihi : 20/12/2022

Anahtar Kelimeler

Analiz
Etki
HBCDD
Kimyasal Oluşum
PBDD/F

Özet

Kalıcı organik kirleticiler (KOK'lar), biyolojik olarak parçalanmamaları nedeniyle çevrede daha uzun süre kalabilen organik kimyasallardır. Polibromlu dibenzo-p-dioksinler/furanlar (PBDD/F'ler), istemeden üretilen ve Stockholm Sözleşmesi'ne henüz dahil olmamış kirleticilerdir. PBDD/F'ler poliklorlu dibenzo-p-dioksinler/furanlar (PCDD/F'ler) gibi kalıcı halojenize organik kirleticiler olup, lipofilik ve bioakümülatif özelliklerinden ötürü besin zincirlerinde birikerek insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz sonuçlar doğurma potansiyeline sahiptirler. PBDD/F'ler esas olarak bromlu alev geciktiricilerin (BFR'lerin) yanması, elektrikli ve elektronik ekipmanların sökülmesi, metal eritme ve atık yakma gibi termal koşullar altında ortaya çıkmaktadır. Hegzabromosiklododekanlar (HBCDD'lar) ise Stockholm KOK'lar Sözleşmesi'nin Ek A kısmında listelenmiş olup; insan maruziyetinin meydana geldiği başta su, toz, hava ve toprak yoluyla taşınarak çevreyi kirletirler. Kontamine olmuş yiyecekler, nefes alma ve içme suyu, insanların HBCDD'lere maruz kalması için üç önemli yoldur. Özellikle balık tüketimi, insanların HBCDD'lere maruz kalmasının ana yollarından biridir. Günümüzde, varlığı, özellikleri, etkileri ve ölçüm yöntemleri de dahil olmak üzere PBDD/F'lerin ve HBCDD'lerin kapsamlı bir açıklanması eksiktir; bu nedenle, bu derleme bu bilgileri sağlamak için yapılmıştır.

Review Paper

Received Date : 22/09/2022

Accepted Date : 20/12/2022

Keywords

Analysis
Effect
HBCDD
Chemical Formation
PBDD/F

Abstract

Persistent organic pollutants (POPs) are organic chemicals that can remain in the environment for a longer period due to their non-biodegradability. Polybrominated dibenzo-p-dioxins/furans (PBDD/Fs) are unintentionally produced pollutants that have not yet been included in the Stockholm Convention. PBDD/Fs are persistent halogenated organic pollutants such as polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs), and they have the potential to cause negative consequences on human health and the environment by accumulating in food chains due to their lipophilic and bioaccumulative properties. PBDD/Fs arise mainly under thermal conditions such as the combustion of brominated flame-retardants (BFRs) disassembly of electrical and electronic equipment, metal smelting and waste incineration. Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) are listed in Annex A of the Stockholm POPs Convention; they pollute the environment by transporting water, dust, air and soil, especially where human exposure occurs. Contaminated food, breathing and drinking water are three major ways people are exposed to HBCDDs. Food intake, particularly through fish consumption, is one of the main ways humans are exposed to HBCDDs. A comprehensive description of PBDD/Fs and HBCDDs, including their existence, properties, effects and measurement methods, is currently lacking; therefore, this review has been made to provide this information.

1. Giriş

Halojenli kimyasallar, 20. yüzyılım ikinci yarısından itibaren endüstriyel ve evsel kullanım için büyük ölçekte

üretilmeye başlanmıştır. Ancak fayda getirmesi amaçlanan bu kullanımlar, kısa bir süre sonra beklenmeyen ve istenmeyen çevresel etkileri de beraberinde getirmiştir [1, 2]. Araştırma/Geliştirme çalışmaları ve yüksek oranda elektronik cihaz tüketimi, küresel ölçekte elektronik atıkların oluşumunun sürekli artmasına yol açarak, bunları

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): guzelbaris08@gmail.com



sanayileşmiş ülkelerdeki en hızlı atık akışı haline getirmiştir [3].

Stockholm Sözleşmesi, 22 Mayıs 2001 tarihinde Stockholm'de imzalanan ve 17 Mayıs 2004 tarihinden itibaren geçerli olan, kalıcı organik kirleticilerin (KOK'lar) üretimini ve kullanımını ortadan kaldırmayı veya kısıtlamayı amaçlayan uluslararası bir çevre anlaşmasıdır. Polibromlu dibenzo-p-dioksinler (PBDD/F'ler), Stockholm Sözleşmesi'ne henüz dâhil olmayan, istemeden üretilen kalıcı organik kirleticilerdir [4]. Poliklorlu ve polibromlu dibenzo-p-dioksinler (PCDD'ler/PBDD'ler), dibenzofuranlar (PCDF'ler/PBDF'ler), difeniller gibi kalıcı halojenize organik kirleticiler; lipofilik ve biyoakümülatif olduklarından, besin zincirlerinde birikerek sağlığı olumsuz etkileme potansiyeline sahiptirler [5, 6]. PBDD/F'ler esas olarak bromlu alev geciktiricilerin (BFR'ler) yanması, elektrikli ve elektronik ekipmanların sökülmesi, metal eritme ve atık yakma gibi termal koşullar altında oluşmaktadır [7-8]. Ayrıca, PBDD/F'ler ticari olarak kullanılan BFR ürünlerinin safsızlıkları olarak tanımlanmıştır [9, 10]. Ticari polibromlu difenil eter (PBDE) karışımları da önemli miktarlarda PBDD/F içermektedir [10]. BFR'ler ilk olarak 1979-1981 yıllarında İsveç'teki çevre örneklerinde tespit edilmiş olup [11]; çevresel dağılımlarına ve davranışlarına, kaderlerine ve etkilerine olan ilgi büyük ölçüde artmıştır [12]. Dünya çapında çok yaygın alev geciktiriciler olan BFR'ler, PBDD/F'lerin en üst öncülleri olarak belgelenmiştir [8, 13, 14]. Son yıllarda BFR'lerin büyük üretim ve uygulamalarının yanı sıra PBDD/F'lerin miktarının çeşitli ortamlarda, canlı organizmalarda ve insanlarda giderek daha fazla olduğu saptanmıştır [8, 15-17].

Hegzabromosiklododekan (HBCDD- $C_{12}H_{18}Br_6$), ilk olarak Sellström ve arkadaşları tarafından 1997'de İsveç nehirlerinde bulunmuştur [18]. İleriki yıllarda, Kuzey Kutbu'nda da dikkate değer miktarda tespit edilen HBCDD'nin hava yoluyla uzun mesafelere taşındığı anlaşılmıştır [19, 20]. HBCDD'ler aromatik olmayan BFR bileşiklerdir [21-23]. HBCDD'ler Stockholm Sözleşmesi'nin Ek A kısmında listelenmiş olup; insan maruziyetinin meydana geldiği başta su, toz, hava ve toprak yoluyla taşınarak çevreyi kirletmektedir [24]. Fiziksel ve kimyasal özellikleri, stabilite ve düşük ayrışma oranlarına sahip olmaları nedeniyle, KOK'lar buldukları ortamda kolayca bozulmamaktadır. HBCDD'ler, çoğunlukla inşaat endüstrisinde termal yalıtım malzemesi olan polistiren köpüklerde kullanılmakta olup, döşemeli mobilyalara, otomobil iç tekstil malzemelerine ve elektronik ekipmanların küçük bir kısmına da uygulanmaktadır [22]. HBCDD'ler de, biyoakümüle olma, uzun menzilli taşınma, toksisiteye sebep olabilme gibi KOK'ların özelliklerine sahip olmakla birlikte, hemen hemen her yerde bulunabilmektedir [14, 23, 25]. 2001

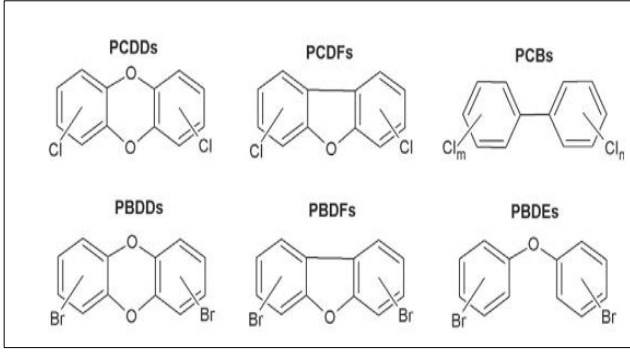
yılında HBCDD için küresel pazar talebi 16.500 ton iken [26], HBCDD'nin tahmini küresel üretimi 2011 yılında 31.000 tona yükselmiştir [27]. Kontamine olmuş yiyecekler, nefes alma ve içme suyu, insanların HBCDD'lere maruz kalması için üç önemli yoldur. Özellikle balık tüketimi, insanların HBCDD'lere maruz kalmasının ana yollarından biridir. Besin yoluna ek olarak, toprak ve yol tozları da insanların HBCDD'lere maruz kalmasında önemli bir rol oynamaktadır. Hidrofobik bileşiklerin büyük tutma kapasitesi nedeniyle, toprak KOK'lar için bir yutak olarak kabul edilir. İnsanlar toprak-bitki-hayvandan insanlara besin zinciri transferi yoluyla KOK'lara maruz kalmaktadır. Ayrıca, bazı araştırmalar, insanların KOK'lara maruziyetinde yağmur suları ve yol tozlarının da önemli bir faktör olduğunu göstermektedir [23, 25].

PBDD/F'ler kirlilik araştırmalarında yeni yeni çalışılmaya başlanılan bir kirletici grubudur. Bünyelerinde önemli miktarda brom ihtiva eden HBCDD'lerin bulunduğu atıkları yakan tesislerin emisyonlarında ve çevresinde PBDD/F'lerin var olduğu yapılan bazı çalışmalarla ortaya konmuştur [14, 17, 23]. Günümüzde, varlığı, özellikleri, etkileri ve ölçüm yöntemleri de dâhil olmak üzere PBDD/F'lerin ve HBCDD'lerin kapsamlı olarak açıklanması eksiktir. Bu derleme, ortaya çıkan yeni bir kirletici sınıfı olarak PBDD'ler ve bu kirletici grubun ortaya çıkmasında önemli bir etmen olan HBCDD'ler ile ilgili önemli bilgiler sunmaktadır.

2. Kimyasal, Fizikokimyasal ve Biyolojik Özellikler

2.1. PBDD/F'lerin Özellikleri

PBDD'ler ve PBDF'ler neredeyse düzlemsel trisiklik aromatik bileşiklerdir. Bileşikler, brom atomlarının sayısı ve halojenasyonların konumları açısından farklılık gösterir. Hem dibenzo-p-dioksin hem de dibenzofuran molekülleri üzerinde halojen ikamesinin meydana gelebileceği sekiz pozisyon bulunmaktadır (Şekil 1). PBDD/F'ler, yaygın olarak kullanılan BFR'lerin ikincil çevre kirleticileri olarak, PCDD/F'lere benzer fizikokimyasal ve toksik özellikler göstermektedirler [28]. Mevcut literatür, PBDD/F'lerin klorlu analoglarına benzer oluşum profillerine sahip olduğunu, ancak verilerin son derece sınırlı olmasıyla birlikte bu kimyasalların potansiyel riskinin tahminini engelleyen büyük bir bilgi boşluğu olduğunu göstermektedir [29-30]. PBDD/F'ler, bir dieter (dioksin) veya furan köprüsü ile birbirine bağlanan iki bromlu benzen halkasına sahip diaromatik moleküllerdir [34].



Şekil 1. PCDD, PBDD, PCDF, PBDF, PCB ve PBDE'lerin kimyasal yapıları

Günümüze kadar yapılan çalışmalar neticesinde PBDD/F'lerin üç farklı şekilde sentezlenmesi mümkündür:

1. HBr/Br² ile de novo sentez, genellikle 250–500 °C sıcaklıklarda meydana gelmektedir [14, 32];
2. Öncül sentez, örneğin polibromlu difenil eterler (PBDE'ler), tetrabromobisfenol A, deka-bromodifenil etan, bromofenoller, bromobenzenler, gibi bromlu aromatiklerin >500 °C'de termolizi [2,13];
3. Reaktif bromofenollerden ve hidroksillenmiş PBDE'lerden doğal biyosentez ve fotoliz,

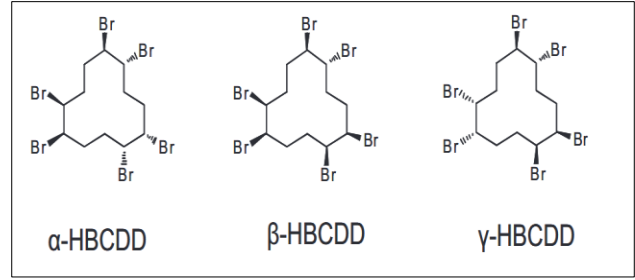
Bu yollar arasında PBDD/F'lerin biyosentezinin esas olarak deniz ortamlarında gerçekleştiği tespit edilmiştir ve buna karşılık gelen ürünlere, iki termal kaynaktan oldukça farklı olan düşük bromlu PBDD'lerin hâkim olduğu bildirilmiştir. PBDD/F'lerin öncü oluşumlarının, bu durum dikkate alındığında, de novo sentezinden çok daha fazla katkıda bulunduğu bildirilmiştir [33,34].

PCDD/F'lerle yakından ilişkili olmasına rağmen, PBDD/F'lerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin veriler azdır ve bilgilerin çoğu model hesaplamalarından elde edilir ya da PCDD/F verilerinden ve davranışlarından çıkarılmıştır. PBDD/F'ler nispeten, daha yüksek moleküler ağırlıklara, erime noktasına, oktanol-su bölme katsayılarına, daha düşük su çözünürlüğüne, buhar basıncına sahiptir. Genellikle yağlarda ve organik çözücülerde çözünürler [31,35,36].

2.1. HBCDD'lerin Özellikleri

HBCDD'lerin farklı biyolojik aktiviteleri olan 16 olası stereo-izomeri bulunmaktadır. HBCDD'nin teknik karışımı/ticari formülasyonu üç izomerik yapı içermektedir: %75-89 γ -HBCDD, %10-13 α -HBCDD ve %1-12 β -HBCDD (Şekil 2). Bunlara ek olarak δ - ve ϵ -HBCDD şeklinde adlandırılan en az iki tane daha izomeri, düşük konsantrasyonlarda bulunmaktadır. HBCDD izoformlarındaki yapısal farklılıklar, polarite, dipol momenti ve suda çözünabilirlik gibi kimyasal özelliklerde farklılıklara neden olmaktadır [37]. Suda α -, β -, γ -HBCDD

çözünürlükleri sırasıyla 48,8 $\mu\text{g/L}$, 14,7 $\mu\text{g/L}$ ve 2,1 $\mu\text{g/L}$ 'dir [25, 38].



Şekil 2. HBCDD'nin başlıca üç izomeri

γ -HBCDD izomeri; teknik HBCDD formülasyonlarında ve abiyotik örneklerde baskın izomer olmasına rağmen, α -HBCDD izomeri çoğu biyota örneğinde daha baskındır [12, 39]. HBCDD'ler, inşaat ve yalıtım panolarında, ambalaj malzemelerinde, elektrikli ve elektronik ekipmanlarda, döşemelik kumaş ve tekstillerde, mobilyalarda, koltuklarda, perdelerde, duvar kaplamalarında kullanılmaktadır [40].

İzomer kimyası düşünüldüğünde, HBCDD'lerin moleküler yapısı daha iyi anlaşılabilir (Şekil 2). İki farklı izomer çeşidi vardır, bunlar; yapısal izomer ve stereoizomerdir. Yapısal izomerler, aynı bileşen atomlarına sahip fakat birbirinden farklı şekilde düzenlenmiş izomerlerdir. Stereoizomerler ise aynı sırayla birbirine bağlı ve aynı atomlardan oluşan izomerlerdir fakat üç boyutlu yapıları farklılık gösterir. [41]. Stereoizomerler enantiyomer ve diastereoizomer olarak iki gruba ayrılır.

Stereojenik merkez, molekül yapısında herhangi bir iki grubun değişiminin gerçekleştiği bir konum olarak tanımlanabilir. Bir karbon atomu dört farklı atom veya grupla bağlandığında, simetrisini kaybeder ve stereojenik bir merkez olur. Stereojenik merkeze sahip olan, iki stereoizomer birbirinin ayna görüntüsü ise, bunlara enantiyomer denir [41]. Enantiyomerler, ayna görüntüsünün üst üste çakışmadığı stereoizomerlerdir. Diastereoizomer ise, enantiyomer olmayan moleküllerdir. Yani birbirlerinin ayna görüntüsü olmayan, kiral ve akiral özellikleri farklı olan stereoizomerlerdir. [42]. Stereoizomerler arasındaki çözünürlük farklılıkları, çevredeki stereoizomerlerin ve besin zincirinin oranında meydana gelen değişiklikler üzerinde de etkili olabilir. α -HBCDD stereoizomeri gıda örneklerinde baskındır, ancak bunun bir biyotransformasyon sürecinin sonucu olup olmadığı veya çözünürlükteki farklılıkların bir sonucu olarak seçici emilimin de bu değişikliğe katkıda bulunup bulunamayacağı belirsizdir [12, 43].

HBCDD'ler hidrofobik ve lipofilik olmakla birlikte; sırasıyla toprak, çamur ve sedimanda farklı yarılanma ömürleri ile biyoakümüle olmaktadır (Tablo 1) [44-47].

Tablo 1. Farklı çevresel ortamlarda HBCDD'nin anaerobik şartlar altında yarılanma ömrü

Ortam	Yarılanma ömrü	Kaynaklar
Toprak	6,9 gün*	[47]
Sediman	1,1 gün*, 1,5 gün*	[47]
Çamur	5,4 gün	[47]
Çamur	0,66 gün*	[25]

*Pseudo ile birinci dereceden bozunma reaksiyonlarına göre

3. Analitik Ölçüm Yöntemleri

Günümüzde, bazı bromlu organiklerin tespit edilmesi halen analitik bir sorun olarak görülmektedir. Klorlu dioksinlerin, PCB'lerin ve PBDE'lerin analizi için bildirilen bir dizi yöntem olmasına rağmen, PBDD/F'lerin belirlenmesi için çok az yöntem mevcuttur [48,68]. Çok sayıda PBDD/F konjenerlerinin tespit edilebilmesi için yüksek hassasiyette, seçici ve spesifik analitik ölçümlerin yapılabildiği gaz kromatografi/kütle spektrometresi (GC/MS) gereklidir.

PBDD/F'lerin; örnekleme, ekstraksiyon, ön-işlem ve analizi için çoğunlukla PCDD/F'lerde uygulanan metot ve teknikleri takip edilmektedir [49]. Bazı homolog gruplardaki çok sayıda izomerin varlığı, konjenerlerin birbirinden ayrılması ve nicelleştirilmesini çok zor hale getirir. Belirleme, niceleme ve doğrulama genellikle kütle spektrometrisi (MS) tarafından yapılmakla birlikte PBDD/F'leri tek tek diğer halojenize bileşiklerden (örneğin PBDE'lerden) ayırt etmek için yeterli seçiciliği gösteren tek tekniktir. MS, halojenlerin sayısının ve türünün karakteristik izotop dağılım modelleri temelinde belirlenmesine izin verir [50]. Diğer MS metodları arasında yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi (HRMS) en yüksek seçiciliğe sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir. İzotopik seyreltme yüksek çözünürlüklü GC/HRMS, pg/g seviyelerinde yüzlerce maddenin eşzamanlı olarak ayrılması ve ölçülmesi için en gelişmiş analitik yöntemdir [51].

HBCDD'lerin ekstraksiyonu ve ön-işlemine yönelik analitik yaklaşımlar genellikle organik çözücülerle ekstraksiyon, basınçlı sıvı ekstraksiyonu (PLE) ve katı faz ekstraksiyonu (SPE) gibi kalıcı lipofilik bileşiklerin analizi için kullanılan metodolojileri takip eder. Ön-işlem genellikle, HBCDD'lerin varlığını potansiyel olarak engelleyebilecek bileşiklerden ayırmak amacıyla farklı kolon kromatografisi teknikleriyle gerçekleştirilir [52-53]. Yeni yaklaşımlar modifiye edilmiş QuEChERS (hızlı, kolay, verimli, dayanıklı ve güvenli) yöntemlerini kullanmaktadır [54-56].

HBCDD'lerin analitik tayini GC/MS veya sıvı kromatografi (LC)/MS tabanlı yöntemlerle

gerçekleştirilmektedir. Her iki teknik de, ekstraksiyon ve ön-işlem sırasında kayıpların düzeltilmesine olanak sağlayan izotop etiketli dâhili standartların (internal standard) kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Bununla birlikte, GC/MS tabanlı yöntemler, stereoizomerleri ayıramadıkları için toplam HBCDD'lerin analizine izin vermektedir. [57].

HBCDD stereoizomerlerinin ve enantiyomerlerinin ayrı spesifik analizi sıvı kromatografisi tabanlı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Analizler genellikle Tetrabromo bisfenol A ve bromofenoller gibi bir dizi diğer BFR'lerin belirlenmesi için prosedürlere bütünleşmiş edilmektedir [58, 59]. Baek ve arkadaşları (2017) HBCDD analizi için çoğu çalışmada seçilen C18 sabit fazlı sütunlarda δ - ve ϵ -HBCDD'nin baskın stereoizomerler olan ; α -HBCDD, β -HBCDD, γ -HBCDD ile birlikte çalışabileceğini bildirmiştir [60]. Yanlış sonuçlardan kaçınmak için, on HBCDD diastereomerin çözülebileceği bir fenil-heksil ultra yüksek performanslı LC (UPLC) sütunu önerilmektedir. Son birkaç yılda, HBCDD'lerin ve diğer BFR'lerin analizi için yeni analitik araçlar tanıtılmıştır [61-62].

4. Literatür Taraması

4.1. PBDD/F

Son yirmi yılda, artan sanayileşme/dijitalleşme faaliyetleri ile beraber PBDD/F'ler ve HBCDD'lerin varlığı ve insan/çevre üzerine etkileri çokça tartışılmaya başlanmıştır. Yapılan son çalışmalarda, özellikle PBDD/F'lerin, kan plazması gibi biyolojik matrislerdeki iyi bilinen varlıklarına ek olarak çeşitli gıda matrislerinde de varlığına ilişkin önemli kanıtlar bulunmaktadır [63-68]. Tablo 2'de Avrupa kıtasındaki farklı ülkelerdeki gıda numunelerinde tespit edilen PBDD/F konjenerleri ve toksik eşdeğerlik (TEQ) değerleri sunulmuştur. PBDD/F'ler somon, Balık/deniz ürünleri, tavuk yumurtası, inek sütü, ekme, tahıllar, konserveler, taze ve konserve sebze, meyve ve fındık örneklerinde 0,01 ila 0,14 pg/g TEQ aralığında tespit edilmiştir.

2000-2013 yılları arasında insan sütü, kan plazması ve yağ dokusu gibi doku örneklerinde PBDD/F'lerin varlığı ve TEQ değerleri Tablo 3'te özetlenmiştir. Asya-Pasifik, Avrupa, Kuzey ve Güney Amerika kıtalarını kapsayan 25 ülkede ve İrlanda'da insan sütünde yapılan çalışmalarda en az on konjenerinin pozitif olarak bulunduğu PBDD/F'ler 0,45 ila 2,64 pg/g TEQ aralığındadır. Benzer çalışma Almanya'da kan plazmasında ve İsveç'te yağ dokusunda yapılmış ve sırasıyla 2,8 ila 9,3 pg/g TEQ ve 0,26 ila 0,96 pg/g TEQ arasında tespit edilmiştir.

Tablo 2. PBDD/F'lerin gıda numunelerinde tespit edilen konjenerler ve TEQ değerleri [34]

Yiyecek türü	Örneklemeye yeri	Numune sayısı	Yıl	Ölçülen konjenerler	TEQ*aralığı pg/g bütün (lipid) ağırlık	Kaynaklar
Somon	Letonya nehirleri, Baltık denizi	25	-	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (14 konjener, T4 - OBDD/F)	0,07-0,14 (TEF ₂₀₀₅)**	[63]
Balık/deniz ürünleri	Birleşik Krallık	38 (kompozit deniz ürünü)	2007	-	<0,01-0,10 (TEF ₁₉₉₈)**	[64]
Tavuk yumurtası	İtalya	6 kompozit	2014-2016	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (12 konjener, T4 - octa)	0,02-0,05 (TEF ₂₀₀₅)	[65]
İnek sütü	İrlanda	30 kompozit	2006-2007	-	<0,01-0,01 (TEF ₁₉₉₈)	[66]
Ekmek, tahıllar, konserveler	Birleşik Krallık	3 kompozit	2012	-	0,01-0,10 (TEF ₂₀₀₅)	[67]
Taze ve konserve sebze, meyve ve fındık	Birleşik Krallık	7 kompozit	2007	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (10 konjener, T4 - H7) + 2,3,7-TriBDD & 2,3,8-TriBDF	<0,01-0,05 (TEF ₁₉₉₈)	[68]

TEF: Toksikite Eşdeğerlik Faktörü

**TEF₁₉₉₈ ve TEF₂₀₀₅: Dünya Sağlık Örgütü (WHO) toksisite eşdeğerlik faktörlerini 1998 yılında belirlemiştir. Rutin inceleme çerçevesinde bu faktörleri yeniden değerlendirmiş ve 2005 yılında revize edilmiş TEF'leri yayınlamıştır ancak toksikolojik veri durumu değişmemiştir. Konjenerlerin yaklaşık yarısı için TEF'ler aynı kalmakla birlikte; diğerleri için belirlenen değerler çoğu zaman önceki değerlerden daha düşüktür [70].

Tablo 3. PBDD/F'lerin insan dokularında tespit edilen konjenerler ve TEQ değerleri [31]

Doku çeşidi	Numune sayısı	Örneklemeye yeri	Yıl	Ölçülen konjenerler	TEQ aralığı pg/g lipid ağırlık	Kaynaklar
İnsan sütü	31 kompozit	25 ülke (Asya-Pasifik, Avrupa, Kuzey, Güney Amerika)	2000-2004	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (11 konjener, T4 - H6, ve OBDD)	0,45-2,64 (TEF ₁₉₉₈)	[55]
İnsan sütü, bir kez doğum yapmış annelerde (20-41 yaş)	11 kompozit	İrlanda	2010	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (10 konjener, T4 - H7) + 2,3,7-TriBDD & 2,3,8-TriBDF	0,58-1,23 (TEF ₁₉₉₈)	[56]
Kan plazması (20-68 yaş bireylerde)	42 birey	Bavaria, Almanya	2013	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (13 konjener)	Medyan =2,8; Maks. = 9,3; (TEF ₂₀₀₅)	[57]
Yağ dokusu (19-65 yaş bireylerde)	9 birey	İsveç	2007	2,3,7,8-Br ikameli PBDD/F'ler (5 konjener, T4 - P5). Ayrıca 8, M1 - T3 konjener	0,26-0,96 (TEF ₁₉₉₈)	[16]

*TEQ (Toksik Eşdeğerlik) : TEQ'lar, farklı dioksin ve dioksin benzeri bileşik kombinasyonlarının toksisitesini karşılaştırmaya ve Toksik Salınım Envanterinde [69] kimyasal salınım bilgilerinin göreceli toksisitesini açıklamaya yardımcı olan hesaplanmış değerlerdir. Bir TEQ değeri hesaplamak için, dioksin ve dioksin benzeri bileşikler kategorisinin her üyesine toksik eşdeğer bir faktör (TEF) atanır. TEF, bu kategorideki bileşiklerden birinin toksisitesinin, kategorideki en toksik iki bileşimin; 1:2,3,7,8-tetraklorodibenzo-p-dioksin (yaygın olarak dioksin olarak adlandırılır) ve 1,2,3,7,8-pentaklorodibenzo-p-dioksin'in toksisitesine oranı olarak tanımlanır. Şuanda Dünya Sağlık Örgütü uluslararası anlaşmalarla klorlu analoglar için kabul edilen TEF değerlerinin aynılarının başlangıçta PBDD/F'ler için de kullanımının yerinde olacağını tavsiye etmiştir [36].

4.2 HBCDD

HBCDD'ler ise iç ve dış ortam havası, arıtma çamuru ve sediman gibi çevresel örneklerde bulunmasının yanı sıra son yirmi yılda kordon kanı, kafa derisi, saç gibi insan doku örneklerinde yapılan çalışmalarda da tespit edilmiştir. 1990-2001 yılları arasında İsveç'te, 2000 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde ve 2016 yılında Çin'de kentsel ve kırsal alanlarının dış ortam havası örneklerinde toplam

HBCDD seviyeleri sırasıyla 2-610 pg/m³, 280 – 28 500 ng/m³ ve 0,28-1 800 pg/m³ aralığında bulunmuştur [25, 71]. Farklı ülkelerde iç mekân ortamlarından alınan toz örneklerinde tespit edilen toplam HBCDD konsantrasyonları ise Tablo 4'te verilmiştir. 2004 yılında Birleşik Krallık, Hollanda ve İrlanda'da arıtma çamurlarında yapılan çalışmalarda toplam HBCDD konsantrasyonlarının < 0,4 - 2683 µg/kg, <0,6 - 3800 µg/kg ve 153 - 9120 µg/kg arasında olduğu tespit

edilmiştir [73]. Farklı yıllarda nehir ve göllerden alınan sediman örneklerinde toplam HBCDD seviyeleri (kuru ağırlık) ise Birleşik Krallık'ta <2,4 - 1680 ng/g, Belçika'da <0,2 - 950 µg/kg, İsveç'te <0,2 - 1590 ng/g, Kanada'da <0,1 - 3,7 ng/g, Norveç'te <0,1 - 84 ng/g ve Hollanda'da <0,2 - 950 ng/g aralığındadır [25,73].

Tablo 4. İç ortamlardan alınan toz örneklerinde toplam HBCDD seviyeleri

Ülke	Çalışma Ortamı	Çalışma Yılı	Toplam HBCDD (ng/g)	Kaynaklar
Avusturya Danimarka Hollanda İtalya İngiltere Finlandiya	Ofis	2000	< 3 - 3 700	[25]
Almanya İsveç	Ofis	2004	< 20 - 58 000	[27]
Belçika	Ofis	2017	116,84 - 2519,38	[74]
Kore	Anaokulu	2017	184,56 - 1159,98	[74]
Kore	Okul	2017	72,84 - 9748,27	[74]
Hollanda	Ev	2010	140,33 ng/g	[25]

Tablo 5. İnsanlarda toplam HBCDD seviyeleri [62,65].

Ülke	Çalışma Yılı	Çalışılan numune	Toplam HBCDD
Hollanda	2000-2001	Kordon kanı	0,2 - 4,3 ng/g lipid ağırlık
Kore	2018	Kafa derisi, saç	0,2 ng/g
Filipinler	2013	Kafa derisi, saç	0,3 - 5,4 ng/g
Hollanda	2000-2001	Hamile kadınlarda, kan serumları	<Algılama sınırının altında - 7,4 ng/g lipid ağırlık
Norveç	2004-2005	Kadınlar, kan serumları	<1,0 - 18 ng/g lipid ağırlık
Kanada	2007-2009	Kan serumu numuneleri	0,75 - 1,10 ng/g lipid ağırlık
Vietnam	2012	Elektronik atık geri dönüşüm işçilerinde, kafa derisi, saç	3,9 ng/g

İnsanların yüksek miktarlarda dioksine ve ilgili bileşiklere maruz kalması cilt lezyonlarına, karaciğer fonksiyonlarında ve duysal yeteneklerde değişimlere, bilişsel gelişiminde azalmaya ve çeşitli kanser türlerine yakalanmasına neden olabilir [80]. PBDD/F'ler yakma fırını emisyonlarında, uçucu külde ve ticarete belirli mesleki süreçlerde ve kimyasallarda tespit edilirken, herhangi bir sistematik çevresel izlemeye çok az dikkat edilmiştir [81]. Lin ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada PBDD/F'lerin PCDD/F'ler ile konjenerler ile fizyolojik parametreler ve diyet alışkanlıkları arasındaki korelasyonların aynı olup olmadığı araştırılmıştır [5]. Bu çalışmada yaş, kilo, vücut

Farklı ülkelerde farklı insan dokusu örneklerinde tespit edilen toplam HBCDD konsantrasyonları ise Tablo 5 'de özet olarak sunulmuştur.

5. İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerindeki Etkileri

İnsanlarda kimyasallara maruziyet yolları nefes alımıyla ve deriden temas ile gerçekleşir [45, 75]. Bununla birlikte, en önemli maruz kalma yolları, özellikle yumurta, süt ürünleri, sığır eti ve domuz eti gibi hayvansal kaynaklı kontamine gıda tüketimidir [76]. Bölgesel veya ulusal gıda alışkanlıklarına ve geleneklerine bağlı olarak, bu kimyasalların farklı gıda gruplarından gerçek alımı önemli ölçüde değişebilir. Aynı zamanda kirleticilerin toksik ve biyolojik etkileri yaş, doz, uygulama yolu, organizmanın türü ve cinsiyeti gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [77]. Çocuklar, vücut ağırlığı bazında yetişkinlerden daha fazla nefes aldıkları veya yuttukları için kirleticilere daha fazla maruz kalırlar [78,79].

kitle indeksi ve diyet alışkanlıkları ile PBDD/F'lerin korelasyonlarını analiz etmek için bir Spearman korelasyon testi kullanılmıştır. Sonuçlar, PBDD/F konsantrasyonu ile bu parametreler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon olmadığını göstermiştir. Çalışmada kimyasal olarak benzerlik gösterdiği bilinen PCDD/F ve PBDD/F'lerin aynı koşullar altındaki davranışlarının gözlemlenmesiyle oluşan korelasyonların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Aynı zamanda çalışmada ,bu faktörlerin (yaş hariç) PCDD/F konjenerleri ile olan korelasyonlarının aynı olduğu bildirilmiştir.İnsan dokularında tespit edilerek teyit edilen gıdalardaki oluşumları, insanların PBDD/F'lere ve dolayısıyla bunlarla

ilişkili dioksin benzeri toksisiteye maruz kaldığını şüpheye yer bırakmayacak şekilde ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut verilerden elde edilen toksisite katkısının, tüm konjenerler dâhil edilmediği için olduğundan daha düşük olarak değerlendirilmesine neden olacaktır. Bugüne kadar, toksik olarak kabul edilen ve yanal olarak ikame eden tüm konjenerler için, gıda örnekleri ve insan dokusu üzerinde farklı konsantrasyon seviyelerinde yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır.[31]. PBDD/Flerin atık malzemeden emisyonlarını en aza indirmek için önemli bir faktör, BFR içeren malzemeleri BFR içermeyen malzemelerden ayırabilen verimli ve hassas tanımlama yapabilen ayırma teknolojilerinin uygulanması olacaktır, böylece her bir fraksiyon uygun şekilde işlenebilir. Bu amaç için çeşitli spektroskopik teknolojiler, yoğunluk ve elektrostatik özelliklerdeki farklılıklara dayanan teknolojiler vardır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin hiçbiri BFR içeren malzemeleri tarayamaz, ancak kombinasyonlarda kullanılması gerekir. Yine de, %100 ayırım sağlanamayacak ve genellikle yaklaşık %5'i yanlış fraksiyonda sonuçlanacaktır. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş malzemeler asla oyuncaklar ve ev ürünleri gibi hassas uygulamalar için kullanılmamalıdır ve BFR içeren fraksiyon söz konusu olduğunda, geri dönüştürülmemelidir. Belki de bu malzemeler endüstri için temel kimyasalların (Brom içeren maddeler) yapımında kullanılabilir, aksi takdirde imha edilmelidir [82].

HBCDD su, sediman ve sucul canlılarda da önemli düzeylerde birikim yaparak canlı yaşamını ciddi tehdit etmektedir. Tablo 6'da HBCDD'nin sucul organizmalar üzerine etkileri özetlenerek sunulmuştur. Sediman, HBCDD için en sık izlenen abiyotik çevre olmakla birlikte; HBCDD gibi hidrofobik kimyasallar için bir yutak görevi görür. Sedimanlarda bulunan nispeten yüksek organik madde seviyeleri ve suya emisyonlar nedeniyle, HBCDD'nin kaynak bölgelere yakın olarak bulunması beklenmektedir. HBCDD'nin aerobik bozulmasının anaerobik bozulmadan çok daha yavaş olması nedeniyle bir komplikasyon ortaya çıkar, bu nedenle sediman analizi aerobik durum hakkında bilgi gerektirir.

HBCDD'ler havada ağırlıklı olarak partikül fazda bulunmaktadır. Yu ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışma, Güney Çin'deki Guangzhou'da havada mevcut olan HBCDD yoğunluğunun toplam 0.7 - 3.1 pg/m³ arasında değiştiğini ve %85- 95'inin partiküllerle ilişkili olduğunu göstermektedir [83]. Bu çalışma aynı zamanda kentsel çevrenin HBCDD'nin atmosferik konsantrasyonları açısından önemini de göstermektedir, çünkü kaydedilen en yüksek seviye kentsel bir alandır.

Fernandes ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada; İngiltere'de 156 kişi üzerinde en sık tüketilen

gıdalarda, 51 adet hayvan üzerinde ise yemlerinde bulunan HBCDD seviyeleri ölçülmüştür. Gıda örnekleri balık ve kabuklu deniz ürünleri, süt, süt ürünleri, yumurta, et, işlenmiş et, sakatat, işlenmiş ve diğer gıdaları kapsamaktadır. Balık, kabuklu deniz ürünleri ve işlenmiş etler en sık rastlanan ürün grubu olurken aynı zamanda, α -HBCDD'nin baskın olduğu noktalarda en yüksek HBCDD konsantrasyonlarını göstermiştir.

Coelho ve arkadaşları (2016) tarafından 21 Portekizli gönüllüden alınan 7 günlük diyet örnekleri ile yapılan çalışmada, HBCDD dahil olmak üzere bir dizi kalıcı organik kirletici ölçülmüştür [85]. Hedef bileşiklerin tahmini günlük alımları bir kişinin günlük 1867,2 g gıda aldığı düşünülerek hesaplanmıştır. HBCDD'ler için, α -HBCDD, β -HBCDD, γ -HBCDD seviyeleri çoğunlukla algılama sınırının altındayken ve α -HBCDD tespit edilen en sık izomer olarak kaydedilmiştir (%23,8) [85].

Pawar ve diğerleri (2017), alev geciktiricilerin iç mekan tozundan dermal biyolojik erişilebilirliğini ve topikal (spesifik bir bölgeye uygulanan) olarak uygulanan kozmetiklerin etkisini araştırmıştır [86]. Çalışmada, iç mekan tozundan sentetik bir ter/sebum karışımından çeşitli alevli brom geciktiricilere (BFR'lerin) kadar in vitro fizyolojik temelli ekstraksiyon testi uygulanmıştır. Sentetik ter/sebum karışımı (SSSM) 25'ten fazla kimyasal bileşen kullanılarak hazırlanmıştır. Genel olarak, SSSM'deki sebum içeriği arttıkça HBCDD'nin biyolojik erişilebilirliğinin arttığı gözlemlenmiştir. %100 ter incelendiğinde γ -HBCDD'nin (%1,4 \pm 0,1) biyo-erişilebilirliğinin, β -HBCDD (%1,6 \pm 0,6) ve α -HBCDD'den (%2,3 \pm 0,2) daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum α -HBCDD ve β -HBCDD'ye kıyasla γ -HBCDD'nin suda daha düşük çözünürlük gösterdiğiyle tutarlıdır. 6 mg kozmetik (nemlendirici krem, güneş koruyucu losyon, duş jeli ve vücut spreyi) ayrı ayrı incelenmiştir. Kozmetiklerin varlığı, HBCDD'lerin iç mekân tozundan biyo-erişilebilirliğini azaltırken, duş jeli ve güneş koruyucu losyonunun HBCDD'nin biyo-erişilebilirliğini arttırdığı gözlemlenmiştir [69].

HBCDD'lerin tiroid hormon sistemini bozabileceğine ve tiroid hormonu reseptörü aracılı gen ekspresyonunu etkileyebileceğine dair raporlar vardır [87]. Sıçanlarda yenidoğan maruziyet deneylerini takiben, kendiliğinden davranış, öğrenme ve hafıza fonksiyonundaki sapmalar gibi gelişimsel nörotoksik etkiler indüklenebilir [88]. HBCDD'ler ayrıca sıçan beyindeki nörotransmitterlerin normal alımını değiştirebilir [89]. Bu etkilerin meydana geldiği gerçek seviyeler hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır [25].

Tablo 6. HBCDD'nin sucul ortamdaki çevresel etkileri hakkındaki temel veriler

Sınıf&Türler	Metot	Sonuçlar	Kaynaklar
SUCUL ORGANİZMALAR			
BALIK			
<u>Akut toksisite</u>			
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	OECD 203 ve TSCA 40/797/1400, ve ASTM Standart E729-88a	2,5 µg/L civarında ölüm veya başka etki yok	[90]
<u>Kronik Toksisite</u>			
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (Gökkuşluğu alabalığı)	Akış yoluyla, OECD 210 ve OPPTS 850.1400	*NOEC µg/L; Yumurtadan çıkma başarısı ≥ 3,7, Yüzme ≥ 3,7, Larva ve yavru hayatta kalma ≥ 3,7 Büyüme ≥ 3,7	[91]
OMURGASIZLAR			
<u>Akut toksisite</u>			
<i>Daphnia magna</i>	OECD 202. statik hareketsizlik testi ve TSCA 40/797/1300 ve ASTM Standardı E729-88a	48 saat EC ₅₀ >3,2 µg/L	[90]
<u>Kronik toksisite</u>			
<i>Daphnia magna</i>	TSCA, OECD 21 günlük testten geçiyor	NOEC 3,1 µg/L **LOEC uzunluğu 5,6 µg/L	[92]
ALG			
<i>Selenastrum capricornutum</i>	OECD 201 ve TSCA40/797/1050	72 saat EC ₅₀ ve LOEC > 2,5 µg/L. NOEC tahmin edilemedi.	[93]
<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassiosira pseudonana</i>	Deniz algal biyotahlil yöntemi, farklı deniz ortamları büyüme medyası	72 saat EC ₅₀ = 9 µg/L (en düşük değer) 72 saat EC ₅₀ = 40 µg/L (en düşük değer) 96 saat EC ₅₀ > sudaki çözünürlük	[94]
<i>Chlorella sp.</i>	OECD 201, ISO 10253:1995 ve AB Direktifi	NOEC 40,6 µg/Lm	
<i>Skeletonema costatum</i>	92/69/EEC – Metod C.3	EC ₅₀ >40,6 µg/L	[95]
<i>Skeletonema costatum</i>	OECD 201	NOEC >10 µg/L EC ₅₀ 52 µg/L	

6. Sonuçlar

Son yıllarda artan sanayileşme/dijitalleşme faaliyetleri ile beraber diğer organik kirleticiler gibi, PBDD/F'lerin ve HBCDD'lerin varlığı da giderek artan bir öneme sahiptir. BFR'lerin yanması, elektrikli ve elektronik ekipmanların sökülmesi, metal eritme ve atık yakma gibi termal koşullar altında ortaya çıkan PBDD/F'ler, PCDD/F'lere nispeten, daha yüksek moleküler ağırlıklara, erime noktasına, oktanol-su bölme katsayılarına, daha düşük su çözünürlüğüne, buhar basıncına sahip olup, yağlarda ve yağ dokusunda çözünerek insan vücuduna kolayca geçebilmektedirler. HBCDD'ler ise başta su, toz, hava ve toprak yoluyla taşınarak yiyecekleri ve içme suyu gibi alanları kontamine etmektedirler. Hidrofobik ve lipofilik özellikleri ile insan vücuduna alınmaktadır. Hayvanlar üzerinde, özellikle kuşlar ve sucul organizmalar ile yapılmış birçok çalışma mevcut olmasına rağmen, HBCDD'lerin bitkiler üzerinde etkileri hakkında yapılan araştırmalar sınırlı kalmaktadır. Bitkiler besin zincirinde birincil üreticiler olarak üstlendikleri görev nedeniyle, HBCDD'nin etkileri hakkında daha fazla araştırma

yapılması önerilmektedir. Son yirmi yılda sunulan sonuçlar, PBDD/F'lerin ve HBCDD'lerin diğer organik kirleticiler gibi önemi artan kirletici sınıfları olmaya başladığını göstermektedir. 2,3,7,8 süstitüe edilmiş PBDD'ler ve PBDF'lerin etki mekanizması ve toksisitesi klorlu analoglarına benzemektedir. PBDD/F'lerin tıpkı PCDD/F'ler gibi insan sağlığı ve çevre üzerinde benzer bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Literatürde PBDD/F'lerin kaynakları, toksisiteleri, formasyon mekanizmaları ve çevresel etkileri hakkında bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bu bağlamda, PCDD/F'ler ile yapılmış çalışmalar ve belirlenmiş standartların, PBDD/F'lerin analizi ve çevresel etkilerinin kontrolü çalışmalarına yol gösterici nitelikte olabileceği düşünülmektedir.

PBDD/F'lerin çevresel etkinliğinin anlaşılması ve analiz yöntemlerinin geliştirilmesi hakkında çeşitli öneriler yapılabilir. İnsanlar üzerindeki etkilerinin halen belirsiz olması PBDD/F'lerin TEF değerlerinin evrensel olarak belirlenmemesi şeklinde değerlendirilmektedir. Ayrıca PBDD/F'lerin formasyon mekanizmaları üzerine daha detaylı araştırmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla da, analitik ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi

gerekmektedir. Ölçümde PBDE'lerin girişimi, ticari olarak etiketlenirilmiş iç standartların eksikliği gibi durumlar sonuçlardaki hassasiyetin azalmasına neden olmaktadır.

Etik Standartlar Beyanı

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Kaynaklar

- [1] Jensen, S., Johnels, A.G., Olsson, M., Otterlin, G., 1969. DDT and PCB in marine animals from Swedish waters. *Nature* 224, 247-250.
- [2] Arnoldsson, K., 2012. Polybrominated dibenzo-p-dioxins: natural formation mechanisms and biota retention, maternal transfer, and effects. Umeå Universitet, Doctoral Dissertation.
- [3] Xiao, X. Hu, J. Chen, D. Bi, X., 2016. Characterization of polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans (PBDDs/Fs) in environmental matrices from an intensive electronic waste recycling site, South China. *Environmental Pollution* 212, 464-471.
- [4] Shen, X., Yang, Q., Shen, J., Yang, L., Wang, M., Yang, Y., Liu, G., 2021. Characterizing the emissions of polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/Fs) from electric arc furnaces during steel-making. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 208, 11722.
- [5] Lin, Y., Le, S., Feng, C., Qiu, X., Xu, Q., Jin, S., Lu, D., 2021. Exposure and health risk assessment of secondary contaminants closely related to brominated flame retardants (BFRs): Polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/Fs) in human milk in Shanghai. *Environmental Pollution* 268, 115121.
- [6] Canli, O., Güzel, B., Karademir, A., 2022. Determination of PCDD/F and DL-PCB pollution levels, source appointment and risk assessment of surface sediments in dam lakes in Istanbul, Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research* 60(29), 90923-90935.
- [7] Ebert, J., Bahadır, M., 2003. Formation of PBDD/F from flame-retarded plastic materials under thermal stress. *Environment International* 29, 711-716.
- [8] Zhou, Y., Liu, J., 2018. Emissions, environmental levels, sources, formation pathways, and analysis of polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 25(33), 33082-33102.
- [9] Hanari, N., Kannan, K., Miyake, Y., Okazawa, T., Kodavanti, P.R.S., Aldous, K.M., Yamashita, N., 2006. Occurrence of polybrominated biphenyls, polybrominated dibenzo-p-dioxins, and polybrominated dibenzofurans as impurities in commercial polybrominated diphenyl ether mixtures. *Environment Science & Technology* 40(14), 4400-4405.
- [10] Ren, M., Cai, Y., Chen, D., Zhou, L., Chen, P., Hu, J., 2011. PBDD/F impurities in some commercial deca-BDE. *Environmental Pollution* 159 (5), 1375-1380.
- [11] Andersson, Ö., Blomkvist, G., 1981. Polybrominated aromatic pollutants found in fish from Sweden. *Chemosphere* 10, 1051-1060.
- [12] Law, R.J., Covaci, A., Harrad, S., Herzke, D., Abdallah, M.A.E., Fernie, K., 2014. Takigami, H., Levels and trends of PBDEs and HBCDs in the global environment: Status at the end of 2012. *Environment International* 65, 147-158.
- [13] Altarawneh, M., Saeed, A., Al-Harabsheh, M., Dlugogorski, B.Z., 2019. Thermal decomposition of brominated flame retardants (BFRs): Products and mechanisms. *Progress in Energy and Combustion Science* 70, 212-259.
- [14] Zhang, M.M., Buekens, A., Li, X.D., 2016a. Brominated flame-retardants and the formation of dioxins and furans in fires and combustion. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 26-39.
- [15] Bjurlid, F., Roos, A., Jogsten, I.E. Hagberg, J., 2018. Temporal trends of PBDD/Fs, PCDD/Fs, PBDEs and PCBs in ringed seals from the Baltic Sea (*pusa hispida botnica*) between 1974 and 2015. *Science of the Total Environment* 616, 1374-1383.
- [16] Jogsten, I.E., Hagberg, J., Lindstrom, G., Bavel, B., 2010. Analysis of POPs in human samples reveal a contribution of brominated dioxin of up to 15% of the total dioxin TEQ. *Chemosphere* 78 (2), 113-120.
- [17] Song, A., Li, H., Liu, M., Hu, J., Sheng, G., Ying, G., 2022. Polybrominated dibenzo-p-dioxins/furans (PBDD/Fs) in soil around municipal solid waste incinerator: A comparison with polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs). *Environmental Pollution* 293, 118563.
- [18] Sellström, U., Kierkegaard, A., Wit, C.D., Jansson, B., 1998. Polybrominated diphenyl ethers and

- hexabromocyclododecane in sediment and fish from a swedish river. *Environmental Toxicology and Chemistry* 17, 1065–1075.
- [19] De Wit, C.A., Herzke, D., Vorkamp, K., 2010. Brominated flame retardants in the arctic environment—trends and new candidates. *Science of the Total Environment* 408, 2885–2918.
- [20] Zhang, Y., Ruan, Y., Sun, H., Zhao, L., Gan, Z., 2013. Hexabromocyclododecanes in surface sediments and a sediment core from rivers and harbor in the northern chinese city of Tianjin. *Chemosphere* 90, 1610–1616.
- [21] Alae, M., Arias, P., Sjodin, A., Bergman, A., 2003. An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release. *Environment International* 29(6), 683-689.
- [22] Zhang, Y.Q., Li, Q.F., Lu, Y.L., Jones, K., Sweetman, A.J., 2016b. Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in surface soils from coastal cities in north China: Correlation between diastereoisomer profiles and industrial activities. *Chemosphere* 148, 504-510.
- [23] Cao, X., Lu, Y., Zhang, Y., Khan, K., Wang, C., Baninla, Y., 2018. An overview of Hexabromocyclododecane (HBCDs) in environmental media with focus on their potential risk and management in China. *Environmental Pollution* 236, 283-295.
- [24] Feiteiro, J., Mariana, M., Cairrão, E., 2021. Health toxicity effects of brominated flame retardants: from environmental to human exposure. *Environmental Pollution* 285, 117475.
- [25] Güzel, B., 2022. Temporal Variations and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Rainwater Collected in a Semi-Urban Area within an Industrial Area in Turkey. *Polycyclic Aromatic Compounds* 42(8), 4965-4983.
- [26] POPRC, 2011. Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the Work of its Seventh Meeting: Risk Management Evaluation on Hexabromocyclododecane. UNEP/POPS/POPRC.7/19/Add.
- [27] POPRC, 2012. Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the Work of its Eighth Meeting: Addendum to the Risk Management Evaluation on Hexabromocyclododecane. UNEP/POPS/POPRC.8/16/Add.3,
- [28] Lin, Y., Le, S., Feng, C., Qiu, X., Xu, Q., Jin, S., Lu, D., 2021. Exposure and health risk assessment of secondary contaminants closely related to brominated flame retardants (BFRs): Polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/Fs) in human milk in Shanghai. *Environmental Pollution* 268, 115121.
- [29] Piskorska-Pliszczynska, J., Maszewski, S., 2014. Brominated dioxins: Little-Known new health hazards - A review. *Bulletin of Veterinary Institute in Pulawy* 58, 327-335.
- [30] Pajurek, M., Pietron, W., Maszewski, S., Mikolajczyk, S., Piskorska-Pliszczynska, J., 2019. Poultry eggs as a source of PCDD/Fs, PCBs, PBDEs and PBDD/Fs. *Chemosphere* 223, 651-658.
- [31] Fernandes, A.R., Falandysz, J., 2021. Polybrominated dibenzo-p-dioxins and furans (PBDD/Fs): contamination in food, humans and dietary exposure. *Science of the Total Environment* 761, 143191.
- [32] Ortuno, N., Conesa, J.A., Molto, J., Font, R., 2014. De novo synthesis of brominated dioxins and furans. *Environmental Science & Technology* 48(14), 7959–7965.
- [33] Goto, A., Tue, N.M., Someya, M., Isobe, T., Takahashi, S., Tanabe, S., Kunisue, T., 2017b. Occurrence of natural mixed halogenated dibenzo-p-dioxins: specific distribution and profiles in mussels from seto inland Sea, Japan. *Environmental Science & Technology* 51(20), 11771–11779.
- [34] Van den Berg, M., Denison, M.S., Birnbaum, L.S., DeVito, M.J., Fiedler, H., Falandysz, J., Rose, M., Schrenk, D., Safe, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tysklind, M., Peterson, R.E., 2013. Polybrominated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, and biphenyls: Inclusion in the toxicity equivalency factor concept for dioxin-like compounds. *Toxicological Sciences* 133(2), 197–208.
- [35] Ballschmiter, K., Bacher, R., 2008. Dioxine - Chemie, Analytik, Vorkommen, Umweltverhalten und Toxikologie der halogenierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane, VCH Weinheim, 3-527-28768-X, 1196.
- [36] WHO, 1998. Environmental Health Criteria 205: Polybrominated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans, World Health Organisation, Geneva, Switzerland.
- [37] Heeb, N.V., Schweizer, W.B., Kohler, M., Gerecke, A.C., 2005. Structure elucidation of hexabromocyclododecanes - A class of compounds with a complex stereochemistry. *Chemosphere* 61(1), 65–73.
- [38] Hunziker, R.W., Gonsior, S., MacGregor, J.A., Desjardins, D., Ariano, J., Friederich, U., 2004. Fate and effect of hexabromocyclododecane in the

- environment. *Organohalogen Compounds* 66, 2300-2305.
- [39] Janák, K., Covaci, A., Voorspoels, S., Becher, G., 2005. Hexabromocyclododecane in marine species from the western scheldt estuary: Diastereoisomer- and enantiomer-specific accumulation *Environmental Science & Technology* 39, 1987–1994.
- [40] Lyche, J.L, Rosseland, C., Berge, G., Polder, A., 2015. Human health risk associated with brominated flame-retardants (BFRs). *Environment International* 74, 170-180.
- [41] Karahan, İ., 2018. Investigation of Biotic Degradation of Hexabromocyclododecane (HBCDD), Middle East Technical University, Master's Thesis, Ankara.
- [42] Bakış, P., 2007. Enantiyomerik Saflıkta 1-Fenil-1-Propanolün Transesterleşme Tepkimesiyle Biyoreaktörde Kinetik Rezolüsyonu, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- [43] Zegers, B.N., Mets, A., Van Bommel, R., Minkenberg, C., Hamers, T., Kamstra, J.H., Pierce, G.J., Boon, J.P., 2005. Levels of hexabromocyclododecane in harbor porpoises and common dolphins from western european seas, with evidence for stereoisomer-specific biotransformation by cytochrome P450. *Environmental Science & Technology* 39, 2095–2100.
- [44] Abdallah, M., Harrad, S., 2009. Personal exposure to HBCDs and its degradation products via ingestion of indoor dust. *Environment International* 35, 870–876.
- [45] Johnson-Restrepo, B., Adams, D.H., Kannan, K., 2008. Tetrabromobisphenol A (TBBPA) and hexabromocyclododecanes (HBCDs) in tissues of humans, dolphins, and sharks from the United States. *Chemosphere* 70, 1935–1944.
- [46] Schechter, A., Szabo, D.T., Miller, J., Gent, T.L., Malik-Bass, N., Petersen, M., Birnbaum, L.S., 2012. Hexabromocyclododecane (HBCD) stereoisomers in US food from Dallas, Texas. *Environmental Health Perspectives* 120(9), 1260-1264.
- [47] Davis, J.W., Gonsior, S.J., Marty, G., Ariano, J., 2005. The transformation of hexabromocyclododecane in aerobic and anaerobic soils and aquatic sediments. *Water Research* 39(6), 1075-1084.
- [48] Güzel, B., Canli, O., Celebi, A., 2022. Characterization, Source and Risk Assessments of Sediment Contaminants (PCDD/Fs, DL-PCBs, PAHs, PCBs, OCPs, Metals) in the Urban Water Supply Area. *Applied Geochemistry* 143, 105394, 1-10.
- [49] Rose, M., Fernandes, A., 2010. Are BFRs responsible for brominated dioxins and furans (PBDD/Fs) in food?. *Proceedings of the 5th International Symposium on Brominated Flame-Retardants*, Kyoto, Japan.
- [50] Canli, O., Çetintürk, K., Güzel, B., 2023. A comprehensive assessment, source input determination and distribution of Persistent Organic Pollutants (POPs) along with Heavy Metals (HMs) in reservoir lake sediments from Çanakkale province, Türkiye. *Environmental Geochemistry and Health* 45 (6), 3985-4006.
- [51] Güzel, B., Canli, O., Dede, D., Karademir, A., 2020. Assessment of PCDD/F and dioxin-like PCB levels in environmental and food samples in the vicinity of IZAYDAS waste incinerator plant (WIP): from past to present. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 13902-13914.
- [52] Covaci, A., Voorspoels, S., Ramos, L., Neels, H., Blust, R., 2007. Recent developments in the analysis of brominated flame-retardants and brominated natural compounds. *Journal of Chromatography A* 1153(1-2), 145-171.
- [53] Kuc, J., Grochowalski, A., 2014. Methods for the determination of hexabromocyclododecane in food. *Technical Transactions Chemistry* 111, 45–55.
- [54] Plassmann, M.M., Schmidt, M., Brack, W., Krauss, M., 2015. Detecting a wide range of environmental contaminants in human blood samples-combining QuEChERS with LC-MS and GC-MS methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 407, 7047–7054.
- [55] Yuan, J.P., Sun, Y.M., Liu, J.H., Yao, Y.X., Chen, Y., 2016. Determination of hexabromocyclododecane enantiomers in chicken whole blood by a modified quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe method with liquid chromatography and tandem mass spectrometry. *Journal of Separation Science* 39, 2846–2852.
- [56] Li, J., Chen, T., Wang, Y., Shi, Z., Zhou, X., Sun, Z., Wang, D., Wu, Y., 2017. Simple and fast analysis of tetrabromobisphenol A, hexabromocyclododecane isomers, and polybrominated diphenyl ethers in serum using solid-phase extraction or quechers extraction followed by tandem mass spectrometry coupled to HPLC and GC. *Journal of Separation Science* 40, 709–716.
- [57] Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J.K., del Mazo, J., Vleminckx, C., 2021. Update of the risk assessment of hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in food. *EFSA Journal* 19(3), e06421.

- [58] Zhou, S.N., Reiner, E.J., Marvin, C., Kolic, T., Riddell, N., Helm, P., Brindle, I.D., 2010. Liquid Chromatography–atmospheric pressure photoionization tandem mass spectrometry for analysis of 36 halogenated flame retardants in fish. *Journal of Chromatography A* 1217(5), 633-641.
- [59] Butt, C.M., Miranda, M.L., Stapleton, H.M., 2016. Development of an analytical method to quantify PBDEs, OH-BDEs, HBCDs, 2,4,6-TBP, EH-TBB, and BEH-TEBP in human serum. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 408, 2449–2459.
- [60] Baek, S.Y., Lee, S., Kim, B., 2017. separation of hexabromocyclododecane diastereomers: Application of C18 and phenyl-hexyl ultra-performance liquid chromatography columns. *Journal of Chromatography A* 1488, 140–145.
- [61] Zacs, D., Rjabova, J., Pugajeva, I., Nakurte, I., Viksna, A., Bartkevics, V., 2014. Ultra high performance liquid chromatography–time-of-flight high resolution mass spectrometry in the analysis of hexabromocyclododecane diastereomers: Method development and comparative evaluation versus ultra high performance liquid chromatography coupled to orbitrap high resolution mass spectrometry and triple quadrupole tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1366, 73–78.
- [62] Riddell, N., Van Bavel, B., Ericson-Jogsten, I., McCrindle, R., McAlees, A., Chittim, B., 2017. Coupling supercritical fluid chromatography to positive ion atmospheric pressure ionization mass spectrometry: Ionization optimization of halogenated environmental contaminants. *International Journal of Mass Spectrometry* 421, 156–163.
- [63] Zacs, D., Rjabova, J., Bartkevics, V., 2013. Occurrence of brominated persistent organic pollutants (PBDD/DFs, PXDD/DFs, and PBDEs) in baltic wild salmon (*salmo salar*) and correlation with PCDD/DFs and PCBs. *Environmental Science & Technology* 47(16), 9478-9486.
- [64] Fernandes, A., Mortimer, D., Rose, M., Smith, F., Panton, S., 2014. Brominated dioxins and PBDEs: Occurrence trend in UK food. *Organohalogen Compounds* 76, 764-767.
- [65] Diletti, G., Ceci, R., De Benedictis, A., Leva, M., Migliorati, G., Pirito, L., Fernandes, A.R., Polybrominated dibenzo-p-dioxins and furans (PBDD/Fs) in italian food: Occurrence and dietary exposure. *Science of the Total Environment* 741, 139916, 2020.
- [66] Fernandes, A.R., Mortimer, D., Gem, M., Dicks, P., Smith, F., White, S., Rose, M., 2009. Polybrominated diphenylethers (PBDEs) and brominated dioxins (PBDD/Fs) in Irish food of animal origin. *Food Additives & Contaminants – Part B* 2, 86–94.
- [67] Mortimer, D., Acheampong, R., Fernandes, A., Rose, M., 2013. Consumer exposure to chlorinated and brominated dioxins and biphenyls and polybrominated diphenyl ethers: New UK total diet study. *Organohalogen Compounds* 75, 1138-1141.
- [68] Fernandes, A., D’Silva, K., Driffield, M., White, S., Rose, M., Branch, E.C., Rose, M., 2005. Brominated Flame-Retardants and Brominated Dioxins in 2003 Total Diet samples, In Report to the Food Standards Agency, London, UK. Report FD-04/37.
- [69] URL-1, 1995. Toxic Chemicals, <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-listed-chemicals>.
- [70] BfR Expert Opinion, 2007. Impact of the Revised Toxicity Equivalency Factors (TEFs) on The Toxic Equivalents (TEQs) of the World Health Organisation.
- [71] Fromme, H., Hilger, B., Albrecht, M., Gries, W., Leng, G., Völkel, W., 2016. Occurrence of chlorinated and brominated dioxins/furans, PCBs, and brominated flame retardants in blood of german adults. *International Journal Hygiene and Environmental Health* 219(4-5), 380-388.
- [72] Barghi, M., Shin, E.S., Kim, J.C., Choi, S.D., Chang, Y.S., 2017. Human exposure to HBCD and TBBPA via indoor dust in Korea: Estimation of external exposure and body burden. *Science of the Total Environment* 593, 779-786.
- [73] Morris, S., Allchin, C.R., Zegers, B.N., Haftka, J.J., Boon, J.P., Belpaire, C., De Boer, J., 2004. Distribution and fate of HBCD and TBBPA brominated flame retardants in north sea estuaries and aquatic food webs. *Environmental Science & Technology* 38(21), 5497-5504.
- [74] Barghi, M., Shin, E.S., Choi, S.D., Behrooz, R.D., Chang, Y.S., 2018. HBCD and TBBPA in human scalp hair: Evidence of internal exposure. *Chemosphere* 207, 70-77.
- [75] Schuhmacher, M., Nadal, M., Domingo, J.L., 2009. Environmental monitoring of PCDD/Fs and metals in the vicinity of a cement plant after using sewage sludge as a secondary fuel. *Chemosphere* 74(11), 1502-1508.
- [76] Schlummer, M., Moser, G.A., McLachlan, M.S., 1998. Digestive tract absorption of PCDD/Fs, PCBs, and HCB in humans: mass balances and mechanistic considerations. *Toxicology and Applied Pharmacology* 152(1), 128-137.

- [77] Safe, S.H., Comparative toxicology and mechanism of action of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 26(1), 371-399, 1986.
- [78] Ssebugere, P., Sillanpää, M., Matovu, H., Mubiru, E., 2019. Human and environmental exposure to PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in Africa: A review. *Chemosphere* 223, 483-493.
- [79] EFSA, 2005. Opinion of the scientific panel on contaminants in the food chain on a request from the commission related to the presence of non dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCB) in feed and food. *The EFSA Journal* 284, 1-13.
- [80] Chen, H.L., Su, H., Guo, Y.L., Liao, P.C., Hung, C.F., Lee, C.C., 2006. Biochemistry examinations and health disorder evaluation of taiwanese living near incinerators and with low serum PCDD/Fs levels. *Science of the Total Environment* 366(2-3), 538-548.
- [81] Birnbaum, L.S., Staskal, D.F., Diliberto, J.J., 2003. Health effects of polybrominated dibenzo-p-dioxins (PBDDs) and dibenzofurans (PBDFs). *Environment International* 29(6), 855-860.
- [82] Lundstedt, S., 2016. Sources and Levels of PBDD/Fs in the Swedish Environment, 43-55.
- [83] Yu, Y.J., Li, Z.R., Zhu, Y., Li, L.Z., Zhang, L.H., Xiang, M.D., Zeng, E.Y., 2022. Significance of biotransformation and excretion on the enantioselective bioaccumulation of hexabromocyclododecane (HBCDD) in laying hens and developing chicken embryos. *Journal of Hazardous Materials* 422, 126749.
- [84] Fernandes, A.R., Mortimer, D., Rose, M., Smith, F., Panton, S., Garcia-Lopez, M., 2016. Bromine content and brominated flame retardants in food and animal feed from the UK. *Chemosphere* 150, 472-478.
- [85] Coelho, S.D., Sousa, A.C.A., Isobe, T., Kim, J.W., Kunisue, T., Nogueira, A.J.A., Tanabe, S., 2016. Brominated, chlorinated and phosphate organic contaminants in house dust from Portugal. *Science of the Total Environment* 569-570, 442-449.
- [86] Pawar, G., Abdallah, M.E., de Sáa, E., Stuart, H., 2017. Dermal bioaccessibility of flame retardants from indoor dust and the influence of topically applied cosmetics. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 27, 100-105.
- [87] Darnerud, P.O., 2003. Toxic effects of brominated flame retardants in man and in wildlife. *Environment International* 29, 841-853.
- [88] Yamada-Okabe, T., Sakai, H., Kashima, Y., Yamada-Okabe, H., 2005. Modulation at a cellular level of the thyroid hormone receptor-mediated gene expression by 1,2,5,6,9,10-hexabromocyclododecane (HBCD), 4,4'-diiodobiphenyl (DIB), and nitrofen (NIP). *Toxicology Letters* 155, 127-133.
- [89] Mariussen, E., Fonnum, F., 2003. The effect of brominated flame retardants on neurotransmitter uptake into rat brain synaptosomes and vesicles. *Neurochemistry International* 43, 533-542.
- [90] Graves, W.C., Swigert, J.P. 1997. Hexabromocyclododecane (HBCD): A 96-hour Flow-Through Acute Toxicity Test with The Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*).
- [91] Drottar, K.R., MacGregor, J.A., Krueger, H.O., 2001. Hexabromocyclododecane (HBCD): An Early Life-Stage Toxicity Test with Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*).
- [92] Drottar, K.R., Krueger, H.O., 2000. PFOS: A flow through Life-Cycle Toxicity Test With The Saltwater Mysid (*Mysidopsis Bahia*), *Wildlife International, Ltd., Project, (454A-107)*.
- [93] Roberts, C.A., Swigert, J.P., 1997. Hexabromocyclododecane (HBCD): A 96-Hour Toxicity Test with The Freshwater Alga (*Selenastrum Capricornutum*), Final report.
- [94] Walsh, G.E., Yoder, M.J., McLaughlin, L.L., Lores, E.M., 1987. Responses of marine unicellular algae to brominated organic compounds in six growth media. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 14(3), 215-222.
- [95] Desjardins, D., MacGregor, J.A., Krueger, H.O., 2005. Hexabromocyclododecane (HBCD): A 72-Hour Toxicity Test with the Marine Diatom (*Skeletonema Costatum*) Using A Co-Solvent, Chapter 1.



R-Bant Boşluk Rezonatörü ile Bazı Mikrodalga Malzemelerinin Karmaşık Dielektrik ve Manyetik Geçirgenliklerinin Belirlenmesi

Determining Complex Permittivity and Permeability of Some Microwave Materials with R-Band Cavity Resonator

A. Oral SALMAN^{1,*} , Furkan ALPER² 

¹MİLTEK (Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Lab.), Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-1708-6803

²MİLTEK (Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Lab.), Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-4936-2032

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/12/2022

Kabul Tarihi : 07/02/2023

Anahtar Kelimeler

Karmaşık Dielektrik ve Manyetik Geçirgenlikler,
Malzemelerin Elektromanyetik Karakterizasyonu,
Malzeme Sarsımı (Pertürbasyon) Yöntemi,
R-Bant Boşluk Rezonatörü.

Research Paper

Received Date : 17/12/2022

Accepted Date : 07/02/2023

Keywords

Complex Permittivity and Permeability,
Electromagnetic Characterization of Materials,
Material Perturbation Method,
R-Band Cavity Resonator.

Özet

Elektromanyetik yapıların analiz ve benzetimlerinde, ortamın ElektroManyetik (EM) parametreleri olan ϵ elektriksel geçirgenliği, μ manyetik geçirgenliği ve σ (elektrik) iletkenliği değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada, mikrodalga teknolojisinde kullanılmakta olan birkaç dielektrik ve manyetik malzemenin EM parametreleri bir R-bant (1.7 - 2.6 GHz) boşluk rezonatöründe, malzeme sarsımı (pertürbasyonu) yöntemiyle ve sadece benzetimleri yapılarak elde edilmiştir. Malzemelerin EM parametreleri laboratuvarımızda bu amaçla yazılmış olan bir MATLAB koduyla otomatik ve hızlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, literatürdeki değerlerine yakın olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hem dielektrik hem manyetik malzemelerin geçirgenliklerinin gerçek kısımları, sanal kısımlarına göre literatür değerlerine daha yakın çıkmıştır. Böylece deneyler öncesinde, benzetimler yardımıyla, dielektrik ve manyetik malzemelerin geçirgenliklerinin hesaplanmasında, malzeme sarsım yönteminin ve ayrıca malzemelerin seçilen şekilleri ve rezonatördeki konumlarının doğruluklarının test edilmesi amaçlanmıştır.

Abstract

In the analysis and simulations of electromagnetic structures, the ElectroMagnetic (EM) parameters of a medium, which are permittivity ϵ , permeability μ , and (electric) conductivity σ values, should be known. In this study, the EM parameters of several dielectric and magnetic materials used in microwave technology were obtained by material perturbation method and only by simulation, in an R-band (1.7 - 2.6 GHz) cavity resonator. The EM parameters of the materials were calculated automatically and quickly with a MATLAB code written for this purpose in our laboratory. These calculated values were obtained close to the values in the literature. According to the results obtained, the real parts of the permittivity of dielectric materials and permeability of magnetic materials are closer to the literature values than the imaginary parts of them. Thus, before the experiments, it is aimed to test the accuracy of the material perturbation method and chosen geometric shapes and positions of materials in resonator for the calculation of the permeability and permittivity of dielectric and magnetic materials with the help of simulations.

1. Giriş

Çeşitli anten tasarımları, Radar Kesit Alanı (RKA) veya ElektroManyetik Uyumluluk (EMU) hesaplamaları ve daha birçok ElektroManyetik (EM) yapının analizi, ortamın EM özellikleri olan ϵ , μ ve σ değerlerinin

bilinmesine bağlıdır. Bu analiz ve tasarımların oluşturulması esnasında kullanılan analitik hesaplama ve benzetimlerde bu parametrelerin doğrudan kullanılması gerekmektedir [1, 2]. Malzemenin, boşluğun elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri olan ϵ_0 , μ_0 'a göre bağlı karmaşık elektrik ve manyetik geçirgenlikleri sırasıyla aşağıdaki gibi

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): oral.salman@kocaeli.edu.tr



$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad [\text{F/m}] \quad (1)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad [\text{H/m}]$$

verilir. Burada boşluğun elektrik geçirgenliği $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [F/m] ve manyetik geçirgenliği $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]'dir. Eş.(1)'deki sanal kısımlar kayıpların, gerçek kısımlar ise elektrik ve manyetik alanda depo edilen enerjilerin birer ölçüsüdür. Sanal kısımların gerçek kısımlara oranları elektrik ve manyetik kayıp tanjantları olarak tanımlanır ve sırasıyla aşağıdaki gibi,

$$\tan \delta_e = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad (2)$$

$$\tan \delta_m = \mu_r'' / \mu_r'$$

verilir. Eğer malzemenin elektrik kayıp tanjantı, $\tan \delta_e \ll 1$ ise malzeme dielektrik (az kayıplı), $\tan \delta_e \approx 1$ ise yarı iletken, $\tan \delta_e \gg 1$ ise de iletken (çok kayıplı)'dir. Malzemenin a.c. (alternatif akım) iletkenliği σ da frekansa bağlıdır ve aslında ε_r'' elektrik geçirgenliğinin sanal (kayıp) kısmıyla aşağıdaki şekilde bağlantılıdır:

$$\sigma = \omega \varepsilon'' = \omega \varepsilon_r'' \varepsilon_0 = 2\pi f \varepsilon_r'' \varepsilon_0 \quad (3)$$

Yani σ , ε_r'' ve f frekans değerleri bilindiğinde bu eşitlikten hesaplanabilir. Manyetik malzemeler için de az kayıplı veya çok kayıplı olma durumları, manyetik kayıp tanjantlarının değerleri açısından benzerdir.

EM parametrelerinin değerleri çeşitli yöntemlerle ölçülebilmektedir ve bu yöntemler genel olarak rezonans yöntemleri ve rezonans olmayan yöntemler olarak adlandırılmaktadır [3]. Rezonans yöntemlerinde; boşluk sarsımı (pertürbasyonu), duvar kaybı sarsımı, malzeme sarsımı gibi üç farklı sarsım yöntemi bulunmaktadır. Rezonans olmayan yöntemlerde ise, yansıma ve iletim yöntemleri uygulanır [4]. Rezonans yöntemleri ile yalnızca bir veya birkaç frekansta ölçüm yapılarak, düşük kayıplı ve küçük hacimli örnekler için hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Rezonans olmayan yöntemler vasıtasıyla da geniş bir frekans bandında, kayıplıdan kayıpsıza, büyük hacimli örnekler dahil olmak üzere sıvı ve yarı katıların ölçümünde hassas sonuçlar elde edilebilmektedir [5].

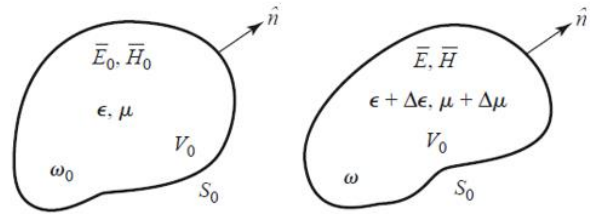
Bu çalışmada mikrodalga teknolojisinde kullanılan bazı malzemelerin EM parametreleri sadece benzetim yoluyla hesaplanacaktır. Bu hesaplamaların hızlı ve otomatik bir şekilde yapılabilmesi için daha önceden laboratuvarımızda (MİLTEK, Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Lab.) yapılmış bir tezde oluşturulmuş olan bir MATLAB kodu, manyetik malzemelerin EM karakterizasyonu hesaplamalarını da içerecek şekilde revize edilmiştir [6]. Bu hesaplamaların tümü rezonatörde

malzeme sarsım yöntemine dayanmaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmış ve hata oranları belirlenmiştir.

2. Malzeme Sarsım (Pertürbasyon) Yöntemi

Malzeme sarsımı (pertürbasyonu) yöntemi rezonatörler vasıtasıyla EM parametrelerin belirlenmesinde sık kullanılan yöntemlerden biridir. Rezonans yöntemleri arasında bulunan bu yöntem ile kaybı yüksek olmayan ($\tan \delta_{e,m} < 1$) malzemelerde daha doğru ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilir.

Şekil 1, boşluğu dolduran ortamın tamamında veya bir kısmında elektrik geçirgenlikte ($\Delta\varepsilon$) veya manyetik geçirgenlikte ($\Delta\mu$) yapılan değişikliklerle sarsıma uğramış bir boşluğu göstermektedir [4].



Şekil 1. Boşluk içindeki ortamın elektrik veya manyetik geçirgenliğindeki değişimle sarsım uygulanan bir rezonans boşluğu [4].

Eğer \vec{E}_0 ve \vec{H}_0 baştaki sarsımsız boşluğun içindeki zamanda uyumlu (harmonik) alanları, \vec{E} ve \vec{H} ise sarsıma uğramış alanları gösteriyorsa, Maxwell'in dönele eşitlikleri bu iki durum için alt alta

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_0 = -j\omega_0 \mu \vec{H}_0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H}_0 = j\omega_0 \varepsilon \vec{E}_0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega(\mu + \Delta\mu)\vec{H}, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega(\varepsilon + \Delta\varepsilon)\vec{E}$$

şeklinde yazılabilir. Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{-\int_{V_0} (\Delta\varepsilon \vec{E}_0^* \cdot \vec{E} + \Delta\mu \vec{H}_0^* \cdot \vec{H}) dv}{\int_{V_0} (\varepsilon \vec{E}_0^* \cdot \vec{E} + \mu \vec{H}_0^* \cdot \vec{H}) dv} \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik malzeme sarsımından dolayı rezonans frekansındaki değişimi vermektedir.

Rezonans boşluğunu dolduran ortamın (i) kayıpsız olduğu, (ii) içindeki örneğin, boşluktan daha küçük hacimde ve homojen olduğu ve (iii) örneğin dışındaki EM alanın ise değişmez olduğu varsayımları kabul edilirse, Eş.(5)'in sağ tarafında paydaki integral, boşluk hacminin (V_0) üzerinden değil, örnek hacminin (V_s) üzerinden alınabilir [3]. Ayrıca $\Delta\varepsilon$ ve $\Delta\mu$ değerleri yeterince küçük kabul edildiğinde, sarsımdan önceki ve sonraki alanlar da

yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir ($\vec{E} \approx \vec{E}_0$, $\vec{H} \approx \vec{H}_0$) ve Eş.(5)'in sağ tarafında paydadaki integralde uygulanabilir. Böylece Eş.(5) aşağıdaki gibi tekrar yazılır.

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \frac{-\int_{V_s} (\Delta \epsilon \vec{E} \cdot \vec{E}_0^* + \Delta \mu \vec{H} \cdot \vec{H}_0^*) dv}{\int_{V_0} (\epsilon |\vec{E}_0|^2 + \mu |\vec{H}_0|^2) dv} \quad (6)$$

Burada paydadaki iki terimin, birbirine eşit nicelikler olduğu gözlemlenmektedir. Ölçümde bağıl karmaşık dielektrik geçirgenlik (ϵ_r) ölçümünün yapıldığı düşünülürse, i) manyetik geçirgenlikte bir değişim olmaz ($\Delta \mu = 0$) ve ii) $\epsilon |\vec{E}_0|^2 = \mu |\vec{H}_0|^2 = 2\epsilon |\vec{E}_0|^2$ olarak alınabilir. Tüm bu varsayımlar Eş.(6)'ya uygulanarak

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \frac{-\int_{V_s} (\Delta \epsilon \vec{E} \cdot \vec{E}_0^*) dv}{2 \int_{V_0} \epsilon |\vec{E}_0|^2 dv} \quad (7)$$

elde edilir. $\Delta \epsilon = \epsilon - \epsilon_0$ ve $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ olduğundan ifade

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{(\omega_r + j\omega_i) - (\omega_{r0} + j\omega_{i0})}{\omega_r + j\omega_i} \quad (8)$$

haline gelir.

Kayıplı bir rezonatörün açısal frekansının gerçek ve sanal kısımları $\omega = \omega_r + j\omega_i$ cinsinden ifade edilebilir [3,7]. Burada ω 'nın gerçek kısmı rezonans frekansı $\omega_r = 2\pi f$ 'yi verir. Böylece Eş.(8)'in sol tarafı

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{(\omega_r + j\omega_i) - (\omega_{r0} + j\omega_{i0})}{\omega_r + j\omega_i} \quad (9)$$

olarak elde edilir. $\omega_{r0} \approx \omega_r$ (küçük pertürbasyon) ve $\omega_i \gg \omega_r$ (az kayıplı malzeme, $Q \propto 1/\omega$) durumlarının geçerli olduğunu varsayarak, Eş.(9)

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \frac{(\omega_r - \omega_{r0}) + j(\omega_i - \omega_{i0})}{\omega_r (1 + j\frac{\omega_i}{\omega_r})} \quad (10)$$

haline gelir.

Rezonatörün kalite faktörü $Q = \omega_r \cdot W/P_L$ ile verilir. Burada W rezonatörde depo edilen enerji, P_L ise ortalama güç kaybını göstermektedir. Q aynı zamanda gerçek ve sanal rezonans frekansları cinsinden $Q = \omega_r/2\omega_i$ şeklinde de ifade edilebilir [7]. Bu ifadeyi Eş.(10)'da kullanarak

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \left[\left(\frac{f - f_0}{f} \right) + j \left(\frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q_0} \right) \right] \times \left(1 - j \frac{1}{2Q} \right) \quad (11)$$

elde edilir. $Q \gg 1$ olarak kabul edilirse - ki bir rezonatör

için öyledir -,

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \left[\left(\frac{f - f_0}{f} \right) + j \left(\frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q_0} \right) \right] \quad (12)$$

olur. Eş.(8) ve Eş.(12) birleştirilirse

$$\left[\left(\frac{f - f_0}{f} \right) + j \left(\frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q_0} \right) \right] = - \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) C \quad (13)$$

ifadesi elde edilir. Burada C integrallerden oluşmuş bir katsayı olarak kabul edilebilir ve

$$C = \frac{\int_{V_s} \vec{E}_0 \cdot \vec{E} dv}{\int_{V_0} |\vec{E}_0|^2 dv} \quad (14)$$

şeklinde verilir. Bağıl elektrik geçirgenlik Eş.(1)'deki tanımı olan $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ kullanılarak Eş.(13) ifadesinin sağ ve solundaki gerçek ve sanal kısımlar birbirine eşitlenirse ϵ_r' ve ϵ_r'' için aşağıdaki denklem takımı elde edilir.

$$2 \left(\frac{f - f_0}{f} \right) = (\epsilon_r' - 1) C \quad (15)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = \epsilon_r'' C$$

Eş.(15)'deki ifadeler, daha sık kullanılan A ve B parametreleri cinsinden tekrar yazıldığında

$$\left(\frac{f - f_0}{f} \right) = A (\epsilon_r' - 1) \frac{V_s}{V_0} \quad (16)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = B \epsilon_r'' \frac{V_s}{V_0}$$

denklem takımı elde edilir. Böylece karmaşık elektrik geçirgenliğinin gerçek ve sanal kısımlarının hesabı için kullanılabilecek sonuç denklem takımı elde edilmiş olur. C parametresine benzer olarak, A ve B parametreleri de boşluğun yapılandırması ve çalışma modu, örneğin şekli ve örneğin boşluktaki konumuna bağlıdır. A ve B parametrelerini analitik olarak hesaplamak zor olduğundan, parametreler genellikle elektriksel geçirgenliği bilinen bir malzemeyi referans olarak kullanıp bununla sistemin kalibrasyonu vasıtasıyla elde edilir. Burada rezonans frekansı f ve kalite faktörü Q , bir örnek rezonatöre koyulduğunda değiştiği için, A ve B katsayıları, Eş.(16) kullanılarak hesaplanabilir. Ancak, kalibrasyonda kullanılan referans malzemenin ölçülecek örneklere şekil ve hacim yönünden benzer şekilde olması gerektiği

unutulmamalıdır. Ancak bu böyle olduğunda hem referans hem de ölçülecek örnek malzeme aynı alan değerlerine maruz kalır ve böylece hata oranı azalır.

Eş.(16)'daki denklem takımı elektrik geçirgenlik deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu denklemlerin temel olarak üç varsayımdan kaynaklandığı unutulmamalıdır. Birincisi, boşluğun içindeki elektromanyetik alanlar, örneğin koyulmasından ve depolanmış enerjiden dolayı değişmez. İkincisi, örnekli ve örneksiz durumlardaki rezonatörün duvar kayıpları arasındaki fark göz ardı edilebilir. Üçüncü varsayım ise ilk iki varsayımın tam olarak yerine getirilmemesi durumunda bile, değerlerin yüksek doğrulukta deneysel olarak elde edilmesinin bir yolunu sunmaktadır.

Manyetik geçirgenlik ölçümü için de yine malzeme sarsımı yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan yaklaşımlarla, manyetik malzemenin elektrik alanının minimum olduğu pozisyona yerleştirildiği veya örneğin elektrik geçirgenliğinin ϵ_0 olduğunu varsayarız. Böylece Eş.(16)'ya benzer bir denklem takımı (eşitliklerde basitçe ϵ'_r ve ϵ''_r yerine μ'_r ve μ''_r yazılarak) karmaşık manyetik geçirgenlik için de elde edilmiş olur.

$$\left(\frac{f - f_0}{f}\right) = A(\mu'_r - 1) \frac{V_s}{V_0} \quad (17)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = B\mu''_r \frac{V_s}{V_0}$$

Eş.(16) ve Eş.(17) incelendiğinde incelenen örneklerin görece dielektrik sabitleri (ϵ'_r) veya manyetik geçirgenliğin gerçek kısımlarına (μ'_r) ait eşitliklerden, bu değerler değiştiğinde rezonans frekanslarının değiştiği görülmektedir. Ayrıca, geçirgenliklerin kayıp terimlerinin (ϵ''_r ve μ''_r) Q değerleriyle ters orantılı olmalarından dolayı, daha kayıplı malzemelerin Q kalite faktörlerinin, daha az kayıplı malzemelerinkine göre düşük olduğu yani S_{21} rezonans eğrilerinin daha düşük şiddette ve daha yayvan olması gerektiği sonucuna bizi götürür. Aslında, bu rezonatördeki enerjinin korunumundan da kaynaklanmaktadır.

Bir dalga kılavuzu parçasının içerisinde ilerleyen baskın TE_{10} modunda uyarılmış EM dalganın kılavuz dalga boyu

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (18)$$

ile verilir [1]. Burada λ serbest uzay dalga boyu, $\lambda_c = 2a$, a ise dalga kılavuzunun uzun kenarıdır.

İçi hava dolu $a \times b \times d$ boyutlarındaki dikdörtgen bir rezonatörün, uyarılmış TE_{101} modunda rezonans frekansı ise

$$f_{r_{101}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2} \quad (19)$$

ile verilir [1]. Bu mod için rezonatörde oluşan E - ve H -alan bileşenleri

$$E_y = D \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d}$$

$$H_x = \frac{-jD}{Z_{TE}} \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi z}{d} \quad (20)$$

$$H_z = \frac{j\pi D}{k\eta a} \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d}$$

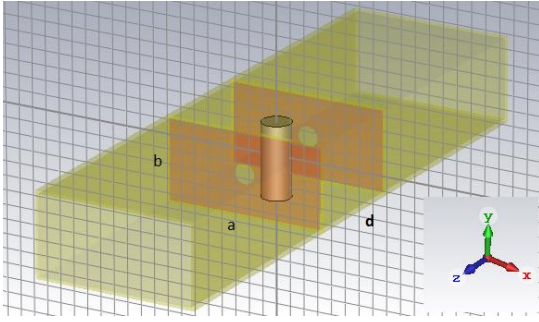
şeklinde yazılır [4]. Burada D sabit bir katsayıyı, Z_{TE} TE modu için dalga empedansını ve η ise öz empedansı temsil etmektedir.

3. Benzetim

Bu çalışmada, önce tasarlanan R -bant boşluk rezonatörünün, karmaşık geçirgenliklerinin literatürdeki değerleri ve geometrileri benzetim programına girilmiştir. Çalışma frekans aralığı da 1,7 GHz - 2,6 GHz olarak seçilmiştir. Dielektrik malzemeler, çeşitli antenlerde, EM soğurucularının taban malzemeleri gibi yerlerde yaygın olarak kullanılan teflon, polietilen, poliamit ve kestamit olarak seçilmiştir. Manyetik malzemeler ise yine EMC bilezikler, sirkülatörler, Faraday faz kaydırıcıları gibi pasif elemanlarda yaygın olarak kullanılan; $NiFe_2O_4$, $LiZnFe_2O_3$, $NiZnFe_2O_4$ gibi feritlerden seçilmiştir [8, 9]. Benzetimlerde demir, çelik gibi saf metalik manyetik malzemeler tercih edilmemiştir. Çünkü bunlar aynı zamanda çok iyi birer iletkenler ve üzerlerinde elektromanyetik dalgaların yayılması açısından çok kayıplı ortamlardır ve rezonatör yöntemi ile ölçümleri oldukça zor olmaktadır. Ancak feritler hem iyi birer dielektrik hem de manyetik yapılar ve aynı zamanda az kayıplı ortamlar olmalarından dolayı rezonatör içerisinde ölçülebilmektedirler.

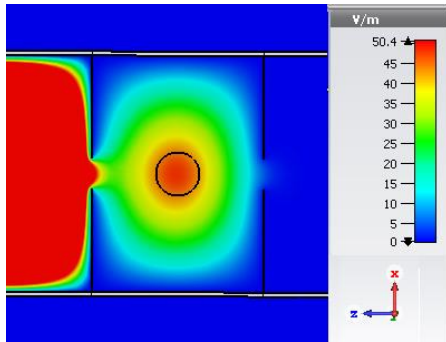
Benzetimlerde rezonatör, laboratuvarımızdaki başka bir tezde, R -bant boşluk rezonatörü için optimum açıklık değeri olarak bulunmuş olan 7 mm çaplı iki uyarım açıklığı ile uyarılmıştır (Şekil.2 ve Şekil.5) [10]. Açıklıklar ise, ortalama çalışma dalga boyu $\lambda = 13,95$ için ($f = 2,15$ GHz'e denk gelir) $\ell = 10,6$ cm = $0,6 \lambda_g$ uzunluğunda (burada λ_g kılavuz dalga boyudur ve Eş.(18)'den 18,12 cm olarak elde edilmiştir) seçilen birer TE_{10} modunda çalışan dalga kılavuzu parçasının ağızlarından dalga kılavuzu uyarımı yapılarak uyarılmıştır. Böyle bir yapılandırma rezonatörde TE_{101} modunu uyarır.

Rezonatörün boyutları $a \times b \times d=10,922 \times 5,461 \times 7,92$ cm olacak şekildedir ve içi hava dolu (boş) rezonatörün rezonans frekansı 2332,8 MHz olarak Eş.(19)'dan faydalanılarak bulunur. Benzetimlerde kullanılacak olan dielektrik malzemeler Şekil 2'de gösterildiği gibi 20 mm çapında 50 mm uzunluğundaki ölçülerde silindirik birer malzeme olarak seçilmiş ve elektrik alana fazlaca maruz kalınması için Şekil 3'te görüldüğü üzere E -alan şiddetinin en fazla olduğu yere konumlandırılmıştır. Buna göre malzemenin konumu, rezonatörün x - z düzleminin merkezi olan $(x, y, z) = (a/2, y, d/2)$ koordinatlarındadır ve Eş.(20)'den bu konumdaki alan değerleri, $E_y = D = E_{y_{max}}, H_x = 0, H_y = 0$ şeklinde hesaplanır. Bu yerleşimde TE₁₀₁ modunda örnek boyunca E -alan şiddetinin maksimum ve H -alan şiddetinin sıfır olduğu, hem alan hesabından hem de Şekil 3 ve Şekil 6'daki alan şiddeti dağılımlarından görülmektedir.

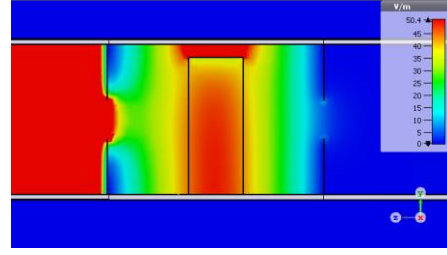


Şekil 2. Dielektrik malzeme için yapılan benzetimin bir görüntüsü.

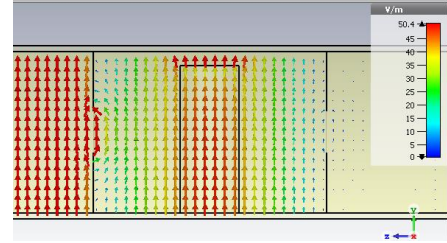
Benzetimler sırasında referans nokta sayısı olarak 9001 nokta alınmıştır. Bu sayede rezonans civarında daha fazla nokta olması sağlanmış ve sonuçların daha doğru olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Malzeme sarsımı yöntemiyle EM parametrelerin hesabında Eş.(16)'daki A ve B katsayılarının hesaplanabilmesi için gereken dielektrik referans malzemesi olarak da teflon seçilmiştir. Referans olarak seçilen malzemelerin hata oranları yöntemden dolayı tespit edilemeyeceği için kayıt altına alınmamıştır.



(a)



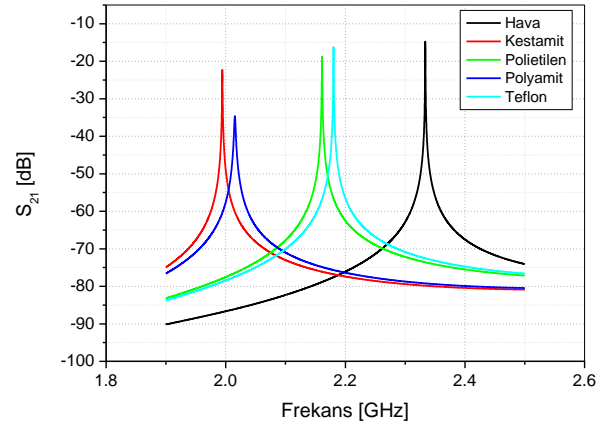
(b)



(c)

Şekil 3. Rezonatör içerisinde, a) x - z düzlemindeki E -alan şiddeti, b) y - z düzlemindeki E -alan şiddeti dağılımı ile c) y - z düzlemindeki E -alan çizgileri.

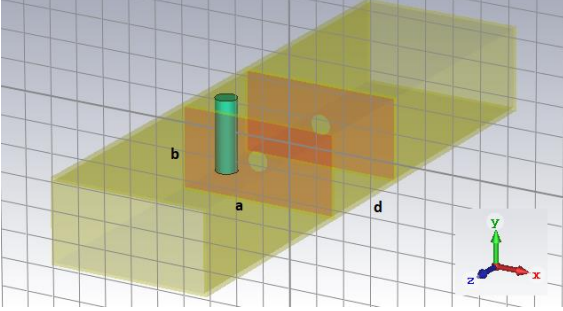
Şekil 4'de benzetimi yapılan dielektrik malzemelerin S_{21} rezonans eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. Benzetimlerden elde edilen dielektrik malzemelerin S_{21} rezonans eğrileri.

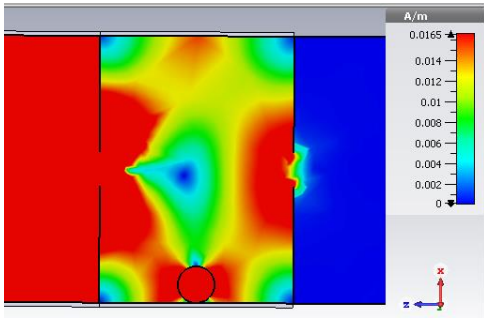
Manyetik malzemelerin benzetimleri için ise Şekil 5'te gösterildiği gibi 15 mm çapında 50 mm uzunluğundaki ölçülerde silindirik malzemeler seçilmiş ve manyetik alana fazlaca maruz kalınması için Şekil 6'da görüldüğü üzere H -alan şiddetinin en fazla olduğu noktaya konumlandırılmıştır. Buna göre malzemenin konumu, rezonatörün y - z düzleminin merkezinde sol yan duvarın hemen yanında $(x, y, z) = (0, y, d/2)$ koordinatları olur ve Eş.(20)'den bu konumdaki alan değerleri, $E_y = 0, H_x = 0, H_z = j\pi D/k\eta a = H_{z_{max}}$ şeklinde olmaktadır. Bu yerleşimde TE₁₀₁ modunda örnek boyunca H -alan şiddetinin maksimum ve E -alan şiddetinin sıfır olduğu,

hem alan hesabından hem de Şekil 3 ve Şekil 6'daki alan şiddeti dağılımlarından görülmektedir [11]. Malzeme sarsımı yöntemiyle EM parametrelerin hesabında Eş.(17)'deki A ve B katsayılarının hesaplanabilmesi için de gereken manyetik referans malzemesi olarak da NiFe_2O_4 yapısında bir ferit seçilmiştir.

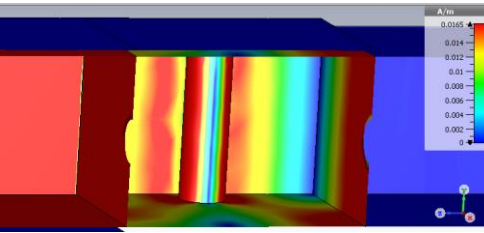


Şekil. 5. Manyetik malzeme için yapılan benzetimin bir görüntüsü.

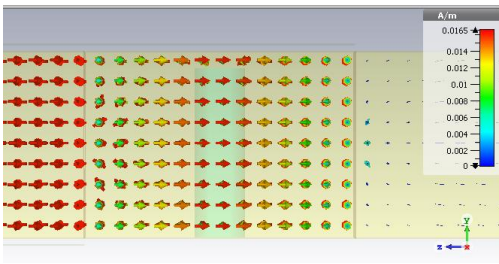
Şekil 7'de ise benzetimi yapılan manyetik malzemelerin S_{21} rezonans eğrileri verilmiştir.



(a)

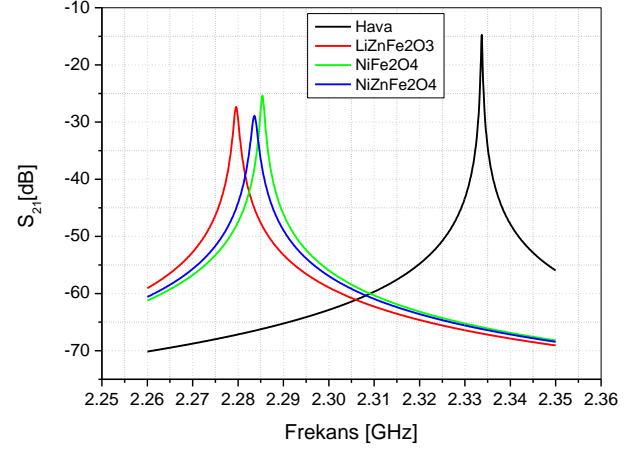


(b)



(c)

Şekil. 6. Rezonatör içerisinde, a) x - z düzlemindeki H -alan şiddeti, b) y - z düzlemindeki H -alan şiddeti dağılımı ile c) y - z düzlemindeki H -alan çizgileri.



Şekil. 7. Benzetimlerden elde edilen manyetik malzemelerin S_{21} rezonans eğrileri.

4. MATLAB Kodu ile Geçirgenliklerin Hesaplanması

Manyetik malzemelerin de EM parametrelerini hesaplayabilmesi için revize edilen MATLAB kodu ile elektrik ve manyetik geçirgenliklerin hesaplanması aşağıda anlatıldığı gibi yapılmaktadır. Öncelikle Şekil 8'de bu kodun bir hesaplama sırasındaki GUI arayüzünün görüntüsü gösterilmektedir. Hesaplama için ilk olarak referans ve örnek malzemenin, benzetimler sonrasında elde edilen frekansa karşı S_{21} eğrileri noktalarını içeren txt uzantılı data dosyaları ve referans ve örnek malzemenin geometrik ölçüleri MATLAB koduna girilir. Malzeme geometrisi için ekranın sol tarafında, malzemenin kesit şekli (silindir, dikdörtgen ve diğer) seçilebilmektedir. Malzeme silindir veya dikdörtgen kesit şekillerinden birine sahipse, seçildiklerinde çap ve yükseklik (silindir için) veya kenar uzunlukları ve yükseklik (dikdörtgen prizma için) olacak şekilde mm cinsinden geometrik ölçüleri istenmektedir. Eğer örnek başka bir şekildeyse doğrudan ekrana hacminin girilmesi istenmektedir. Kod, bu girişlerden sonra "plot" butonuna basılınca örneğe ait rezonans eğrisini ekranda çizer ve otomatik olarak yarı güç frekansları (f_0, f_1, f_2), bant genişliği BW ve kalite faktörü Q değerlerini hesaplar ve ekranda gösterir. Aynı anda kod hesaplanan bu değerleri kullanarak da malzeme sarsımı yöntemi için dielektrik ölçümü ise Eş.(16)'dan, manyetik ölçüm ise Eş.(17)'den A ve B katsayılarını ve karmaşık geçirgenliklerin (ϵ veya μ) bileşenlerini ve ayrıca kayıp tanjant ($\tan \delta_e$ veya $\tan \delta_m$) değerlerini ekranda gösterir. Böylece elle oldukça uzun vakit alacak olan bant genişliği BW ve Q değeri hesaplamaları ve diğer hesaplamalar hızlı, hatasız ve otomatik olarak yapılabilmektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışma

Benzetimlerden elde edilen S_{21} rezonans eğri noktalarının ve malzeme boyutlarının MATLAB koduna girilmesi ve kodun çalıştırılmasıyla elde edilmiş olan geçirgenlik ve buradan hesaplanan kayıp tanjant $\tan \delta$, a.c. iletkenlik σ ve kalite faktörü Q değerleri, dielektrik malzemeler için Tablo.1, manyetik malzemeler için ise (σ değeri hariç olarak) Tablo.2’de sunulmuştur.

Tablo 1’de dielektrik malzemeler için elde edilen ϵ_r' , ϵ_r'' , $\tan \delta_e$ ve a.c. σ değerleri ile literatürdeki değerler birlikte verilerek karşılaştırma yapılmıştır. Her örnek için σ değerleri Eş.(3)’ten hesaplanmıştır, burada f frekans değerleri rezonans frekansı olarak alınmıştır. Tabloda ayrıca Eş.(21) ile verilen yüzde hata oranları da hesaplanarak eklenmiştir.

$$\% \text{Hata Oranı} = \frac{|\epsilon_r'_{\text{literatür}} - \epsilon_r'_{\text{ölçüm}}|}{\epsilon_r'_{\text{literatür}}} \times 100 \quad (21)$$

Eş.(21) ϵ_r' hata oranı içindir ve diğer nicelikler için de aynı şekilde hata oranları hesaplanır.

Bu kapsamda yapılan benzetimler sonucunda elektrik geçirgenliğinin gerçek kısmı ϵ_r' lerin hata oranlarının %1’den az olduğu, sanal kısımları ϵ_r'' lerde (ve σ ’larda) hata oranlarının ise %21 ile %52 arasında değiştiği gözlenmektedir.

Tablo 2’de ise manyetik malzemelerin elde edilen μ_r' , μ_r'' , $\tan \delta_m$ değerleri ile literatürdeki değerleri birlikte verilmiştir. Manyetik malzemelerin gerçek kısımları μ_r' lerde, $\text{LiZnFe}_2\text{O}_3$ için %29, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ için ise %12 oranında hata oluşmuştur. Sanal kısımlar μ_r'' lerde ise $\text{LiZnFe}_2\text{O}_3$ için %1,3, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ için ise %18 oranında hata oluşmuştur.

Ayrıca, boş rezonatörün benzetimle elde edilen rezonans frekans değeri 2331,8 MHz olarak bulunmuş olup Eş.(19) ile teorik olarak hesaplanan 2332,8 değerine, Eş.(21) ile hesaplanan % 0,043 hatayla çok yakın çıkmıştır.

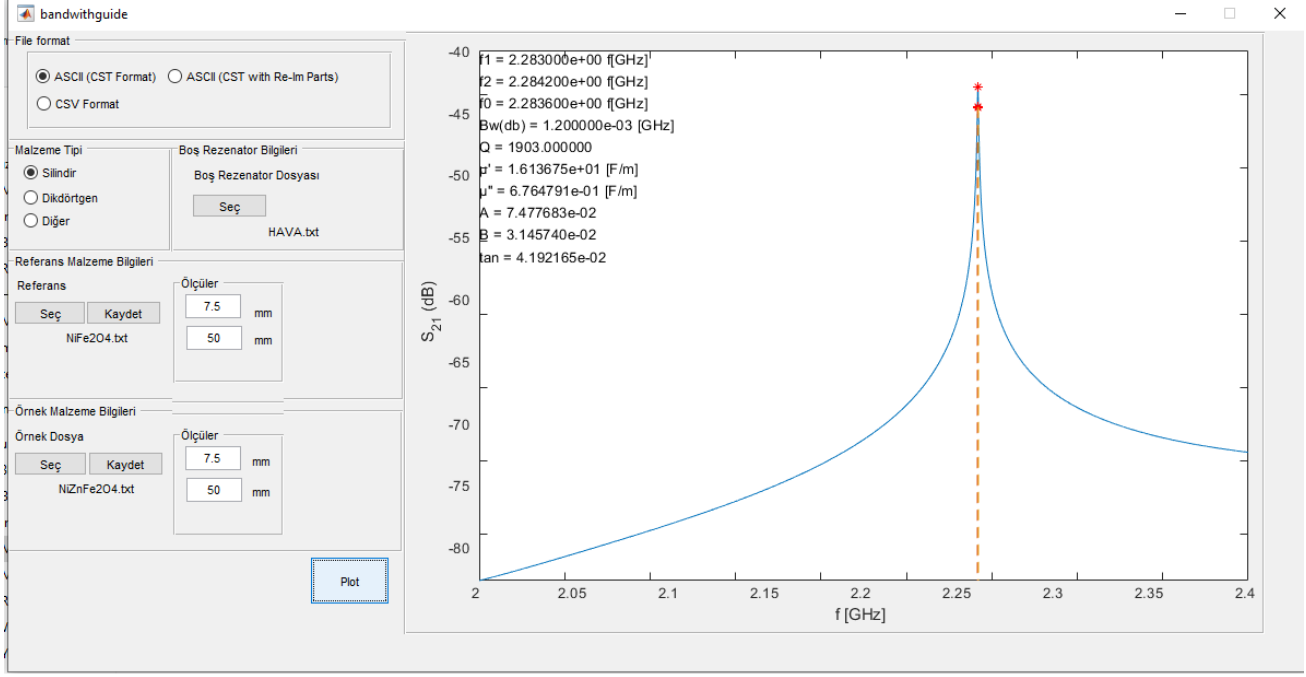
R -bant boşluk rezonatöründe dielektrik malzemelerin E -alana, manyetik malzemelerin H -alana paralel konumlandırılmasıyla buna ek olarak dielektrik malzemelerin E -alan şiddetinin maksimum, H -alan şiddetinin minimum olduğu konumda, manyetik malzemelerin ise tersi durumun geçerli olduğu konumda benzetimlerin yapılmasıyla ilgili alan bileşenine malzemelerin en fazla etkileşmesi sağlanmıştır. Böylece bulunan karmaşık ϵ ve μ ’nün bileşenleri, kayıp tanjant ($\tan \delta_e$ veya $\tan \delta_m$) ve a.c. elektrik iletkenlik σ değerleri literatürdeki değerlere yakın çıkmıştır. Elde edilen σ

değerleri, beklendiği gibi ϵ_r'' değerleri arttıkça artmakta, Q değerleri de buna bağlı olarak azalmaktadır. Tablo 1 ve 2’ye bakıldığında parametrelerin sanal kısımlarındaki hataların gerçek kısımlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum [4] ve [6]’da elde edilen sonuçlarla uyumludur. Hatanın sanal kısımlarında gerçek kısımlara göre fazla olmasının sebebi, sanal kısım değerlerinin gerçek kısma göre çok daha küçük olması ve sistem hassasiyetinin yetmemesi olabilir. Hatanın azaltılması rezonatör metoduyla pek mümkün görünmemekle beraber farklı bir metotla ölçümlerin yapılması sanal kısımlardaki hatanın az bulunmasına yardım edebilir.

Şekil 4 ve Şekil 7’deki, incelenen örnekler için S_{21} rezonans eğrileri ve Tablo 1 ve 2’de elde edilen değerler incelendiğinde, yöntem kısmının sonunda da belirtildiği gibi, daha kayıplı malzemelerin S_{21} eğrilerinin, beklendiği gibi daha düşük genlikli ve yayvan oldukları yani daha düşük Q değerine sahip oldukları gözlemlenmektedir. Daha az kayıplı malzemelerin S_{21} eğrileri ise tersine, yüksek genlikli ve keskin yani yüksek Q değerine sahiplerdir.

Daha önce bölümümüzde yapılan tezde sadece dielektrik malzemelerin benzetimleri incelenmiş ve zaman alanında (domeninde) benzetimler yapılmıştı [6]. Ancak bu çalışmada daha kararlı olan frekans alanında benzetimler yapılarak daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca [6]’da malzemeler geniş bir disk şeklindeydi ve E -alana en fazla olacak şekilde maruz kalamıyordu nedeni ise TE_{101} modunda E -alanının x -ekseninde sinusoidal bir dağılıma sahip olması ve merkezde maksimum olması, H -alanının ise merkezde sıfır ancak merkezden uzaklaştıkça artmasıdır yani kosinüsoidal bir dağılıma sahip olmasıdır (Şekil 3 ve Eş.20). Bu çalışmada malzeme geometrisi olarak uzun bir silindir seçilmiş ve rezonatörün merkezine yerleştirilmiştir. Dolayısıyla [6]’ya göre daha fazla E -alanına ve en az da H -alanına maruz kalmaktadır. Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar [6]’dakilerle Tablo 3’de karşılaştırılmıştır ve görüldüğü gibi çoğu sonuçlarda iyileştirme sağlandığı gözlemlenmektedir.

Tüm elde edilen bu sonuçlar, deneyler öncesinde, benzetimler yardımıyla, dielektrik ve manyetik malzemelerin geçirgenliklerinin hesaplanmasında kullanılan malzeme sarsımı yönteminin çalıştığını ve malzeme şekillerinin ve rezonatörde yerleşim biçimlerinin doğru olarak seçildiğini göstermiştir.



Şekil 8. EM parametrelerin hesaplandığı MATLAB kodunun GUI arayüzü.

Tablo 1. Dielektrik malzemelerin benzetim ve literatür değerleri ile hata oranları.

	Benzetim Değerleri					Literatür Değerleri [12, 13]				Yüzde Hata Oranları			
	Q	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta_e$	σ [S/m]	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta_e$	σ [S/m]	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta_e$	σ [S/m]
Polietilen	5402,5	2,25	0,00043	0,00019	$0,51 \times 10^{-4}$	2,25	0,00090	0,00040	$1,08 \times 10^{-4}$	% 0,0	% 52	% 52	% 52
Kestamit	3739,48	3,67	0,00106	0,00028	$1,17 \times 10^{-4}$	3,70	0,00148	0,00040	$1,64 \times 10^{-4}$	% 0,8	% 28	% 30	% 28
Polyamit	916,03	3,48	0,00730	0,00209	$8,25 \times 10^{-4}$	3,50	0,00945	0,00270	$10,58 \times 10^{-4}$	% 0,5	% 21	% 22	% 21

Tablo 2. Manyetik malzemelerin benzetim ve literatür değerleri ile hata oranları.

	Benzetim Değerleri				Literatür Değerleri [8, 9]			Yüzde Hata Oranları		
	Q	μ'_r	μ''_r	$\tan \delta_m$	μ'_r	μ''_r	$\tan \delta_m$	μ'_r	μ''_r	$\tan \delta_m$
LiZnFe ₂ O ₃	2279,6	17,42	0,528	0,03033	24,62	0,521	0,02116	% 29	% 1,3	% 43
NiZnFe ₂ O ₄	1903,00	16,13	0,676	0,04192	18,42	0,825	0,04478	% 12	% 18	% 6

Tablo 3. Dielektrik malzemelerin benzetimle elde edilen parametrelerinin, literatüre göre yüzde hata değerlerinin, [6]'daki değerlerle karşılaştırılması.

	Bu Çalışmada Elde Edilen Sonuçlar için % Hatalar		[6]'da Elde Edilen Sonuçlar için % Hatalar	
	ϵ'_r	ϵ''_r	ϵ'_r	ϵ''_r
Polietilen	% 0,0	% 52	% 2	% 53
Kestamit	% 0,8	% 28	% 20	% 70
Polyamit	% 0,5	% 21	% 12	% 95

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Balanis C.A., 2020. Advanced Engineering Electromagnetics, 2nd ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [2] Balanis C.A., 1997. Antenna Theory Analysis and Design, 2nd ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [3] Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K., 2004. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization, 1st ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [4] Pozar D.M., 2012. Microwave Engineering, 4th ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [5] https://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf (Erişim tarihi: 12 Kasım 2022)
- [6] Yıldırım, T. Ş., 2018. Mikrodalga Dielektrik Malzemelerin Dielektrik Geçirgenliklerinin R-Bant Dalga Kılavuzu Rezonatörü İle İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 535695.
- [7] Sucher M., Fox J., 1963. Handbook of Microwave Measurements, 3rd ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [8] Raveendranath U., Mathew K.T., 1998. New Cavity Perturbation Technique for Measuring Complex Permeability of Ferrite Materials. Microwave and Optical Technology Letters, 18(4), 241-243.
- [9] Jha A.K., Akhtar M.J., 2015. Improved Resonator Method for Microwave Testing of Magnetic Composite Sheets. IEEE Transactions on Magnetics, 51(9), 1-9.
- [10] Durmuş, M., 2018. R-Bant Dikdörtgen Boşluk Rezonatörü İçin Uygun Uyarım Açıklık Yarıçapının Bulunması Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 522122.
- [11] Alhassoon K.A., Malallah Y., Daryoush A.S., Complex Permittivity and Permeability Extraction of Ferromagnetic Materials For Magnetically Tuned Microwave Circuits. IEEE Journal of Microwaves, 1(2), 639-645
- [12] <https://www.cst.com/> (Erişim tarihi: 12 Kasım 2022)
- [13] <http://www.polikim.com.tr/pdf/kestamid.pdf> (Erişim tarihi: 12 Kasım 2022)



Asfalt Beton Malzemelerin Karma Mod (I-II) Kırılma Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of Mixed Mode (I-II) Fracture Properties of Asphalt Concrete Materials

Nazife ERARSLAN^{1,*} ¹ İnşaat Mühendisliği, İzmir Demokrasi Üniversitesi, İzmir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-5202-9644**Araştırma Makalesi**

Gönderilme Tarihi : 06/10/2022

Kabul Tarihi : 08/06/2023

Anahtar Kelimeler

Asfalt Beton (AC)
AC ve Karma Mod I-II Kırılma
AC ve Mod I Kırılma
Asfalt Beton ve Kohezif Çatlak

Research Paper

Received Date : 06/10/2022

Accepted Date : 08/06/2023

Keywords

Asphalt Concrete (AC)
AC and Mixed Mode I-II Fracturing
AC and Mod I Fracturing
AC and Cohesive Crack

Özet

Bu çalışmada, asfalt beton (AC) numunelerinde çatlak oluşumunu ve yayılmasını araştırmak için Yarı Dairesel Disk Eğilme (SCB) numuneleri ile deneysel, analitik ve sayısal analiz araştırmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, AC malzemelerin karma mod I-II (çekme ve kesme) kırılmasını analiz etmek için ASTM D8044 standardının sadece mod I için değil karma modu test etmede uygulanabilirliğini araştırmaktır. Gerilme dağılımı ve çatlak ilerleme sayısal analizleri, kırılma mekaniği programı FRANC2D kullanılarak yapıldı. AC numunelerinin mod I (çekme) kırılma tokluğu (KIC) değerinin 0.45 MPa√m olduğu bulunmuştur. Öte yandan, $\beta=30^\circ$ için mod II kırılma tokluğu (KIIC) değeri 0.17 MPa√m ve $\beta=45^\circ$ için mod II değeri ise 0,19 MPa√m olarak bulunmuştur. Sayısal analizlerle Kritik Çatlak Eşiği (CCT) çatlak uzunluğu 2-3 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuç, hem deneysel bulgular hem de CCT analitik analiz sonuçları ile uyumludur. FRANC2D analizlerinde kohezif çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. AC numunelerinde 'kanat çatlak' büyümesi literatürde ilk kez hem deneysel hem de sayısal analizlerle bu çalışma ile elde edilmiştir. Elde edilen deneysel, analitik ve sayısal sonuçlara göre, bu çalışmanın sadece mod I için önerilen ASTM D8044 test standardının AC malzemelerin karma mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol göstereceğine inanılmaktadır.

Abstract

Experimental, analytical, and numerical analysis studies were carried out with the semicircular disc bending (SCB) specimens to investigate crack formation and propagation in Asphalt Concrete (AC) materials in this study. The main objective of this study is to investigate the feasibility of the ASTM D8044 for analyzing the mixed mode I-II fracturing of AC materials. The numerical analysis of crack growth were performed using the fracture mechanics program FRANC2D. Mode I fracture toughness (KIC) values were found to be 0.45 MPa√m for the tested AC samples. The KIIC value for $\beta=30^\circ$ was found to be 0.18 MPa√m and the mode II value for $\beta=45^\circ$ was found to be 0.19 MPa√m. The Critical Crack Threshold (CCT) length was found to be 2-3 mm. The most significant slip between the cohesive crack surfaces was obtained with the 30° inclined crack. The 'wing crack' growth in AC samples has been obtained for the first time in the literature. It is believed according to the experimental and numerical results obtained that this study may lead to the studies of a new international standard for the determination of the mixed mode I-II fracturing of AC materials by using ASTM D8044 test standard recommended for mode I.

1. Giriş

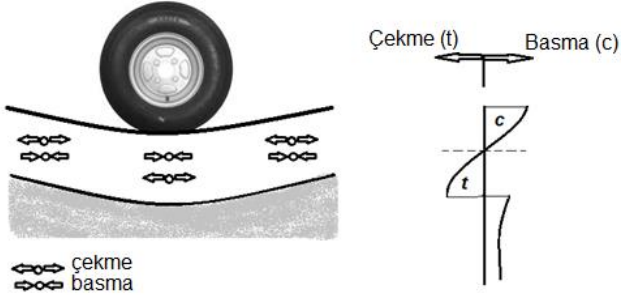
Yol kaplamaları, trafik yükünden kaynaklanan gerilmeleri alt temel malzemesini deforme etmeyecek bir ölçekte alt katmanlara dağıtan kompozit bir malzemedir. Aynı zamanda, yol alt tabakalarından gelen deformasyon ve çatlakları yüzeye yansıtan da bir tabakadır. Tekerlek yükü altında meydana gelen eksenel gerilmeler, yüzeye yakın alanlarda basma gerilmesine neden olur (Şekil 1).

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): nazife.dogan@idu.edu.tr

Tekerleğin hemen altındaki bölgede düşey yönde oluşan gerilmeler çapsal sıkıştırma gerilmeleridir ve bu gerilmeler yatay yönde indirekt dolaylı çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar (Şekil 1). Yüzey kaplamasında oluşan basınç gerilmeleri tekerlek izi şeklinde deformasyonlara neden olurken, kaplama altında oluşan dolaylı çekme gerilmeleri ise çekme ve yorulma çatlaklarına ve deformasyona neden olur. Bu noktada, kırılma mekaniği ilkeleri, asfalt kaplama ve asfalt bitümlü temel (ABT) araştırmalarında oldukça faydalı olacağı aşikardır. Özellikle, kırılma mekaniğinde yer alan

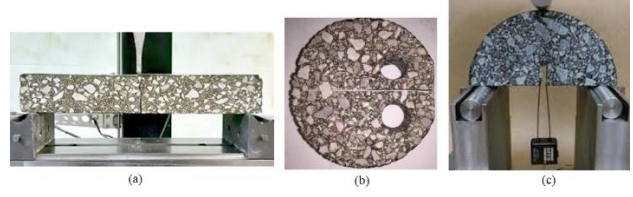


mod I (çekme) ve karma mod I-II (çekme-kesme) çatlakları/yenilmeleri, bu tür hem basma hem de endirekt çekme ve makaslama gerilemelerinin olduğu asfalt kaplama ve asfalt beton araştırmalarında oldukça fayda sağladığı literatürde pek çok araştırmada belirtilmiştir [1-5].



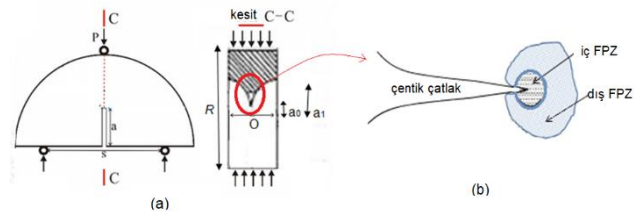
Şekil 1. Teker yükü altında esnek yol kaplamalarda gerilme dağılımı

AC farklı fazları olan bir kompozit malzeme olup çoğunlukla bir kaplamanın temel tabakası olarak kullanılan büyük boyutlu agregaların kullanıldığı bir malzemedir. Çeşitli bağlayıcı veya bitüm türleri ve farklı boyutlardaki agregaların karıştırılmasıyla farklı hava boşluğu oranlarında oluşturulabilen bu partiküllü kompozitler, sıcak bölgelerde farklı deformasyonlar gösterirler, örneğin duktıl deformasyonlar, fakat soğuk iklimlerde kırılğan malzeme deformasyonları gösterirler [5-11]. AC gibi kompozitler heterojen malzemelerdir ve asfalt karışımlarının üretimi sırasında özellikle agregalar ve bitüm bağlayıcı arasında birçok yapısal mikro çatlak oluşur. Bu mikro çatlaklar özellikle mekanik yükleme ve sıcaklık değişimlerinden dolayı büyümeye ve yayılmaya başlarlar. Bu nedenle, asfalt kompozitlerin mekanik özelliklerini anlamak için kırılma mekaniği uygulamalarının kullanılması oldukça fayda sağlamaktadır. AC malzeme araştırmacıları son yıllarda kırılma mekaniği testlerini kullanmaya başlamış ve dahası bu alanda yeni uluslararası standart testler sunulmuştur [12-13]. AC araştırmalarında kullanılan test yöntemleri arasında özellikle çentik çatlaklı kiriş (SEB) testi, direkt çekme disk (DCT) testi ve yarım daire disk (SCB) testleri tercih edilmektedir [8, 14] (Şekil 2). Literatürdeki son araştırmalarda, kırılma mekaniği prensipleri özellikle yorulma ve viskoz deformasyon araştırmalarında, örn. AC'deki deformasyonları daha ayrıntılı olarak tanımlamak için kohezif çatlak modelleri, kullanıldığı görülmektedir. [4, 15-17].



Şekil 2. AC malzemelerde kırılma testleri(a) SEB test (b) DCT test and (c) SCB test

AC kompozitlerde kırılma kaynaklı deformasyonu tanımlamak ve AC'nin mekanik performansını artırmak için yapılan testlerin çoğunda, yeni oluşacak çatlakın başlama yerini kontrol edebilmek için numuneye bir çentik yerleştirilir [2, 6, 18]. Kırılma mekaniği prensiplerinden Gerilme Yoğunluk Faktörü (SIF) yaklaşımının, çatlak önündeki plastik bölgenin büyüklüğünün ilk çatlak uzunluğuna kıyasla küçük olması durumunda, sıcak karışimli asfalt (HMA) gibi viskoelastik malzemeler için oldukça uygun olduğu kabul edilir [1, 18]. Son yıllarda asfalt kompozitlerin mod I kırılma tokluğunu belirlemek için çentik çatlaklı içeren SCB geometrisini uluslararası standart testler önerildi [12-13, 17-20]. Ayrıca SCB numune geometrisi ile, çentik çatlaklı ucunda oluşan elastoplastik deformasyonların incelenmesi için çatlak gelişme alanı olan FPZ'nin (Fracture Process Zone: FPZ) incelenmesi de mümkün olmaktadır (Şekil 3). FPZ genel olarak iki bölgede incelenir: 1) İç bölge: ilk gerilme kaynaklı çatlak gelişimi; ve 2) Dış bölge: kararsız/duraysız çatlak gelişimi. İç bölgede, çentik çatlak ucunda indüklenen gerilmeler, çatlak yayılımındaki gerilme artışlarından daha hızlı artar ve bu alanda ezik bölge oluşur. Bu bölgede ayrıca gerinin sertleşmesine yol açan pek çok mikro ve nano ölçekli çatlak oluştuğunu belirtmek önemlidir. Bu bölge, gerilme konsantrasyonu olan SIF değerinin kritik bir değere yani kırılma tıkızlığı değerine (K_{IC}) ulaşana kadar büyümeye devam eder. Dış bölgede ise, numune içindeki indüklenen gerilme, kararsız çatlakların gelişmesi ve daha büyük deplasmanların oluşması nedeniyle daha azalmaya başlar [21-22].



Şekil 3. SCB numune geometri parametreleri ve çentik çatlaklı önünde FPZ bölgeleri

Çatlak ucunun etrafında herhangi bir noktadaki gerilim durumu şu şekilde hesaplanır:

$$\frac{K_I}{\sigma_o \sqrt{\pi c}} = Y_I \quad (1)$$

Burada, maksimum asal gerilme (çekme) yönünde ilerleyen çentik çatlak çevresindeki gerilim koşulu, K_I ($N/mm^{3/2}$); kırılma yükü P , çentik çatlak uzunluğu, c ve numune boyutları ile orantılı olarak tanımlanır. σ_o , $F/2rt$ formülü ile bulunur. F , kırılma meydana geldiği andaki maksimum yüküdür (MN). Numunenin boyutları, t , r ve c , sırasıyla metre cinsinden kritik çatlak boyutunun kalınlığı, yarıçapı ve uzunluğudur. Y_I , boyutsuz mod I SIF değeridir. Böylece, K_I 'in kritik değere ulaşması ile, malzemelerin kırılma tokluğu, K_{IC} , parametresi elde edilir.

2. Deneysel Materyal ve Metotlar

2.1. Deneysel Materyaller

AC karışım dizaynında, Aydın Köşk Başçayır Taşocağından üretilen (19–38) mm, (13–19) mm., (5–13) mm ve (0–5) mm tane boyu agregalar ve 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Karışım gradasyonunun hazırlanmasında, elek analizi sonuçlarının ortalamaları esas alınmıştır (Tablo 1). Dizayn gradasyonuna uygun olarak hazırlanan agregalara şartnamelere uygun standard deneyler yapılmıştır (Tablo 2). Kullanılan bitüme ait deneylerin sonuçları ise Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Agregaların kullanım oranları ile dizayn gradasyonu

Kullanım oranları	27	15	23	35	100
Elek açıklığı, mm	(19-38)	(13-18)	(5-12)	(0-5) mm	Karş.
mm	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen	Grad.
37,5	100				100
25	61,4				89,6
19,1	25,7	100			79,9
12,7	1,9	30,8	100		63,1
9,52	1,7	2,3	88,5		56,2
4,76	1,6	2,0	16,0	100	39,4
2,00	1,5	1,8	1,9	66,6	24,4
0,42	1,4	1,7	1,7	29,7	11,4
0,177	1,3	1,6	1,6	17,6	7,1
0,075	1,2	1,5	1,5	10,8	4,7

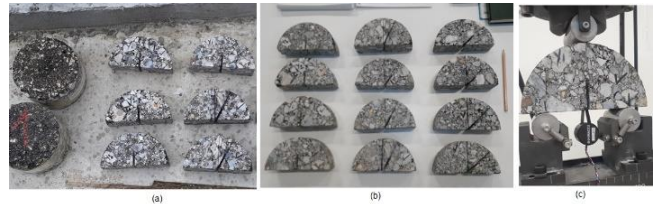
Tablo 2. Agregalara ait bazı standart deneyler

	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler	Deney Standardı
Hacim Özgül Ağırlığı	2,783	2,758		TS EN 1097-6
Zahiri Özgül Ağırlığı	2,816	2,821	2,764	
Absorpsiyonu %	0,432	0,813		

Tablo 3. Bitüm deney sonuçları

Bitüm Özgül Ağırlığı	1,029	TS 1087
Bitüm Penetrasyonu, dmm	57	TS EN 1426
Yumuşama Noktası, °C	51,0	TS EN 1427
İmalatta kullanılacak bitümlü bağlayıcı	Rafinerisi tipi	Aliğa Bitüm

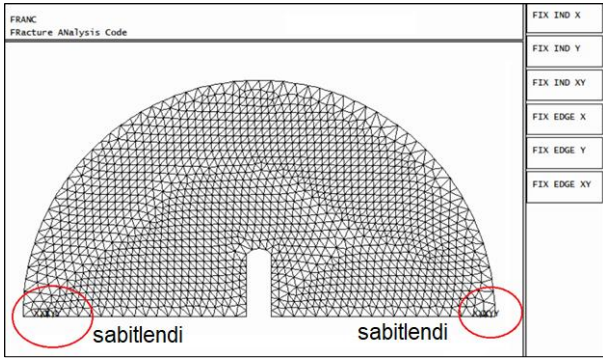
Marshall Metoduna göre 2x75 darbeyle yapılan dizayn sonucunda, Optimum Bitüm kuru agregaya göre ağırlıkça %3,85 (100g. kuru agregası + 3,85 gr. uygun özellikteki bitüm) olarak bulunmuştur. Karışım gradasyonu ve optimum bitüm içeriği belirlendikten sonra, AC karışımları oluşturulmuş ve kırılma tokluğu testleri için ASTM D8044 standardı takip edilerek silindirik numuneler sahadan alınmıştır. Sahadan alınan silindirik karot numunelerden yirmi adet yarım daire SCB numunesi kırılma tokluğu testleri için hazırlanmış olup her çentik açısı deneyi için üçer tekrar testleri yapılmıştır. (Şekil 4). Kırılma tokluğu deneylerinde, $\beta=0^\circ$, $\beta=30^\circ$ ve $\beta=45^\circ$ olan üç farklı çentik çatlak açısına sahip numuneler test edilmiştir. Her deney setinden dört tekrarlı deney olmak üzere on iki SCB numunesi test edildi (Şekil 4-b). Numune kalınlığı B , 50 mm, numune çapı D , 150 mm, çatlak kalınlığı t , 2 mm ve dış çentik çatlak uzunluğu a_1 , 38 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler, 18° laboratuvar ortam sıcaklığında yapılmıştır. Çatlak açılma deplasmanı (COD) mesafesi doğrudan ölçülmüştür. A ölçümü için SHIMADZU P701805 model transdüser kullanıldı (Şekil 4-c). Kullanılan transdüser, Amerikan standardı ASTM 399 70T ve ASTM D8044-16'da belirtilen özellikleri karşılamaktadır.



Şekil 4. Hazırlanan SCB numuneleri ve COD transdüseri

2.2. Sayısal Analizler

Çalışmada sayısal analizler, kırılma mekaniği prensiplerine göre geliştirilen FRANC2D (Fracture Analyses Code) programı kullanılmıştır. FRANC2D ayrık çatlak yayılımı analizi yapabilen iki boyutlu lineer ve plastik analiz programıdır. FRANC2D ile yapılan gerilme ve çatlak analizlerinde, kırılma mekaniğinde var olan üç çatlak yayılım teorisinden Maximum Teğetsel Gerilme Konsantrasyon Teorisi kullanılır [23]. Sayısal modellemede FRANC2D ile analizlere başlamadan önce modellenecek numune geometrisi CASCA adı verilen ağ üreticisi (mesh generator) ile ağ modellemesi yapılmıştır (Şekil 5). Hem gerilme dağılımı analizleri hem de çatlaklanma analizleri yapılarak, programın sonuçları elde edilen deneysel sonuçlarla Bölüm 3'te karşılaştırılarak doğrulanmıştır. FRANC2D ile analizlere başlamadan önce SCB numunesi ve çentik çatlak açılarının ağ modellemesi CASCA ağ yaratıcısı (mesh generator) programı ile yapılmıştır. Modellenen SCB numune modelinde, üç noktalı eğilme deney düzeneğinde yer alan destek noktaları hem yatay hem düşeyde (x, horizontal direction ve y, vertical direction) sabitlenmiştir.



Şekil 5. SCB numunesinin CASCA ile modellenmesi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel Sonuçlar

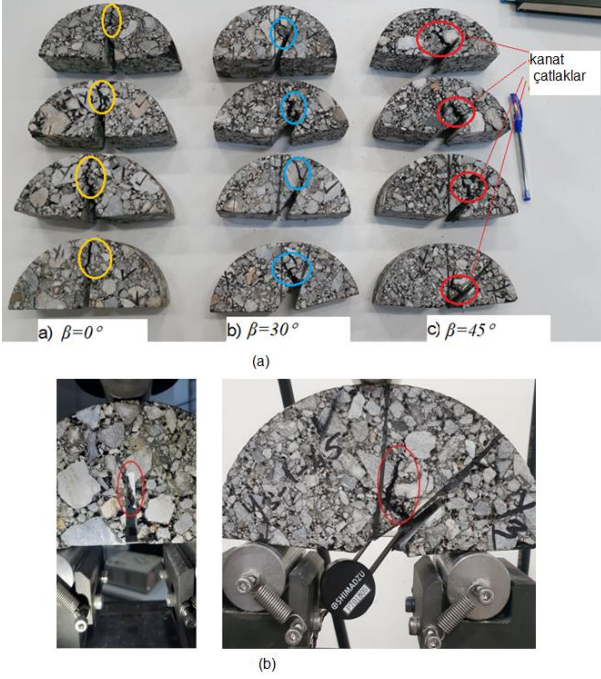
Dolaylı olarak indüklenen çekme yüklemesi ile oluşan çekme-kesme (karma mod I-II) gerilme koşulları, doğrudan çekme yüklemesi ile oluşan karma mod koşullarından oldukça farklıdır. Çapsal basma yükü ile oluşan dolaylı çekme çatlakları, çapsal basınç gerilme eksenine yönünde başlar ve bu yöne bağlı olarak 'kanat' çatlaklarının oluşması yönünde ilerler [1, 3, 24]. Mod I (çekme) ve karma mod I-II yükleme koşulları, çatlak eğim açısının (β) indüklenmiş çekme yüklemesi eksenine göre 0° ile 90° arasında açılarla SCB numunesi konumlandırılarak elde edilir. SCB numunesi farklı β açılarıyla yüklendiğinde

mod I-II gerilme bölgesi çatlak eksenine boyunca yer değiştirir ve yeni çatlaklar bu bölgede oluşmaya başlar. Kırılma tokluğu deney sonuçları ve SCB geometri detayları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. SCB tokluk deney sonuçları

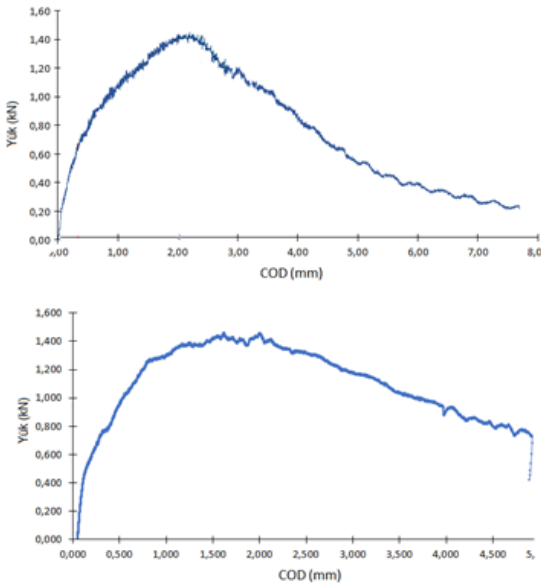
Çatlak eğim açısı, β	D (mm)	B (mm)	a (mm)	(P) (kN)	K_{IC} ($MPa\sqrt{r}$)	K_{IIC} (MPa)
0°	150	51	36	1.46	0.46	-
0°	150	51.5	37	1.47	0.48	-
0°	150	51	36	1.43	0.43	-
Ort.	150	51	36	1.45	0.45	-
St.Sp.	0.00	0.00	0.58	0.03	0.03	
30°	151	50	36	1.53	0.43	0.16
30°	150	51	37	1.58	0.47	0.19
30°	151	50	37	1.56	0.44	0.17
Ort.	151	50	37	1.56	0.45	0.18
St.Sp.	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	
45°	150	50	37	1.61	0.33	0.17
45°	150	50	36	1.63	0.35	0.19
45°	151	51	37	1.65	0.37	0.20
Ort.	150	51	37	1.63	0.35	0.19
St.Sp.	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01

Test edilen SCB numuneleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Test edilen numuneler incelendiğinde, çatlak başlama açısının (θ), β açısına bağlı olduğu gözlenmiştir. Mod I ve karma mod I-II kırılma testlerinin deneysel bulguları, $\beta=0^\circ$ ve $\beta=30^\circ$ açıları arasında eğimli çentik çatlaklarda yeni çatlakların çatlak ucu etrafında başladığını göstermiştir. Çünkü çentik çatlak ucu, çekme gerilmesi konsantrasyonunun en yüksek olduğu bölgedir. Mod I yüklemesinin gerçekleştiği $\beta=0^\circ$ eğim açısına sahip numunelerde ise, yeni oluşan çatlakların dolaylı çekme gerilmesine dik yönde yayılma eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 6). En önemli diğer bulgulardan biri ise, indüklenen gerilme kaynaklı yeni çatlak başlama yerinin, $\beta=45^\circ$ eğimli çentik çatlakın merkezine doğru kaydığı saptanmıştır (Şekil 6). Elde edilen bu sonuç, kırılma mekaniği prensipleri ve 'kanat' çatlak oluşumu konseptiyle oldukça uyumludur. Çünkü, $\beta=30^\circ$ ve $\beta=45^\circ$ eğimli çentik çatlakları ile yapılan deneylerde, çatlak yayılma yönü çatlak ekseninden uzaklaşır ve çapsal basma yüklemesi eksenine doğru ilerlemek için kavisli bir yol boyunca büyür. Bu gerilme kaynaklı oluşan kavisli çatlaklara, kırılma mekaniğinde "kanat çatlakları" denir [25-26]. (Şekil 6). Bu çalışmada yapılan deneylerde gözlemlenen kanat çatlakları prensibi, kırılma mekaniğinde en tipik çatlak yayılma biçimidir. Böylece, kırılma mekaniği ilkelerinin AC örnekleri kullanılarak yapılan araştırmalarda kullanılabilirliği ve doğruluğu bir bakıma bu çalışma ile gösterilmiştir.



Şekil 6. (a) Test edilmiş numunelerden bazıları (b) COD ve deney düzeneği

Yük-COD eğrilerinden bazıları Şekil 7’de verilmiştir. Test edilen tüm numunelerde düktil davranış gösteren benzer yük-COD grafikleri elde edilmiştir. Yük-COD eğrilerinde görüldüğü gibi AC numunelerinde, literatürde görülen tipik elastoplastik deformasyon davranışı tespit edilmiştir. Bu grafiklerde, yenilme öncesi gerilim sertleşmesi/güçlenmesi (strain hardening) ve yenilme sonrası gerilim yumuşaması (strain softening) davranışları görülmektedir. Bunun nedenleri ileriki bölümlerde tartışılmıştır.



Şekil 7. Yük-COD eğrileri

Kırılma mekaniği ilkelerinde, çatlak ucunun önünde depolanan enerji, kırılma için gereken yüzey enerjisini aştığında, yeni çatlak oluşumu ve ardından kararlı çatlak büyümesi meydana gelir [16, 27]. Yenilmeye neden olan bu makro çatlakların başladığı nokta, kırılmaya karşı malzeme direnç değeri olarak tanımlanan kırılma tokluğunu (KIC) ve FPZ çevresinde kararsız çatlak yayılımının başladığını gösterir. Bununla birlikte, bir çatlakın FPZ’de kararsız olarak yayılmaya başladığı çatlak uzunluğunu belirlemek kolay değildir. Bu özellikle AC gibi elastoplastik malzemelerde oldukça zordur. Çapsal basma gerilmesi ile yüklenen SCB numunesindeki 2a uzunluğunda bir chevron çatlak için, boyutsuz gerilme-yoğunluk faktörü (NI) hesaplanabilir bir parametredir [7, 15, 28]. N_I , boyutsuz çatlak uzunluğunun ($\alpha=a/R$) bir fonksiyonudur. ‘Düz çatlak varsayımı kriteri (STCA)’ kullanılarak, çapsal basma altında SCB numunesi içindeki çentik çatlak için gerilme yoğunluk faktörünü (K_I), Eş.2 ile hesaplanır. Atkinson v.d., [28] tarafından $\alpha=0.1-0.6$ aralığındaki çatlaklar için boyutsuz gerilme yoğunluk faktörünün (YI) sayısal değerlerinin bulunması için Eş. 3 ve Eş. 4’te verilen eşitlikler önerilmiştir:

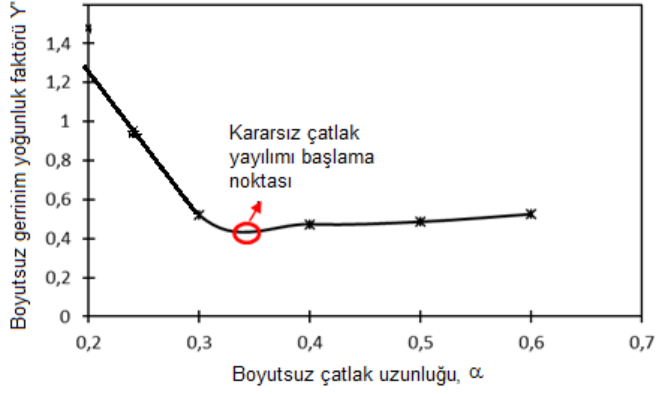
$$K_{Ic} = \frac{P}{(\pi R)^{1/2} B} \alpha^{1/2} N_I(\alpha) \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$N_I = 0.991 + 0.141\alpha + 0.863\alpha^2 + 0.886\alpha^3 \quad (3)$$

$$Y = \alpha^{1/2} N_{1(\alpha)} \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right)^{1/2} \quad (4)$$

P, R ve B sırasıyla; kırılma yükü, numune yarıçapı ve numune kalınlığı iken; $\alpha_1=a_1/R$ ve $\alpha_0=a_0/R$. a_0 ve a_1 parametreleri Şekil 3’te gösterilmektedir. Eş.2’nin uygulanabilmesi için kritik çatlak uzunluğu a ’nın, $a_0 < a < a_1$ değerleri arasında olması gerekmektedir. Bu çalışmada, kararsız çatlak yayılımının başlangıç noktası anlamına gelen kritik çatlak uzunluğu a ’nın, a_0 ile a_1 arasında olup olmadığı analitik ve sayısal analizler ile araştırılmıştır. Gerilme yoğunluğu katsayısı (Y) grafiği ve boyutsuz çatlak uzunluğu grafiği Şekil 8’de gösterilmiştir. Kararsız/kritik çatlak yayılımı, boyutsuz gerilme yoğunluğu faktörünün minimum olduğu yerdir ve analitik analizlerde $Y_{\min}^* = 0,47$ ’ye eşit olduğunda, AC’nin ilgili kırılma tokluğu değerinin $0,45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olduğunu gösterir. Bu noktada, $\alpha=0.34$ olup çatlak uzunluğu ise $\alpha=a/R$ bağıntısıyla 2,5 mm olarak bulunur. Böylece, kararsız çatlak yayılmasının başladığı nokta, a_0 ile a_1 arasında olduğu ve kritik çatlak uzunluğu belirlenmiştir. Bu durum, iç çentik çatlakının önünde gelişen FPZ nedeniyle SCB

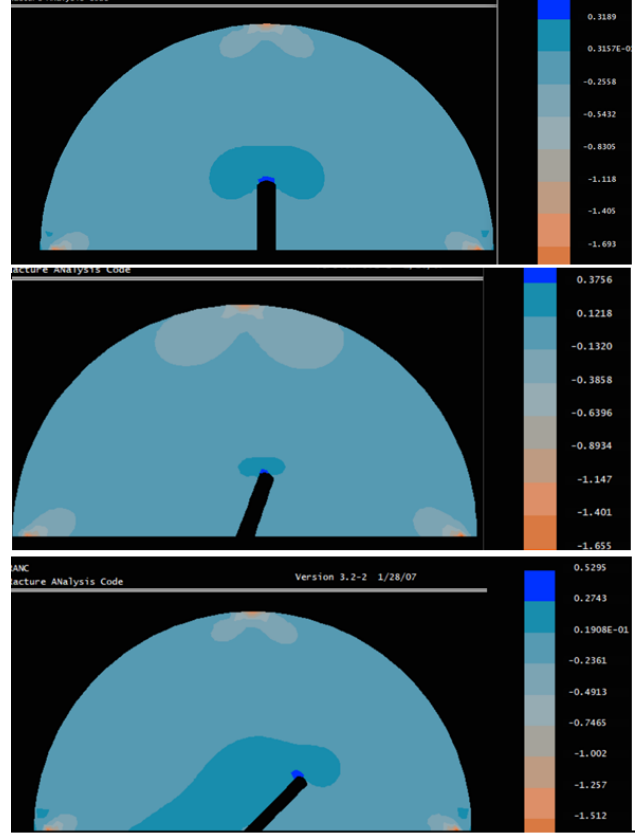
numunesindeki iç çentik çatlağının ucunda kararsız çatlak yayılımının başladığı anlamına gelir.



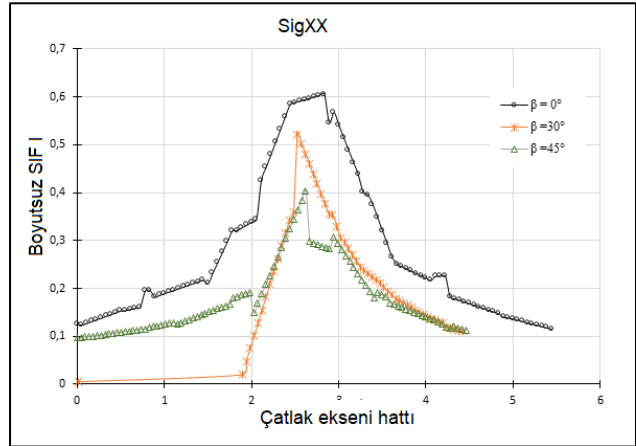
Şekil 8. SCB numunelerinde boyutsuz gerilim yoğunluğu katsayısı ve çatlak uzunluğu ilişkisi

3.2. Sayısal Analiz Sonuçları

İlk sayısal analizler, çatlak analizlerinden önce SCB numunesindeki çentik çatlakları etrafındaki gerilme dağılımının incelenmesi için yapıldı (Şekil 9). Genel olarak, yüksek çekme gerilimi konsantrasyonu bölgesinin, artan β ile çentik çatlağının merkezine doğru yer değiştirdiği bulundu. FRANC2D ileri işlem menüsü seçeneklerinden 'çizgisel sonuç' seçeneği ile grafiksel bir karşılaştırma olanağı yaratılarak elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Hem Şekil 9'daki renkli kontur gösteriminde hem de Şekil 10'daki grafik gösterimde görüldüğü gibi, maksimum çekme gerilimi $\beta = 0^\circ$ simülasyonları ile elde edilmiştir. Modellenen çatlağın mod I durumunda elde edilen maksimum SIF değerine benzer şekilde, maksimum SIF değerine yakın değerler karma mod I-II durumunda da ($\beta = 30^\circ$ ve $\beta = 45^\circ$) elde edildi (Şek.9, Şek.10). Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarına göre, $\beta = 30^\circ$ olduğunda hem çekme hem de kesme gerilmelerinin en yüksek değere sahip olup karma modlu kırılmanın elde edildiği sonucuna varılır. Elde edilen bulgularla, mod I için önerilen ASTM standardının AC malzemelerinin mod II kesme ve karma mod I-II mukavemetinin hesaplanmasında da kullanılabilirliği gösterilmiştir.



Şekil 9. SCB numunelerinde gelişen gerilme dağılımlarının FRANC2D sayısal analiz programı ile modellenmesi

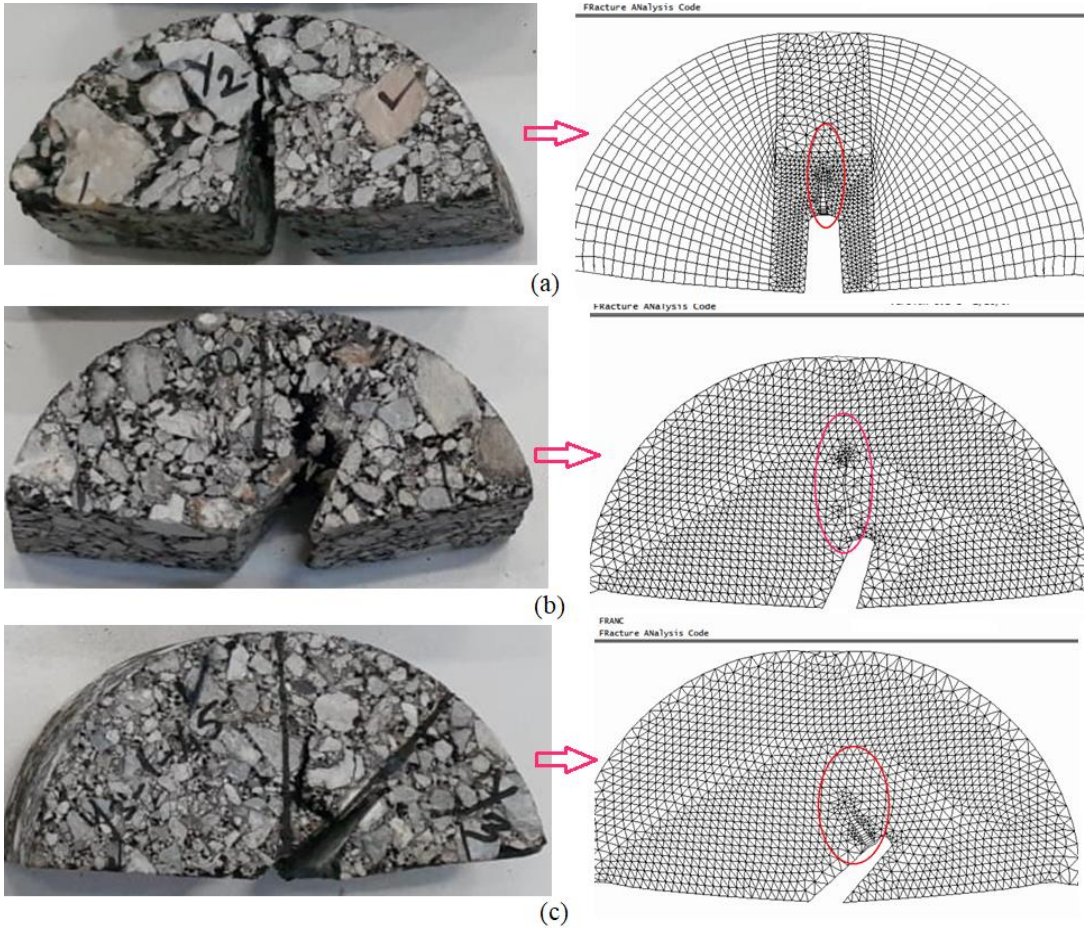


Şekil 10. Çatlak eğim açısı β ve SIF I ilişkisi

FRANC2D ile yapılan gerilme analizlerinden sonra çentik çatlak eğim açlarına bağlı olarak AC numunelerinin kırılma davranışını analiz etmek için çatlak analizleri yapıldı. FRANC2D programını diğer sayısal analiz programlarından ayıran en önemli özellik, her çatlak ilerleme adımında, çatlak ucunu çevreleyen ağ elemanlarının silinmesi ve oluşturulan çatlağı mevcut ağa bağlamak için ağın otomatik olarak yeniden oluşturulmasıdır (Şekil 11). SCB numunelerinde çentik çatlağının ucundaki FPZ'nin etkisi, heterojen ve elastoplastik olan kompozit malzemeler için çok daha

belirgindir. Bu nedenle, Kritik Çatlak Eşiği (CCT) analitik analizlerinde kritik SIF değerlerini bulmak için gerilme analizlerinde lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) modellenmesi kullanılırken, kohezif çatlak analizi için doğrusal olmayan elastik kırılma mekaniği (Non-LEFM:NEFM) modellenmesi yapılmıştır. Bu tip çatlak ilerleme davranışı 'kohezyonlu kırılma modeli' olarak tanımlanır [29-30]. Kırılma mekaniği alanında kohezif çatlak yaklaşımlarından biri olan Genelleştirilmiş Dugdale Modeli (GDM) (kohezif çatlak modeli olarak adlandırılır), sayısal analizlerde kohezif kırılmayı modellemek için kullanılır [29, 31-32]. FRANC2D'de var olan NEFM dinamik gevşeme analitik çözümü, GDM analizlerinde kullanılabilir olma özelliği ile programı kullanışlı ve sonuçların doğruluğunu yüksek düzeyde verir. FRANC2D ile yapılan NEFM sayısal modellemelerinde FPZ bölgesinin etkisini, doğrusal olmayan arayüz elemanlarına

sahip kohezif çatlak analizleri kullanılmıştır. FRANC2D ile yapılan sayısal çatlak modelleme sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. Daha önceki bölümde deneysel sonuçlarda verildiği gibi, başlangıç çatlak açısı, θ 'nın çatlak eğim açısı β 'ya oldukça bağlı olduğu sayısal analiz sonuçlarıyla da elde edilmiştir. Ayrıca, çatlak ilerleme yönü, yüklenme yönüne paralel bulunmuş ve deneysel bulgular ile sayısal analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 11'de verilen deneysel ve sayısal çatlak analizleri karşılaştırıldığında, çekme gerilmesi yoğunlaşma bölgesi ve yeni oluşacak çatlakın artan β açıları ile çatlak merkezine doğru yer değiştirdiği gözlenmiştir. Bu çalışma ile, AC gibi elastoplastik malzemelerle elde edilen kırılma deneylerinin sonuçları ile sayısal çatlak analiz sonuçları arasında literatürde ilk kez bu kadar uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

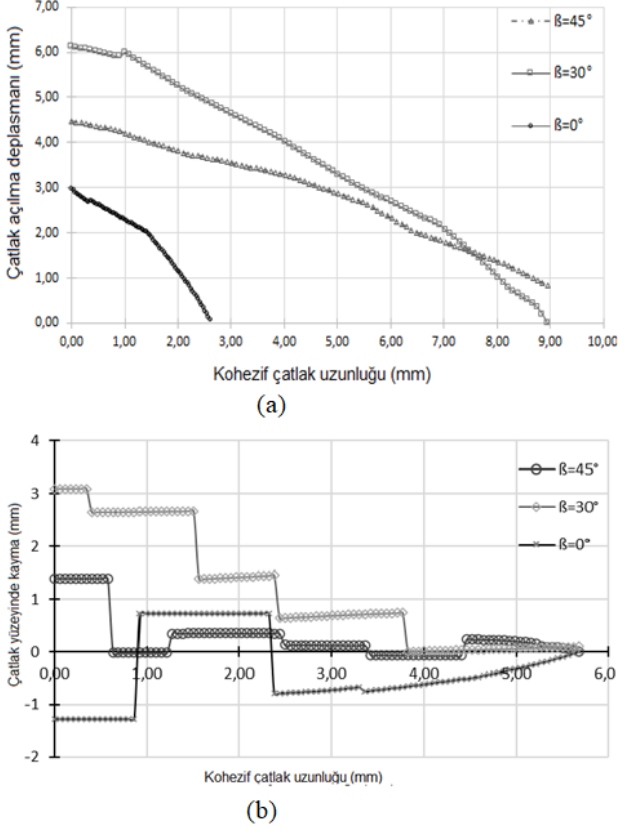


Şekil 11. FRANC2D ile çatlak modellenmesi ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Karma mod I-II kohezif çatlak uzunluğu ve çatlak yüzeylerinde kayma miktarı ilişkisi, farklı β değerleri için tespit edilmiş ve grafiksel olarak Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12b'de verilen grafiğin adımlı grafik şeklinde olmasının nedeni, her bir çatlak ilerleme adımının sayısal analizlerde otomatik değil ayrı ayrı yapılmasından

kaynaklanmaktadır. Her kohezyonlu çatlak ilerlemesi adımı çatlak yüzleri arasındaki kayma büyüklüğü, FRANC2D programının 'post-process' seçeneği ile elde edilmiştir. Bu grafiğe göre, ilerleyen çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. Daha önce gerilme analizlerinde de

gösterildiği gibi, en yüksek kesme gerilmesi yine 30° eğimli çatlak ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışma, ASTM tarafından sadece mod I için önerilen ASTM8044 test standardı geliştirilerek, AC malzemelerin karışık mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol gösterici olabilir.



Şekil 12. (b)Farklı β değerleri ile kohezif çatlak uzunluğu ve çatlak yüzeylerinde kayma miktarı ilişkisi

4. Bulgular ve Tartışma

Asfalt kaplamalarda meydana gelen kusurlar; deformasyonlar, matris-mineral ayrışmaları ve çatlaklar olmak üzere üç grupta özetlenmektedir. Literatürde deformasyonlar ve ayrışmalar ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır [1-3, 10-11, 15]. Bununla birlikte, literatürde asfalt kompozitlerde çatlaklanma ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır ve genellikle düşük sıcaklıklardaki gevrek asfalt kırılma koşulları içindir [1, 6, 8]. Ancak kırılma mekaniği prensiplerine göre, elastik ve elasto-plastik malzemelerde mikro çatlaklar ve önceden var olan yapısal kusurlar nedeniyle makro kırıklar ve deformasyonlar meydana gelir [26, 33]. Bu çatlaklar gerilme yoğunlaştırıcı gibi etkileri olduğundan ve malzemenin kırılma direnci üzerinde temel bir etkiye sahip olduğundan dolayı makro ölçekli deformasyonlara sebep olurlar. Asfalt kompozitler tük taşıma kapasitesi ve yüzey dayanımları açısından tanımlanan ve sınıflanan üstyapı

malzemelerinin işlevselliği, bu çatlak/kırılma özelliklerine oldukça bağlı olduğu açıktır. Asfalt, agregalar ve asfalt beton karışımları için özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası, gradasyon, özgül ağırlık, birim ağırlık, boşluk yüzdesi ve Los Angeles aşınma testi, su emme, yoğunluk, boşluk yüzdesi gibi birçok rutin testler vardır. Tüm bu testlerin yürütülmesinde ve yorumlanmasında birçok belirsizlik olmasına rağmen, bu testler ve yolların servis ömrü bir mühendisin sahip olabileceği en iyi rehberdir. Bu araştırma, ile özellikle bu testlerin amacı olan durabilite ve dayanıklılık mekanizmalarının temelinde yatan çatlak mekaniği prensiplerini ve bu alanda en önemli konulardan biri olan kırılma tokluğu parametresi ile asfalt araştırmalarındaki kritik çatlak oluşumları ve gerilim sertleşmesi konusu arasındaki ilişkinin araştırılması amaçlanmıştır. Fakat, sadece mod I (çekme) kırılma tokluğunun belirlenmesi için önerilen ASTM ve AASTO standartları dışında, karma mod I-II ve kesme mod II kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi için şu an var olan bir test yöntemi yoktur. Bu nedenle bu çalışmada ASTM tarafından önerilen ASTM D8044 standart testinin karma mod ve mod II kırılma dayanımı değerlerinin belirlenmesi için kullanılabilirliği hem deneysel hem de analitik ve sayısal analizlerle incelenmiştir.

Kararsız çatlak başlama (SCI) noktası ve kritik çatlak uzunluğu kırılma mekaniği Kritik Çatlak Eşiği (CCT) analitik çözümlenmesine dayalı olarak 2,5 mm olarak bulunduğu daha önceki kısımlarda Şekil 8'de verildi. Analitik analizle elde edilen 2,5 mm kritik çatlak uzunluğu değeri, deneysel olarak elde edilen ve Şekil 7'de verilen yük-COD eğrilerinde yenilmenin gerçekleştiği 2-2.5mm COD değeri ile oldukça uyumlu sonuçlardır. Elde edilen bu kritik çatlak uzunluğu değeri, literatürde 'Alt-kritik' (sub-critical) çatlaklar olarak adlandırılan kararlı çatlakların, 2-2.5mm COD değerine kadar duraylı olarak ilerleyecekleri ve kararsız çatlak ilerlemesini yani yenilmeyi başlatmak için bir araya gelecekleri anlamına gelir. Yük-COD grafiklerinin ve CCT analiz sonuçlarının uyumluluğu, AC araştırmalarında kırılma mekaniği alanının ne kadar gerekli olduğunu açıkça göstermektedir.

İleri kohezif çatlak analizleri ile her bir β açısı için, çatlak açıklığı ve kohezif çatlak uzunluğu arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 13'te verilmiştir. Sayısal analiz sonuçları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Kohezif çatlak ilerlemesi aynı zamanda oluşan FPZ bölgesinin boyutları hakkında bilgi verir ve en uzun kohezif çatlak uzunluğu 8-9 mm arasında $\beta=30^\circ$ ve 45° eğimli çatlaklarla elde edilmiştir (Şekil 12a). 30° ve 45° eğim açılarıyla modellenen çatlaklar beklendiği gibi karma mod I-II kırılmasına yol açtığı ve bu açılarla yapılan deneylerde malzemenin kırılmasında hem çekme hem de kesme gerilmelerinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna

karşın, mod I kırılma modu ($\beta=0^\circ$) sonuçlarına göre kohezif çatlak uzunluğu 2-3mm olarak bulunmuş ve bu sonuca göre FPZ bölgesi beklendiği gibi açılma modunda bir kırılmada en küçük boyutta olacaktır (Şekil 12a).

Bu çalışmanın ana amaçlarından biri AC malzemelerin kırılma özelliklerinin belirlenmesi ve AC araştırmaları için kırılma mekaniği ilkelerinden yararlanarak mod I için önerilen ASTM D8044 standardının karma mod I-II testleri için kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. SCB numuneleri üzerinde yapılan statik çapsal basma (indirekt/dolaylı çekme) testleri sonucunda elde edilen deneysel bulgulara göre, çentikli çatlakların 45° çatlak eğim açısına (β) kadar açıldığı tespit edilmiştir. AC numunelerinin mod I kırılma tokluğu (K_{IC}) değeri $0.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ bulunmuştur. Bununla birlikte, $\beta=30^\circ$ için mod II kırılma tokluğu (K_{IIC}) değeri $0.18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ve $\beta=45^\circ$ için mod II değeri ise $0,19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olarak bulunmuştur.

Bu araştırmada, gerilme dağılımı ve çatlak yayılma sayısal analizleri kırılma mekaniği programı FRANC2D kullanılarak yapıldı ve bu çalışma ile programın kırılma malzemeler yanında elasto-plastik malzemeler için de oldukça uygun olduğu anlaşılmıştır. Sayısal analizlerde gerilme analizlerinden sonra yapılan çatlak analizleri ile çatlak eğim açısı (β) değerleri ile çatlak yayılma yönünün çapsal yüklemeye yönüne paralel olduğu ve 'kanat çatlak' oluşumlarının hem deneysel hem de sayısal analizlerle tespit edilmesi literatürde ilk kez bu çalışma ile elde edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal analizlerde, yüksek çekme gerilmesi bölgesinin, artan β değerleri ile çentikli çatlakın merkezine doğru kaydığı gözlenmiştir. Böylece simülasyonlarda β arttığında çatlak başlangıç bölgesinin, çentikli çatlakın merkezine daha yakın bir bölgede olacağı anlaşılır. Bu bulgu hem deneysel hem de sayısal analizlerle doğrulanmıştır.

Kırılma mekaniğinde kararsız/kritik çatlak yayılımının başlangıcı, boyutsuz gerilme yoğunluğu faktörünün minimum olduğu yerdir ve bu çalışmada analitik analizlerde $Y_{min}^*=0,47$ 'ye eşit olduğunda, AC'nin mod I kırılma tokluğu değerinin $0,45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olduğu gösterilmiştir. $Y_{min}^*=0,47$ 'ye eşit olduğunda ise kritik çatlak uzunluğunun $2,5 \text{ mm}$ olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca analizlerde, kararsız çatlak yayılımının başladığı noktanın, a_0 ile a_1 arasında olduğu da tespit edilmiştir. Bu durum, iç çentik çatlakının önünde gelişen FPZ nedeniyle SCB numunesindeki iç çentik çatlakının ucunda kararsız çatlak yayılımının başladığı anlamına gelir. Elde edilen bu sonuç, LEFM prensiplerine göre kırılma mekaniği hipotezleri ile oldukça uyumludur.

5. Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı, AC malzemelerin karma mod I-II (çekme ve kesme) kırılmasını analiz etmek için ASTM D8044 standardının sadece mod I için değil karma modu test etmede uygulanabilirliğini araştırmaktır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre AC numunelerinin mod I (çekme) kırılma tokluğu (KIC) değerinin $0.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olduğu bulunmuştur. Öte yandan, $\beta=30^\circ$ için mod II kırılma tokluğu (KIIC) değeri $0.18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ve $\beta=45^\circ$ için mod II değeri ise $0,19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ olarak bulunmuştur.

CCT çatlak uzunluğu sayısal analizler ve analitik analizlerle 2-3 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuç, hem deneysel bulgular hem de CCT analitik analiz sonuçları ile uyumludur. FRANC2D analizlerinde kohezif çatlak yüzeyleri arasında en belirgin kayma 30° eğimli çatlak ile gözlenmiştir. AC numunelerinde 'kanat çatlak' büyümesi literatürde ilk kez hem deneysel hem de sayısal analizlerle bu çalışma ile elde edilmiştir. Elde edilen deneysel, analitik ve sayısal sonuçlara göre, bu çalışmanın sadece mod I için önerilen ASTM D8044 test standardının AC malzemelerin karma mod I-II kırılma tokluğunun belirlenmesi için yeni bir uluslararası standart çalışmalarına yol göstereceğine inanılmaktadır.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Yazar, bu araştırmada numune temininde yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Karayolları İzmir 2.Bölge Müdürlüğü ve Ar-Ge Başmühendisi Kanat Uğur Aydın Bey'e ve deneyler sırasında yardımcı olan İzmir Demokrasi Üniversitesi Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Kartal'a teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Li, X., Marasteanu, M.O., 2004. Evaluation of the Low Temperature Fracture Resistance of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Test, Journal of Asphalt Pavement Technology, 73, 401-426.

- [2] Kuruppu, M., Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P., Funatsu, T., 2014. ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 47, 267–274.
- [3] Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Hu, S., Lytton, R., 2019. A calibrated mechanics-based model for top-down cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 48, 102-112.
- [4] Wang, H., Wang, J., Chen, J.Q., 2014. Micromechanical Analysis of Asphalt Mixture Fracture with Adhesive and Cohesive Failure. *Engineering Fracture Mechanics*, 132, 104–119.
- [5] Zhang, Y., Luo, Z., Luo, R., Lytton, R., (2014). Crack initiation in asphalt mixtures under external compressive loads. *Construction and Building Materials*, 72, 94-103.
- [6] Ling, M., Zhang, Y., Kaseer, F., Martin, A.E., Lytton, R., 2020. Investigation of fracture behavior of asphalt mixture composite using energy-based approach. *Composites Part B: Engineering*, 181, 107324
- [7] Si, Z., Little, D.N., Lytton, R., 2002. Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (6), 461-470
- [8] Marasteanu, M.O., Dai, S., Labuz, J.F., Li, X., 2002. Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Board*, 1789, 191–199
- [9] Aliha, M.R.M., Fazaeli, H., Aghajani, S., Nejad, F.M., 2015 Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 95, 545–555
- [10] Aliha, M.R.M., Pour, P.J.H., 2020. Fracture resistance study for hot mix asphalt mixture under out of plane sliding mode. *Engineering Fracture Mechanics*, 238, 107230.
- [11] Mirsayar, M.M., Shi, X., Zollinger, D.G., 2017. Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen. *Engineering Solid Mechanics*, 65, 293–306
- [12] AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures, 4th ed.; American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 1993; pp. 1–640.
- [13] ASTM D8044, 2016. Standard Test Method For Evaluation Of Asphalt Mixture Cracking Resistance Using The Semi-Circular Bend Test (SCB) At Intermediate Temperatures.
- [14] Wagoner, M.P., Buttlar, W., Paulino, G.H., 2005. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental Mechanics*, 45(3), 270-277.
- [15] Li, C., Guo, J., (2019). Cracking simulation of asphalt concrete beam specimen using cohesive zone model. *Construction and Building Materials*, 214, 49-60.
- [16] Song, S.H., Wagoner, M.P., Pagulino, W., Buttlar, G., 2008. Crack opening displacement parameter in cohesive zone models: experiments and simulations in asphalt concrete fatigue. *Fracture of Engineering Materials and Structure*, 31 (10), 850-856.
- [17] Yin, A., Yang, X., Zeng, G., Gao, H., 2015. Experimental and numerical investigation of fracture behavior of asphalt mixture under direct shear loading. *Construction and Building Materials*, 86, 21–32.
- [18] Im, S., Ban, H., Kim, Y.R. 2014. Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry. *Construction and Building Materials*, 52, 413-421.
- [19] Ayetollahi, M.R. and Pirmohammad, S., 2013. Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes. *Structural Engineering Mechanics*, 45(1),19-32
- [20] NRC, 2004. Guide for mechanistic – empirical design of new and rehabilitated pavement structures. *Transportation Research Board, NCHRP 1-37A Final report*.
- [21] Sulaiman, S.J., Stock, A.F 199). The use of fracture mechanics for the evaluation of asphalt mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 64, 500-531
- [22] Shenoy, A., 2002. Stress relaxation can perturb and prevent physical hardening in a constrained binder at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 3, 87-94.
- [23] Erdogan, F., Sih, G.C., 1963. On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, *ASME Journal of Basic Engineering*, 10, 25–37
- [24] Al-Shayea N.N., 2005. Crack propagation trajectories for rocks under mixed mode I–II fracture. *Engineering Geology*, 81(1), 84-97

- [25] Evans, M., Hesp, S.A.M., 2011. Physical hardening effects on stress relaxation in asphalt cements and implications for pavement performance. *Transportation Research Records*, 2207, 34-42.
- [26] Saha, G., Biligiri, K.P., 2015. Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 142, 154-169.
- [27] Romero, P., Youtcheff, J., Stuart, K., 1999. Low-temperature physical hardening of hot-mix asphalt. *Transportation Research*, 1661, 22-26.
- [28] Atkinson, C., Smelser, R., Sanchez, J., 1982. Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *International Journal of Fracture*, 18, 279–291.
- [29] Dugdale D.S., (1960). Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100–104.
- [30] Barenblatt G.I., 1962. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55–129.
- [31] Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6 ,773-782.
- [32] Petersson, P.E., 1981. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, Report TVBM -1006/1-174, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden
- [33] Kim M, Hussein H., 1987. Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures. *Construction and Building Materials*, 11 (7-8), 403-411.



Beyin Tümörü Tanıları İçin YOLOv7 Algoritması Tabanlı Karar Destek Sistemi Tasarımı

Decision Support System Design Based on YOLOv7 Algorithm for Brain Tumor Diagnosis

Serhat YILMAZ^{1,*} ¹ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-9765-7225

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 16/01/2023

Kabul Tarihi : 08/06/2023

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
Evrimsel Sinir Ağı
Makine Öğrenmesi
Nesne Tespiti
You Only Look Once (YOLO)

Research Paper

Received Date : 16/01/2023

Accepted Date : 08/06/2023

Keywords

Deep Learning
Convolutional Neural Network (CNN)
Machine Learning
Object Tracking
You Only Look Once (YOLO)

Özet

Sağlık alanında derin öğrenme algoritmalarının karar destek sistemleriyle bağdaştırılması her geçen gün daha tutarlı teşhisler ve etkin tedavilerin önünü açmaktadır. Sağlık çalışanları, daha fazla veri, belge ve deneyim içeren karar verme modelleri ile etkileşime geçerek hızlı ve doğru kararlar alabilmektedir. Derin öğrenme modellerindeki gelişmelerle birlikte, imge ve video görüntülerinden doğru ve hızlı bir şekilde nesne tespiti için evrimsel sinir ağları gibi mimariler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Evrimsel sinir ağları üzerine inşa edilen nesne tespit modellerinde, eğitim aşamasından geçtikten sonra test aşamasında önce nesnenin tahmini yapılır ve belirlenen nesne çerçeve içine alınarak tespit aşaması tamamlanır. Bu çalışmada, YOLO algoritması kullanılarak beyin tümörlerinin ve konumlarının MR görüntüleri üzerinde tespiti hedeflenmiştir.

YOLOv7 ve YOLOv7-tiny algoritmaları üzerinde 3203 eğitim görüntüsü kullanılarak model eğitimleri tamamlanmıştır. Bunu, çok sayıda klinik deneyimin karar destek sistemine aktarılması olarak yorumlamak yanlış olmayacaktır. Model eğitim çıktılarının başarımı kesinlik, hatırlama ve F1 puanı gibi ölçütler açısından değerlendirilmiştir. Eğitim görüntüleri haricinde test ve doğrulama görüntüleri de oluşturulmuştur. Görüntüler "makesense.ai" kullanılarak etiketlenmiştir ve Google Colab üzerinden eğitimleri gerçekleştirilmiştir. Tespitlerde %97'lere varan doğruluklar elde edilmiştir. YOLO algoritmasının karar destek sistemlerinin doğruluğunu artırması farklı sağlık kurumlarındaki tanılar arasında tutarlılığı sağlayacak, kişisel kaynaklı tespit hatalarını en aza indireyecek ve izlenecek tedavi prosedürlerini olumlu yönde etkileyecektir.

Abstract

Associating deep learning algorithms with decision support systems in the field of health paves the way for more consistent diagnoses and effective treatments. Healthcare professionals can make fast and accurate decisions by interacting with decision-making models that contain more data, documents and experience. With the developments in deep learning models, architectures such as convolutional neural networks have been widely used for accurate and fast object detection from images and video images. In object detection models built on convolutional neural networks, after the training phase, first the object is estimated in the test phase, and the detection phase is completed by taking the determined object into the frame. In this study, it is aimed to detect brain tumors and their locations on MR images using the YOLO algorithm.

Model trainings were completed using 3203 training images on YOLOv7 and YOLOv7-tiny algorithms. It would not be wrong to interpret this as transferring a large number of clinical experiences to the decision support system. The performance of the model training outcomes was evaluated in terms of criteria such as precision, recall and F1 score. In addition to the training images, test and validation images were also created. Images are tagged using "makesense.ai" and trained via Google Colab. Accuracies up to 97% were obtained in the determinations. Increasing the accuracy of the decision support systems of the YOLO algorithm will ensure consistency between diagnoses in different health institutions, minimize personal-based detection errors and positively affect the treatment procedures to be followed.

1. Giriş

Beyin tümörleri, kafatası bölgesinde, beyin veya çevresindeki dokularda hücrelerin kontrolsüz bir şekilde

büyümesi olarak tanımlanır. Bu büyümenin kafatası içinde yol açtığı basınç artışına bağlı olarak şiddetli baş ağrısı, kusma ve bulantı gibi yaygın belirtiler görülebilir. Hasta hikayesi dinlenerek, şikayetler tümör semptomları ile örtüşüyorsa, yaygın bir tanı yöntemi olan bilgisayarlı tomografiye başvurulmalıdır [1]. Günümüzde gelişmekte

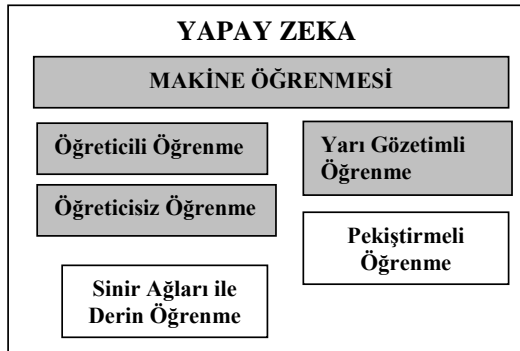
* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): serhaty@kocaeli.edu.tr



olan yapay zeka çalışmaları sağlık sektöründe de başarılı uygulama alanları bulmuştur. Bunlardan biri de hekimlerin işlerini kolaylaştıran, yanlışları en aza indiren ve tüm sağlık birimlerinde standart ve doğru teşhisler koyabilmeyi mümkün kılan karar destek sistemleridir [2]. Derin öğrenme, Yapay Sinir Ağlarının (YSA) gelişmiş bir alt dalıdır ve son yıllarda, Python, C ve C++ dilleri üzerine inşa edilen OpenCV, Tensorflow gibi kütüphanelerle kullanılarak nesne tespiti için bir makine öğrenmesi yöntemlerinden birisidir [3, 4]. YOLO modeli, CNN mimarisi üzerine kurulmuş bir yapıdır ve nesne tespiti konusunda tercih edilir. Bu model, algılanan nesnenin etrafında bir çerçeve çizerek nesneyi tanımlarken, aynı zamanda nesne tahmini yapabilir. YOLO algoritmasının gün geçtikçe daha kullanışlı ve daha etkin sürümleri çıkmaktadır [5]. Bu çalışmada tomografi görüntülerinin işlenmesi, YOLO algoritması kullanarak sınıflandırılması ve sonrasında yeni görüntüler üzerinde tümör tespiti yapmak hedeflenmiştir. Eğitim ve sınav süreçlerinde güncel sürümlerin içerdiği YOLOv7 ve YOLOv7-tiny algoritmaları üzerinde model eğitimleri tamamlanmıştır ve yüksek doğrulukta tümör tespiti yapabilen sonuçlar elde edilmiştir. Model eğitiminde 3203 görüntü kullanılmıştır. Eğitim görüntüleri haricinde test ve doğrulama görüntüleri de oluşturulmuştur. Görüntüler “makesense.ai” [6] kullanılarak etiketlenmiştir ve Google Colab [7] üzerinden eğitimleri gerçekleştirilmiştir.

2. Yöntem: Yapay Zeka

Yapay zeka; görme, duyma, öğrenme ve karar verme gibi insana özgü kabul ettiğimiz bir çok etkinliğin yazılımla yapılabilmesidir. Bu amaca erişmek için özellikle makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi yöntemler kullanılır (Şekil.1.) [8]. John McCarthy 1956 yılında Yapay Zekâ terimini kullanmıştır ve bu terim, zeki makine ve zeki bilgisayar programları yapma bilimini ve mühendisliğini ifade etmek için kullanılmıştır [9].



Şekil.1. Yapay zeka ve makine öğrenmesi kapsamları

2.1 Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi, yapay zekâ ve bilgisayar bilimleri alanında bir dal olarak, bir makinenin verileri kullanarak

öğrenme yeteneğini geliştirmeyi amaçlar. Bu öğrenme yeteneği sayesinde, bir makine öğrenmesi modeli, veri setinde görülen özellikleri kullanarak bir sınıflandırma görevinde doğruluğu artırabilir veya bir regresyon görevinde tahminleri daha doğru hale getirebilir. Örneğin, bir makine öğrenmesi modeli, veri setinde görülen resimleri kullanarak resimlerin ne olduğunu tahmin etmeye çalışabilir veya veri setinde bulunan müşteri verilerini kullanarak müşterilerin satın alma davranışlarını tahmin etmesi için eğitilebilir [10]. Böylece, makine öğrenmesi sayesinde bir makine karmaşık problemleri çözebilir ve tecrübe ederek o andaki ve gelecekteki durumlarda karar verme yeteneğini kazanır. Makine öğrenmesi; Öğreticili, Öğreticisiz, Yarı Gözetimli, Pekiştirmeli ve Derin Öğrenme olarak beşe ayrılabilir [10]. Makine öğrenmesi, günümüz teknolojisine adapte edilerek sayısal asistanlar, siber güvenlik uygulamaları, medikal görüntü analizi, sürücüsüz otomobiller gibi birçok alanda kullanılır. Teknolojiye ulaşma maliyetinin azalmasıyla birlikte, makine öğrenmesi günlük yaşamımızla daha da yakınlaşacaktır.

2.2 Derin Öğrenme

Derin öğrenme, makine öğrenimi yöntemlerinden biridir ve yapay sinir ağları (YSA) tabanlıdır. Bu yöntemler, gerçekçi veri kümelerinden çok sayıda özellik çıkarır ve bu özellikleri kullanarak yüksek doğruluk oranlarına ulaşmayı amaçlar. Derin öğrenme yöntemleri, özellik çıkarma işlemlerini birden fazla katman halinde gerçekleştirir. Bu katmanlar arasında veri taşınır ve her bir katman önceki katmanlardan öğrendiği bilgileri kullanarak daha derin bir anlam çıkarmaya çalışır. Bu sayede, derin öğrenme yöntemleri gerçekçi veri kümelerinde oldukça iyi performans gösterir ve bu nedenle görüntü tanıma, ses tanıma ve metin üzerinde dil işleme gibi alanlarda kullanılır [11].

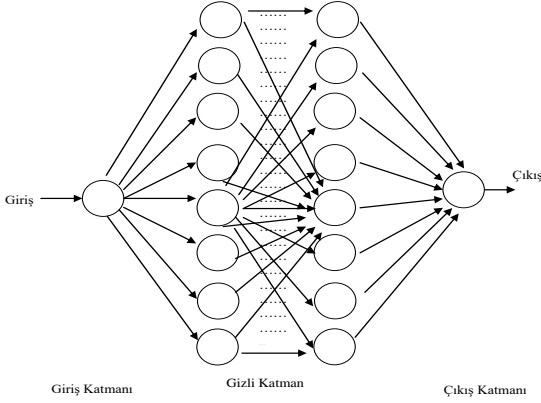
2.3. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları, gerçek sinir sistemlerinden esinlenilerek geliştirilmiş, yinelemeli olarak parametrelerini güncelleyen (öğrenen), öğrendiği örüntü hakkında tahminlerde bulunabilen, birbiriyle bağlantılı çok sayıda işlem biriminin oluşturduğu bir veri işleme yapısıdır [12]. Yapay sinir ağları, girdi verilerini ağırlıklı katmanları aracılığıyla işler ve çıktı verilerini üretir [13]. Her bir işlem biriminin çıkışı, önceki katmandan gelen ağırlıklı girişlerin (u_i) ve eşik değerinin (θ) toplamının (S) (Denklem.1) bir aktivasyon fonksiyonundan (ψ) geçirilerek bulunur [14]. Burada

$$S = w_1u_1 + w_2u_2 + \dots + w_nu_n - \theta = \left(\sum_{i=1}^n w_iu_i \right) - \theta \quad (1)$$

Bir yapay sinir ağı tasarlarlarken, amaç en uygun çıktı sonucunu verecek w ve θ değerlerini belirlemektir. Bu

değerler, ağın performansını belirleyecek ve en iyi sonuçları elde etmemize yardımcı olacaktır. Bu işlem birimleri giriş, gizli ve çıkış katmalarına yerleştirilerek w ağırlıkları ile birbirine bağlanır (Şekil.2). Veri akışı ileri yöndedir. Parametre güncellemeleri için ise geriye yayılım algoritmaları gibi optimizasyon yöntemlerine başvurulur.



Şekil.2. Çok katmanlı bir YSA yapısı [15]

2.4. YSA'da Evrişim Kavramı

Bu işlemin görevi bir filtre aracılığı ile imgenin boyutlarını küçültmek ve her katman için öznelik haritası oluşturmaktır. Bir katmandaki harita, imgenin içindeki belirli bir özelliğe odaklanırken, diğeri kenar bulmayı hedefleyebilir. Şekil.3'te, 3x3'lük filtre, 6x6 boyutundaki imge ile kaydırılarak çarpılmıştır. Böylece 4x4 boyutunda öznelik matrisi elde edilmiştir [16].

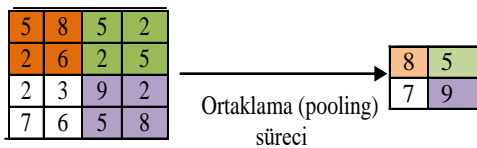
$$\begin{bmatrix} 6 & 3 & 3 & 4 & 5 & 2 \\ 4 & 5 & 4 & 8 & 2 & 5 \\ 2 & 1 & 1 & 4 & 5 & 8 \\ 7 & 7 & 6 & 5 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 2 & 6 & 8 & 2 \\ 7 & 6 & 4 & 3 & 5 & 8 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 3 & 2 \\ 7 & 6 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & -7 & -4 & 1 \\ 2 & -4 & 0 & -1 \\ 2 & -4 & -8 & 0 \\ 4 & 2 & -5 & -1 \end{bmatrix}$$

6x6 Giriş Matrisi 3x3 Filtre Öznelik Matrisi

Şekil.3. Evrişim katmanında giriş görüntüsüne filtre uygulanması [17]

2.5. YSA'da Pooling (Ortaklama) Kavramı

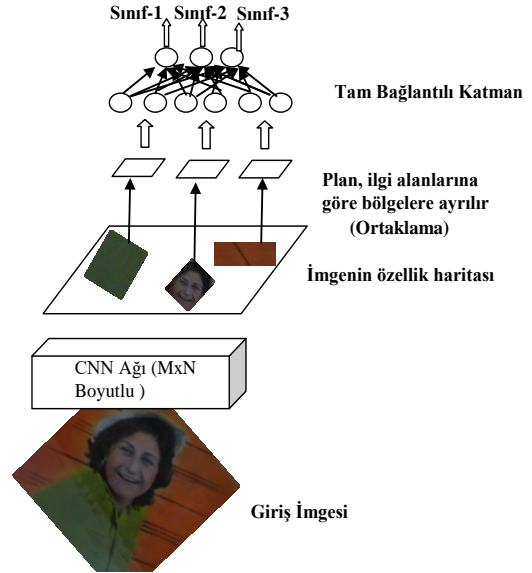
Evrişimsel YSA katmanlarından biridir ve filtre tarafından taranan imgenin boyutunu, imge matrisindeki en büyük (Şekil.4), ortalama veya toplam değeri, o bölgeyi temsil eden tek değer olarak seçerek, en az kayıpla küçültmeyi hedefler [18].



Şekil.4. İmge matrisindeki en büyük değerlerin 2x2'lik filtre ile ortaklanması [18]

2.6. Evrişimsel Sinir Ağı (CNN) Modelleri

Yann Lecun, 1998 yılında geri yayılım (back propagation) temelli öğrenme işlemine dayalı evrişimsel sinir ağları modelini ilk kez ortaya çıkarmıştır. AlexNet'in 2012 yılındaki ImageNet verileri üzerinde gerçekleştirilen bir yarışmada, verileri CPU yerine GPU tabanlı olarak eğitmesi evrişimsel sinir ağları alanında çalışanlar için büyük ilham kaynağı olmuştur.



Şekil.5. Fast R-CNN mimarisi [21]

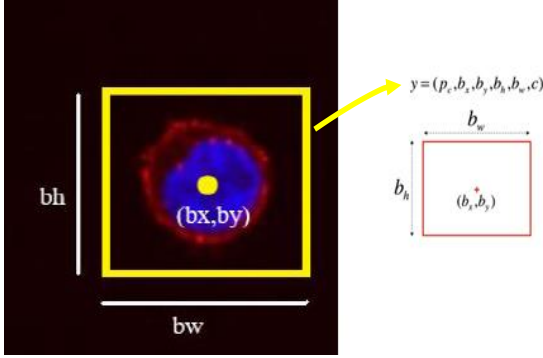
Son dönemlerde, evrişimsel sinir ağları mimarileri arasında bir çok yöntem kabul görmüştür. Seçici arama yöntemi ile görüntüyü nesne olabilecek çok sayıda bölgeye ayırıp, tespit edilen nesnelere sınıflara ayıran Bölgesel CNN (R-CNN) yöntemi bunlardan biridir [19]. Bunu, eğitim ve tespit süresini hızlandıran Fast ve Faster R-CNN yöntemleri (Şekil.5.) izlemiştir [20,21].

İşlemleri hızlandırmak için, imgenin özellik haritası çıkarıldıktan sonra, olası nesne bölgeleri tespit edilir, maskeleme yapılır ve sadece bu bölgelere ortaklama işlemi yapılır. Bu yöntem Mask R-CNN adı verilir [22]. Olasılık olarak bir nesne içeren bölgeler belirlenir. Bu bölgeleri belirlemek için (Region Proposal Network: RPN) kullanılır ve daha sonra bölgesel önerilerde havuzlama işlemi uygulanır.

2.7 You Only Look Once (YOLO) Algoritması

Diğer algoritmalar imge üzerindeki nesnelere tespit etmek için görselin tamamını kullanırken, YOLO görseli parçalara böler ve bu alanlardaki nesnelere bulunduğu kutuları çizer. Bu kutulara "sınırlayıcı kutu" (bounding box) denir ve her alan nesnenin orada bulunma ihtimalini hesaplar. Ayrıca, bu ihtimaller için "Güven Skoru" adı verilen bir ölçüt de hesaplanır, bu skor nesnenin sınırlayıcı

kutuda yer alan yüzdesiyle eğitilen nesnelere arasındaki benzerlik oranını gösterir. YOLO, görseli tek seferde sinir ağından geçirir, bu da işlemin daha hızlı gerçekleştirilmesini sağlar. Sınırlayıcı kutular 3x3, 5x5, 7x7 gibi farklı boyutlarda olabilir ve nesnenin olup olmadığını tespit etmek için oluşturulurlar. Daha sonra, nesne kutu içerisindeyse, orta noktasının kutunun içinde olup olmadığına bakılır. YOLO, sınırlayıcı kutular için tek tek değerlendirme vektörü oluşturur ve bu vektörlerin uzunluk, yükseklik ve ait olduğu sınıfı belirler.



Şekil 6. Sınırlayıcı kutu örneği [23]

Şekil 6'daki görüntüde, bir nesnenin tespit edildiği kutu y vektörü ile gösterilmiştir [23]. Bu vektörün parametreleri aşağıdaki gibidir:

p : Güven skorunu ifade eder ve nesnenin tahmin ettiği nesneyle eşleşme yüzdesini gösterir.

b_x : Nesnenin merkez noktasının x koordinatını verir.

b_y : Nesnenin merkez noktasının y koordinatını verir.

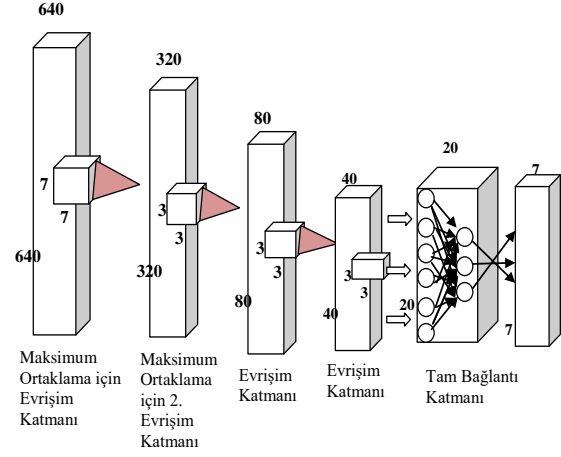
b_h : Nesnenin genişliğini gösterir.

b_w : Nesnenin yüksekliğini gösterir.

c : Bağlı Sınıf Olasılığı, eğitimde kaç tane sınıf var ise o miktarda tahmin değerini gösterir.

Güven skoru, bağlı sınıf olasılığı ile "kutu güven skoru" olarak adlandırılan tahminin çarpımıyla hesaplanır.

Anlatılan işlemler, bir nesnenin sınırlayıcı kutusunda bulunduğu durumda yapılır. Eğer birden fazla nesnenin bulunduğu bir kutu durumu ile karşılaşırsa, bu durum "çapa kutusu" yöntemiyle çözülür ve her nesne için ayrı kutular oluşturulur. Bu kutular için yukarıda açıklanan değerler hesaplanır ve bu hesaplamada "IoU" (Intersection over Union) kullanılır [23]. Gereksiz kutuların ortaya çıkmasını önlemek için, "Maksimum Olmayanı Bastırma" (Non Max Suppression) algoritması da eklenir. Bu algoritma, ilk hesaplamada düşük güven skoru olan kutuları iptal eder ve sonuç olarak en yüksek güven skoru olan kutuları vermek hedeflenir. YOLO mimarisi, Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 7 YOLO mimarisi [24]

Algoritma temel olarak, giriş imgesini bölgelere ayırır. Güven puanı düşük olan çerçeveler, nesne olmadığı varsayılarak elenir. İmgenin boyutu bir filtre ile yüksek seviyeli ortaklama evrişim katmanlarından geçirilerek küçültür.

2.8. YOLOv7

YOLOv7, görüntülerdeki nesnelere tespit etme ve sınıflandırma için tasarlanmıştır, önceki YOLO sürümlerinden daha hızlı ve daha doğru sonuçlar veren görüntü tanıma algoritmalarından biridir.

YOLOv7, etkili bir özellik bütünleştirme yöntemine, daha doğru bir nesne algılama başarımına ve artırılmış etiket atama ve model eğitim verimliliğine sahip olması nedeniyle hızlı ve güçlü bir ağ mimarisine sahiptir. Diğer derin öğrenme modellerine göre çok daha az bilgi işlem donanımı gerektirmesi ve önceden eğitilmiş ağırlıklar olmadan bile küçük veri kümeleriyle hızlı bir şekilde eğitilebilmesi, YOLOv7'nin daha etkin bir model olmasını sağlamaktadır [25]

Nesne takip algoritmalarının genel olarak imgeyi bölgelere ayırıp, nesne bulunan olası bölgeleri seçip, her bölgeye ayrı ayrı sınıflandırma işlemi yapmaları işlem yükünü artırmaktadır. YOLOv7, imgeyi tek seferde Evrişimsel YSA'dan geçirip grup normalizasyonu yapar. Bu da 5 FPS'den 160 FPS'ye kadar değişebilen bir çerçeve işleme hızı kazandırır [26].

3. MR Görüntülemelerinde Beyin Tümörü'nün Segmentasyonu ve Tespiti

Beyin tümörü, kontrolsüz bir şekilde büyüyen ve beyin dokusuna saldıran kanser hücrelerinin yol açtığı bir hastalık türüdür. Beyin tümörleri iyi huylu ve kötü huylu tümörlerden oluşur. Kötü huylu beyin tümörleri genellikle etrafını saran yağın eşlik ettiği kan pıhtıları şeklindedir [27]. Beyin MR görüntülerinin segmentasyonu, beyindeki anatomik yapıların ölçümü ve görselleştirilmesinde, beyin tümörlerinin incelenmesinde ve bu bilgiler doğrultusunda

yapılacak cerrahi planlamalarda önemli rol oynar. Karşılaştırılabilir araştırmalarla, anizotropik filtreler, beklenti maksimizasyonu (EM) sıvı inceltmeli inversiyon iyileştirme gibi çeşitli yöntem ve tekniklerin birleştirilmesiyle 2 boyutlu (2D) ve 3 boyutlu (3D) beyin MR görüntülerinin iyileştirilmesi tümörün daha iyi segmentasyonu ve saptanması sağlanabilir. Burada başarımlar ölçütleri, segmentasyonun doğruluğu, hassasiyeti ve özgüllüğünün doğru belirlenmesidir [28].

4. YOLOv7 Yöntemi ile Beyin Tümör Tanısı için Karar Destek Sistemi Modelinin Hazırlanması ve Eğitilmesi

Modelin hazırlanması, eğitilmesi ve izlenen adımlar Şekil.8'deki akış şemasında sunulmaktadır. Eğitim sürecinin tamamı üç başlıkta toplanabilir. Bunlar veri seti hazırlama, modelin eğitilmesi ve eğitilen modelin sınanmasıdır.

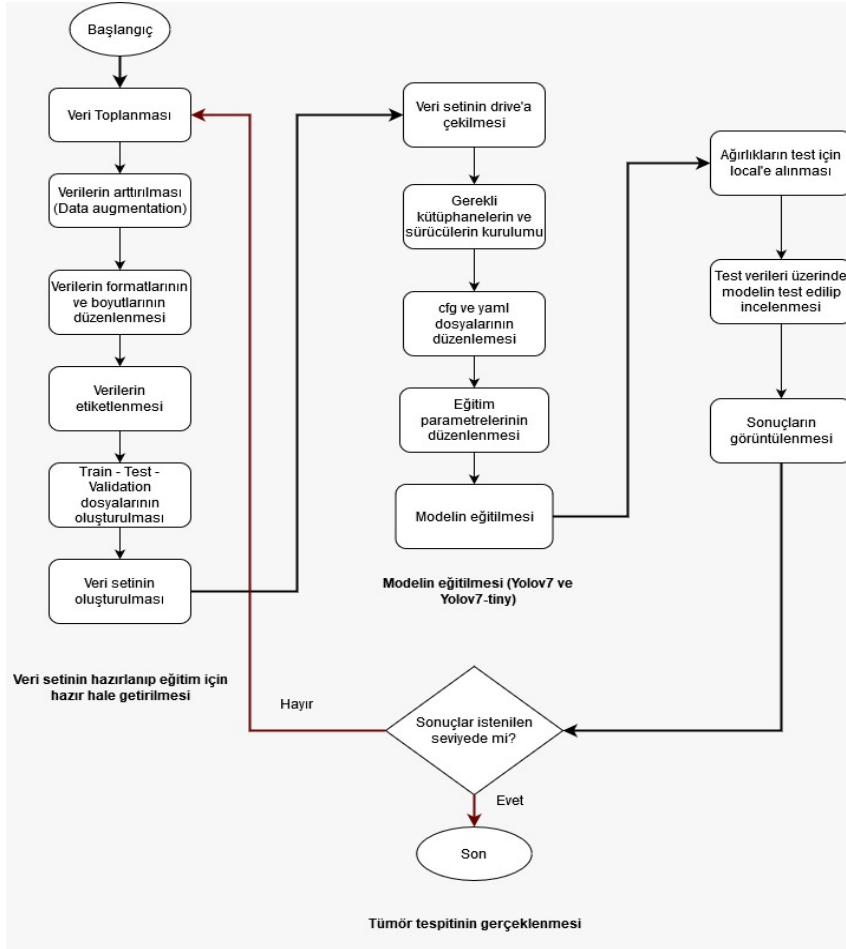
4.1 Veri Seti

The Image Data Resource (IDR) gibi kaynaklar, tıp alanında elde edilmiş yüksek çözünürlüklü görüntü verilerini erişim ve akademik çalışmalarda kullanıma

açmaktadır [29]. Eğitim modelimiz için 3203 tane tümörlü beyin MR görüntüsü toplanmıştır. Eğitim verileri kaggle ve github linklerinde paylaşılan veri setlerinden alınmıştır [30-33]. Ayrıca test için 110, doğrulama için 87 görüntü kullanılmıştır (Şekil.8). Veri setimizdeki görüntülerin çözünürlüğü ne kadar iyiyse doğru orantılı bir şekilde nesne tespitinde başarı oranı da iyi olacaktır. Daha sonra etiketleme işlemi için online etiketleme aracı olan "makesense.ai" [6] kullanılmıştır. Buradan her bir görüntü için etiketin değerlerini yazan .txt formatında dosya elde edilir. Bu değerlerden ilki etiketlenen görüntünün sınıfını belirtir. İkinci değer nesnenin merkez noktasının apsisini verir. Üçüncü değer nesnenin merkez noktasının ordinat değeridir.

Dördüncü değer nesnenin genişliğinin apsisi değerini, son değer ise nesnenin genişliğinin ordinat değerini gösterir. Aşağıda, etiketlenmiş veriye ait değerlerin .txt formatında yazım örneği verilmiştir.

```
tumorBrain2.txt - Notepad
File Edit Format View Help
0 0.825125 0.340674 0.289000 0.246114
```



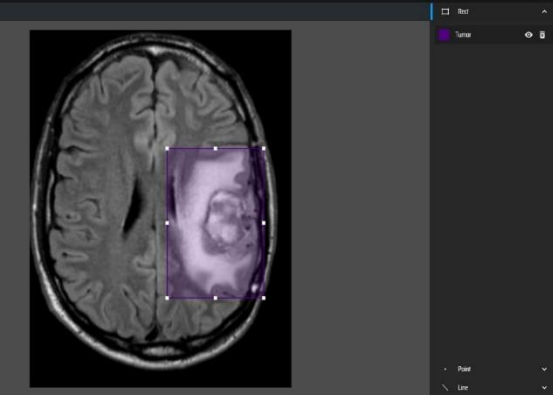
Şekil 8. Eğitime ait akış şeması

MR görüntüsü içindeki sınırları belirli bir kitle, sınırlayıcı çerçeve içine alınmaktadır. Çerçeve merkezinin koordinatları kitle içinde ise burada bir kitle olduğu belirlenmiş olur. Çerçeve merkezinin koordinatları kitleye göre hesaplanır. Ancak yükseklik ve genişliği tüm görüntünün boyutları tarafından belirlenir. Ağın ileri doğru yayılma işlemleri sonucunda YOLO algoritması kitlenin belirli bir sınıfa (burada genel anlamda tümör olarak sınıflandırılmıştır) girme olasılığını puanlandırır (Denklem.2).

$$\text{Puan}_{c,i} = p_c \times S_i \quad (2)$$

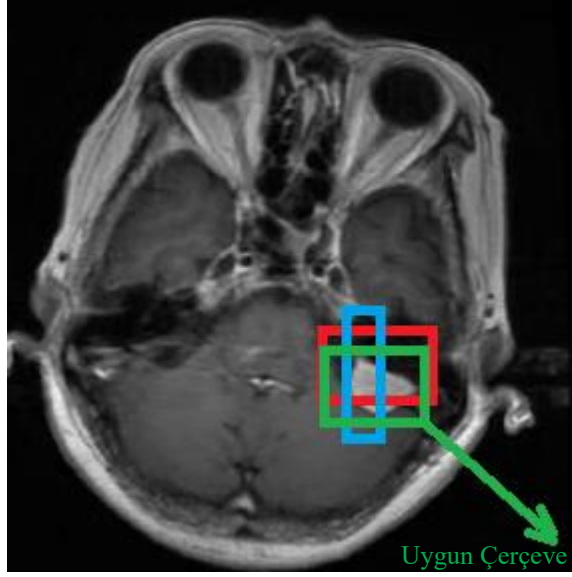
Burada p_c çerçevenin tümör olasılığı, S_i ise sınıf numarasıdır. İçlerinden en yüksek olasılığa sahip olan sınıf seçilir ve puan değeri çerçeve üzerine atanır. Tüm çerçeveler için aynı işlem yapılır.

Denklem 2'de sınıf olasılığı hesapladıktan sonra görüntü üzerinde etiketleme yapılır. Algoritma için etiketleme süreci YOLO Modelinin bu nesnelere tanımlaması ve sınıflandırması için görüntüdeki belirli bölgeleri veya nesnelere işaretleme veya açıklama ekleme işlemleridir [23]. Şekil.9'da verilerin etiketlenmiş bir görüntüsü örnek olarak verilmiştir.



Şekil 9. Etiketlenmiş veri görüntüsü

Etiketlemede, en yüksek olasılığa sahip sınıf belirli bir çerçeveye atanır. Görüntüdeki tüm çerçeveler için aynı işlem gerçekleşir (Şekil.10).



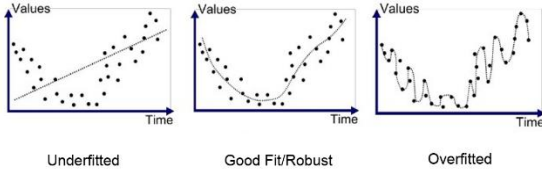
Şekil.10. Oluşan Sınırlayıcı Çerçeveler

Bunu aşmak için maksimum olmayı bastırma yöntemi ile güven skoru en yüksek olan çerçeve ile önceden bir IoU (birlik üzerinden kesişme) oluşturarak birbirlerine çok yakın olan bu sınırlayıcı çerçeveler ortadan kaldırılır (Denklem.3) [23].

$$\text{IoU} = \frac{\text{Örtüşen Alan}}{\text{Birleşik Alan}} \quad (3)$$

En yüksek güven skoruna sahip çerçeve için ve tüm sınırlayıcı çerçeveler için IoU değeri hesaplanır, ardından IoU değerleri eşikten büyük olan sınırlayıcı çerçeveler, aynı nesneyi içerdiği ancak güven skoru düşük olduğu için atılır.

Derin öğrenme eğitim modelleri için veri setinin büyüklüğü ve çeşitliliği önemli bir unsurdur. Gerçekte karşılaşılabilecek durumlar göz önünde bulundurularak veri seti oluşturulmalıdır. Bu durum dikkate alınmaz ise modelin eğitimi aşırı öğrenme (overfitting) durumuna girebilir. Aşırı öğrenme, modelin eğitim verileri üzerinde keskin bir sonuca sahip olup test verilerinde aynı doğrulukta sonuçlar vermemesi durumudur. Kısaca eğitim verileri üzerinden modelin ezber yaptığı istenmeyen bir durumdur. Ek olarak aşırı öğrenmenin aksine, bir model yetersiz öğrenmeye sahipse (underfitting), modelin eğitim verilerine uymadığı, bu nedenle verilerdeki genel eğilimi kaçırdığı anlamına gelir. Yetersiz öğrenme sorunu olan modellerde hem eğitim hem de test veri setinde hata oranı yüksektir. Şekil.11'de bir modelin aşırı öğrenmiş, yetersiz öğrenmiş ve iyi öğrenmiş örnekleri verilmiştir.



Şekil 11. Modelin yetersiz öğrenmiş, iyi öğrenmiş ve aşırı öğrenmiş örnek grafikleri [34]

Çözüm olarak izlenebilecek yöntemlerden bir tanesi transfer öğrenme algoritmasıdır. Başka bir metot ise veri artırma (Data Augmentation) yolunun izlenmesidir. Veri artırma, mevcut verilerden yeni veriler üreterek veri miktarını yapay olarak artırma işlemidir. Bu işlem, veri kümesini genişletmek için orijinal verilerin gizli alanında yeni veri noktaları oluşturmak için verilere küçük değişiklikler eklemeyi veya makine öğrenimi modellerini kullanmayı içerir. Artırılmış veri ile yapay veri arasındaki farkı şu şekilde açıklayabiliriz:

- Yapay veriler: Gerçek verilerle doğrudan bir bağlantısı olmadan bilgisayar algoritmaları tarafından rastgele veya bir kurala dayalı olarak üretilen yapay verilerdir.
- Artırılmış veriler: Eğitim setinin çeşitliliğini artırmak için bir tür küçük geometrik dönüşümlerle (çevirme, öteleme, döndürme veya gürültü eklemesi gibi) orijinal görüntülerden türetilmiştir.

Giriş görüntüleri 416x416 boyutunda bir ağa dahil edilmektedir. Kapasitenin üstündeki giriş boyutları eğitim sırasında hatalara yol açıp hiç başlamaması ya da yarım kalmasına yol açabilmektedir.

4.2. Modellerin Eğitim Çıktıları

Başarım parametrelerinin oluşturulmasında karışıklık matrisine (confusion matrix) ihtiyaç duyulur. Matrisi oluşturabilmek için bilinmesi gereken dört değer vardır. Bunlar:

- True Positive (TP): Nesnenin gerçekte var olduğu ve tahminin de nesne algıladığı durum (1-1).
- True Negative (TN): Nesnenin gerçekte var olmadığı ve tahminin de nesne algılamadığı durum (0-0).
- False Positive (FP): Nesnenin gerçekte var olmadığı ancak tahminin nesne algıladığı durum (0-1).
- False Negative (FN): Nesnenin gerçekte var olduğu ancak tahminin nesne algılamadığı durumdur (1-0).

Karışıklık matrisi kullanılarak elde edilen sonuçlardan yararlanarak YOLOv7-tiny algoritmasında başarımları hesaplanır. Bunlar sırasıyla Kesinlik, Hatırlama ve F1 puamıdır.

Kesinlik (Precision): Görüntüde belirtilen tümörlerin kaçının gerçekte mevcut olduğunu belirleyen ölçüttür. Yine 0 ile 1 arasında değerler alır ve değer ne kadar yüksek

olursa tespitin doğruluğu o kadar kesindir. Denklem(4) yardımıyla hesaplanmaktadır [35].

$$TP/(TP + FP) \quad (4)$$

Hatırlama (Recall): Görüntüde gerçekte mevcut olan tümörlerin kaçının tahmin edildiğini ölçen ölçüttür. 0 ile 1 arasında değerler alır ve değer ne kadar yüksek olursa o kadar iyidir. Bu ölçüt aynı zamanda doğruluk oranı olarak da adlandırılır. Denklem.5 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$TP/(TP + FN) \quad (5)$$

F1 Puanı: Modelin başarımını daha iyi değerlendirebilmek için, farklı modellerle karşılaştırma yapılır. Ancak hassasiyet ve kesinlik üzerinden yapılacak karşılaştırmalar zor olabilir. Örneğin bir modelin kesinliği yüksek olabilirken diğerinin hassasiyeti yüksek olabilir. Bu durumda karşılaştırma yapmak zor olabilir. Bu nedenle, seçim yaparken tek bir F1 değerinden yararlanılabilir. Çünkü F1 yüksekse, diğer iki değer de yüksek çıkacaktır.

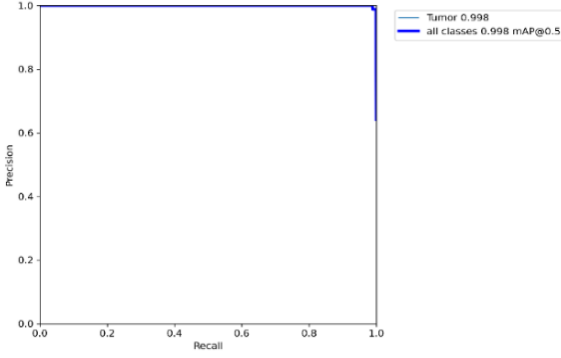
F1 puanı, Hatırlama ve Kesinlik değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Harmonik ortalama, sadece ortalamanın alınması yerine, iki değer çarpımının logaritmasının alınması suretiyle hesaplanır. Bu, hassasiyet değeri 1 ve kesinlik değeri 0 olan bir model için F1 puanı 0.5 olması gibi uç durumların değerlendirilmesinde yanlıcı etkileri ortadan kaldırır. F1 puanı, Denklem(6) kullanılarak hesaplanır.

$$F1 = \frac{2 \cdot \text{Kesinlik(Precision)} \times \text{Hatırlama(Recall)}}{\text{Kesinlik(Precision)} + \text{Hatırlama(Recall)}} \quad (6)$$

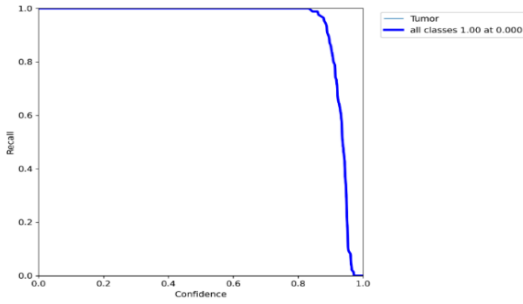
5. Sonuçlar

Bu çalışmada beyin MR görüntüleri üzerinden tümör tespiti yapmaya yönelik bir karar destek sistemi modeli ve bunun için gerekli algoritmalar tasarlanmıştır. Model eğitimleri YOLOv7 ve YOLOv7-tiny algoritmaları üzerinde yapılmıştır. Eğitim sürecinde 3203 görüntü kullanılmıştır. Eğitim görüntüleri haricinde test ve doğrulama görüntüleri de oluşturulmuştur. Test için 110, doğrulama için 87 görüntü kullanılmıştır. Görüntüler “makesense.ai” kullanılarak etiketlenmiştir ve Google Colab üzerinden eğitimleri gerçekleştirilmiştir.

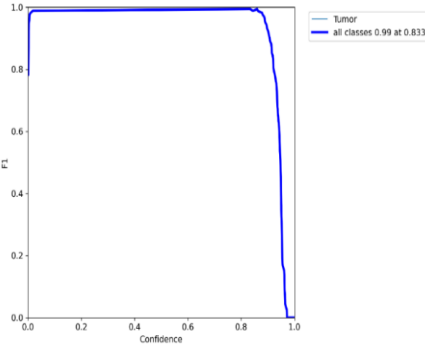
YOLOv7-tiny algoritması ile elde edilen Kesinlik, Hatırlama ve F1 skorları yüksek oranda güvenilir tespitler yapıldığını göstermektedir (Şekil.12).



a) Kesinlik Grafiği



b) Hatırlama Grafiği

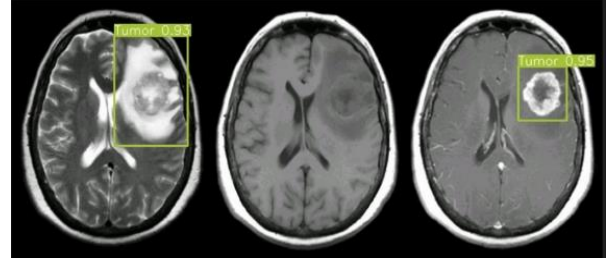


c) F1 Skor Grafiği

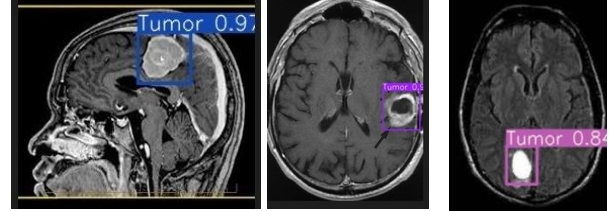
Şekil.12. YOLOv7-tiny için elde edilen Kesinlik, Hatırlama ve F1 grafikleri

Derin öğrenme yöntemi, problemlerin kullanıcıdan bağımsız olarak çok katmanlı bir yapay sinir ağı aracılığıyla çözülmesini sağlayabilmek için yeterli miktarda verinin kullanılmasını gerektirmektedir. Burada 1.0, %100 güvenilirliğe karşılık gelmektedir.

Eğitim sonrasında, önerdiğimiz modele, eğitim setinde kullanılmamış gerçek beyin MR görüntülerinden oluşan 3 test imgesi sorulmuştur. Karar destek modeli, ilk test verisinde tümörü %93 kesinlikle diğer dokulardan ayırmış ve tespit etmiştir (Şekil.13.a).



a) Birinci Test



b) İkinci Test

c) Üçüncü Test

d) Dördüncü Test

Şekil 13. Birinci Test Sonucu

Benzer şekilde farklı kesitlerde ikinci, üçüncü ve dördüncü test verilerinde bulunan farklı tümörleri sırasıyla %97 (Şekil.13.b), %90 (Şekil.13.c) ve %84 (Şekil.13.d) kesinlikle tespit etmiştir.

Yapay zeka yöntemleri her ne kadar 1990'lı yıllarda tıbbi alanında kullanılmış olsa da genelde başarısız olmuştur. Bu, o dönemde henüz yeterince gelişmemiş bilgisayar donanım ve yazılım ve yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Günümüzde, gelişmiş donanımlar ve modeller sayesinde yapay zeka, sağlık alanına da entegre edilmektedir.

Bu, insan sağlığı açısından hataları azaltıp daha iyi sonuçlar elde etme amacıyla karar destek sistemleri olarak kullanılmaktadır. Doğruluğu yüksek karar destek sistemleri insan sağlığını ilgilendiren hataları azaltmakta ve sağlık kuruluşları arasındaki teşhis ve bu teşhislere yönelik olarak karar verilen tedavilerde oluşabilecek farklılıkları en aza indirmektedir.

Teşekkür

Çalışmada bana destek olan Mehmet Burak ŞEN ve Mehmet Akif ŞEKKELİ'ye katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Oğuz N., İlnem C., Yener F., 2005. Beyin Tümörlerin Neden Olduğu Psikiyatrik Tablolar: İki Olgu Sunumu. Klinik Psikofarmakoloji Bulteni, 15(1), 18-21.
- [2] Tang R., Zhu Z., Yao H., Li Y., Sun X., Hu H., Xie G., Li Y. 2022. Integrating Medical Code Descriptions and Building Text Classification Models for Diagnostic Decision Support, 2022 IEEE 10th International Conference on Healthcare Informatics (ICHI), pp.612-613, Rochester, MN, USA.
- [3] Lee K.B., Shin H.S., 2019. An Application of a Deep Learning Algorithm for Automatic Detection of Unexpected Accidents Under Bad CCTV Monitoring Conditions in Tunnels, 2019 International Conference on Deep Learning and Machine Learning in Emerging Applications (Deep-ML), pp.7-11, Istanbul, Turkey
- [4] Şeker A., Diri B., Balık H.H., 2017. Derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları hakkında bir inceleme. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(3), 47-64.
- [5] Yu X., Kuan T.W., Zhang Y., Yan T., 2022. YOLO v5 for SDSB Distant Tiny Object Detection, 10th International Conference on Orange Technology (ICOT), Shanghai, China.
- [6] Samkeliso Suku Dube S.S.; Bhuru A., 2022. Snake Identification System Using Convolutional Neural Networks, 1st Zimbabwe Conference of Information and Communication Technologies (ZCICT), 09-10 November, Harare, Zimbabwe.
- [7] Ali I., Khan A., Waleed M., 2020. A Google Colab Based Online Platform for Rapid Estimation of Real Blur in Single-Image Blind Deblurring, 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 25-27 June, Bucharest, Romania.
- [8] Özgür S.B., 2021. Algoritmalar, Yapay Zeka, Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme ve Uygulamaları: Beşeri Fayda Üretiminin Yazılımlar Tarafından Karşılanması. Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, 10(1), 1-29.
- [9] Grewal D.S., 2014. A critical conceptual analysis of definitions of artificial intelligence as applicable to computer engineering, IOSR Journal of Computer Engineering, 16(2), 9-13.
- [10] Bonaccorso G., 2017. Machine learning algorithms, Birmingham, UK: Pacht Publishing. pp.10-17.
- [11] Hao X., Zhang G., Ma S., 2016. Deep learning. International Journal of Semantic Computing, 10(3), 417-439.
- [12] Yılmaz S., Dincer H., Eksin I., Kalenderli O., 2007. Heat control in HVDC resistive divider by PID and NN controllers. Energy Conversion and Management, 48(10), 2739-2748.
- [13] Yılmaz S. Dinçer H., 2004. Development of a Neural Training Program which is Used for Improvement in the Measurement of DC HV Resistive Dividers. NEU-CEE 2004, 2nd International Symposium on Electrical, Electronics and Computer Engineering , (Lefkoşa, Cyprus (Kktc)), 132-137.
- [14] Yılmaz S., Kılıcı S. B., 2020. Design of Training and Development Tool for Feedforward Artificial Neural Networks. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 133-146.
- [15] Yılmaz S., Ekinci Ö., Şentürk E., Yuce A. M., 2022. Recurrent Neural Networks For Peak Flow Estimation., Environmental Engineering and Management Journal, 21(6), 927-937.
- [16] Kell D.B., Samanta S.; Swainston N., 2020. Deep learning and generative methods in cheminformatics and chemical biology: navigating small molecule space intelligently. Biochemical Journal, 477(23), 4559-4580.
- [17] Özkan İ. N. İ. K., Ülker E., 2017. Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6(3), 85-104.
- [18] Gülcü A., Zeki K. U. Ş., 2019. Konvolüsyonel sinir ağlarında hiper-parametre optimizasyonu yöntemlerinin incelenmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 7(2), 503-522.
- [19] Gandhi R., “R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO — Object Detection Algorithms”, Towards Data Science, <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e> (Erişim tarihi: 1 Ocak 2023).
- [20] Girshick R., 2015. Fast r-cnn, In: Proceedings of the 2015 IEEE international conference on computer vision., 1440-1448, 7-13 Dec., Santiago, Chile
- [21] Li F., Johnson J., Yeung S., “Detection and Segmentation”, http://cs231n.stanford.edu/slides/2017/cs231n_2017_lecture11.pdf, (Erişim tarihi: 1 Ocak 2023).

- [22] Jiang A., Yan N., Wang F., Huang H., Zhu H., Wei B., 2019. Visible Image Recognition of Power Transformer Equipment Based on Mask R-CNN, 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 21-23 November , Beijing-China, 657-661.
- [23] Altay A., Yılmaz S., 2023. Classification of T Cells Using YOLO Algorithm. İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi, 3(2), 66-81.
- [24] Wu T.H., Wang T.-W., Liu Y.-Q., Ya-Qi Liu, 2021. 3rd World Symposium on Artificial Intelligence (WSAI), 18-20 June, Guangzhou, China, 24-28.
- [25] Wang C.-Y.; Bochkovskiy A.; Liao H.-Y.M., 2022. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. arXiv preprint arXiv:2207.02696
- [26] Hu B., Zhu M., Chen L., Huang L., Chen P., He M., 2022. Tree species identification method based on improved YOLOv7, IEEE 8th International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS), 26-28 November, Chengdu, China, 622-627.
- [27] Wulandari A., Sigit R., Bachtiar M.M., 2018. Brain Tumor Segmentation to Calculate Percentage Tumor Using MRI, International Electronics Symposium on Knowledge Creation and Intelligent Computing (IES-KCIC), 29-30 October, Bali, Indonesia, 292-296.
- [28] Jagan A., 2018. A New Approach for Segmentation and Detection of Brain Tumor in 3D Brain MR Imaging, Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 30 September, Coimbatore, India, 1230-1234.
- [29] <https://www.kaggle.com/datasets/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection>
- [30] <https://www.kaggle.com/datasets/sartajbhuvaji/brain-tumor-classification-mri>
- [31] <https://github.com/MohamedAliHabib/Brain-Tumor-Detection>
- [32] https://figshare.com/articles/dataset/brain_tumor_dataset/1512427
- [33] <https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset>
- [34] Bhande A., 2023. "What is underfitting and overfitting in machine learning and how to deal with it", Medium, <https://medium.com/greyatom/what-is-underfitting-and-overfitting-in-machine-learning-and-how-to-deal-with-it-6803a989c76> (Erişim tarihi: 2 Ocak 2023).
- [35] Şen M.B., 2022. YOLO Algoritması Kullanarak Beyin Tümörü Tespiti, KOÜ, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü Lisans Bitirme Tezi.



Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri ve Dayanıklılığı

Mechanical Properties and Durability of Steel Fiber Self-Compacting Concrete

Serkan BİÇİCİ^{1,*} , Yusuf TOLA² ¹ İnşaat Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-4838-3157² İnşaat Teknolojisi, Kocaeli Meslek Yüksek Okulu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-9019-2605

Derleme Makale

Gönderilme Tarihi : 16/02/2022

Kabul Tarihi : 15/06/2023

Anahtar Kelimeler

Beton
Çelik Lif Oranı
Dayanım
Mekanik Deneyler

Özet

Bu çalışma çelik fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun (SFRSCC) özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Bu amaçla mekanik özelliklerini karakterize etmek ve dayanıklılık göstergelerini değerlendirmek için SFRSCC ve kendiliğinden yerleşen beton (SCC) numuneleri ile yapılan deneysel çalışmalar incelenip değerlendirilmiştir. Mekanik özellikler, basınç, yarmada çekme, elastisite modülü ve eğilme dayanımları için test analiz edilmektedir.

Çelik fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun (SFRSCC) dayanıklılığına ilişkin araştırmalar hala çok azdır. Bu yüzden çelik fiberlerin korozyonunun çatlamaya ve ardından parçalanmaya yol açıp açmayacağı henüz net bir şekilde ortaya koyulmamıştır.

Sonuçlar, çelik liflerin SCC'ye eklenmesinin, çatlama sonrası eğilme direncini ve enerji absorpsiyonunu artırma açısından çok etkili olduğunu ve SCC'nin kendi kendine yerleşen gereksinimleri ve dayanıklılık göstergelerini önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Ayrıca araştırmalardan elde edilen bulgulara göre liflerin karışım özelliklerinin ve hacim oranının bu ana özellikleri önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir.

Bu çalışma, birçok araştırmacı tarafından rapor edilen çok çeşitli uluslararası kaynaklardan toplanan veri tabanları ve deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak kapsamlı karşılaştırmalar sunmaktadır. Sunulan uygulama örnekleri ile ilgili bir derleme makale çalışması yapılmıştır.

Review Paper

Received Date : 16/02/2022

Accepted Date : 15/06/2023

Keywords

Concrete
Steel Fiber ratio
Strength
Mechanical Experiment

Abstract

This study is about how steel-reinforced SFRSCC can grow in reinforced concrete construction. In order to create reinforced concrete samples that can be designed and formed for this purpose, the applications made with SFRSCC and settling concrete samples were examined and measured. The test is analyzed for mechanical properties, compressive strength, tensile patch strength, elasticity and bending strength.

Research on the durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC) is still very scarce. Therefore, it has not yet been clearly established whether corrosion of steel fibers will lead to cracking and subsequent fragmentation.

The results showed that the addition of steel fibers to SCC was very effective in increasing the flexural strength and energy absorption after cracking, and did not significantly affect the self-contained requirements and strength indicators of SCC. It has also been shown that the blend properties and volume ratio of the fibers can significantly affect these main properties.

This study offers comprehensive comparisons using empirically obtained data and databases collected from a wide variety of international sources reported by many researchers. A review article study was made about the application examples presented.

1. Giriş

Kendiliğinden yerleşen beton (SCC), geleneksel beton gibi çimento, su, agrega, mineral ve kimyasal katkılardan oluşmaktadır [1]. Dayanıklı beton yapılara ulaşmak amacıyla ilk olarak yaklaşık 32 yıl önce Japonya'da geliştirildi. Bu tip betonlarda vibrasyon gerekli olmayıp,

kendi ağırlıkları nedeniyle kalıp içerisinde hava kalmayacak şekilde yerleşmektedir [2]. Ayrıca SCC kullanımı şantiyedeki gürültü seviyesini düşürüp bu sayede çevreye olan etkiyi azaltmaktadır. SCC' de büyük partiküllerin ayrılmasını önlemek için viskoziteyi artırıcı katkı maddeleri veya dolgu maddeleri kullanılmaktadır [3]. Su altında tüneller ile dökülen betonlarda SCC için genellikle viskoziteyi artıran mineral katkı maddesi kullanılmaktadır [4]. Bu katkı maddeleri kireçtaşı, silis

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): biciciserkan@hotmail.com



dumanı, uçucu kül, ince kum ve cam dolgu malzemeleridir [5]. Aynı zamanda SCC karışım bileşimine yeterli çelik lif takviyesi yapıldığı takdirde betonun gevrek bir malzeme olarak davranışı sünek davranışa dönüşmektedir [6].

Çelik lifler betonda çatlama sonrası yük taşıma kapasitesi ve enerji emme performansı gibi mekanik özelliklerini artırmak amacıyla kullanılmıştır [7]. Fiberler ayrıca çatlak genişliğini sınırlamak amacıyla kullanılır ve beton dayanımı açısından faydalı sonuçlar vermektedir. Artan çatlak genişliği, betonun geçirgenliğini artırarak donatının korozyona uğraması için ortam oluşturmaktadır [8]. Çatlakların oluşması ve yayılması nedeniyle betonun artan geçirgenliği, su, klorür ve diğer aşındırıcı maddelerin girmesine izin vererek bozulmayı kolaylaştırmaktadır [9]. Betonun geçirgenliği düşük ise klorür iyonları, sülfat iyonları ve asitler gibi zararlı maddeler betona kolayca girememekte ve böylece yapının mukavemeti daha iyi korunmaktadır [10].

Beton karışımlarına çelik lifler takviye edildiği takdirde, beton karışımındaki enerjinin absorbe kapasitesi, çatlak gelişimi, süneklilik düzeyi, basınç, çekme, eğilme ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri iyileşmektedir. Bu sebeple çelik lifli betonlar yapı sektöründe giderek daha fazla önem kazanmaktadır [11]. Ancak lifli betonların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Çelik lif kullanımı beton karışımının kıvamını ve işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir [12]. Taze betonun işlenebilirliği kullanılan liflerin uzunluğuna, miktarına ve şekline göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada varılan önemli sonuçlarından birisi de, betonun yapısında çelik liflerin kullanılması ile betonun mekanik özellikleri ve dayanımının önemli ölçüde değişikliğe uğradığı değerlendirilmiştir.

Betonarme yapılarıdaki dayanım günümüzde önemli bir konu haline gelmiştir. Bu durumda çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (SFRSCC) kullanım alanlarının giderek artması kaçınılmazdır [13]. SFRSCC kompozit malzemelerin yayılması amacıyla dayanıklılık (durabilite) analizleri ile desteklenmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle çalışma içerisinde dayanıklılık performansına ilişkin bazı analizler verilip kıyaslamalar yapılmaktadır [14].

Araştırma SFRSCC ve SCC performansını analiz etmek amacıyla mekanik özellikler (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme mukavemeti) ve geleneksel betonun dayanıklılık analiz değerlendirmesine yöneliktir. Bu geleneksel yöntemler ile su emme kapasitesi, hava geçirgenliği, elektrik direnci, çelik liflerin korozyonu, klor penetrasyonuna direnci ve karbonatlaşma miktarlarında ortaya çıkan araştırma bulguları ışığında çalışma analiz edilmektedir. Basınç dayanımını tam anlamıyla kazanmış numune üzerinden yapılan çalışmalar gösterge olarak alınmaktadır.

2. Taze Betonun Karışım Özellikleri

Betonun içerisindeki çelik lif oranındaki artışla işlenebilirliğin azalmasına ve bu oranın %0.75 üzerinde olduğu zamanlarda ise hava içeriğinin arttığı tespit edilmiştir [15]. Bu durumda betondaki çelik lif oranının işlenebilirlik ve hava içeriği arasında bir bağlantı olduğunu göstermektedir.

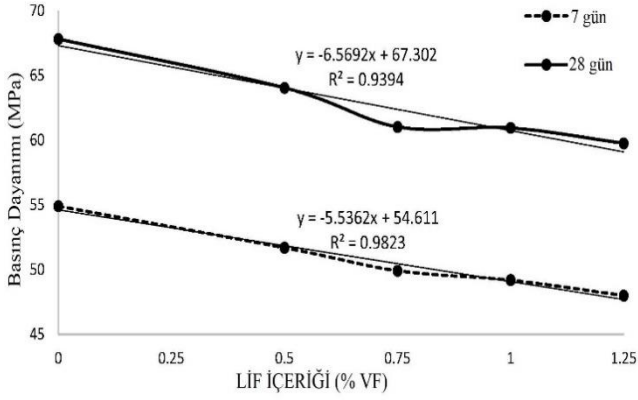
Madandoust vd. ile Iqbal vd. tarafından yapılan araştırmalar incelendiğinde SFRSCC ile ilgili analiz sonuçları, çelik lif eklenmesiyle betonun çökme akışında çok az oranda değişiklik olduğunu ve betonun işlenebilirliği üzerinde büyük bir etkisi olmadığını tespit etmişlerdir. Lif içeriği arttıkça, özellikle %0.75 çelik lif içeriğinin üzerinde çökme akışı azalır. %1,25 lif içeriğine sahip beton karışımı için çökme akışı minimum gereklilik olan 600 mm'nin altına düşmüştür. Ancak araştırma sonuçları çelik liflerin çökme değeri üzerinde önemli olumsuz etkilerin olmadığını göstermektedir.

Khaloo vd. çalışmasında betona özellikle %2 olmak üzere yüksek lif oranları ile takviye edilmiş orta dayanımlı numunelerinin, taze betonun donatılar arasından geçişinin zorluğu nedeniyle ağır donatılı kesitler için kabul edilebilir bir karışım olmadığı görülmektedir [16]. Mazaheripour vd. araştırmasında ise maksimum agrega boyutu, lif hacmi, lif tipi, lif geometrisi ve lif en-boy oranı gibi birçok parametreye bağlı olarak betona lif katılması betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır.

3. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri

3.1. Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükünün etkisi altında betonun kırılmaması için maksimum kapasite olarak tanımlanmaktadır [17]. Çelik liflerin etkisi altında basınç dayanımı %25 oranında artış gösterirken, bazı durumlarda ise aynı oranlarda dayanım kaybı da yaşanmaktadır. Bunun nedeni liflerin beton içerisindeki dağılımıdır [18]. Yükleme yapıldığında dik olan çelik lifler herhangi bir yüke karşı direnç göstermez iken, diğer çelik lifler paralelliği oranında direnç göstermektedir [19].



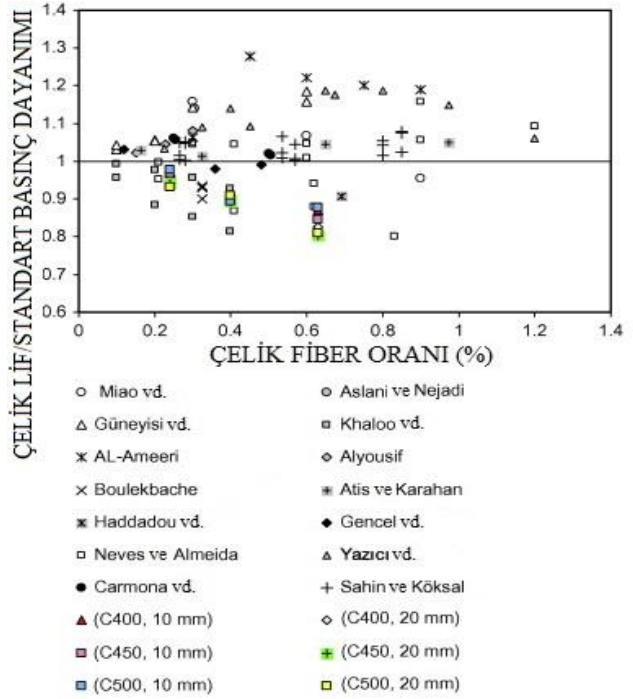
Şekil 1. Betonun Basınç Dayanımındaki Değişim

Iqbal vd. beton basınç dayanımı testlerinin sonucunda; Beton içerisindeki çelik lif oranındaki artışın, beton basınç dayanımında belli oranlarda azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Bu ilişki 7 günlük ve 28 günlük beton dayanımları üzerinden ölçülerek belirlenmektedir. Test edilen numunelerin bu davranış verileri Şekil 1'de grafiksel olarak sunulmaktadır. Şekil 1. bizlere 7 günlük ve 28 günlük lif içerikli betonların lif oranı arttıkça aynı doğrultuda basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir [20].

Şekil 1'de lif ilave edilmemiş betonun basınç dayanımı 67.8 Mpa iken, %1.25 çelik lif ilaveli betonda ise 59.74 Mpa olarak bulunmuştur. Bu durumda betonun basınç dayanımında %11.9 azalma olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar beton içerisindeki çelik lif oranındaki artışın beton içerisindeki hava oranını artırdığından, basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmektedir.

Bentur ve Mindess araştırması incelendiğinde çelik lifli betonların mekanik dayanımları arasındaki en büyük değişimin basınç dayanımında olduğu görülmektedir [21]. Iqbal vd. ile Khaloo vd. basınç dayanımı çalışmalarında benzer şekilde, çelik liflerin eklenmesi ile beraber yüksek mukavemetli SCC' nin basınç dayanımında ortalama %10'luk bir azalma olduğunu bildirmişlerdir [22].

Şekil 2'de betonların normalleştirilmiş basınç dayanımına karşılık gelen çelik lif faktörüne göre arasındaki ilişki göstermektedir. Araştırmacılar tarafından çelik liflerin hacmi ve en boy oranının beton özellikleri üzerindeki etkisi incelemektedir [23, 24]. Belirli çelik lif faktöründe ölçülen basınç dayanımı için önemli çelişkili bulgular bulunmaktadır [25, 26]. Bazı araştırmacılar ihmal edilebilir etkiler bulurken bir kısım araştırmacı lif faktörünün basınç oranının iyileştirdiğini belirtmiştir [27, 28, 29, 30, 31, 32]. Bunun yanında basınç oranını negatif etkilediğine dair sonuçlarda çıkarılmaktadır [34, 33]. Şekil 2'ye göre çelik lif faktörünün basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmaktadır.

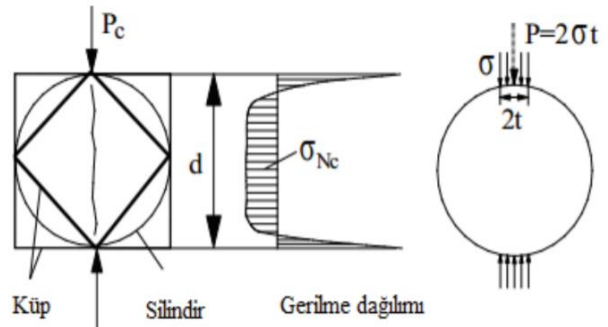


Şekil 2. Çelik Lif/ Standart Betonun Basınç Dayanımı

3.2. Yarmada Çekme Dayanımı

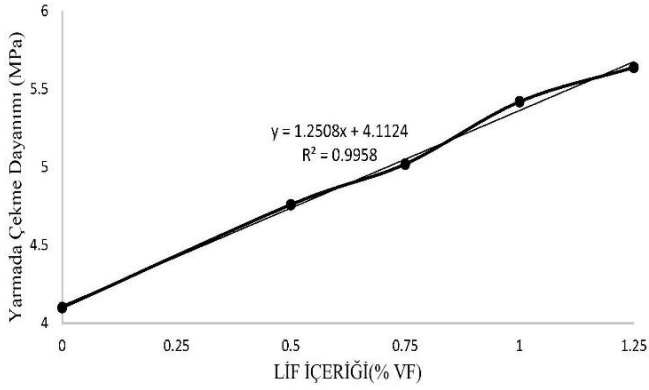
Betonun çekme dayanımının basınç dayanımından daha zayıf olmasının nedeni çekme gerilmesi altında çatlakların kolay oluşup ilerlemesinden kaynaklanmaktadır [35]. Tasarımlarda betonun çekme dayanımı göz ardı edilse bile, betonun kırılmaya karşı hassas olması nedeniyle göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Çekme dayanımında yarmada çekme, eğilmede çekme ve direkt çekme deneyleri kullanılmaktadır. Bu deneylerden en basit şekilde dayanımı tespit edebileceğimiz yarmada çekme dayanımı metodudur [36]. Şekil 3'de gösterilen deney numunesinin alt ve üst kısımlarına standartlara göre farklı uzunluk ve genişlikte plakalar yerleştirilmiştir. Bu sayede yükleme bölgelerindeki ezilme ve birçok çatlama önlenmektedir. Şekilde yarmada çekme gerilmesi, test numunesine uygulanan doğrusal bir yük boyunca, basınç gerilmesine dik olan yönde meydana gelmektedir [37].

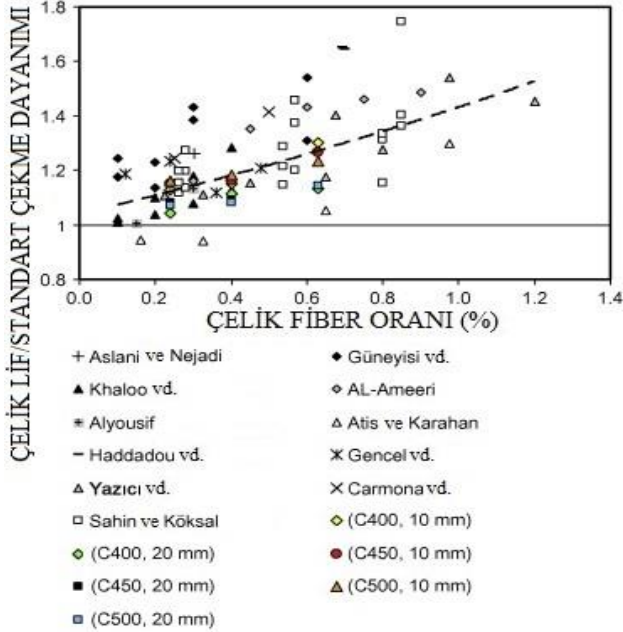


Şekil 3. Yarma Deneyi Ve Gerilme Dağılımları

Iqbal vd. yarmada çekme dayanımı verilerinden yararlanarak sonuç Şekil 4'de grafiksel olarak sunulmuştur. Beton içerisine %1.25 oranında çelik lif takviye edilmesi ile analiz edilen numunelerin yarmada çekme dayanımlarında %37'lik artış olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Altun ve Aktaş tarafından yapılan araştırmada çelik lif oranındaki artışın SCC'nin çekme ve eğilme mukavemetinde kademeli olarak bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Analiz sonuçları betona %2 çelik lif eklenmesiyle yüksek mukavemetli SFRSCC'nin yarma çekme mukavemetinde %17'lik bir artış olduğu görülmektedir. Mazaheripour vd. %0.3 oranındaki poliprobilen lif ilavesiyle SCC'nin çekme mukavemetinde %14'lük bir artış olduğu sonucuna varmıştır [38].



Şekil 4. Betonun Yarmada Çekme Dayanımındaki Değişim



Şekil 5. Çelik Lif/ Standart Betonun Çekme Dayanımı

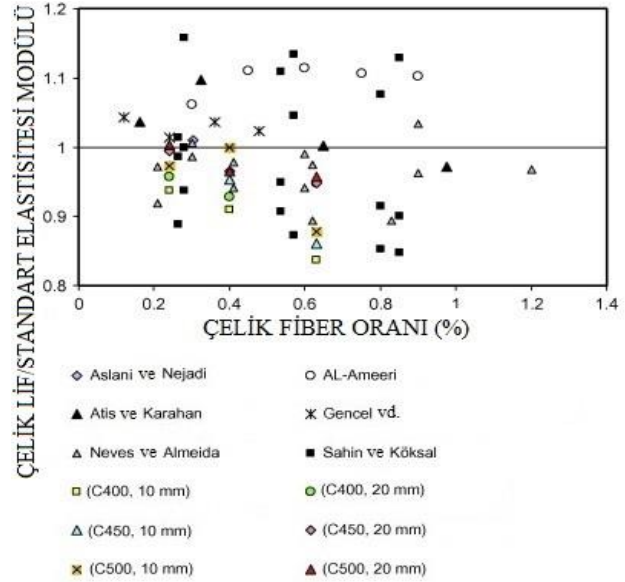
Şekil 5'de betonların normalleştirilmiş yarmada çekme dayanımına karşılık gelen lif faktörüne göre arasındaki ilişki göstermektedir. Fiber oranı arttıkça grafikte daha fazla saçılma gözlemlenmektedir. Diğer bir deyişle, normalleştirilmiş yarmada çekme dayanım oranı ile lif

faktörü arasında benzersiz bir ilişki yoktur. Bu kullanılan malzemelerin agrega, çimento, çelik liflerin türü ve boyutu gibi çeşitli özelliklerinden ve ayrıca karıştırma test prosedürlerinden kaynaklanıyor olabilmektedir.

3.3. Elastisite Modülü

Elastisite modülü, bir malzemenin bir kuvvete maruz kaldığında göstereceği elastik deformasyonunun bir ölçüsüdür. Yük kaldırıldığında önceki şekline geri dönen şekil değiştirmelerine "elastik şekil değiştirme" adı verilmektedir [39]. Elastik şekil değiştirme çoğu yapı malzemesindeki gerilme ile orantılı ve doğrusaldır [40].

Mazaheripour vd. ile Altun ve Akbaş araştırmalarında beton içerisindeki çelik lif oranındaki artışın betonun elastisite modülü üzerinde belirgin bir değişime neden olmadığı ve değerlerin aynı seviyelere yakın kaldığını belirtmişlerdir [41].



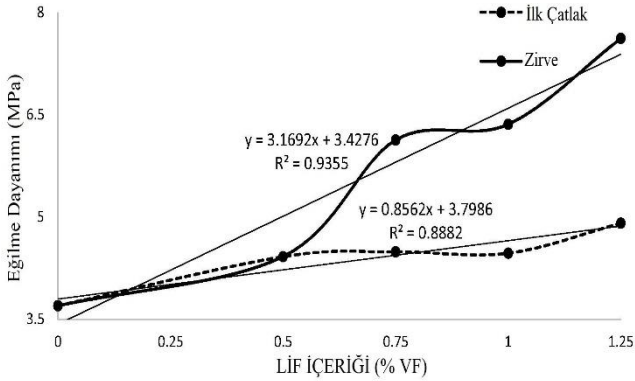
Şekil 6. Çelik Lif/ Standart Betonun Elastisite Modülü

Şekil 6'da çelik lif takviyeli betonların elastisite modülü ile ilgili kapsamlı çalışmalardan elde edilen bulgular dayalı olarak lif faktörünün değişimi göstermektedir. Ancak diğer mekanik özelliklere benzer şekilde olması bir genellemeye ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bazı araştırmacılar, çelik fiber takviyeli betonun standart betondan daha yüksek elastik sertliğe sahip olduğu kanısını varmaktadır [42]. Bazıları, çelik takviyeli ve standart betonların elastisite modülü arasında ihmal edilebilir bir fark olduğunu bildirmiştir [43, 44, 45]. Oysa tam tersi bulgular başka yazarlar tarafından gözlemlenmektedir [46]. Varyasyonun genel olarak yaklaşık $\pm\%20$ sınırları içinde olduğu ifade edilebilmektedir. Bu çelişkili bulgulardan net bir davranış bulunamayacağı anlaşılmaktadır.

3.4. Eğilme Dayanımı

Bir şekilde mesnetlenmiş olan, eksene dik ya da eksene dik bileşene sahip olan yük etkisi altında yapı elemanlarını eğilmeye maruz bırakan ve elemanın eğilmesine neden olan, elemanda gerilme ve şekil değiştirmelere neden olan kesit tesirlerine “eğilme momenti” denir [47, 48]. Eğilme momentinin değeri, mesnetler arasındaki açıklığa ve açıklığa etki eden yükün büyüklüğüne bağlıdır. Eğilme momentinin etkisi altında elemanlarda çekme ve basınç gerilmeleri oluşmaktadır [49].

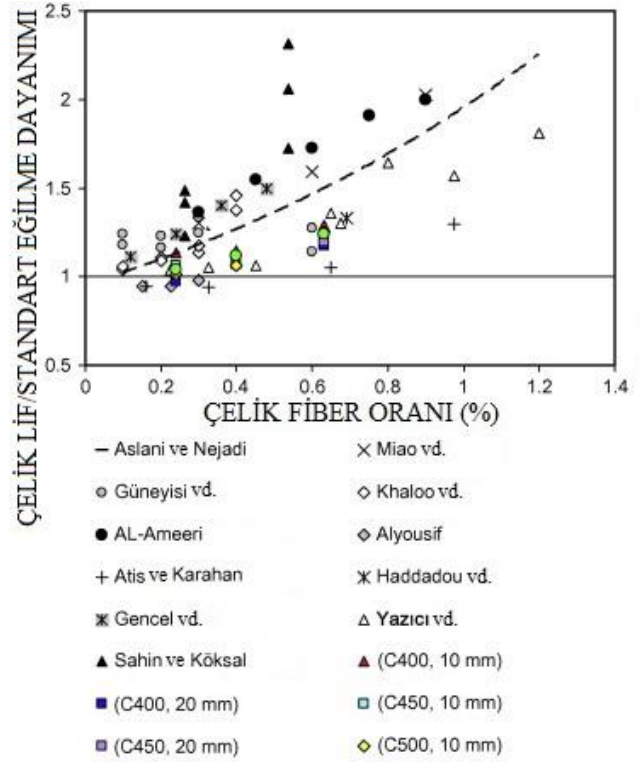
Altun ve Aktaş ile Iqbal vd. araştırmalarındaki veriler ışığında beton içerisindeki çelik lif oranındaki artış ile eğilme dayanımındaki artışın doğru orantılı olduğunu göstermektedir. İlk çatlak ve nihai yükteki eğilme mukavemeti için sonuçlar Şekil 7’de grafik olarak gösterilmektedir. Betonun içeriğine %1.25 oranında fiber lif takviye edildiğinde ilk çatlak yükü %32 artarken, maksimum yüklemde %110’ luk artış meydana gelmektedir. Çelik lifler çatlakları birbirine bağlamaya başlamaktadır. Eğilme dayanımı testlerinin ikinci önemli bulgusu, % 0,5 çelik lif içerikli beton karışımının, ilk çatlak yükü ve maksimum yükü birbirine eşit olacak şekilde şekil değiştirme davranışı sergilemesidir.



Şekil 7. Betonun eğilme mukavemetindeki değişim

Pajak ve Ponikiewski SFRSCC'nin eğilme özelliklerini araştırırken, çelik lif içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu araştırmanın test sonuçları da diğer araştırmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak düz çelik lifli beton, %1.5 oranında çelik lif takviye edilmesiyle deformasyon yumuşama davranışı göstermiştir. Bu yumuşama davranışı betonun kırılma, kopma veya çatlak oluşumunda azalma olayını ifade etmektedir. Iqbal vd. araştırmasında betonda %0.75 çelik lif kullanımı ile pekleşme (deformasyon sertleşmesi) davranışı gözlemlenmiştir [50]. Mazaheripour vd. tarafından yürütülen test sonuçları ile polipropilen elyaf ilavesinin hafif SCC'nin özellikleri üzerindeki etkisini araştırarak, %0.3 polipropilen elyaf ilavesiyle eğilme mukavemetinde %10,7'ye varan bir artışa işaret edilmiştir

[51]. Ayrıca Ponikiewski ve Golaszewski SCC üzerine yaptıkları araştırmada çelik liflerin eğilme dayanımını %80'e kadar arttırdığını bildirmişlerdir [52].



Şekil 8. Çelik Lif/ Standart Betonun Çekme Dayanımı

Şekil 8’de betonların normalleştirilmiş eğilme dayanımına karşılık gelen lif faktörüne göre aralarındaki ilişki göstermektedir. Sonuçlar özellikle yüksek miktarda lif kullanılmaya başlandıkça saçılma gözlemlenmektedir. Ancak liflerin çatlaklara karşı köprü oluşturması etkisinden dolayı betonun eğilme davranışını iyileştirdiği görülmektedir.

4. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanıklılığı

4.1. Su Emme Kapasitesi

Su emme kapasitesi hesaplamalarında en çok daldırma ve kılcallık ile su emme testi kullanılmaktadır [53]. Betonun kılcal su emilimini belirlemek için prizmatik bir kalıba yerleştirilen beton numunesi kullanılmaktadır [54]. Yararlanılan çalışmalarda 90 gün olarak tanımlanan sertleşme süresine ulaşıldığında, numuneler kesici yardımıyla üç parça olacak şekilde kesilmiş ve ardından 70°C’lik etüvde 1 gün bekletilerek tamamen kurumaya sağlanmaktadır. Numuneler, yüzeye temas eden yüzey hariç yüzeylerinden su emilmesini önlemek amacıyla parafinle kaplanmakta ve kuru ağırlığı belirlenmektedir.

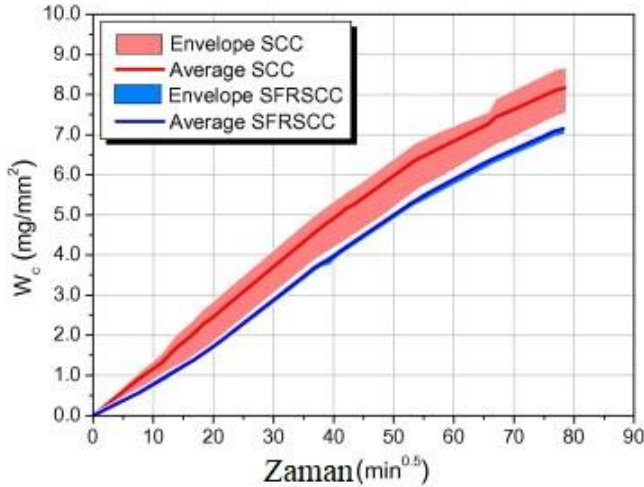
Bu deney yönteminde numunenin sadece bir yüzü suya maruz kaldığında, betonun ağırlığındaki artıştan su emme hızına ilişkin zamana bağlı veriler elde edilmektedir [55]. Çok küçük çaplı boşluklar içerisinde emilen su kılcallık etkisi ile yükselir [56]. Betonarme yapılarda bu istenmeyen durumu kontrol altına almak için beton üzerinde kılcal su emme testleri yapılmaktadır [57].

Kılcallık (Kapiler Olay) yöntemiyle emilen su (W_c), deklemler (1)'de numunenin su ile temas halinde olan alt yüzeyinin alanı, Ω_i ile kütle numunesinin artması arasındaki oran ile belirlenmektedir.

$$W_c = \frac{(M_i - M_0)}{\Omega_i} \quad (1)$$

Formüldeki M_i , farklı zamanlardaki okuma süreleri için su ile temas halinde olan numunenin kütlesidir. ($\sqrt{t_i}$) ve M_0 , numunenin 40 ± 5 °C'deki kuru kütlesidir.

Frazao vd. yaptığı araştırmada SCC' de emilen toplam su miktarı SFRSCC' dekinden daha fazladır. Su emme oranları Şekil 9'da grafiksel olarak verilmiştir. Bozulan maddelerin penetrasyonunu kolaylaştırmak için liflerin varlığının SFRSCC yüzeyinin kılcal gözenekliliğinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı anlamına gelmektedir.



Şekil 9. SCC ve SFRSCC' nin kılcallığı ile su absorpsiyonu

4.2. Hava Geçirgenliği

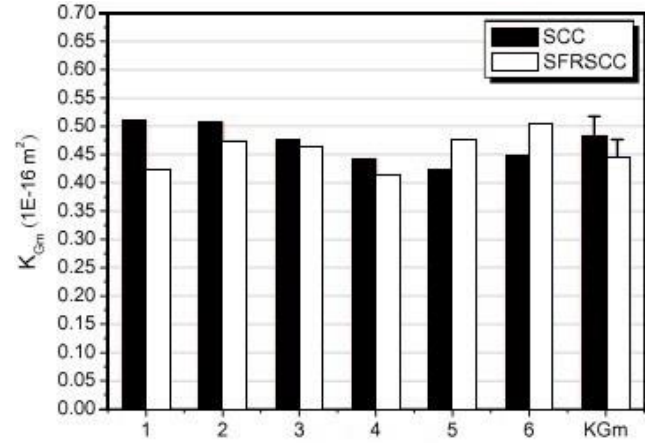
Betonun geçirgenliği, beton boşlukları ile çimento hamuru agregası arasındaki ara yüzeydeki küçük çatlakların bir fonksiyonudur [58]. Betonun dayanıklılığı için boşluk ve geçirimsizlikten arındırılmış olması önem taşımaktadır [59]. Betonun mukavemeti ve geçirgenliği birbirleriyle yakından ilişkili olaylardır [60]. Betonun geçirimsizliği; basınçlı su geçirimsizliği, kılcal yolla su emme ve hava geçirimsizliğinden oluşmaktadır [61]. Hava geçirgenliğinin belirlenmesi amacıyla hava geçirgenlik test

cihazı kullanılmaktadır [62]. Bu cihaz numunenin belirli süre zarfında ve belirli basınç altında numunelerden geçen sıvının sabit durum akışına maruz kalmasını sağlamaktadır. Denklem (3)'te gazlar için gereklilik katsayısı (K_G), sıvının sıkıştırılabilirliği ve viskozitesini dikkate alan denkleme göre değiştirilmiş denklem 2'deki Darcy yasasına (Q) göre belirlenmektedir.

$$Q = \frac{kA}{\eta L} \Delta p, \quad \Delta p = P_1 - P_2 \quad (2)$$

$$K_G = \frac{2v \times \eta \times L \times P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3)$$

Buradaki Q debi, k geçirgenlik katsayısı, A gazın geçtiği beton kesiti, L gazın geçtiği beton kesitinin kalınlığı, v gaz akışı, η gazın dinamik viskozitesi ($2.02 \times 10^{-16} \text{Ns/m}^2$), P_1 mutlak basınçlı gaz girişi ve P_2 mutlak basınçlı gaz çıkışıdır.



Şekil 10. Numuneler için hava geçirgenlik katsayıları

Frazao vd. araştırmalarında numunelerin geçirgenlik katsayısı ortalaması SCC için $0.483 \times 10^{-16} \text{m}^2$ ve SFRSCC için $0.443 \times 10^{-16} \text{m}^2$ bulunmaktadır. Ölçümdeki verilerden yola çıkarak Şekil 10'da grafiğe aktarılmıştır. Bu testlerde hataların yüksek olmasından dolayı yüzde %8.3'lük farklılık normal karşılanmaktadır. Bileşimin uygun şekilde optimize edilmesi şartıyla, SCC'ye liflerin eklenmesinin bu tip betonun hava geçirgenliğini etkilemediği kabul edilmektedir [63].

4.3. Elektrik Direnci

Elektrik özdirenci, Proceq beton elektriksel özdirenç ölçer kullanılarak suya doymuş numunelerde ölçülmektedir [64]. Araştırmalara göre özdirenç ölçerle akımı iletmek amacıyla iki uç elektrot kullanılmaktadır [65]. Bu sayede iki elektrot arasındaki voltaj ölçülmektedir. Elektrik özdirenci (ρ) denklem (4)'te göre hesaplanmaktadır.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times \frac{V}{l} \quad (4)$$

Formülde V ölçülen potansiyel fark, I uygulanan akım, a iki iç elektrot arasındaki mesafe olarak gösterilmektedir. El-Dieb ile Frazao vd. yaptıkları çalışmalarda çelik lifler betonun toplam yük geçişini ve elektriksel iletkenliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Bu artış çelik liflerin hacim oranına bağlıdır. Araştırmalarda test edilen numunelerin ortalama elektrik özdirenci karşılaştırıldığında beton içerisine eklenen çelik liflerin elektrik direncini %70'e kadar azaldığı tespit edilmektedir [66]. SFRSCC yüksek iletkenliği özdirenç ölçümünü etkileyen çelik liflerin tipi ve miktarı dikkate alınmalıdır [67].

4.4. Çelik Liflerin Korozyonu

Korozyon, betonarme yapıların dayanıklılığı üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir [68]. Korozyonun başlıca nedenleri klorür penetrasyonu ve karbonatlaşma nedeniyle beton matrisinin pH'nın düşmesidir. Aynı zamanda çatlakları köprüleyen lifleri etkiler ve SFRC yapılarının performansı açısından zararlı sonuçlar doğurmaktadır [69]. Olumsuz ortamlara maruz kalan beton yüzeylerde korozyon lekeleri oluşmaktadır. Saojeng ve Weiting, klorür geçirgenliği ve korozyon davranışını değerlendirmek için SFRC numunelerinde hızlandırılmış bir korozyon testi gerçekleştirmiştir. Korozyon hücresi, donatı çubuğu çalışma elektrodu, doymuş kalomel elektrodu referans elektrodu ve titanyum ağ karşı elektrot görevi görecektir şekilde bağlanmıştır. 0.5 mA/cm² lik akım uygulandığında lineer polarizasyon direnci ölçülmüştür [70]. Bu test sırasında çelik lif içeriğinin artmasıyla hem OCP (30 saat süren açık devre potansiyeli)'nin hem de polarizasyon direncinin ilkinde hafif, ikincisinde ise önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir [71].

Saojeng ve Weiting ile Frazao vd. araştırmada SFRSCC numunelerinde korozyona bağlı olarak lif kesitindeki azalma ve aşınmış lif etrafındaki mikro kaybın lif bağlarındaki bozulmadan daha güçlü bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [47]. Gerçekleştirilen bu testler ile, çelik liflerin korozyonunun, betondaki mikro çatlakların oluşumuna ve ardından mikro-dökülmeye neden olabileceğini ve bunun matris direnci açısından zararlı bir etki yarattığını belirtmişlerdir [72].

4.5. Klorür Penetrasyonuna Direnci

Klorür penetrasyonuna direnci hesaplanırken en çok doğal daldırma yöntemi kullanılmaktadır [73]. Bu yöntem numunenin %15 sodyum klorür içeren doymuş bir kalsiyum hidroksit çözeltisine daldırıldıktan sonra numunelerdeki klorür penetrasyon oranının ölçülmesi

tespit edilmektedir [74]. Sertleşmiş betonda klorür penetrasyonu ile ilgili parametrelerin belirlenmesine dayanmaktadır. Bu test genellikle 90 gün daldırma yapıldığı için uzun sürmektedir [75].

Denklem (5)'te Fick'in 2. yasası fonksiyonu çözümüne eğri uydurma yoluyla difüzyon katsayısı (Dd) ve yüzey klorür içeriği (Cs) değerlerini vermektedir.

$$C_x = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{D_{at}}}\right) \quad (5)$$

Formüldeki C_x , x derinliğinde t daldırma süresi için ölçülen klorür içeriği, C_s , t daldırma süresinden sonra beton yüzeyinde hesaplanan klorür içeriği ve C_0 betondaki ilk klorür içeriği ve erf hatadır. Değerler çelik liflerin bulunması, bu sayede klorür iyonlarının lifler üzerine yerleşmesine neden olmaktadır. İyonların matrise nüfuz etmesini geciktirmesine ve hatta engellemesine neden olduğu için SCC'de klorür penetrasyonuna karşı direncin SFRSCC' den daha yüksek olduğuna dair kanıt sunmaktadır [76].

4.6. Karbonatlaşma

SCC ve SFRSCC kirişlerindeki potansiyel karbonatlaşma direncinin değerlendirilmesi, hızlandırılmış bir karbonatlaşma testi kullanılarak gerçekleştirilmektedir [77]. Karbonatlaşma testi fenolftalein çözeltisi kullanılarak, farklı maruziyet yaşlarında betonun bölünmüş yüzeyine gösterge püskürtülerek gerçekleştirilmektedir [78]. Fenolftalenin, açık sarı renge ve formülü $C_{20}H_{14}O_4$ olan bir organik bileşiktir. Bu bileşik suda çözünmemekte olup, genellikle asit-baz indikatörü olarak kullanılmaktadır [79]. Fenolftalein indikatör çözeltisi, betonun kırılma yüzeyine uygulanmaktadır. Gösterge mora dönerse, pH 8,6'nın üzerindedir. Çözeltinin renksiz kaldığı durumlarda betonun pH'ı 8,6'nın altındadır [80]. Tamamen karbonatlı bir betonun pH'ı yaklaşık 8.4 bulunmaktadır. Bundan dolayı çözelti, karbonatsız betonda pembe bir renk haline gelmektedir. Genellikle karbonatlaşma direnci, R_{c65} portekiz standardına göre denklem (6)'da verilmektedir.

$$R_{c65} = \frac{2 \times C_{acel} \times t_1}{X_1^2} \quad (6)$$

Formüldeki C_{acel} , karbonatlaşma sürecini hızlandıran CO_2 konsantrasyonudur. Bu oran genellikle $90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ olarak alınmaktadır. T_1 numunede karbonatlaşma derinliği X_1 değerine ulaşmak için gerekli süredir.

Papadakis ile diğlerinin yaptığı çalışmada SCC 'nin elde edilen karbonatlaşma direnci $1774.62 \text{ kg yıl/m}^5$),

SFRSCC' de 1695.67 kg yıl/m⁵ olarak bulunmuştur. Sonuçlar SCC' nin karbonatlaşma direnci %4,67 daha yüksek olduğunu göstermektedir. SCC ve SFRSCC için, betonun azaltılmış geçirgenliği nedeniyle CO₂ 'ye maruz kalma süresi boyunca karbonatlaşma derinliğinde düşük bir artış bulunmaktadır. SCC karışımlarında yüzeye yakın beton, karbonatlaşmaya karşı daha yüksek dirence neden olan geleneksel vibrasyonlu betona göre daha yoğun ve daha dirençlidir [81].

5. Sonuçlar

İyi işlenebilirlik/kendiliğinden sıkışma ile birlikte betonun iyi çekme dayanımı istendiğinde kısa çelik lifleri kullanılmalıdır. SFRSCC ' nin işlenebilirliği, yüksek çelik lif ilavesi ile güçleşmektedir.

Yukarıda referans alınan çalışmalarda betona kısa çelik lifler eklemek, betonun çekme ve eğilme mukavemetini büyük ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Aynı zamanda, bu özellikleri daha da iyileştirmek için farklı uzunluk ve oranlarda çelik mikro liflerin kullanımına yönelik daha fazla araştırma ihtiyacını da teşvik etmektedir. Çelik lifler, betonarme elemanları güçlendirmek için kullanılmakta ve çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerinde değişme olup olmadığını görmek için test edilebilmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen bir diğer önemli sonuç; Çelik lif ilavesinin SFRSCC' nin elastisite modülü ve basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı değerlendirilebilir.

Betona çelik liflerin eklenmesi kılcallık yoluyla su absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmedikinden dolayı kılcallık gözenek boyutunun önemli ölçüde değişmediği sonucuna varılmaktadır.

SFRSCC yapısındaki çelik liflerden kaynaklı hava geçirgenliği önemli ölçüde değişme görülmezken, elektrik direncinde ise ortalama 70% oranında azalma tespit edilmiştir.

SFRSCC yapısındaki çelik liflerde artan korozyon belirtileri görülmekte ve beton içerisine giren klorür iyonu çelik liflerde etrafındaki koruyucu tabakanın yok olmasına sebep olmaktadır. Korozyon olayında çelik lif kesit alanında bir miktar küçülmeye yol açabilmektedir. Aşırı yüklenme durumunda, çelik liflerin korozyonu betonda çatlamaya neden olmaktadır. Bu da SFRSCC için çekme dayanımının azalmasına neden olmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Okamura H., Ouchi M., 2003. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5-15.
- [2] Persson B., 1999. Tunnel through water-distributing sediments without injection in advance. Bygg & Teknik, 28-29.
- [3] Louis Granju J., Balouch S., 2005. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. Cement and Concrete Research, 35(3), 572-577.
- [4] Wang K., Jansen D., Shah S., Karr A., 1997. Permeability Study of Cracked Concrete. Cement and Concrete Research, 27(3), 381-393.
- [5] Anomin., 1994. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton. Ankara: T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı.
- [6] Iqbal S., Ali A., Holschemacher K., Bier T., 2015. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). Construction and Building Materials, 98, 325-333.
- [7] Bentur A., Mindess S., 1990. Fibre Reinforced. London: Modern Concrete Technology Series.
- [8] Abu-Lebdeh T., Fini E., Lumpkin M., 2012. Flexural and Tensile Characteristics of Micro Fiber-Reinforced Very High Strength Concrete Thin Panels. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(2), 184-197.
- [9] Neville A., 2011. Properties of Concrete. Harlow: The Royal Academy of Engineering.
- [10] Öztekin E., 2019. Karma Çelik Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kesme Davranışının İncelenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 40.
- [11] Pajak M., Ponikiewski T., 2013. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. Construction and Building Materials, 47(10), 397-408.
- [12] Mazaheripour H., Ghanbarpour S., Mirmoradi S., Hosseinpour I., 2011. The effect of polypropylene

- fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), 351-358.
- [13] Ponikiewski T., Golaszewski J., 2013. Properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete for optimal rheological and mechanical properties in precast beams. *Concrete and Concrete Structures Conference*, 65, 290-295.
- [14] Frazao C., Camões A., Barros J., Gonçalves D., (2015). Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 155-166.
- [15] Chao S., Lin W., 2013. Effects of silica fume and steel fiber on chloride ion penetration and corrosion behavior of cement-based composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* , 28, 279-284.
- [16] Papadakis V., 2000. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance. *Cement and Concrete Research* , 30(2), 291-299.
- [17] Khaloo A., Raisi E., Hosseini P., Tahsiri H., 2014. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 51, 179-186.
- [18] Altun F., Aktaş B., 2013. Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 575-581.
- [19] Birincioglu M., Ulusoy S., Arslan G., 2015. Influence of steel fibers on the shear strength of RC beams without stirrups. *International Conference on Civil and Environmental Engineering ICOCEE-Cappadocia*. Nevşehir, Türkiye, 20 May: 185-192.
- [20] Naik T., Kumar R., Ramme B., Canpolat F., 2012. Development of high-strength, economical self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 463-469.
- [21] Yan W., Cui W., Qi L., 2020. Effect of aggregate gradation and mortar rheology on static segregation of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 119816.
- [22] Lu H., Sun X., Ma H., 2022. Anti-washout Concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 128151.
- [23] Guler S., Akbulut Z., Siad H., Lachemi, M., 2021. Effect of macro polypropylene, polyamide and steel fibers on the residual properties of SCC at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*.
- [24] Ferdosian I., Camões A., 2021. Mechanical performance and post-cracking behavior of self-compacting steel-fiber reinforced eco-efficient ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- [25] Idir R., Cyr M., Pavoine A., 2020. Investigations on the durability of alkali-activated recycled glass. *Construction and Building Materials*.
- [26] Alsaif A., Koutas L., Bernal S., Guadagnini M., Pilakoutas K., 2018. Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 533-543.
- [27] Ahmad H., Hashim M., Bakar A., Rahman F., 2019. Flexural performance of full and partially steel fibre reinforced self-compacting concrete (SCFRC) ribbed slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- [28] Ahmad J., Lezcano R., Majdi A., El-Shorbagy M., Kahla N., Deifalla A., 2022. Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials*, 1-15.
- [29] Chen M., Si H., Fan X., Xuan Y., Zhang M., 2022. Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*.
- [30] Li D., Jin L., Fu J., Lu A., 2016. Size effect tests of normal-strength and high-strength RC columns subjected to axial compressive loading. *Engineering Structures*.
- [31] Gao J., Sha A., Wang Z., Hu L., Yun D., Liu Z., Huang, Y., 2018. Characterization of carbon fiber distribution in cement-based composites by Computed Tomography. *Construction and Building Materials*, 134-147.
- [32] Wang D., Ju Y., Shen H., Xu L., 2019. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 464-473.
- [33] Safiuddin M., Amrul Kaish A., Woo C.O., Raman S., 2018. Early-Age Cracking in Concrete: Causes, Consequences, Remedial Measures, and Recommendations. *Applied Sciences*, 8-10.
- [34] Sapieta M., Dekýš V., Štalmach O., Sapietová A., Svoboda M., 2021. Detection of Elastic Deformation in Metal Materials in Infrared Spectral Range. *Materials*.
- [35] Du C., Liu T., Zou D., Teng J., 2015. Time dependent strain development of early age concrete under step-by-step load history. *Construction and Building*

Materials.

- [36] Shi X., Park P., Rew Y., Huang K., Sim C., 2020. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. *Construction and Building Materials*.
- [37] Gordo J., Guedes Soares C., 2014. Experimental analysis of the effect of frame spacing variation on the ultimate bending moment of box girders. *Marine Structures*, 111-134.
- [38] Wang Y., Wang W., Wang D., Liu Y., Liu J., 2021. Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption coefficient of porous building materials. *Journal of Building Engineering*.
- [39] Van Belleghem B., Montoya R., Dewanckele J., Van den Steen N., De Graeve I., Deconinck J., De Belie N., 2016. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar – A comparison between experimental study and finite element analysis. *Construction and Building Materials*, 154-162.
- [40] Zhang P., Wittmann F., Vogel M., Müller H., Zhao T. 2017. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete. *Cement and Concrete Research*, 60-67.
- [41] Çelik M., Kaçmaz A., 2016. The investigation of static and dynamic capillary by water absorption in porous building stones under normal and salty water conditions. *Environmental Earth Sciences*.
- [42] Liu B., Jiang J., Shen S., Zhou F., Shi J., He Z., 2020. Effects of curing methods of concrete after steam curing on mechanical strength and permeability. *Construction and Building Materials*.
- [43] Liu R., Xiao H., Liu J., Guo S., Pei Y., 2019. Improving the microstructure of ITZ and reducing the permeability of concrete with various water/cement ratios using nano-silica. *Journal of Materials Science*, 444-456.
- [44] Aslam F., Zaid O., Althoey F., Alyami S., Qaidi S., Prado Gil J., García R., 2022. Evaluating the influence of fly ash and waste glass on the characteristics of coconut fibers reinforced concrete. *Structural Concrete*.
- [45] Gong F., Maekawa K., 2019. Proposal of poro-mechanical coupling among ASR, corrosion and frost action for damage assessment of structural concrete with water. *Engineering Structures*, 418-429.
- [46] Oliveira L., Nepomuceno M., Gomes J., Vila M., 2014. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 113-120.
- [47] Yang K., Basheer P., Bai Y., Magee B., Long A., (2014). Development of a new in situ test method to measure the air permeability of high performance concretes. *NDT & E International*, 30-40.
- [48] Ghosh P., Tran Q., 2014. Correlation Between Bulk and Surface Resistivity of Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 119-132.
- [49] Robles K., Jae Yee J., Hoon Kee S., 2022. Electrical Resistivity Measurements for Nondestructive Evaluation of Chloride-Induced Deterioration of Reinforced Concrete—A Review. *Materials*.
- [50] Belli A., Mobili A., Bellezze T., Tittarelli F., 2020. Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. *Cement and Concrete Composites*.
- [51] Ganta J., Seshagiri Rao M., Mousavi S., Srinivasa Reddy V., Bhojaraju C., 2020. Hybrid steel/glass fiber-reinforced self-consolidating concrete considering packing factor: Mechanical and durability characteristics. *Structures*, 956-972.
- [52] Melchers R., 2019. Modelling durability of reinforced concrete structures. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 171-181.
- [53] Wang X., Fan F., Lai J., Xie Y., 2021. Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining. *Structures*.
- [54] Chen Z., Koleva D., 2017. Effect of Stray Current on Corrosion Behavior of Reinforcing Steel: Importance of Cell Geometry and Orientation with Respect to the Electrical Field. *International Journal of Structural and Civil Engineering*.
- [55] Beglarigale A., Yazıcı H., 2015. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. *Construction and Building Materials*.
- [56] Jajcinovic M., Fischer W., Mautner A., Bauer W., Hirn U., 2018. Influence of relative humidity on the strength of hardwood and softwood pulp fibres and fibre to fibre joints. *Cellulose*.
- [57] Alsaif A., Bernal S., Guadagnini M., Pilakoutas, K., 2018. Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*.
- [58] Wang Y., Ueda T., Gong F., Zhang D., 2019. Meso-scale mechanical deterioration of mortar due to sodium chloride attack. *Cement and Concrete Composites*.

- [59] Samimi K., Bernard S., Maghsoudi A., Maghsoudi M., Siad H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*.
- [60] Yehia S., Douba A., Abdullahi O., Farrag S., 2016. Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*.
- [61] Grünewald S., Walraven J., 2020. Properties of fibre reinforced SCC. *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*.
- [62] Ameer A., Rafiq M., Tsioulou O., 2021. Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*.
- [63] Otieno M., Ikotun J., Ballim Y., 2020. Experimental investigations on the effect of concrete quality, exposure conditions and duration of initial moist curing on carbonation rate in concretes exposed to urban, inland environment. *Construction and Building Materials*.
- [64] Paul S., Panda B., Huang Y., Garg A., Peng X., 2018. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete. *Measurement*.
- [65] AL-Ameer A., 2013. The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete. *Am. J. Civ. Eng.*, 102-110.
- [66] Aslani F., Nejadi S., 2013. Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Compos. B*, 121-133.
- [67] Atis C., O K., 2009. Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Constr. Build. Mater.*, 392-399.
- [68] Gencil O., Brostow W., Datashvili T., Thedford M., 2011. Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Compos. Interfaces*, 169-184.
- [69] Neves R., Almeida J., 2005. Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Struct. Concr.*, 1-8.
- [70] El-Dieb A., Taha M., 2012. Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Constr. Build. Mater.*, 585-596.
- [71] Sahmaran M., Yurtseven A., Yaman I., 2015. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Build. Environ.*, 1672-1677.
- [72] Thomas J., Ramaswamy A., 2007. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *J. Mater. Civ. Eng. ASCE*, 385-392.
- [73] Musmar M., 2013. Tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Contemp. Eng. Sci.*, 225-237.
- [74] Sahin Y., Köksal F., 2009. The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete. *Constr. Build. Mater.*, 1801-1806.
- [75] Carmona S., Aguado A., Molins C., 2013. Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test. *Constr. Build. Mater.*, 592-600.
- [76] Güneysi E., Gesoglu M., Akoi A., Mermerdas K., 2014. Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete. *Composites Part B*, 83-91.
- [77] Miao B., Chern J., Yang C., 2003. Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *J. Chin. Inst. Eng.*, 523-530.
- [78] Alyousif A., 2010. Design and Testing of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete. M.Sc. Thesis. Eastern Mediterranean University.
- [79] Yazıcı S., Inan G., Tabak V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Constr. Build. Mater.*, 1250-1253.
- [80] Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S., 2010. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Constr. Build. Mater.*
- [81] Haddadou N., Chaid R., Ghernouti Y., Adjou N., 2014. The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. *J. Build. Mater. Struct.*, 65-76.



Yer Karosu Uygulamaları İçin Konya Bölgesinden (Türkiye) Temin Edilen Kil Minerallerinin Zenginleştirilmesi ve Karakterizasyonuna Genel Bir Bakış

An Overview of Enrichment and Characterization of Clay Minerals Obtained From Konya Region (Türkiye) For Applications in Floor Tile

Emre AKDOĞAN¹ , Yunus BÜYÜKTEPE² , Nihan ERCİOĞLU AKDOĞAN^{3,*} 

¹ Kimya Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1505-9323

² Kimya Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-0495-7873

³ Seranit Seramik Fabrikası, ARGE Merkezi, Eskişehir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-1528-9914

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 10/04/2023

Kabul Tarihi : 22/06/2023

Anahtar Kelimeler

Kil
Seramik
Sürdürülebilirlik
Zenginleştirme

Research Paper

Received Date : 10/04/2023

Accepted Date : 22/06/2023

Keywords

Ceramic
Clay
Enrichment
Sustainability

Özet

Doğada bulunan kil minerallerinin, fizikokimyasal özelliklerinin tespit edilmesinden sonra saflaştırılarak ve işlenerek kullanım alanları geliştirilebilmektedir. Kil minerallerinin türü, kimyasal bileşimi ve oranı bir kilin kalitesini belirlemektedir. Bu sebeple, killerin yapılarında bulunan safsızlıklardan dolayı bir zenginleştirme işlemi ile temizlenmesi gerekmektedir. Buradan yola çıkarak bu çalışmada, ülkemizde farklı kalitelere sahip bulunan bu doğal kaynakların daha iyi değerlendirilmesi ve ülke ekonomisine daha çok katkısı olacak şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Temin edilen kil numunelerine uygun saflaştırma prosesi uygulanmıştır. Zenginleştirilen killerin harmanlama işlemi sonrasında seramik üretimde kullanılan angop reçetesinde alternatif hammadde olarak kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Saflaştırılan kil numunelerinin X-Işını Kırınım yöntemi ile hammadde içeriğindeki elementlerin kantitatif analizi yapılarak kimyasal içerikleri tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, pişirim sonrası angop içerisinde oluşan fazların tespiti için X-Işınları Diffraktometresi kullanılarak malzemelerin kristalografik özellikleri incelenmiştir. Optik dilatometre cihazı ile killerin termal davranışları incelenmiştir. Zenginleştirilmiş killerin kullanıldığı angop reçetelerinin ısı genleşme analizi ile boyutsal değişimlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçümü gerçekleştirilmiştir. Seramik endüstrisinde, angop reçetesi içerisinde alternatif hammadde olarak kullanımı uygun bulunmuştur.

Abstract

Natural clay minerals usage areas can be developed by purifying and processing. The quality of clay is determined by its type, chemical composition, and minerals ratio. Therefore, the impurities in clays need to be removed from the clays via enrichment processes. In this study, we aimed at making better use of these natural resources, possessing different qualities in our country, and using them in a way that will contribute more to the country's economy. Appropriate purification processes were applied to the clay samples to enrich. The suitability of the enriched clays as alternative raw materials in the engobe recipe for ceramic production after the blending process was investigated. The chemical contents of the enriched clay samples were characterized using X-Ray Diffraction method. In addition, the crystallographic properties of the materials were investigated by using X-Ray Diffractometry to detect the phases formed in engobe recipes after firing. The thermal behavior of the clays was investigated using an optical dilatometer. The thermal expansion analysis of engobe recipes using the enriched clays and the measurement of dimensional changes as a function of temperature were carried out. The enriched clays are considered highly promising materials for use in engobe recipes in the ceramic industry.

1. Giriş

Angop, kil temelli olup sır ile bünye arasına uygulanarak, uygulama şekline göre seramik ürünün yüzeyinin rengini değiştiren, ürüne bazı dekoratif değerler

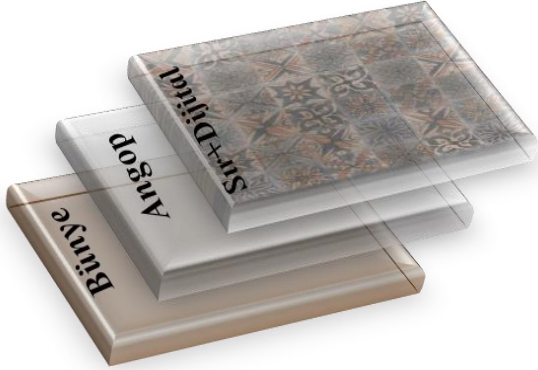
katan bir kil tabakası olarak tanımlanan seramik çamurudur [1, 2]. Şekil 1'de seramiğin tabakalı yapısı gösterilmiştir.

Ürünün nihai rengini belirleyen en önemli faktörlerden biridir [2, 3]. Sır ile bünye arasına uygulanan angobun, en temel faydalarından biri de su geçirgenliğini azaltmaktır. Ayrıca birçok seramik hatasının önüne geçmek için de kullanılmaktadır. Bünye renginin kapatılmasında önemli

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): nihanercioglu@gmail.com



bir görev üstlenir [2]. Isıl genleşme katsayısının ayarlanmasında kullanılarak, sır ile bünye arasında genleşmeden dolayı oluşacak deformasyonların önlenmesini sağlar [4, 5, 6].



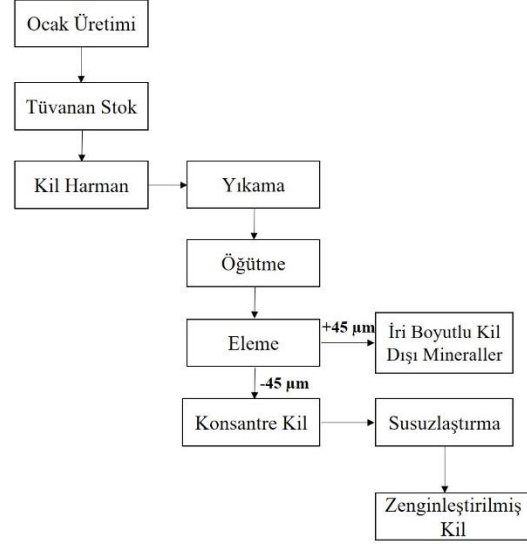
Şekil 1. Seramik karonun tabakalı yapısı

Angop hazırlanmasında, farklı yapılarıdaki kil ve kaolinler, feldspat, frit, nefelin, kuvars gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır [1, 7, 8]. Angopların bileşimindeki en yüksek oranı kil oluşturur ve bunların kimyasal ve mineralojik yapısı büyük önem arz etmektedir [8]. Kil mineralleri temelinde alüminyum hidrosilikat yapılarıdır [9, 10].

Bazı kil minerallerinde alüminyum bileşeninin yerini tamamen veya kısmen demir (Fe) veya magnezyum (Mg) alır [11, 12]. Alkali mineraller veya alkali metaller kil minerallerinin temel bileşenleri olarak yapıda bulunurlar. Bazı killeri tek bir kil mineralinden ibaretken, çoğu birkaç mineralin karışımı halinde bulunmaktadır [11, 13, 14]. Killer içinde kil minerallerine ilâveten kuvars, kalsit, feldspat ve pirit gibi mineralleri «kil olmayan malzeme» bulundurabilirler. Birçok kil minerali de yapısı içinde organik maddeleri ve suda çözünebilir tuzları ihtiva ederler [15, 16, 9]. Dünyada üretilen farklı özellikteki kil minerallerinin %70 ile %75'i seramik endüstrisinde farklı alanlarda kullanılmaktadır [17, 18]. Seramikte kullanılan killeri çoğunlukla kaolin esaslı alümina oranları yüksek killeri olup; su emme, pişme rengi, kuruma ve pişmede büzülme miktarı, camlaşma sıcaklığı değerleri, basınç dayanımları gibi özellikleri tane boyutlarına göre değişmektedir [17, 18]. Maden ocaklarında üretilen killeri, istenilen tane boyutunda ve homojenlikte elde edilmiş olsalar bile, genellikle bünyelerinde birtakım safsızlıkları bulundurmaktadırlar. Bunların yanı sıra, kil içerisinde istenilenden fazla miktarlarda kuvars ve feldspat minerallerinin yanı sıra mika, titan, demir oksit ve suda çözünen sülfatlı istenmeyen minerallerde yapı içerisinde bulunabilmektedir [21, 22, 23, 24]. Bu sebeple, istenmeyen safsızlıkların yapıda bulunması veya istenilenden daha fazla oranda bulunmasından kaynaklı olarak killeri

zenginleştirilmesi teknolojik bir zorunluluk haline gelmiştir [19, 20].

Killerin zenginleştirilmesi işlemi Şekil 2'de gösterilen kademelerden oluşmaktadır.



Şekil 2. Killerin zenginleştirilmesi işleminin iş akış şeması

Zenginleştirme aşamalarındaki basamaklar şu kademelerden oluşmaktadır [21, 22, 23]:

- Ön zenginleştirme; renklendirme yapan metal oksitli damarları gözle ayırt ederek ve manyetik parçaları mıknatıs yardımı uzaklaştırılmasının sağlanması,
- Boyut küçültme; ocaktan alınan killeri 3 ila 5 cm iriliğe indirilmesi amacıyla boyut küçültme işlemlerinin yapılması,
- Harmanlama; ocaktan üretilen ve değişik damarlardan alınan killeri birlikte harmanlanarak homojenleştirilmesi,
- Zenginleştirme; istenilen irilikte ve harmanlanmış killeri su ile yıkılarak mekanik dağıtma ile açılması işlemlerini kapsamaktadır.

Ülkemizdeki işletilebilir kil rezervleri 40 milyon tondan fazla olup üretim kapasiteleri 900.000 ton/yıl olmasına rağmen ülkemizdeki kil potansiyeli bazı endüstriyel kullanımlar için kaliteli kil üretimini karşılayamamaktadır [19]. Bu sebeple gerekli miktar, ithalat yolu ile karşılanmaya çalışılmaktadır. Buradan yola çıkılarak bu çalışmada, düşük maliyetli killeri zenginleştirilmesi ile ürüne katma değer kazandırılması amaçlanmıştır. Elde edilen zenginleştirilmiş killeri; alternatif hammadde olarak, ithal edilen angop kili yerine yer karosu angop reçetesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunun yanı sıra, geliştirilen angop yüzeylerin renk, geçirgenlik ve yapı-özellik davranışı incelenmiş olup aynı zamanda bu özellikleri etkileyen parametreler açıklanmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Konya'da bulunan Tokluoğlu Madencilik firmasından, saflaştırılmak üzere iki adet kumlu kil (K173 ve K251) ve kuvarsit numuneleri tedarik edilmiştir. Standart yer karosu angop reçetesinde kullanılan kil (MT500), Almanya'da bulunan Stephan Schmidt gruppe firmasından tedarik edilmektedir. Geliştirilen angop reçetelerinin reolojik özelliklerinin kontrol altında tutulmasını sağlayan reolojik ajanlardan sodyum tripolifosfat (STTP) Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. firmasından, karboksimetil selüloz (CMC) Lamberti Kimya San. ve Tic. Firmasından satın alma yolu ile tedarik edilmiştir. Angop hazırlama aşamasında değirmenlerin içerisine ilave edilen su; seramik firmasının atık su arıtma tesisinden sağlanmıştır.

2.1. Killerin Zenginleştirilmesi

Killerin zenginleştirilmesi işlemi için kumlu yapıdaki kil numuneleriyle kuvarsit harmanlanarak reçeteler oluşturulmuştur. Hazırlanan reçeteler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Kil reçeteleri

Kil Reçeteleri	K173	K251	Kuvarsit
ECR311	60	20	20
ECR983	45	40	15
ECR441	40	40	10
ECR271	20	70	10

Killerin zenginleştirilmesi genellikle kilin su ile yıkanması ve mekanik olarak dağıtılarak boyutsal sınıflandırılması temelinde gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, kil ve kuvarsit numunelerinden oluşturulan reçeteler, her biri alümina bilyeli 5 kg'lık değirmenlerin içerisine alınarak zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için toplam kil kütlelerine göre %55 su ile 300 rpm'de karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Değirmen öğütme süresini optimize etmek için; 1,5 saat, 3,5 saat ve 7 saat öğütme sürelerinde denemeler yapılmıştır. Reçeteler öğütüldükten sonra, ikinci aşama olarak sıvısı ve katısı birlikte bulunan çamur karışımları 45 µm (No. 325) Retsch markalı, eleklerden geçirilerek iri boyutlu kuvars taşı ve organik maddelerden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Elekten geçen küçük boyutlu kil tanecikleri çöktürülmüş ve suda çözünen safsızlıklardan ayrılarak killerin zenginleştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.2. Tane Boyut Dağılımı

X-ışınları Sedigrafı Yöntemiyle tabakalı yapıya sahip zenginleştirilmiş killerin tane boyut dağılımları analiz edilmiştir. Ölçümlerde, Micromeritics marka SediGraph III Plus model cihaz kullanılmıştır. Bu yöntemle, dar ve yatay bir X-ışını tabancası kullanarak, sıvı içerisindeki partiküllerinin bağıl kütle konsantrasyonunu X-ışınının şiddetini ölçerek belirlenmiştir. Homojen dağıtılmış katı ve sıvı karışımı ölçüm hücresine konularak katı partiküllerin bir miktar X-ışını enerjisini absorplaması sağlanmıştır. X-ışını tarama yaparken karıştırma işlemi durdurularak tanelerin çökmesine izin verilmiştir. Bu sayede tanelerin çökme hızı, viskozitesi ve yoğunluğu bilinen bir ortamda Stokes kanununa uyarlanarak tane partikül boyutları belirlenmiştir. Sedigrafı ile numunelerin, 0.1-300 mikrometre arası tane boyutları ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, d(0,1), d(0,50) ve d(0,9) değerleri ile kümülatif kütle yüzde değerleri tespit edilebilmiş ve tane boyut dağılımı grafiği elde edilmiştir.

2.3. Kimyasal ve Minerolojik Analiz

X-ışını Kırınım (XRF) analizi Rigaku marka ZSX Primus model XRF cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bor-uranyum aralığındaki elementlerin analizleri, zenginleştirilmiş kil numunelerinin matrisine bağlı olarak; ppt% konsantrasyon mertebesinde, tahribatsız ve hızlı bir şekilde ölçülmüştür. Kaba tane boyutlu numuneler tungsten halkalı öğütücü yardımı ile ~63µm altına gelecek şekilde öğütülmüştür. Öğütme sonrası numuneler ~105±5°C etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmiştir. Kurutulmuş numunelerin ~1000°C'de kızdırma kaybına bakılmıştır.

X-ışınları Difraksiyonu (XRD) yöntemi ile zenginleştirilmiş kil numunelerinin yapıları incelenmiş ve içeriğindeki fazlar tespit edilmiştir. Numuneler uygun metoda göre hazırlanıp Rigaku marka Miniflex 600 model XRD cihazı kullanılarak standart tarama aralığında ($2\theta=5^\circ-70^\circ$) ölçümü yapılmıştır.

2.4. Isı Mikroskobu ile Ergime Davranışı Tayini

Zenginleştirilmiş killerin ısı mikroskobu ile ergime davranışları analiz edilmiştir. Ergime davranışları Misura ODHT HSM 1600-80 marka ısı mikroskobuyla belirlenmiştir. Numunelerin ergime davranışının ölçümleri sonrasında, ergime davranışı ve karakteristik sıcaklık noktaları (sinterleme, yumuşama, tam küre, yarı küre ve akma sıcaklığı) tespit edilmiştir. Toz numune doğrudan numune hazırlama aparatıyla yaklaşık 2x3 mm (çap x

yükseklik) ebatlarında şekillendirilerek silindirik hale getirilmiştir. Şekillendirilen numuneler alümina altlık üzerinde cihaza yerleştirilerek analizleri yapılmıştır.

2.5. Yer Karosu Angop Uygulaması

Standart angop kili yerine kil reçeteleri ilave edilerek hazırlanan angoplar 30x30 cm² ham yer karosu üzerine 30-35 gram olacak şekilde uygulanmıştır. Sır/angop çekme aleti vasıtası ile angobun karo yüzeyine uygulanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Uygulama yapılan numuneler etüvde tamamen kuruyana kadar bekletilmiştir. Kuruyan ham karo, yer karosu fırın rejiminde (1205°C-52dk) pişirilmiştir.

2.6. Isıl Genleşme Katsayısı Tayini

Zenginleştirilmiş kil numuneleriyle geliştirilen angop reçetelerinin ısıl genleşme ölçümleri Netzsch marka 402PC model dilatometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Dilatometre ölçümünde, malzemenin ısı karşısında gösterdiği boyut değişimi hesaplanmıştır. Pişmiş numuneler, ~25 ila 50 mm uzunluğunda ve ~5 mm genişliğinde, ~5 mm kalınlığında ölçüm boyutuna getirilmiştir. ~105°C±5 sıcaklığında etüvde numuneler tamamen kuru oluncaya kadar tutulmuştur (iki tartım arasındaki fark ~%0,1 oluncaya kadar etüvde bekletilmiştir). Numuneler oda sıcaklığında bekletilerek kararlı hale gelmesi sağlanmıştır. Numuneler için ısıtma hızı 10°C/dk ile 700°C'ye kadar olan standart bir pişme periyodu uygulanmıştır. Termal genleşme değerleri doğrusal genleşme katsayısı (α) cinsinden verilmiş olup ~50°C ila 650°C arasında 50°C'de bir boyutsal değişim verileri hesaplanmıştır.

2.7. Küçük Renk Farklılıkları ve Geçirgenlik Analizi

Angop numunelerinin renk farklılıkları TS EN ISO 10545-16 standardına göre ölçülmüştür. Bu metot, angop numunesinin hem kendi rengini hem de diğer numunelerin birbirine göre küçük renk farklılıklarını tayin etmek için kullanılmıştır. Ölçülecek numune (referans) yüzeyi seçilir, test edilecek yere renk ölçüm cihazı koyulur. Yüzeyin ışık almaması sağlanır. Numune yüzeyinden iki ölçüm yapılarak kaydedilir. CIE tarafından kabul görmüş en yaygın ölçüm yöntemi L*a*b* değerlerinin tespitidir. L; yüzeyin beyazlık (-L) ve koyuluk (+L) değerini, a; kırmızılık (+a) ve yeşillik (-a) değerini ve b ise; sarılık (+b) ve mavilik (-b) değerlerinin ölçülmesini sağlamıştır.

Angopların geçirgenlik testleri için yüzeyin üzerinde herhangi bir kısım işaretlenerek L, a, b değerleri ölçülür.

Ölçüm sonrası angoplular on beş dakika boyunca suyun içerisinde bekletilerek su emmesi sağlanır. Sürenin sonunda, işaretli nokta üzerinden tekrar renk ölçümü yapılarak aradaki fark hesaplanır. Bu farkın fabrika standartlarına göre 2,5 değerinin altında olması beklenir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tane Boyut Dağılımı Analizi

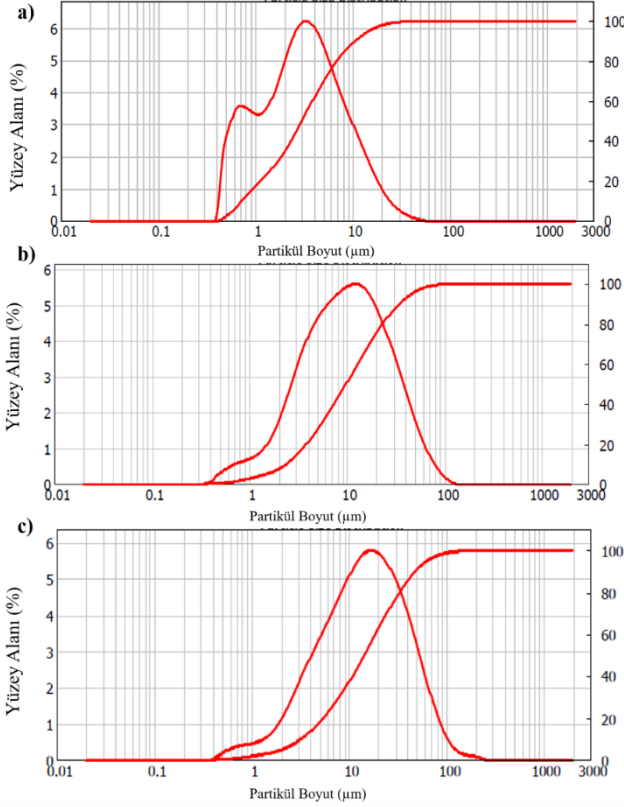
Farklı öğütme sürelerinde hazırlanan numunelerin tane boyut dağılımları incelenmiştir. Öncelikle en uzun öğütme süresi olan 7 saat boyunca öğütme işlemine tabi tutulan zenginleştirilmiş kil numunelerinin lazer yöntemi ile elde edilen tane boyut analizi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Zenginleştirilen killerin tane boyut dağılımları

	d(0,1) μm	d(0,5) μm	d(0,9) μm
ECR311	0,7	3	11,2
ECR983	0,7	3	10,6
ECR441	0,7	3	11,1

Tüm numunelerin tane boyut dağılımları incelendiğinde, tüm numunelerin tane boyut dağılımlarının %10'unun 0,7 μm 'nin altındayken, %50'sinin de 3 μm 'nin altında olduğu belirlenmiştir. Zenginleştirilmiş kil numunelerinin tane boyut dağılımlarının d(0,9) verileri karşılaştırıldığında ise en yüksek tane boyutuna sahip numunenin ECR271 kodlu kil reçetesi olduğu tespit edilmiştir. ECR271 kodlu numunenin tane boyut dağılımlarının %90'ının 12 μm altında olduğu görülmüştür. En düşük d(0,9) tane boyut dağılımına sahip numunenin ise ECR983 kodlu zenginleştirilmiş kil reçetesinin numunesi olduğu görülmüştür. Tüm kil numuneleri benzer tane boyut dağılıma sahip olup standart sapmaları $\pm 0,5 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. 7 saat öğütme sonrası elde edilen çamur kurutulularak granül haline getirilmiştir. Granüler kil reçeteleri, 10x20 mm² ebatlarında preslenerek sinterleme sonrası deformasyon hareketini incelemek için yer karosu fırın rejiminde pişirilmiştir. Pişirim sonucunda numunelerin deformasyonu (konkav-konveks yönelmesi) incelenmiştir. Diğer numunelere kıyasla, ECR983 kodlu numunenin daha düz (yönelmesiz) çıktığı belirlenmiştir. Konkav ve konveks deformasyon hareketi yapmaması angop reçetesinde kullanımını mümkün kılmıştır. Bu sebeple, ECR983 kodlu denemenin 7 saat öğütme süresi haricinde 3,5 ve 1,5 saat süresince öğütüldükten sonra da tane boyut dağılımları incelenmiştir. Şekil 3'de R983 kodlu reçete için farklı öğütme sürelerinde tane boyut dağılımları gösterilmiştir. Öğütme süresinin azalması ile birlikte tane boyutları artış görülmüştür. Şekil 3.a'da 7 saat öğütülen R983 kodlu kil reçetesinin sonucu gösterilmektedir. Şekil 3.b'de sunulan

3,5 saatlik öğütme süresindeki R983 reçetesinin $d(0,1)$ değerinin $2,4 \mu\text{m}$, $d(0,5)$ değerinin $9,8 \mu\text{m}$ ve $d(0,9)$ değerinin $34,5 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Öğütme süresi 1,5 saat olan R983 reçetesinin ise $d(0,1)$, $d(0,5)$ ve $d(0,90)$ değerlerinin, sırasıyla $3,2 \mu\text{m}$, $14,3 \mu\text{m}$ ve $48,1 \mu\text{m}$ olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.c).



Şekil 3. Farklı öğütme sürelerinde ECR983 kodlu numunenin tane boyut dağılımları a) 7 saat öğütme süresi b) 3,5 saat öğütme süresi c) 1,5 saat öğütme süresi

3.2. Kimyasal Analiz

Tane boyut dağılımları analiz edilen çamurlar kurutulduktan sonra XRF analizleri karşılaştırılarak öğütme süresi tespit edilmiştir. Zenginleştirilmiş kil numunelerinin yarı kantitatif kimyasal analizi yapılarak standart yer karosu angop reçetesinde kullanılan MT500 killinin bileşenleri ile karşılaştırılmıştır. En fazla öğütme süresi olan 7 saat öğünmüş numunelerin değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Zenginleştirilmiş kil numunelerinin kimyasal analiz sonuçları benzer özellik göstermektedir. Tüm kil numunelerinin alümina silikat esaslı yapılar oldukları tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra; tüm kil numunelerinin, alkali mineraller veya alkali metaller esaslı bileşenleri dikkat çekmektedir. Tablo 3'de görüldüğü gibi Na_2O , K_2O , MgO gibi alkalilerin yapıda bulunduğu belirlenmiştir. MT500 kili hariç diğer numunelerin ateş zayıatları 6-7 arasında ölçülürken, MT500 kilinin ateş

zayıatı 11,61 olarak tespit edilmiştir. Diğer önemli fark ise, zenginleştirilmiş kil numunelerinde K_2O oranı $\sim 2,66 \pm 0,1$ iken, MT500 numunesinde bu oran 1,9 olarak kaydedilmiştir. Zenginleştirilmiş killerde K_2O oranının %40 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, Fe_2O_3 oranları kıyaslandığında en düşük zenginleştirilmiş kil numunesinin ECR983 kodlu numune olduğu görülmektedir. Zenginleştirilmiş kil numunelerinin SiO_2 ve Al_2O_3 değerleri standart olarak kullanılan kil numunesinin değerlerine göre farklılık göstermektedir. SiO_2 miktarının düşürülmesi ve Al_2O_3 miktarının yükseltilmesi killerin saflaştırılması için ana hedefdir. İstenilen değerlerin öğütme süresinin değiştirilmesi ile uygun aralıklara getirilmesi gerekmektedir. Al_2O_3 oranları kıyaslandığında, en yüksek değere sahip numunenin ECR983 kodlu numune olduğu ve SiO_2 miktarının diğer zenginleştirilmiş kil numunelerinden az olduğu tespit edilmiştir. ECR983, ECR441 ve ECR271 kodlu numunelerde SO_3 bileşeninin uzaklaştırıldığı belirlenmiştir.

Tablo 3. 7 Saatlik Öğütme İle Zenginleştirilmiş Kil Reçetelerinin Kimyasal Analiz Sonuçları

	R311	ECR983	ECR441	ECR271	MT500
SiO_2	63,63	63,89	64,98	66,48	60,83
Al_2O_3	21,9	22,95	20,93	20,49	21,64
K_2O	2,75	2,62	2,74	2,52	1,9
Fe_2O_3	1,41	1,3	1,48	1,72	1,01
TiO_2	1,11	0,94	1,08	1,02	1,48
Na_2O	0,93	0,69	0,81	0,56	0,66
MgO	0,52	0,49	0,43	0,54	0,51
CaO	0,3	0,25	0,29	0,35	0,28
P_2O_5	0,24	0,15	0,19	0,22	-
SO_3	0,08	-	-	-	0,09
A.Z	7,13	6,71	7,07	6,1	11,61

ECR983 kodlu numunenin kimyasal analiz sonuçları, öğütme süresinin optimize edilmesi için farklı öğütme sürelerinde (7, 3,5 ve 1,5 saat) öğütülmesi sonrasında XRF analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'de ise elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. SiO_2 ve Al_2O_3 değerleri karşılaştırıldığında, en düşük SiO_2 değerine 7 saatlik bir öğütmenin sonunda ulaşılrken, 3,5 saatlik öğütme sonrasında ise en yüksek Al_2O_3 değerine ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra, kil minerali yapısındaki organik maddeler ve safsızlıklar çok küçük miktarlarda olsalar bile kilin mekanik özellikleri ve kararlılıkları üzerinde büyük etki yaratabildiğinden yapıdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu sebeple TiO_2 , SO_3 , MgO , CaO bileşenlerinin oranlarında da azalma olması beklenmiştir. Bu bileşenlerinde yapıda en az bulunduğu numune 7 saatlik öğütme süresine sahip olan numunenin olduğu tespit

edilmiştir. Ateş zaiyatları, 7 ve 3,5 saatlik öğünme süresine sahip numunelerde benzer değerlerde gözlenirken 1,5 saat öğünme süresinde ateş zaiyatının azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi, 1,5 saat öğünmüş numunenin granüllerinin daha iri olması ve sinterleme aşamasında daha küçük tane boyutuna sahip numunelere göre daha az ergime fazına geçmesidir.

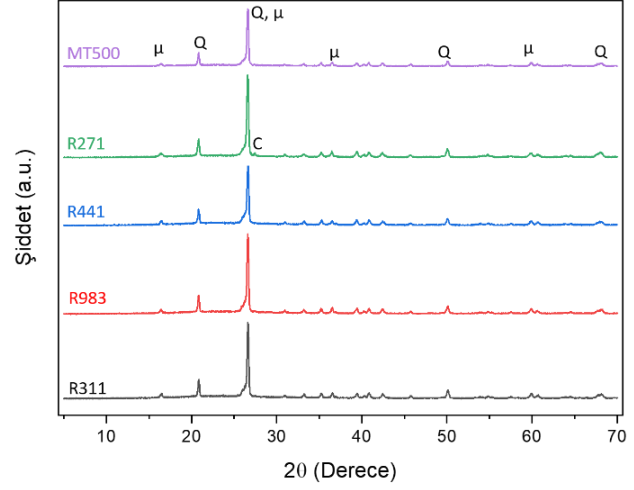
Tablo 4. ECR983 Kodlu Zenginleştirilmiş Kil Numunesinin Farklı Öğütme Sürelerindeki Kimyasal Analiz Sonuçları

Öğütme Süresi	7 Saat	3,5 Saat	1,5 Saat
Na ₂ O	0,69	0,68	0,41
MgO	0,49	0,58	0,50
Al ₂ O ₃	22,95	22,5	19,0
SiO ₂	63,89	63,23	68,98
P ₂ O ₅	0,15	0,19	0,22
SO ₃	-	-	0,02
K ₂ O	2,62	3,27	2,99
CaO	0,25	0,29	0,28
TiO ₂	0,94	1,08	0,95
Fe ₂ O ₃	1,30	1,45	1,42
A.Z.	6,71	6,74	5,17

3.3. Mineralojik Analiz

Zenginleştirilmiş kil numunelerinin, pişirim sonrasında oluşacak kristal yapılarının tespiti için XRD analizi yapılmıştır. Numunelerden elde edilen faz analizlerinin sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu analizler sonucunda tüm numunelerde baskın faz olarak, kuvars ve müllit fazlarının meydana geldiği görülmüştür. Yapılarda meydana gelen kuvars fazın oluşumunun iki nedenden dolayı ortaya çıktığı tespit edilmiştir. İlki XRF sonuçlarında tespit edildiği gibi ergitici hammaddelerin bulunması diğeri ise yapıdaki ince kuvars [10]. Kuvarın en yüksek pik şiddetine ulaştığı numunenin ECR311 numunesi olduğu belirlenmiştir. Zenginleştirmek için ECR311 kilinin içerisine ilave edilen kuvarsit, diğer killere ilave edilenlere kıyasla daha fazladır. Bunun yanı sıra, kimyasal analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi ergiticilerin oranı en fazla olan zenginleştirilmiş kil numunesidir. Bu sebeple, ECR311 numunesinin içerisinde oluşan camsı faz yoğunluğu diğer zenginleştirilmiş kil numunelerinden fazladır. Bunun yanı sıra, yapı içerisinde en düşük kuvars pik şiddetine sahip olan zenginleştirilmiş kil numunesi ECR441'dir. Tüm numunelerde görülen ve sinterleme aşamasında düşük sıcaklıkta oluşan müllit kristalleri, iyi kristalleşmiş kaolinit yapısından müllit çekirdeklerinin birikmesiyle meydana gelmişlerdir. Müllit fazı yapılaraya yüksek mekanik dayanım ve düşük ısıl genleşme özelliklerini kazandırmıştır. Tüm numunelere

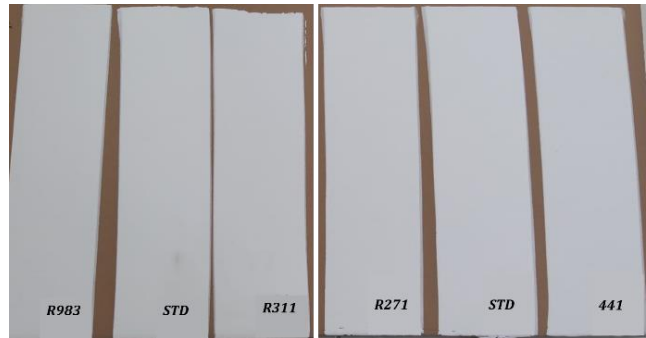
kıyasla R271 kodlu numunede $2\theta=26^\circ$ 'da karbon pikine rastlanmıştır. Yapıda karbon bulunması pişirim sonrasında siyah çekirdek (black core) oluşumuna neden olabileceği için istenmeyen bir durumdur.



Şekil 4. Zenginleştirilmiş kil numunelerinin XRD grafikleri

3.4. Yer Karosu Angop Reçetesinin Uygulanması

Yer karosunun angop reçetesinde %5 oranında standart kil malzemesi bulunmaktadır. Zenginleştirilen killeri, reçete çalışmalarında standart kil numunesine muadil olarak aynı oranda ilave edilmiştir. Hazırlanan angop numuneleri ham 30x30 cm2 ebatlarında yer karosu üzerine, angop çekme aleti vasıtasıyla uygulanmıştır. Angoplar yüzey üzerine uygulandıktan sonra yer karosu fırın rejiminde (1205°C-52dk) pişirilmiştir. Denemelerin pişirim sonrası dijital fotoğrafları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Yer karolarının pişirim sonrası yüzey görüntüleri

Pişirim sonrası yüzeylerin renk değerlerinin tespiti ve geçirgenlik testleri yapılarak kaydedilmiştir. Tablo 5'de renk değerleri ve geçirgenlik ölçüm sonuçları verilmiştir. Renk ölçüm sonuçları incelendiğinde, benzer beyazlık değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Kırmızılık ve

yeşillik ölçümlerini gösteren 'a' değeri; standart angobun en yüksek ölçülmüştür. Bu da diğer angoplara göre yüzeyin daha kırmızı olduğunu ifade etmektedir. Sarılık/mavilik renk sonucu olan 'b' değeri en yüksek olan ölçüm R983 kodlu numunesine aittir. Bu değer diğer numunelere kıyasla daha sarı bir yüzey elde edildiğini göstermiştir. Sarılık ve yeşillik değeri dijital baskı sonrasında renk alımları için önemlidir [3]. Bu sebeple sarı yönde yüzey elde edilmesi avantaj sağlamıştır. ΔE sonuçları standart numuneye en yakın olan numuneler R311 ve R983 kodlu angop reçeteleridir.

Tablo 5. Angop Numunelerinin Yüzey Renk Ve Geçirgenlik Ölçüm Sonuçları

	L	a	b	ΔE	Geçirgenlik
STD	91,21	0,24	4,46	-	2,48
R311	90,69	0,18	4,46	0,52	2,14
R983	90,88	0,11	4,91	0,57	2,33
R441	90,33	0,08	4,34	0,90	1,83
R271	90,14	0,04	4,43	1,08	1,75

3.5. Isı Mikroskobu ile Ergime Davranışı

Yer karosu angop numunesi ile zenginleştirilmiş kil numunelerinin ergime davranışları analiz edilmiştir. Sinterleme, yumuşama, tam küre, yarı küre ve akma sıcaklıkları tespit edilmiş olup ölçüm sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Numuneler sinterleme sıcaklığına geldiğinde sıcaklık değerleri artmış ve viskoz akış aktivasyon bariyeri aşılmıştır. Bu aşamada, numunelerin boyutu azalmış, ancak gerçek şekilde değişme olmamıştır.

Numunelerin sinterlenmesi tamamlanıncaya kadar, yüzey geriliminin etkisiyle cam taneleri birbirine yaklaşarak deforme olmuşlardır. Numunelerin belirgin bir akışkan camsı faza sahip olana kadar boyutunun değişmediği sıcaklık aralığı tespit edilerek bu sıcaklığa sinterleme sıcaklığı denilmiştir [10]. Sinterleme sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, R271 kodlu numunenin en yüksek sinterleme sıcaklığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu reçetenin pişirimi için daha yüksek sıcaklıklar gerekeceği için üretimde kullanılması uygun bulunmamıştır. En düşük sinterleme sıcaklığına sahip numunenin R441 kodlu numune olduğu belirlenmiş olup diğer zenginleştirilmiş kil numuneleri ile geliştirilen reçetelerin sıcaklıkları da standart ile benzer değerlerde ölçülmüştür. Standart angop reçetesinin sinterleme sıcaklığının çok üzerinde olması beklenmemektedir. Pişirim esnasında yüzey hatalarının meydana gelmemesi ve su emme değerinin değişmemesi için benzer değer aralıklarında olması istenmektedir [2, 5]. Yumuşama sıcaklıkları R983 ve R441 no'lu numunelerde tespit edilememiş olup standart angop, R311 ve R271 kodlu

numuneler için sırasıyla; 1298°C, 1480°C ve 1490°C olarak ölçülmüştür. Tam küre sıcaklıkları hiçbir numunede tespit edilmemiştir. Yarı küre sıcaklığı ve akma sıcaklığı standart angop için 1378°C ve 1400°C olarak belirlenmiştir.

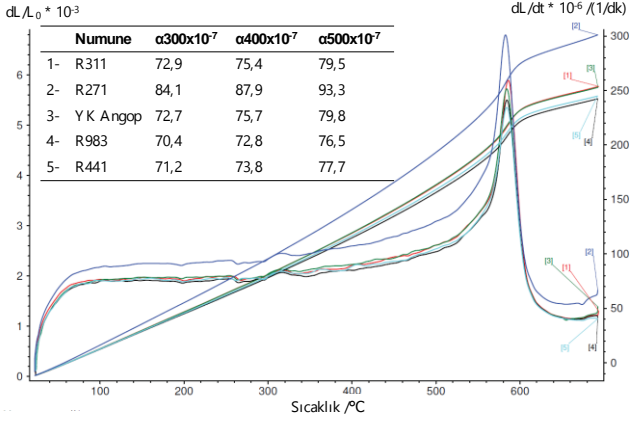
Tablo 6. Zenginleştirilmiş Kil Numunelerinin Ergime Davranışları

	YKA	R311	R983	R441	R271
Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1138	1146	1158	1132	1176
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	1298	1480	-	-	1490
Tam Küre Sıcaklığı (°C)	-	-	-	-	-
Yarı Küre Sıcaklığı (°C)	1378	-	-	-	-
Akma Sıcaklığı (°C)	1400	-	-	-	-

3.6. Isıl Genleşme Katsayısı Tayini

Gevrek özellikteki seramik malzemeler, ısı karşısında tekdüze olmayan boyutsal değişimler sonucu deformasyon özelliği gösterirler. Eğer bünye ve angop arasındaki genleşme farkı çok yüksek ise karolar kırılabilir veya sırtı yırtılabilir [6, 30]. Bu sebeple geliştirilecek olan angobun bünye ile dengede ısı genleşme katsayısına sahip olması gerekmektedir. Numunelerin ısı karşısında gösterdiği boyut değişimleri (dL/L0) tespit edilmiş olup termal genleşme değerleri, doğrusal genleşme katsayısı (α) cinsinden hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerler Şekil 6'da sunulmuştur. ECR271 kodlu angop numunesinin ısıl genleşme değeri 84-93 arasında olup diğer numunelere ve yer karosu angoba göre yüksektir. ECR271 kodlu numune hariç diğer zenginleştirilmiş kil numuneleri ilave edilerek geliştirilen angoplar, yer karosu angop ile benzer ısıl genleşme değerine sahip olup 70-79 değer aralıklarında ölçülmüştür.



Şekil 6. Isıl genişleme katsayılarının karşılaştırılması

4. Sonuçlar

Ticari olarak kullanılan killerin yerine zenginleştirilmiş killerin kullanılarak angop reçetelerinde kullanılması, projenin yenilikçi yönünü oluşturmuştur. Araştırmanın hem daha önce endüstriyel olarak denenmemiş olması hem de safsızlık içermeyen killerin maliyetlerindeki artış göz önüne alındığında kil rezervlerindeki azalmanın önüne geçilmesi açısından ekonomik olarak avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Öğütme süreleri optimize edilmiş olup 7 saat süresince öğütülen ECR983 kodlu numunenin SO_3 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 bileşenlerinin yapıdan yüksek oranda uzaklaştırıldığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, Al_2O_3 oranı standart kil numunesine kıyasla ~%6,1 oranında artmıştır. ECR983 reçetesi ile geliştirilmiş, R983 angop numunesinin renk, geçirgenlik ve genişleme özelliklerinin üretim şartlarında uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, zenginleştirilen killerin seramik endüstrisi için ucuz ve umut verici alternatif hammaddeler olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Teşekkür

2209-B üniversite öğrencileri sanayiye yönelik araştırma projeleri destekleme programı kapsamında TÜBİTAK tarafından 1139B412200338'nolu proje olarak desteklenmiştir.

Proje çalışmaları süresince finansal destek sağlayarak çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan Sinpaş Holding yönetim kuruluna ve Seranit Seramik Fabrikası yönetim kuruluna teşekkür ve saygılarımızı sunarız.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyanı

Emre AKDOĞAN: Metodoloji (Fikrin oluşması), tasarımın yapılması, makalenin kontrol edilmesi

Yunus BÜYÜKTEPE: Veri düzenlemesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, makalenin kontrol edilmesi

Nihan ERCİOĞLU AKDOĞAN: Gerekli literatür taraması ve sonuçların değerlendirilmesi, Kullanılan malzeme ve ekipmanların temini, tasarımın yapılması, görselleştirme

Kaynaklar

- [1] El-Didamony, H., El-Fadaly, E., Amer, A. A., Abazeed, I. H. (2020). Synthesis and characterization of low cost nanosilica from sodium silicate solution and their applications in ceramic engobes. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 59(1), 31-43. DOI: 10.1016/j.bsecv.2019.06.004
- [2] Dal Bó, M., Bernardin, A. M., Hotza, D. (2014). Formulation of ceramic engobes with recycled glass using mixture design. *Journal of cleaner production*, 69, 243-249. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.088
- [3] Ercioğlu-Akdoğan, N., Ubay, E. (2022). Development of Metallic-Speck Textured Artistic Ceramic Glazes: Investigation of Surface Abrasion Properties. *International Journal of Natural and Applied Sciences*, 8(4), 722-735. DOI: 10.28979/jarnas.1134869
- [4] Tarhan, M., Tarhan, B. (2020). Development of waterproof engobe layer for ceramic wall tiles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Cilt. 140(2), 555-565. DOI: 10.1007/s10973-019-08893-3
- [5] Kashim, I.B., Jegede, F. I., Adelabu, O.S. (2020). Developing a Ceramic Base Engobe from locally available raw materials in Nigeria. *Ceramics Art and Perception*, 116, 146-149. DOI: 10.3316/informit.581367354853550
- [6] Ercioğlu-Akdoğan, N. (2022). Valorization of Ahlat Stone Wastes in the Production of Ceramic Tiles: Physical-Mechanical Properties. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 81(4), 141-148, DOI: 10.1080/0371750X.2022.2133013
- [7] Chin, C.L., Ahmad, Z.A. (2020). Optimization of ceramic tile properties from three Malaysian clays via

- statistical mixture design, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(1), 275-290. 2020. DOI: 10.1007/s13369-019-04150-9
- [8] Izzo, F., Ciotola, A., Guarino, V., Verde, M., De Bonis, A., Germinario, C., Morra, V. (2023). Focusing on red and black engobes in Roman pottery from Cumae (southern Italy): Pompeian Red Ware and Graue Platten ceramic productions. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 47, 103778. DOI: 10.1016/j.jasrep.2022.103778
- [9] Mukasa-Tebandeke, I. Z., Ssebuwufu, P. J. M., Nyanzi, S. A., Schumann, A., Nyakairu, G. W. A., Ntale, M. (2015). The elemental, mineralogical, IR, DTA and XRD analyses characterized clays and clay minerals of Central and Eastern Uganda. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 5, 67-86. DOI: 10.4236/ampc.2015.52010.
- [10] Ercioglu, N., Ubay E. (2021). An environmentally friendly process for preparing commercial ceramic foam composites based on frit/glass wastes. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8(3), 850-861. DOI: 10.1111/ijac.13683.
- [11] Valanciene, V., Siauciunas, R., Baltusnikaite, J. (2010). The influence of mineralogical composition on the colour of clay body. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(7), 1609-1617. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.017.
- [12] Dondi, M., Raimondo, M., Zanelli, C. (2014). Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. *Applied Clay Science*, 96, 91-109. DOI: 10.1016/j.clay.2014.01.013.
- [13] He, J., Garzanti, E., Dinis, P., Yang, S., Wang, H. (2020). Provenance versus weathering control on sediment composition in tropical monsoonal climate (South China)-1 Geochemistry and clay mineralogy. *Chemical Geology*, 558, s. 119860. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119860.
- [14] Gkay, D. H., Rex, R. W. (1966). Formation damage in sandstones caused by clay dispersion and migration, *Clays and Clay Minerals* (355-366), Surrey: Pergamon Berkeley, California. DOI: 10.1016/B978-0-08-011908-3.50033-5
- [15] Becker, E., Jiusti, J., Minatto, F. D., Delavi, D. G. G., Montedo, O. R. K., Noni, A. D. (2017). Use of mechanically-activated kaolin to replace ball clay in engobe for a ceramic tile. *Cerâmica*, 63(367), 295-302. DOI: 10.1590/0366-69132017633672077.
- [16] Fiori, C., Fabbri, B., Donati, G., Venturi, I. (1989). Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. *Applied Clay Science*, 4(5-6), 461-473. DOI: 10.1016/0169-1317(89)90023-9.
- [17] Bain, J. A., Highley, D. E. (1979). Regional appraisal of clay resources-a challenge to the clay mineralogist, *Developments in Sedimentology* (437-446), Surrey: Elsevier. DOI: 10.1016/S0070-4571(08)70741-6.
- [18] Murray, H. H. (1999). *Applied clay mineralogy today and tomorrow*, Clay minerals (39-49), Surrey: Cambridge University Press. DOI: 10.1180/000985599546055.
- [19] Ross, G. J. (1978). Relationships of specific surface area and clay content to shrink-swell potential of soils having different clay mineralogical compositions. *Canadian Journal of Soil Science*, 58(2), 159-166. DOI: 10.4141/cjss78-020.
- [20] Ahmed, M. M., Abadir, M. F., Yousef, A., El-Naggar, K. A. M. (2021). The use of aluminum slag waste in the preparation of roof tiles. *Materials Research Express*, 8(12), 125501. DOI: 10.1088/2053-1591/ac3bf7.
- [21] Nandi, V. S., Raupp-Pereira, F., Montedo, O. R. K., Oliveira, A. P. N. (2015). The use of ceramic sludge and recycled glass to obtain engobes for manufacturing ceramic tiles. *Journal of Cleaner Production*, 86, 461-470. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.091.
- [22] Martínez-García, C., Eliche-Quesada, D., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F. J., Corpas-Iglesias, F. A. (2012). Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. *Journal of environmental management*, 95, S343-S348. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.016.
- [23] Sanfeliu, T., Jordán, M. M. (2009). Geological and environmental management of ceramic clay quarries: a review. *Environmental geology*, 57, 1613-1618. DOI: 10.1007/s00254-008-1436-4.
- [24] Lei, L., Palacios, M., Plank, J., Jeknavorian, A. A. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149, 106564. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106564.
- [25] Malayoğlu, U., Akar, A. (2006). Killerin Sınıflandırmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 21-22 Nisan, 125-132.
- [26] Erdemoğlu M., Birinci M. ve Uysal T. (2018). Kil minerallerinden alümina üretimi: güncel değerlendirmeler, *Politeknik Dergisi*, 21(2), 387-396. DOI: 10.2339/politeknik.386907

- [27] Kalpaklı, Y., Topal, A., Balkan A. (2022). Killer, Modifikasyon Yöntemleri ve Asit Aktivasyonu. Ankara: İksad Yayıncılık.
- [28] Moon, C.F. (1972). The microstructure of clay sediments. *Earth-Science Reviews*, 8(3), 303-321. DOI: 10.1016/0012-8252(72)90112-2.
- [29] Pavlova, I. A., Sapozhnikova, M., Farafontova, E. P. (2021). The use of overburden clay in ceramic production, *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*, 316, (1044-1049). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.1044.
- [30] Ercioğlu-Akdoğan, N., Ubay, E. (2022). Evaluation of Sugar Industry Waste in Production of Suitable for Double-Fired Wall Tile. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 66-74. DOI: 10.53410/koufbd.1132963.