



KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2022

SAYI / NUMBER : 2

CILT / VOLUME : 25



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

<http://jes.ksu.edu.tr/>

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.

This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.



Sahibi / Owner

Prof.Dr. Niyazi CAN
KSU Rector

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Hüseyin TEMİZ
htemiz@ksu.edu.tr

Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

Assist. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER
zeynepozger@ksu.edu.tr

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
asyilmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet ALKAN
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
aalkan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL
Civil Eng.
KSU Univ. TURKEY
munsal@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet KAYA
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
kaya38@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
Civil Eng.
Atatürk Univ., TURKEY
rsahin@atauni.edu.tr

Prof Dr. Yücel ÖZMEN
Mechanical Eng.
Karadeniz Teknik Univ., TURKEY
yozmen@ktu.edu.tr

Prof.Dr. Özlem TURGAY
Food Eng.
KSU Univ. TURKEY
ozlem@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU
Landscape Arc.
KSU Univ. TURKEY
fmengelo@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI
Electrical Eng.
İstanbul Teknik Univ, TURKEY
akincitc@itu.edu.tr

Prof. Dr. Kristina SARIC
Geological Eng.
University of Belgrade, SERBIA
kristina.saric@rgf.bg.ac.rs

Prof. Dr. Ramazan GÖKÇE
Food Eng.
Pamukkale Univ., TURKEY
rgokce@pau.edu.tr

Assoc. Prof.Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ., TURKEY
tamer@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Erdem SELVER
Textile Eng.
KSU Univ. TURKEY
eserver@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Beril ÖZÇELİK
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
bozcelik@ksu.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Yakup CUCİ
Environmental Eng.
KSU Univ. TURKEY
cuci@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Hasan BADEM
Computer Eng.
KSU Univ. TURKEY
hbadem@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Özdeş ÇERMİK
Language Editor
KSU Univ. TURKEY
ozdescermik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Dr. S.Hatice GÖKLER
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sedahaticegokler@ksu.edu.tr

Research Assist. Fahriye GEMCİ
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
fahriyegemci@ksu.edu.tr

Res. Assist. Elif ÇELİK
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
elifcelik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Sermet AYMAN
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sayman@ksu.edu.tr

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Cetin Kaya KOC

Dep. of Computer Eng.
Univ Of Cal.
Santa Barbara. USA
koc@cs.ucsb.edu

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Sakarya Univ. Sakarya,
TURKEY
aozdemir@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK

Dep. Of Elcn & Comm Eng.
İTU Univ.
İstanbul. TURKEY
korurek@itu.edu.tr

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ

Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI

Dep. of Mechanical Eng.
Alanya Alaaddin Keykubat
Univ. Antalya, TURKEY
apinarbasi@alanya.edu.tr

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER

Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
YBU Univ.
Ankara, TURKEY
serel@ybu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT

Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul. TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK

Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul. TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI

Dep. of Civil Eng.
Brunel Univ.
Uxbridge,UK
mizi.fan@brunel.ac.uk

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY

Dep. of Microelectronics
Panjab Univ,
Chandigarh, India
amit_chaudhry01@yahoo.com

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras. TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Selim AY

Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul. TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Murat PALA

Dep. of Civil Eng.
Adiyaman Univ.
Adiyaman. TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ

Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş. TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr



BU SAYIYA (CİLT 25 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER

Alp Buğra AYDIN

Musa EŞİT

Mehmet DAŞ

Erdal KILIÇ

Hüseyin YAĞLI

Erdem ALIÇ

Mustafa EKEN

Nükhet ŞAPCI

Turab SELÇUK

Ali UÇURUM

Pelin CANBAY

Hakan AÇIKGÖZ

Cemal AKTÜRK

Halit ÖZTEKİN

Kutlucan GÖRÜR

Nuri KAPUCU

Abdurrahman ÖZBEYAZ

Ramazan SOLMAZ

Orhan KAVAK



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Scs-Cn Metodolojisi İçin Havza Morfolojik Haritalarının Geliştirilmesi: Sisne Havzası Örneği**
Development Of Watershed Morphological Maps For The Scs-Cn Methodology: Case Study Over Sisne Basin 57-70
Mehmet Hanifi ÇUBUK, Muhammet Ömer Diş
- Performance Analysis And Optimization Of A Concentrated Photovoltaic System With Double Fresnel Lenses**
Çift Frensel Lensli Bir Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik Sistemin Performans Analizi Ve Optimizasyonu 71-94
Ferhat KARTAL, Osman TURAN
- Experimental Investigation of The Effect of Harran House Geometry on Building Thermal Performance**
Harran Evi Geometrisinin Bina Isıl Performansı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi 95-109
Erdal YILDIRIM
- Pomza Agreganın Çimento Esaslı Tiksotropik Rötresiz İnce Tamir Harcının Performansına Etkisi**
The Effect Of Pumice Aggregate On The Performance Of Cement-Based Thixotropic Non-Shrinkage Thin Repair Mortar 110-125
Şevket Onur KALKAN, Lütfullah GÜNDÜZ
- Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Bitki Yaprağındaki Hastalıkların Sınıflandırılması**
Classification of Plant Leaf Diseases Using Deep Learning Methods 126-137
İpek ATİK
- Dielektrik Taban Destekli Eş Düzlemli Dalga Kılavuzları İçin Genetik Programlama İle Geliştirilmiş Quasi-Statik Analiz Modelleri**
Quasi-Static Analysis Models for Dielectric Base Supported Coplanar Waveguides Improved By Genetic Programming 138-144
Hakan KIŞIÖĞLU, Celal YILDIZ
- Mikroskopik Görüntülerde Multipl Miyelom Plazma Hücrelerinin Tespiti**
Detection Of Multiple Myeloma Plasma Cells In Microscopic Images 145-154
Mücahid GÜNAY, Mehmet TAZE

DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE

A Non-Traditional Resource for Critical Minerals: Rare Earths +Y (Rey), And Sc Contents Of Some Turkish Low-Rank Coals

Kritik Mineraller İçin Geleneksel Olmayan Bir Kaynak; Düşük Kaliteli Bazı Türk Kömürlerinin Nadir Toprak + Y Ve Sc İçeriği

Nazan ERİK

155-172



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.02.2022
Kabul Tarihi : 17.03.2022

Received Date : 16.02.2022
Accepted Date : 17.03.2022

SCS-CN METODOLOJİSİ İÇİN HAVZA MORFOLOJİK HARİTALARININ GELİŞTİRİLMESİ: SİSNE HAVZASI ÖRNEĞİ

DEVELOPMENT OF WATERSHED MORPHOLOGICAL MAPS FOR THE SCS- CN METHODOLOGY: CASE STUDY OVER SISNE BASIN

Mehmet Hanifi ÇUBUK¹ (ORCID: 0000-0003-2750-5490)
Muhammet Ömer DİŞ^{2*} (ORCID: 0000-0002-3347-5112)

^{1,2}Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammet Ömer DİŞ, momerdis@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sisne Havzası üzerinde gerçekleştirilmiş olup bölgedeki geçmiş taşkın olaylarının nedenleri havza morfometrisi yönünden araştırılmıştır. Bu amaçla, SCS-CN metodolojisi kullanılarak; Hidrolojik Toprak Grupları (HTG), Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (AKAÖ) gibi veriler Arc-GIS ortamında işlenmesiyle Eğri Numaraları (CN) elde edilmiştir. Sisne Havzasına ait CN değerlerinin ortalaması 82,62, havzanın toprak tarafından tutulan potansiyel maksimum yağış miktarı (S) 53,43 mm ve başlangıçta tutulan yağış miktarı (I_a) 10,7 mm olarak hesaplanmıştır. Havza hidrolik uzunluğu, havza eğimi gibi parametrelere bağlı olan gecikme süresi ise (t_{lag}) 2,46 saat olarak belirlenmiştir. Ayrıca, havza ortalama geçirimsiz alanlarının yüzdesi arazi özellikleri haritasından yararlanarak %20,76 ve geçirimsizlik sınıfı olarak havza çoğunluğunun ormanlar sınıfında olduğu gözlemlenmiştir. Meydana gelen sel, taşkın gibi olayların sebebinin bölgeye ait yağış potansiyelinin yüksek olması, havza yapısı ve şeklinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Çalışma çıktıları, meteorolojik parametrelerin eklenmesiyle hidrometeorolojik modeller vasıtasıyla bölgenin potansiyel taşkın haritaları ve hidrograf analizleri gibi gelecekteki çalışmaları motive edebilir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolojik Modelleme, SCS-CN, Sisne Havzası, Taşkın

ABSTRACT

This study was implemented over the Kahramanmaraş Sisne Basin, and the reasons of past flood events in the region were investigated in terms of basin morphometry. For this aim, using the SCS-CN methodology; Curve Numbers (CN) were obtained by processing data such as Hydrological Soil Groups (HTG), Land Use/Land Cover (LULC) in Arc-GIS environment. The Sisne Basin average CN value is 82.62, the basin's potential maximum retention after runoff begins (S), is 53.43 mm, and the initial abstraction (I_a) is 10.7 mm. The lag time (t_{lag}) depending on the parameters such as the basin hydraulic length and slope was determined as 2.46 hours. In addition, it has been observed that the percentage of basin average impervious area is 20.76% using the land characteristics map, and the majority of the basin is in the forest class as the impermeability class. It might be concluded that the reason for flood and excess-runoff events is due to the high precipitation potential over the region and the basin structure and its shape. The study results can motivate future studies such as potential flood maps and hydrograph analyzes of the region through hydrometeorological models with the addition of meteorological parameters.

Keywords: Hydrological Modelling, SCS-CN, Sisne Basin, Flood

GİRİŞ

Su, canlılar için vazgeçilmez temel kaynaklardan olduğu gibi, başta insanlara olmak üzere birçok faydalar sağlamaktadır. Özellikle ülkelerin kalkınmasında su kaynakları temel bir ihtiyaç olarak görülür (ÇTÜE, 2022). Türkiye her ne kadar su kaynakları açısından zengin olsa da gelecekte su kıtlığı gibi sorunlarla karşılaşılması için beşer olarak su kaynaklarına zarar vermemek ve bu kaynakları ihtiyaç nispetinde kullanmak önem arz eder. Gelişen teknolojiyle birlikte yeni tasarımların geliştirilmesi ve suyun iktisatlı olarak kullanılması gerekmektedir. Bu bakımdan temini sınırlı olan su kaynakları dünyadaki varlıklar için büyük önem arz etmekle birlikte, su kaynaklarının sürdürülebilir açısından korunması ve yönetimi için yüzey yağış-akışının tahmini esastır.

Yağış rejimindeki değişimler, hidrolojik, zirai ve su kaynakları bakımından çok önemli sonuçlar doğurabilir (Özfidaner, Şapolyo ve Topaloğlu 2016). Yağışların, sadece tarım alanında etkisi olmayıp, dünya üzerinde diğer alanlarda da birçok faydası vardır (Türkeş, Sümer ve Çetiner, 2000). Yağışların etkisiyle bir bölgede hidroelektrik santralin kurulması, baraj yapılması, sulanabilir tarım alanlarının artırılması gibi olumlu projeler yapılabilmektedir. Bu projeler yapılırken uzun süre olumlu neticeler alabilmek adına bölgenin coğrafi özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Çünkü bölge jeomorfometrisine bağlı olarak gelen yağışın bir kısmı sızmaya, bir kısmı yüzeysel akışa, bir kısmı da buharlaşmaya geçer. Başta insanlar olmak üzere tüm canlıları etkileyebilecek nitelikte olan yağışlar, faydası olmakla birlikte sel ve taşkın gibi olaylara sebep olup zararları da olabilmektedir. Toprağın suya doygun olduğu bölgelerde yüzeysel akışa geçen yağış miktarı daha fazladır. Bu topraklar suya doygun hale gelmesiyle heyelan gibi zararlara da neden olabilmektedir (Kadıoğlu, 2008). Dünyada, yağışların sebep olduğu birçok felaket vardır ve bu büyük sel felaketleri can kaybının yanı sıra ekonomik açıdan da büyük zararlara neden olabilmektedir.

Hidrolojik döngüdeki parametrelerin tahmini ve ekstrem yağış zararlarının minimize edilmesi amacıyla geçmişten günümüze birçok hidrometeorolojik uygulamalar ve metotlar geliştirilmiştir. Hidrometeorolojik modeller bir bölge üzerinde meydana gelen yağış-akış sürecinin bilgisayar ortamında matematiksel benzeşiminin yapılması amacıyla kullanılmaktadır (Kargı, 2019). Bu modeller, dünyadaki çoklu etkileşimleri (fiziksel, ekolojik, sosyo-ekonomik, vb.) göz önünde bulundurarak karar vericilerin planlama ve işletim için en etkili kararı almalarını sağlamayı amaçlayan tahmin araçları olarak uygulanmaktadır (İspirli, 2019). Bu uygulamalar günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte kullanışlı bir araç olan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile de daha sistemli hale getirilmiştir. Geçmişte modellerde kullanılan hidrometeorolojik verilerin her biri farklı organizasyon veya devlet dairelerinde bulunmaktayken, günümüzde giderek bu veriler tek bir organizasyon tarafından depolanmakta ve modelleme yapacak kişi bu organizasyondan tek bir seferde her türlü veriyi elde edebilmektedir. Sayısal Yükseklik Modellerinin (SYM) CBS ortamında kullanımı ve verilerin her zaman kolay ulaşılabilir formda olması aynı havzada çalışma yürütecek diğer araştırmacılara bir altlık oluşturmaktadır (Aslan, Gündoğdu ve Demir, 2004; Akyüz, 2018). Aynı zamanda, bu modellerin taşkın erken uyarı sistemleri, taşkın frekans tahmini, taşkın güzergahı, iklim ve arazi kullanım değişikliği ve entegre havza yönetiminin etkisi gibi birçok alanda kullanımı da mevcuttur (İspirli, 2019).

Havzaların hidrometeorolojik simülasyonlarında çeşitli kullanım amacına yönelik farklı tip modeller kullanılabileceğinden, çalışma hedefine yönelik en uygun model tipi seçimi büyük önem arz etmektedir. Uygulama hedeflerinin genişliği, veri setlerine erişim, bölgenin jeomorfometrik yapısına bağlı olarak SWAT (Soil and Water Assessment Tool), MIKE SHE (Système Hydrologique Européen), HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-the Hydrologic Modeling System), HEC-RAS (River Analysis System), CREST (the Coupled Routing and Excess STorage), WMS (the Watershed Modeling System) gibi geniş bir model yelpazesi vardır. Bu modeller birçok sahada uygulanarak gelişen teknolojiyle birlikte su kaynaklarının anlaşılması, tahmin edilmesi ve doğru olarak yönetilmesi gibi faydalar sağlamaktadır (Abbott, Bathurst, Cunge, O'Connell ve Rasmussen, 1986; Gassman, Reyes, Green ve Arnold, 2007; USACE, 2010; Daniel, Camp, LeBoeuf, Penrod, Dobbins ve Abkowitz, 2011; Wang, Hong, Li, Gourley, Khan, Yilmaz, Adler, Policelli, Habib, Irwn, Limaye, Korme ve Okello, 2011). Bu paket programları, havza fiziksel özelliklerinin girilmesi, hidrolojik döngünün tasviri, yağış-akış benzeşimleri, sızma, evapotranspirasyon, yüzeysel ve yüzeyaltı akış miktarlarının belirlenmesi amacıyla birçok metodoloji uygulamaktadır. Bu metotlar ile birlikte çalışılan bölgenin ileriye yönelik bazı olumsuzluklara (sel, fırtına veya su kıtlığı gibi) karşı önlem alınması gerekebilir. Ayrıca, bölgenin kalkındırmasında (regülatör, baraj, HES gibi) da yeni projeler üretilebilir. Bu modellerin ortak parametreleri (hidrolojik, meteorolojik ve jeomorfolojik) olduğu gibi, kullanılan metot için de kalibrasyon parametreleri içermektedir. Bu bağlamda tercih edilen yöntemin ihtiyaç

duyduğu veri setlerinin bilinmesi, kullanım amacı, kalibrasyon parametrelerinin bilinmesi model avantaj/dezavantajları bakımından önem arz etmektedir.

Geçmişten günümüze birçok hidrolog tarafından kullanılan metotlardan biri de SCS-CN (The Soil Conservation Service- Curve Number: Toprak Koruma Hizmeti Eğri Numarası) yöntemidir. SCS-CN yöntemi, küçük havzalardan belirli bir yağış olayı için yüzey akışını tahmin etmek amacıyla en yaygın olarak kullanılan tekniktir (Mishra ve Singh, 1999; Das ve Paul, 2006; Eraydın, 2015). SCS-CN metodu, akım ölçümü bulunmayan havzalarda verilen bir yağışın oluşturacağı dolaysız akış hidrografını belirlemek için geliştirilmiştir (USDA, 1957; SCS, 1972). Bu metodun, az veri ihtiyacı ile birlikte hızlı sonuç vermesi ve bu sonuçların diğer birçok çalışma için kullanılabilir olması gibi avantajları mevcuttur. Tarihsel olarak bakıldığında, SCS-CN yöntemi 1954 yılında ABD Tarım Bakanlığı (USDA) Toprak Koruma Servisi (SCS) tarafından geliştirilmiş ve Toprak Koruma Servisi (SCS) Ulusal Mühendislik El Kitabında detaylı olarak açıklanmıştır (SCS, 1985). Yöntemi içeren el kitabının ilk versiyonu 1954'te yayınlanmış olup, 1956, 1964, 1965, 1971, 1972, 1985 ve 1993'te müteakip revizyonlar izlemiştir (Ponce ve Hawkins, 1996). SCS-CN metodu kökeninde ise Sherman (1949)'ın dolaysız akış yağış çizimi ile yaptığı çalışmadan ve Mockus (1949)'un zemin, başlangıç zemin durumu, yağış süresi ve ortalama sıcaklık verilerinin kullanımıyla yüzey akışı tahminlerinden izler taşımaktadır (Arslan, 2008).

Bir havzaya düşen yağışın akış durumu belirli parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Başta havzanın fiziki yapısı olmak üzere, bulunduğu konum bu açıdan büyük önem arz etmektedir. Toprak yapısı, bitki örtüsü, geçirgenlik, eğim, yüzey alanı gibi havzanın jeomorfometrik özellikleri, bir bölgedeki akış tahmininde belirleyici parametredir. Hidrometeorolojik modellemede daha az veri kullanılarak olumlu netice alınması imkânsız sayılmaz. Bu noktada SCS-CN metodu, yağış verilerinden akışın belirlenmesinde hidrologlar tarafından sıkça kullanılan bir yöntem olup, akışı elde etmek için yağış, hidrolojik toprak sınıfları, arazi kullanımı ve bitki örtüsü gibi verilere ihtiyaç duyar. Bu metotla ilgili ulusal ve uluslararası ölçekte birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, Siddi Raju, Sudarsana Raju ve Rajasekhar (2018) tarafından Mandavi Havzasında (Hindistan) yağış-akış tahminlerinde SCS-CN metodu kullanılmış ve bu metodun yağış-akış tahmininde etkili bir yöntem olduğu ifade edilmiştir. Ramakrishnan, Bandyopadhyay ve Kusuma (2009) tarafından Hindistan'da yapılan diğer bir çalışmada ise, bölgedeki potansiyel su toplama alanları SCS-CN, GIS ve uzaktan algılama kullanarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular ve saha araştırması neticesinde, potansiyel alanların uygunluğunun %80-100 aralığında SCS-CN metoduyla tahmin edildiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, SCS-CN metodundan elde edilen sonuçlar taşkın yönetiminde ve planlamasında da kullanılmıştır. Örneğin, Al-Ghamdi, Elzahrany, Mirza ve Dawod (2012) tarafından yapılan çalışmada, Suudi Arabistan'ın Mekke şehrinde kentsel büyümenin sel tehlikeleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasında SCS-CN metodundan yararlanılmıştır. Pik debi ve Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (AKAÖ) arasındaki ilişki, korelasyon katsayılarıyla ifade edilmiştir.

Bir havza üzerinde modelleme yapılırken birçok metot bir arada da kullanılabilir. Bu yaklaşım, kullanılan farklı yöntemlerin performans değerlendirilmesine olanak sağlar. Örneğin, Govender, Dube ve Shoko (2022) tarafından Wet-Spa (A Distributed Model for Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere), JULES (the Joint UK Land Environment Simulator), SWAT ve SCS-CN yöntemlerini kullanarak AKAÖ ve iklim değişikliğinin kısıtlı olan su kaynakları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bhavsar ve Patel (2020), yüzey akışını tahmin etmek amacıyla SCS-CN ve Snyder'in modellerini karşılaştırılarak Hindistan'ın Tapi River Havzası üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, her iki model arasında SCS-CN metodunun daha uygun olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca, birçok araştırmacı SCS-CN'nin kullanılan sınırlı verilerle yüksek tahmin performansı sağladığı ve akışı tahmin etmek için etkili bir yöntem olduğunu ifade etmektedir (Shafuan, Nurhidayu ve Kamarudin, 2016).

SCS-CN metodolojisi uluslararası alanda kullanıldığı gibi Türkiye'de de birçok hidrolog tarafından kullanılmaktadır. Örneğin, Özdemir (2007) tarafından Havran Çayı üzerinde meydana gelebilecek taşkınların anlaşılması için yağış-akış analizleriyle üretilen akım verilerinden maksimum akımların hesaplanması konusunda SCS-CN metodu uygulanmıştır. Çalışmada, pik debi zaman değerlerinin farklı çıkmasının nedeni olarak elde edilen morfolojik harita verilerinin (havzaların alansal büyüklükleri ve AKAÖ vs.) etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. SCS-CN metodunun önemli parametrelerden biri olan havza için tutulma miktarının tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bakımdan Akgül (2009) tarafından Gediz Havzasında yapılan çalışmada ise, su depolama yapılarını besleyen havzalar için tutulma miktarının hesaplanmasında ve yüzey akışının belirlenmesinde SCS-CN metodu kullanılmıştır. Mesta, Kargı, Tezyapar, Ayvaz, Göktaş, Kentel ve Tezel (2019) tarafından, akışa geçen su miktarının hesaplanabilmesi amacıyla SCS-CN metodu tercih edilmiş ve uygulanan metotla hidrolojik modelin

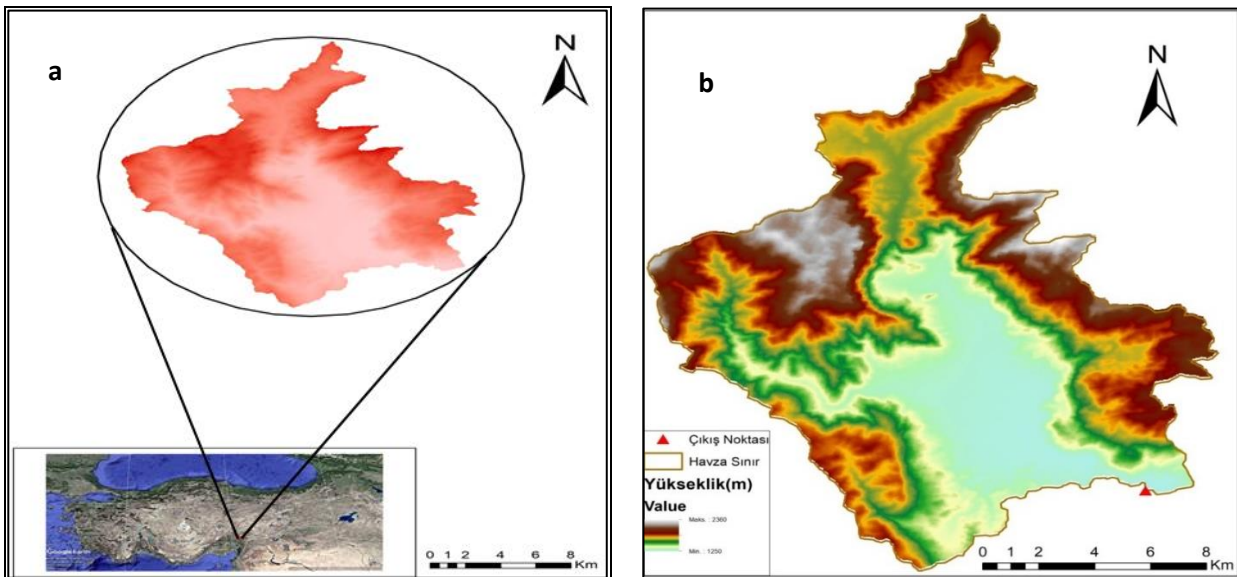
oldukça iyi bir performans sergilediği ifade edilmektedir. Cengiz (2021) tarafından yapılan çalışmada, Bodrum'daki kentsel taşkınların nedenleri araştırılmıştır. Bu amaçla, SCS-CN yöntemi kullanılmış ve taşkın sebep olduğu dereler tespit edilerek çözüm önerileri sunulmuştur. Elagca ve Diş (2022) SCS-CN yönteminin uygulanabilirliğini, Ceyhan'daki Ballıkaya Havzasında topografya, arazi kullanımı gibi havza fiziksel özelliklerini Arc-GIS ve HEC-GeoHMS ortamında işleyerek HEC-HMS modeliyle farklı objektif fonksiyonların kullanımıyla araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, bu modülün bölgede hidrograf analizlerini yüksek oranda tahmin edebilme yeteneğine sahip olduğunu ifade etmektedirler.

Bu çalışmada gerek ulusal gerekse uluslararası uygulanabilirliği olan ve daha az veri parametresine sahip SCS-CN metodolojisi kullanılması amacıyla Andırın Sisne bölgesinde meydana gelen sel, taşkın gibi olayların havza yapısı ve şekli bakımından morfolojik haritaları geliştirilmiştir. Elde edilen haritalar birbirleriyle ilişkilendirilerek yorumlanmıştır. Özellikle arazi kullanımı, hidrolojik toprak gruplarının havzada dağılımı göz önünde bulundurulmuş ve hesaplanan eğri numaraları ile ilişkilendirilmiştir. Sel ve taşkın olaylarının olması bölgenin düşük drenajlı alanlara sahip olduğu ortalama geçirimsizlik haritasıyla desteklenmiştir. Ayrıca elde edilen CN değerlerinin havza alanındaki dağılımı harita ile gösterilmiş olup çalışma alanı hakkında ön fizibiliteyi sağlamaktadır. Böylelikle çalışma alanına gidilmeden iş yükünün minimize edilmesi amaçlanmıştır. Sisne Havzası geçmiş yıllara ait yağış kaynaklı taşkınlara maruz kaldığından dolayı bölge sakinleri bundan olumsuz etkilenmiştir. Çalışmada CN haritalarının ve bölge jeomorfometrisinin elde edilmesiyle, yağış kaynaklı yüzeysel akışın ve buna bağlı olarak potansiyel risk durumunun tahmin edilebilmesi, karar verici mekanizmalara yönelik planlaması hedeflenmektedir. Bu amaçla, CBS gibi araçlar kullanılarak, verilerin hızlı olarak işlenebilmesi, güncellenmiş arazi kullanımı, olası taşkın ve zaman kaybının önlenmesi sağlanmıştır.

METOT

Çalışma Alanı

Andırın Altınyayla mevkiinde bulunan Sisne Havzası, yüz ölçümü 172,07 km² olup 36°20' ve 36°30' doğu boylamları ile 37°41' ve 37°54' kuzey enlemleri arasında kalmaktadır (Şekil 1.a). Havzanın çıkış noktası kırmızı üçgen ile gösterilmiş olup koordinatları 36°29' doğu 37°41' kuzey noktasında ve havzanın güneydoğu tarafına düşmektedir (Şekil 1.b). Arc-GIS ortamında çalışılırken, coğrafi koordinat sistemi olarak ED1950-UTM ZONE-37N ve projeksiyon olarak ise *Transverse Mercator* kullanılmıştır. Arc-GIS'e aktarılan ham veri üzerine çıkış noktası koordinatları girilerek havza sınırları belirlenmiş ve bu sınırlar açık kahverengi çizgi ile gösterilmiştir. Toplam çevre uzunluğu 84 km olan havza, 1.250-2.400 m arasında değişen bir rakıma sahip olup çıkış noktasının çevre kısımları ve iç kısım yükseklikleri 1200+ m civarındadır. Havzanın ortalama eğimi %16,4 olup arazi örtüsü olarak yaklaşık %53'ünü ormanlar teşkil etmektedir. Çalışma alanının kuzey ve kuzey-batı tarafındaki yükseklik güneye göre daha yüksek değerlere sahiptir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en yüksek değerler kahverengi tonunda, minimum değerler ise açık mavi tonundadır. Özellikle kuzey tarafında bu yükseklik değerleri maksimum seviyededir.

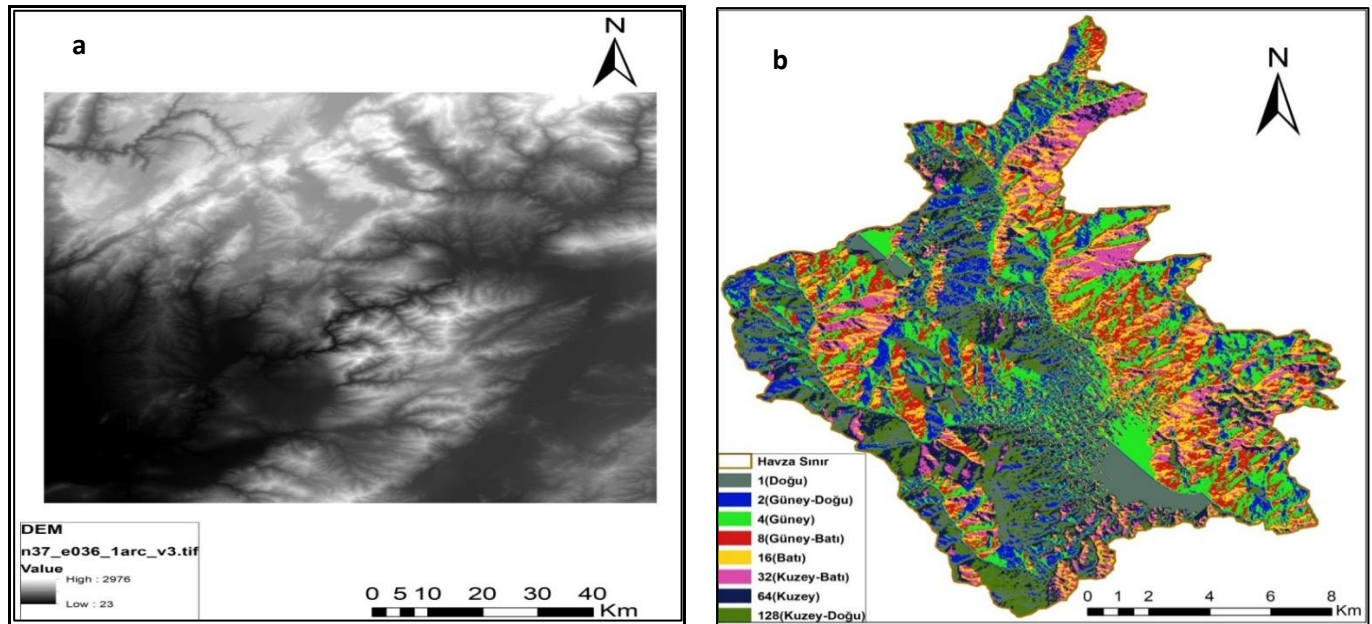


Şekil 1.a. Çalışma Alanı b. Bölgeye ait SYM

Veri Setleri

USGS (United States Geological Survey-ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu)'den Sisne Havza bölgesine ait *Tagged Image File Format (tiff)* uzantılı 30x30 m mekânsal çözünürlüklü SYM verileri elde edilmiştir (USGS, 2021) (Şekil 2.a). Bu veri herhangi bir işlemten geçirilmeden ham veri olarak muhafaza edilip, Arc-GIS ortamına aktararak gerekli projeksiyon ve koordinat dönüşümleri sağlandıktan sonra; sırasıyla boşluk doldurma, akış yönü belirleme, kümülâtif akış, drenaj ağını oluşturma, çıkış noktasını işaretleme işlemlerinden geçirilmiştir. Ham SYM verisi minimum 20 m, maksimum değer olarak ise yaklaşık 3000 metredir. SYM verisindeki bir hücrenin kendinden daha yüksek olan hücrelerle çevrildiği durumlarda, yükseklik değeri az olan hücreye doğru akan su, boşluklar doldurulamadığından yüzey akışı olmayacaktır. Model bu problemi çözmek amacıyla, boşluk doldurma işlemi ile yükseklik değerini yeniden düzenlemektedir (Karadağ, 2012; Dis ve Elagca, 2019). Boşluk doldurma işleminden sonra ise akım yönleri belirlenir. Akım yönleri, SYM'ye bağlı olarak hidrolojide su yollarının hesabında ve sedimantasyon analizlerinde kullanılmaktadır (Tarboton, 1997). Havza analizlerinde önem arz eden bir işlem olan akım yönlerinin belirlenmesi, akarsuyun hareket yönü ve akarsu kollarının sahip olduğu alt havzaları bulmada kolaylık sağlamaktadır (Şekil 2.b).

SYM verisinin Arc-GIS ile kullanımıyla havzaya ait yükseklik, eğim haritaları ve akış kolları, alt havzalar oluşturularak SCS-CN metodu için altlıklar oluşturulmuştur. Ayrıca Tarım ve Köy İşleri Müdürlüğünden temin edilen Büyük Toprak Grupları (BTG) verisiyle, havzaya ait Hidrolojik Toprak Grupları (HTG), AKAÖ haritaları oluşturulmuştur. SCS-CN metodolojisi için sonraki aşamalarda ise ortalama geçirimsizlik, CN haritaları ve CN değerlerinin bir fonksiyonu olan başlangıçta tutulan yağış miktarı, I_a , toprak tarafından tutulan potansiyel maksimum yağış miktarı, S , değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.a. İşleme Tabi Tutulmamış SYM Verisi b. Arc-GIS Ortamında Akım Yönleri Belirlenmesi

SCS-CN Yüzeysel Akım Yöntemi

Eğri Numarası yöntemi USDA tarafından geliştirilmiş olup arazi kullanma şekli ve toprak tiplerine göre gelen yağıştan akışın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu hidrolojik model yöntemi 1954 yılında NEH-4 (National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology) adıyla yayınlanmıştır (SCS, 1985). Hidrolojik model kurulumunda önemli bir parametre olan konsantrasyon süresi, t_c [saat], meydana gelen yağış için etki ettiği alanın hidrolojik olarak en uzak kısmından havzanın çıkış noktasına ulaşma süresidir (Dingman, 2002). Bu süre, gecikme süresinin, t_{lag} [saat], bir fonksiyonu olup, 1,67 gibi sabit bir sayıyla çarpılarak elde edilir. Gecikme süresi, diğer taraftan, yağış fazlalığının kütle merkezi ile akış pik değeri arasındaki zaman farkı olarak tanımlanır (Singh ve Singh, 2001; Fang, Bedient, Benavides ve Zimmer, 2008). Gecikme süresinin hesaplanması için Denklem 1'den de anlaşılacağı üzere havzanın ortalama eğiminin, W_{ort} [%], ortalama eğri numarasının, CN_{ort} , ve havzaya ait en uzun akarsu kolu uzunluğunun, L [m], bilinmesi gerekir.

$$t_{lag} = \frac{L^{0,8}(2540 - 22,86 CN_{ort})^{0,7}}{1410CN_{ort}^{0,7}\sqrt{W_{ort}}} \quad (1)$$

Daha önce de belirtildiği gibi çok fazla parametreye ihtiyaç duyulmayan SCS-CN yönteminde, yağış, HTG ve AKAÖ verileri kullanılmaktadır. Herhangi bir alan ve süredeki akışı bulmak için su dengesi denkleminde faydalanılarak Denklem 2 yazılabilir ve uygun bir alan ve zaman diliminin seçilmesi su dengesi analizini çok daha basit hale getirebilmektedir (De Ridder ve Boonstra, 1994). Denklem 2'den de görüleceği üzere, toplam yağış miktarı, P [mm], başlangıçta tutulan yağış miktarının, I_a [mm], sızma miktarının, F [mm], ve yüzeysel akış miktarının, Q [mm], toplamı olarak hesaplanmaktadır.

$$P = I_a + F + Q \quad (2)$$

Çok sayıda havzadan gözlemlenen verilere dayanarak elde edilen SCS yöntemine göre oransal eşitlik hipotezi, Denklem 3'ten de görüleceği üzere, sızmanın potansiyeline oranının, doğrudan akışın potansiyel değerine oranına eşit olmasıdır (SCS, 1972; 1985). Denklem 2'deki yüzeysel akış miktarı ve sızma yükseklikleri toplamı, Denklem 3'te yerine yazılarak; Q değeri için Denklem 4 elde edilmiş olacaktır. I_a değerleri Denklem 5'ten de görüleceği üzere, toprak tarafından tutulan potansiyel maksimum yağış miktarına, S [mm], bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, mevcut durum için bu bağıntıda geçen I_a değerlerindeki, Doğal Kaynakları Koruma Servisi (Natural Resources Conservation Service, NRCS) tarafından başlangıçta tutulan yağış miktarı hesabındaki oran sabiti değerinin, λ , tutulması veya değiştirilmesi konusunda herhangi bir karar verilmemiştir. Mevcut CN değerleri " $\lambda = 0.2$ " ile bağlantılı olarak geliştirildiğinden, λ değerlerindeki bir değişikliğin etkin bir şekilde yeni bir CN kümesini gerektireceği kolayca görülmektedir (Ponce ve Magallon, 2021). Başlangıçta tutulan yağış miktarı ve bu değerlerin oran sabiti Denklem 4'te yerine yazıldığında yüzeysel akış yüksekliği Denklem 6 ile bulunabilir.

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (3)$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4)$$

$$I_a = \lambda S \quad (5)$$

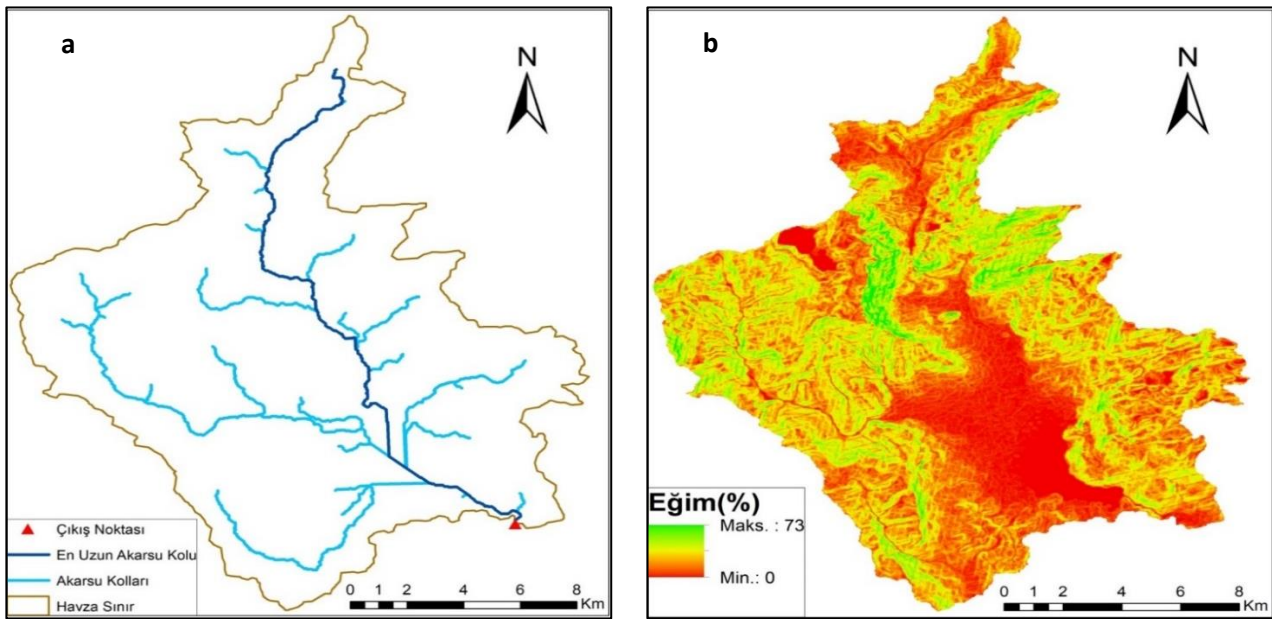
$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (6)$$

Yukarıdaki bağıntıda kullanılan S değerleri eğri numarasına bağlı olarak Denklem 7 ile hesaplanabilir. CN değerleri ise 0-100 arasında değişmekte olup boyutsuz bir parametredir. CN değerleri, yüzeysel akış hesaplamalarında bağıntılardan da anlaşılacağı üzere çalışılan havza için en duyarlı parametredir. Bu parametreyle havzanın başta sızma durumu olmak üzere gelen yağışın durumu da gözlemlenmektedir. CN değerlerinin sıfıra yakınsaması toprak tarafından tutulan potansiyel maksimum yağış miktarının sonsuza eşitlenmesini ve bütün yağışların toprağa sızdığını, eğri numarası değerinin yüze eşit olması ise S değerlerinin sıfıra yakınsamasını gelen yağışların tamamının yüzeysel akışa dönüştüğünü ifade etmektedir.

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (7)$$

BULGULAR

Havza sınırları içerisinde birçok dere olup her birinin bağlı olduğu ana akarsuyu farklıdır. Ana akarsuya bağlı diğer küçük akarsu kollarının (dere) sürekliliği mevsimsel yağışlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Akış potansiyeli, zamanlaması, frekansı, süresi, mevsimselliği ve yıllık rejimi akarsu için önem arz etmektedir (Atak, 2014). Bu amaçla, SYM verisi temel işlemler sonucunda daha düzenli hale getirilerek, havzaya ait dereler ve en uzun akarsu kolu tespit edilmiştir (Şekil 3.a). Bu akarsu kollarından en uzununu, koyu mavi renkle gösterilmiş ve uzunluğu ise yaklaşık 2.500 metredir. Ayrıca en uzun akarsu kolu gecikme süresi ile doğru olarak değişmekte olup bu sürenin hesaplamalarında kullanılan ana parametrelerdendir. Sisne Havzasının eğimi ise Şekil 3.b'de gösterilmektedir. Eğim değerleri %0 ile %73 arasında değişmekte olup ortalama eğimi %16,4'tür. Eğim değerleri, havzanın kuzeyinden güneyine doğru azalmakta ve havza çıkış noktasında minimum değerlere ulaşmaktadır. Eğim değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde akışın yüksek olması ve buna bağlı infiltrasyon miktarı, eğim değerlerinin az olduğu alanlara kıyasla daha düşüktür. Yoğun yağış dönemlerinde, toprağın doymuş hale gelmesiyle birlikte yağış bazlı akışlar yüksek eğimden düşük eğime doğru seyir halini almakta; eğimin çok azaldığı yerlerde ise taşkın riski artmaktadır (İSTKA, 2013; Utlu ve Ekinci, 2015).



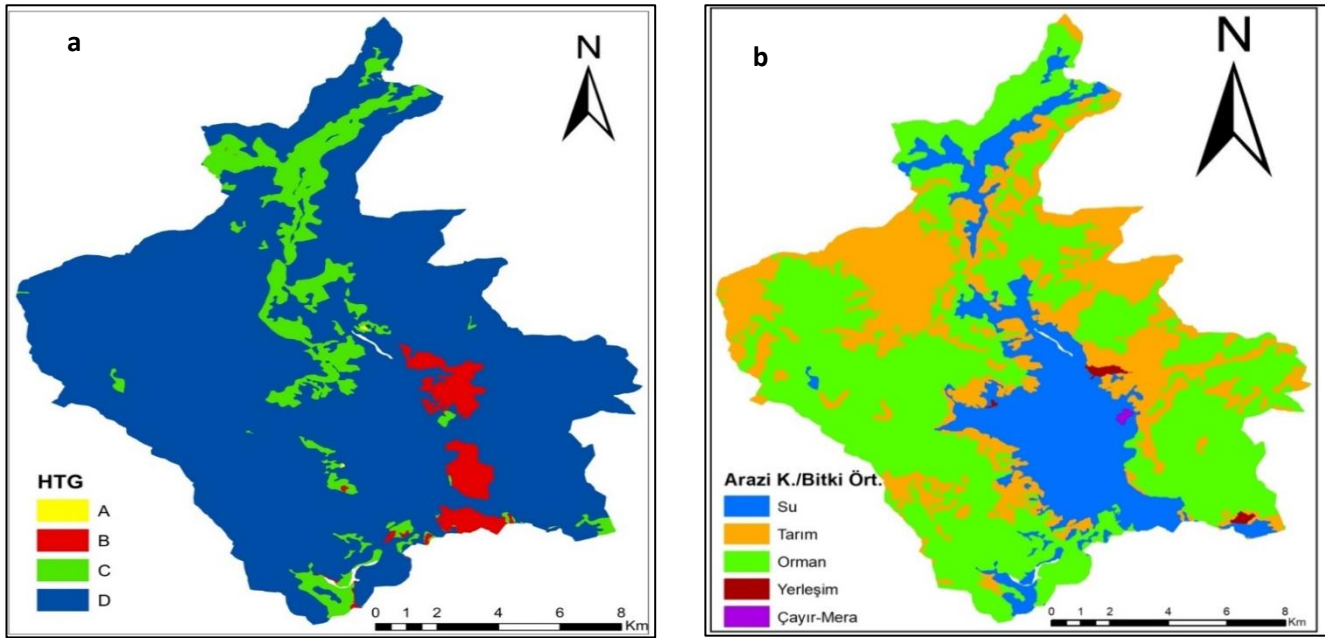
Şekil 3.a. Sisne Havzasına Ait Dere ve En Uzun Akarsu Kolu b. Eğim Haritası

Tarım ve Köy İşleri Müdürlüğünden temin edilen BTG verisi, Arc-GIS ara yüzüne aktarıldıktan sonra toprak tipleri sınıflandırılarak etki ettiği alanlar hesaplanmıştır. Her bir toprak grubu bir sembol ile belirtilir (Dizdar, 2003). Bölgede özellikle Kahverengi Orman Toprakları, Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları ve Alüvyal Toprakların hâkim olduğu tespit edilmiştir. Sınıflandırmaya göre Sisne Havzasını %56'sını Kahverengi Orman, %19'unu Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları oluşturmaktadır (Tablo 1). Kahverengi Orman Toprakları, dağlık ve tepelik olan eğimli bölgelerde görülen genç yapılı ormanlardan olup toprağın yıkanma oranı genellikle yüksek olduğu için pH değeri düşüktür. Su tutma kapasitesi gelişmiş olan bu topraklar uzun süre su tutabilir özelliktedir. Bu topraklar yapraklarını döken orman örtüsü altında, kireçli ana materyal üzerinde gelişmekte olan genç topraklardır (Özyavuz, 2011; Anonim, 2021). Alüvyal Topraklar ise sürekli veya mevsimlik olarak yaş genellikle de taban suyunun etkisi altındadırlar. Genellikle taze tortul depozitler üzerindeki genç toprak olarak tanımlanmaktadır (Turna, 2014).

Tablo 1. Büyük Toprak Gruplarının Havzada Alansal Dağılımı

Büyük Toprak Grupları	Sembol	Alan		Büyük Toprak Grupları	Sembol	Alan	
		Km ²	%			Km ²	%
Kahverengi Topraklar	A	0,15	0,09	Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları	N	34,12	19,83
Alüvyal Topraklar	B	23,20	13,48	Kırmızı Akdeniz Toprakları	T	5,34	3,10
Kırmızı Kahverengi Topraklar	E	3,21	1,86	Kireçsiz Kahverengi Topraklar	U	3,31	1,92
Kırmızımsı Kahverengi Topraklar	F	1,20	0,70	Bazaltik Topraklar	X	0,05	0,03
Kolüvyal Topraklar	K	4,23	2,46	Yerleşim Alanları	YR	0,64	0,37
Kahverengi Orman Toprakları	M	96,62	56,16				

HTG haritası Arc-GIS ortamında toprak sınıfları ve diğer toprak özellikleriyle kombinasyon yapılarak elde edilmiştir (Şekil 4.a). HTG haritası A, B, C ve D olmak üzere dört gruptan oluşmaktadır ve her bir grubun belirleyici özelliği vardır. A grubu infiltrasyon hızı yüksek iken, D grubu sızma hızı düşüktür. Bu dört grup özellikleri içerisinde A grubunda bulunan topraklar nemli olsalar bile kum veya çakıl içeriklerinden dolayı yüksek geçirgenlik değerine sahiptir. Bu topraklarda su taşınımı yüksek değerlerdedir. B grubu hidrofiziksel karakteristiğine bakıldığında sızma kapasitesi orta, kısmen derin ve kaba tekstürlü olup geçirgenliği hızlı topraklardan meydana gelmektedir. Sızma kapasitesi yavaş, orta tekstürlü ve geçirgenliği düşük olan grup C olarak ifade edilmektedir. D grubu ise akış potansiyeli çok yüksek, sızma miktarı ise çok az olan zeminlerdir (ıslanınca çok şişen zeminler, ağır plastik kil, yeraltı su yüzeyi her zaman yüksek olan zeminler, geçirimsiz tabakaya oturan derinliği az zeminler, bazı tuzlu zeminler) ve sıg toprak olan alanlarda görülürler. Bundan dolayı D grubu sıg topraklardan oluşup hemen hemen geçirimsiz bir tabakadan meydana gelmektedir (SCS, 1964; 1986; Arslan, 2008; Özalp, 2009). Havzanın büyük bir kısmını (%86,5) D grubu içerdiği gibi bu alanlarda akış potansiyelinin fazla olması ve buna bağlı olarak CN değerlerinin yüksek çıkması beklenmektedir. Sisne Havzasındaki hidrolojik toprak gruplarının havzadaki alansal dağılımına bakıldığında, yaklaşık olarak %10,1 (17,32 km²) kısmı C grubundan, %3,4 (5,89 km²) kısmı B grubundan ve %0,03 (0,05 km²) kısmı ise A grubundan meydana gelmektedir. C ve D guruplarının havzanın çoğunluğunu oluşturması gelen yağışın sızmadan ziyade akışa geçtiğini ifade etmektedir.

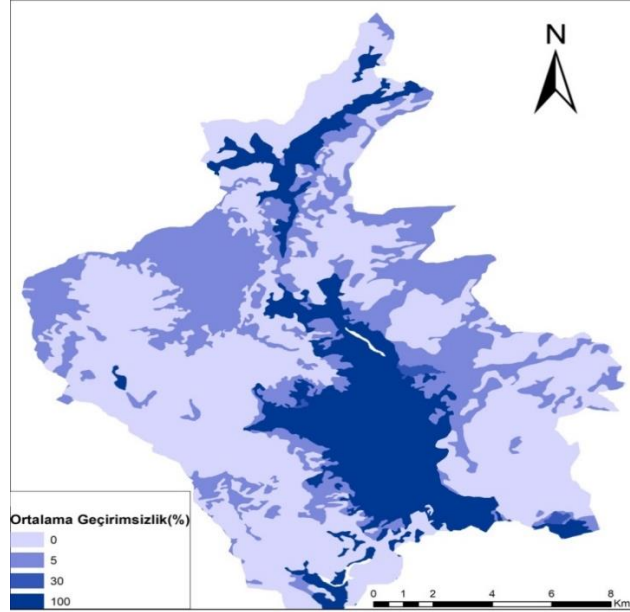


Şekil 4.a. HTG Haritası b. AKAÖ Haritası

Sisne Havzasının Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü haritası Şekil 4.b'de gösterilmektedir. Haritadan da görüleceği üzere, bölgenin büyük çoğunluğu orman, tarım ve sulak alanlardan oluşmaktadır. Bununla birlikte, havzada en az yer kaplayan yerleşim yerleri ve çayır-mera alanları da mevcuttur. Havzanın CN değerlerinin tespiti ve buna bağlı olarak yağışın akışa geçme durumundaki sızma oranlarının belirlenmesi açısından bu harita önem arz etmektedir. Sisne Havzası su ve tarım bakımından iyi durumda olduğu, akarsuların sürekliliği mevsimsel olarak devam ettiği gözlemlenmektedir. Ayrıca, bölgenin yüzdesel geçirimsizliği Şekil 4.b ve Tablo 2'nin bütüncül olarak kullanılmasıyla belirlenebilir. Geçirimsiz yüzeyler, uzun süredir kentsel alanlarda yağış-akış ilişkisini etkileyen kritik faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Schoener, 2018). Tablo 2'den de görüleceği üzere, havzanın büyük çoğunluğunu oluşturan ormanlar, ortalama geçirimsizlik yüzdesi %0 iken su alanlarında %100'dür. Çayır-mera alanları ise havzada çok az yer kaplayıp %5 oranında tespit edilmiştir. Havzanın ortalama geçirimsizlik yüzdesi %20,76 hesaplanmıştır. Havzada bulunan yerleşim yerleri kırmızı renkle gösterilmiş olup geçirimsizlik yüzdesi %30 oranında; sulak bölgeler mavi renkle gösterilmiş olup havza geçirimsizliği %100 oranındadır (Şekil 5).

Tablo 2. Sisne Havzası Ortalama Geçirimsizlik Değerleri ([HEC-GeoHMS-USACE, 2013]'den Uyarlanmıştır.)

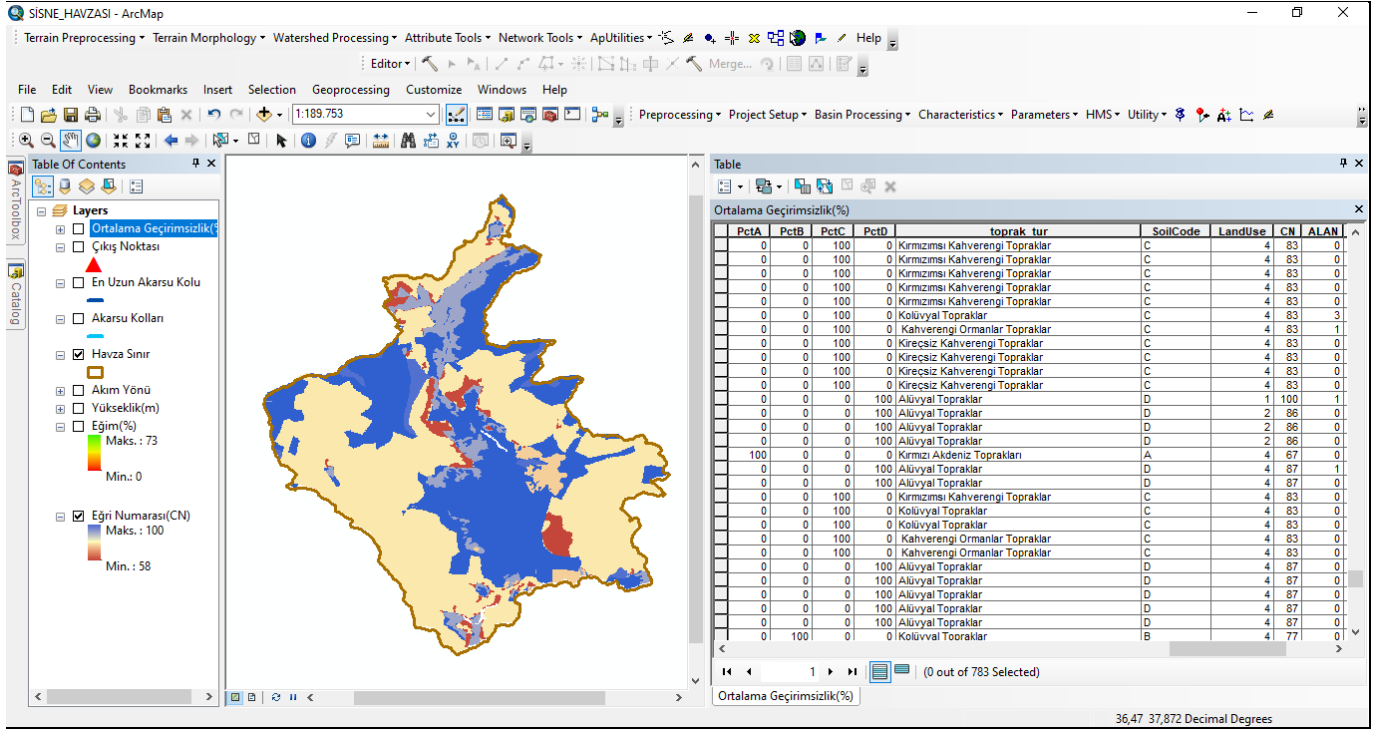
AKAÖ	Ort. Geçirimsizlik [%]	Alan [Km ²]	Alan [%]
Su	100	33,47	19,45
Orman	0	90,75	52,74
Tarım	5	47,07	27,36
Yerleşim	30	0,64	0,37
Çayır-mera	5	0,14	0,08

**Şekil 5.** Ortalama Geçirimsizlik Yüzdeleri

Eğri numaraları bulunurken havzaya ait AKAÖ ve HTG gibi bazı özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler havza alanının yerleşim, ticari, sulak, orman vs. gibi kullanımına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Örneğin, çayır, otlak ve sık ormanlar gibi bölgelerde (sadece A Grubu için) CN değeri 30 iken, su/sulak alanlarda bu değer (A, B, C ve D gruplarının tamamında) 100'e ulaşmaktadır (Tablo 3). Arc-GIS'de Tablo 3'teki özelliklere göre kombinasyonu yapılmış ve Sisne Havzasına ait CN değerleri elde edilmiştir (Şekil 6).

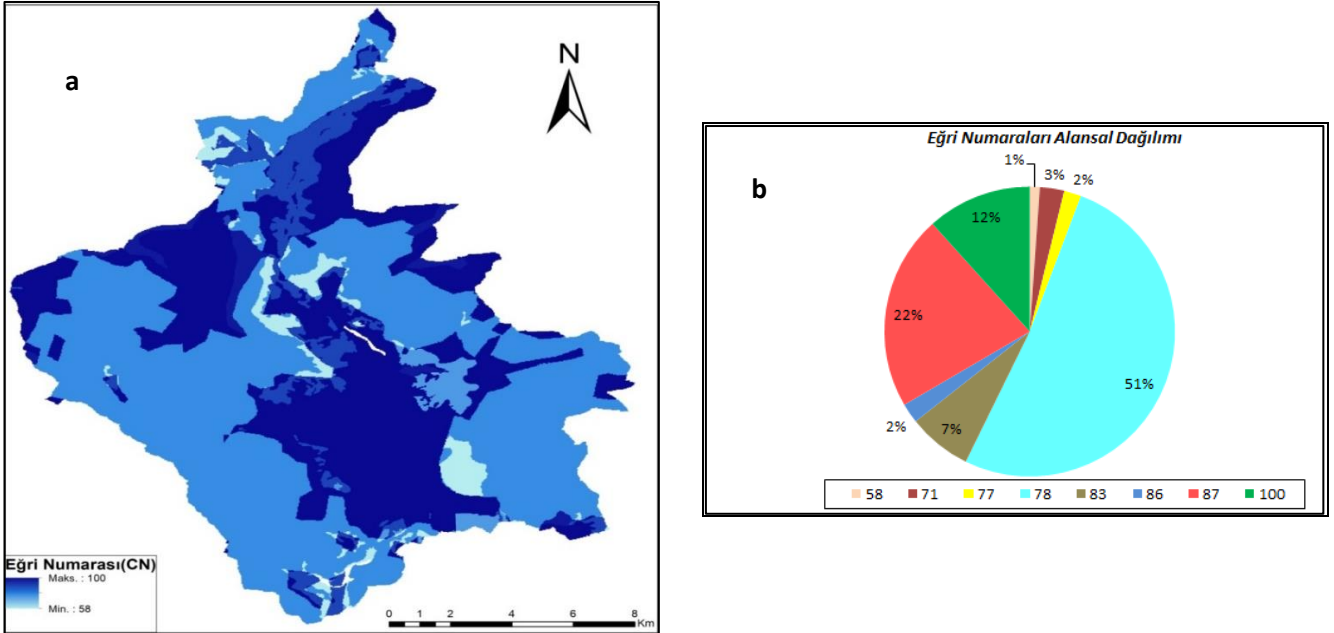
Tablo 3. AKAÖ ve HTG'ye Göre CN Değerleri ([Saral, 2010]'dan Uyarlanmıştır.)

AKAÖ	HTG			
	A	B	C	D
Yerleşim	57	72	81	86
Ticari Alanlar	89	92	94	95
Endüstriyel Alanlar	81	88	91	93
Açık Alanlar	39	61	74	80
Çayır, Otlak	30	58	71	78
Sık Ormanlar	30	55	70	77
Seyrek Ormanlar	43	65	76	82
Su/Sulak Alanlar	100	100	100	100



Şekil 6. CN Değerlerinin CBS Ortamında Elde Edilmesi

Elde edilen CN değerlerinin havza üzerindeki dağılım haritası ve alansal dağılımlarını gösteren şekiller sırasıyla Şekil 7.a. ve Şekil 7.b.’de gösterilmektedir. CN değerleri 58 ile 100 arasında değişen havzanın alansal olarak dağılımında ise yaklaşık %50’si 78 olduğu şekil üzerinden de görülmektedir. Buna en yakın diğer CN değeri 87 olup toplam havza alanının %22’sine tekabül etmektedir. Sisne Havzasının ortalama eğri numarası değeri, CN_{ort} , ise 82,62 olarak hesaplanmıştır. Havzanın iç kesimleri ve kuzey bölgelerinde arazi kullanımına da bağlı olarak CN değerleri daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 7.a. CN Dağılım Haritası b. CN Değerlerinin Alansal Yüzdelik Dilim Gösterimi

Sisne Havzasına ait diğer sayısal hesaplamaların sonucu Tablo 4’te gösterilmiştir. Gecikme zamanı değeri, denklemde yerine yazıldığında 2,46 saat olarak elde edilmiştir. Denklemden de anlaşılacağı gibi, t_{lag} değeri eğim ile ters, CN değerleri ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Sisne Havzası ortalama eğim değeri ise 16,4 olup, ortalama eğri numarası 82,62 gibi 100’e yakın bir değerin çıktığını göstermiştir. Ayrıca toprak tarafından tutulan

maksimum su miktarı, CN değeri Denklem 7’de yerine yazıldığında 53,43 mm bulunurken I_a Denklem 5’de yerinde yazıldığında 10,7 mm olarak hesaplanmıştır. Başlangıçta tutulan yağış miktarı değeri görüldüğü gibi CN ile ters orantılı olup, maksimum I_a değeri minimum CN ile elde edilmiştir.

Tablo 4: Sisne Havzasına Ait Parametrik Değerleri

Alan km ²	Uzunluk km	CN -	W %	L m	S mm	t_{lag} saat dk	I_a mm	Geçirimsizlik %
172,07	84	82,62	16,4	25079	53,43	2,46 147	10,7	20,76

SONUÇLAR

Kahramanmaraş’daki en büyük yağışın Andırın ilçesine düşmesi sebebiyle Sisne Havzası ve bölgedeki tarım amacıyla kullanılan topraklar, özellikle kış ve bahar aylarında sürekli yağış altında kalmaktadır. Yağışların beslediği önemli su kaynakları potansiyeli de bulunan bölgede, sürekli ekstrem yağışlar ise sel ve taşkın gibi zararları da beraberinde getirmektedir. Bu metodolojinin uygulanmasıyla birlikte Andırın-Sisne bölgesindeki yağış-akış tahminleri ve buna bağlı olarak hidrograflar elde edilebilecektir. Birçok hidrometeorolojik modelin aksine SCS-CN metodu ile daha az veri kullanılarak olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir. Gelişen teknolojiye bağlı olarak CBS kullanımının artması ve uzaktan algılama verileri, arazi ölçüm maliyetlerini ve iş yükünü minimize etmekte; böylece gerekli analiz ve haritalamalar daha kolay yapılabilmektedir. Bu amaçla, CBS vasıtasıyla havza jeomorfolojisi (AKAÖ, HTG, akarsu kolları, rakım, akım yönü, eğim, geçirimsizlik, eğri numarası, vb.) temin edilmelidir.

SCS-CN metoduyla elde edilen haritalar, hidrograf analizleri bölgeye geleceğe yönelik yapılacak yeni çalışmalar için topoğrafik veya jeolojik açıdan destekleyici nitelikte olabilmektedir. Sisne Havzasına bakıldığında ortalama CN değeri 82,62, ortalama geçirimsizlik değeri %20,76 olup havza hakkında bazı ön bilgilere ulaşılmıştır. Geçmişte sel ve taşkın olaylarının olması bölgenin geçirimsizlik alanlara sahip olduğu ortalama geçirimsizlik haritasıyla desteklenmiştir. Elde edilen CN değerlerinin çalışma alanındaki dağılımı harita ile gösterilmiş olup çalışma hakkında ön fikirde bulunmayı sağlamıştır. Sisne Havzasının AKAÖ haritasından anlaşılacağı gibi yerleşim alanları oldukça az bir alana sahiptir. Ayrıca, BTG sınıfı yardımıyla bölgedeki tarıma elverişli alanlar belirlenebilmekte; böylece, yağışın sürekliliğiyle üretimde yeni projeler tasarlanabilmektedir. Hidrolojik toprak grupları ise akış potansiyeli tahmininde önemli rol almıştır. HTG haritasından da anlaşıldığı gibi havzanın büyük çoğunluğu D grubu, yani geçirgenliği çok yavaş olduğu tabakadan oluşmakta olup, geçirgenliğin az olması ise bölgedeki toprağın kil olduğunun göstergesi olarak yorumlanmıştır. Havza alanında yerleşim alanı az olduğu ve yağış oranının ise yüksek olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, ortalama eğri numarası değeri ve SYM verilerinden havzanın eğim dağılımına bakılarak az eğimli topoğrafik yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sisne Havzasına ait yükselti değerleri özellikle havzanın kuzey bölgesinde daha yüksek olduğu ve akışın kuzeyden güneydoğuya doğru olduğu görülmektedir. Havzanın gecikme süresi (t_{lag}) 2,46 saat olarak bulunurken; bu değer, havzanın büyüklüğü, eğimi ve yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Andırın Sisne bölgesinde meydana gelen sel, taşkın gibi olayların sebebi bölgenin yağış bakımından potansiyelinin yüksek olması, havza yapısı ve şekline bağlı olarak düşünülmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara, evapotranspirasyon, sıcaklık, yağış gibi meteorolojik verilerin de eklenmesiyle bölgeye ait yağış-akış simülasyonları, taşkın frekans analizleri veya erken uyarı sistemleri geliştirilebilir. Böylelikle CBS ile entegre edilen SCS-CN metodu, yüzey yağış-akış tahmininin havza yönetiminde etkin bir şekilde kullanılabilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 87 (1–2), 45–59. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)

Akgül, S. (2009). Gediz Havzasında su bütçesi elemanlarındaki değişimin tarımsal su kullanımına etkisi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Ankara 246s.

Akyüz, D. E. (2018). Coğrafi Bilgi Sisteminde Havzanın Tanımlanması. *Su Vakfı, Su Bülteni* (6), 7.

Al-Ghamdi, K. A., Elzahrany, R. A., Mirza, M. N., & Dawod, G. M. (2012). Impacts of urban growth on flood hazards in Makkah City, Saudi Arabia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 4 (2), 23-34. <https://doi.org/10.5897/IJWREE11.128>

Anonim (2021). <https://www.orman.gen.tr/kahverengi-orman-topraklari.html> (ET:01.12.2021)

Arslan, O. (2008). Yağış-yeraltısuyu ilişkisi modellerinin değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta 90s.

Aslan, Ş. T. A., Gündoğdu, K. S., & Demir, A. O. (2004). Sayısal yükseklik modelinden yararlanılarak bazı havza karakteristiklerinin belirlenmesi: Bursa Karacabey İnkaya Göleti Havzası örneği. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18 (1), 167-180.

Atak, E. (2014). Sürdürülebilir Hidroelektrik İçin Çevresel Akış Kılavuzu. WWF-Türkiye, 69, İstanbul.

Bhavsar, P. N., & Patel, J. N. (2020). Event-based rainfall-run-off modeling and uncertainty analysis for lower Tapi Basin, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26 (3), 353-362. <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1464406>

Cengiz, K. (2021). Bodrum Yarımadası Kent Taşkınlarının Nedenleri ve Çözüm Önerileri Üzerine Bir Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 207-216. <https://doi.org/10.31590/ejosat.898178>

ÇTÜE (2022). T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK (MAM), Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, <https://ctue.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/su-ve-toprak-kaynaklarinin-surdurulebilir-yonetimi> (ET:29.01.2022).

Das, S., & Paul, P. K. (2006). Selection of site for small hydel using GIS in the Himalayan region of India. *Journal of Spatial Hydrology*, 6 (1). <https://scholarsarchive.byu.edu/josh/vol6/iss1/8>

Daniel, E.B., Camp, J.V., LeBoeuf E.J., Penrod, J.R., Dobbins, J.P., & Abkowitz, M.D. (2011). Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review . *The Open Hydrology Journal*. 5 (1), 26–50. <https://doi.org/10.2174/1874378101105010026>

De Ridder, N. A., & Boonstra, J. (1994). Analysis of water balances. Drainage principles and applications., (2nd Ed.), 601-633.

Dingman, S.L. (2002). Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA. Physical Hydrology (2nd Ed.), 646.

Dizdar, M. Y. (2003). Türkiye'nin toprak kaynakları. *TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası Teknik Yayınlar Dizisi*, (2), 77-251.

Dis, M.O., & Elagca, A. (2019). Determination of Catchment Characteristics over Ballikaya Subbasin in Ceyhan Watershed via Arc-GIS Environment. *KSU Journal of Engineering Sciences*, 22, Special Issue, 88-94.

Elagca, A., & Dis, M.O. (2022). Application of Arc-GIS, HEC-GeoHMS and HEC-HMS in a Holistic Sense for Estimation of Rainfall-Runoff Process: Case Study over Ballikaya Basin. *Acta Scientiarum. Technology*.

Eraydın, E. (2015). Uzaktan Algılama ve Cbs Yöntemleri Kullanılarak Akış Eğri Numaralarından Eşen Çayı Havzası İçin Taşkınların Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 107s.

Fang, Z., Bedient, P.B., Benavides, J.A., & Zimmer, A.L. (2008). Enhanced Radar-Based Flood Alert System and Flood Plain Map Library. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*. 926-938. [https://doi.org/10.1061/\(Asce\)1084-0699\(2008\)13:10\(926\)](https://doi.org/10.1061/(Asce)1084-0699(2008)13:10(926))

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*. 50 (4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>

Govender, T., Dube, T., & Shoko, C. (2022). Remote sensing of land use-land cover change and climate variability on hydrological processes in Sub-Saharan Africa: Key scientific strides and challenges. *Geocarto International*, 1-27. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2043451>

HEC-GeoHMS-USACE, Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS User's Manual Version 10.1, (2013). US Army Corps of Engineers. *Hydrologic Engineering Center*. Davis, CA, USA. February.

İspirli, M. N. (2019). HEC-HMS Model Programı Kullanılarak Dağlık Havzalarda Kar Erimesine Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi ve Kırkgöze Çipak Havzası'nın Hidrolojik Modellenmesi. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum 161s.

İSTKA (2013). Kozlar deresinin taşkın riskinin belirlenmesi ve koruma tedbirleri, İSTKA/2012/DFD/83, proje raporu

Kadıoğlu, M. (2008). Sel, Heyelan ve Çığ için Risk Yönetimi, Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri, *JICA Türkiye Ofisi Yayınları* No:2, 251-276, Ankara.

Karadağ, A. A. (2012). Kovada Gölü alt havza sınırlarının belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 8 (1), 58-76.

Kargı, P. G. (2019). Ergene havzası yağış-akış ilişkilerinin hidrolojik ve hidrolik modelleme ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli 178s.

Mesta, B., Kargı, P. G., Tezyapar, İ., Ayvaz, M. T., Gökteş, R. K., Kentel, E., & Tezel, U. (2019). Yenicegözü Havzası'ndaki yağış-akış ilişkisinin HEC-HMS hidrolojik modeli ile belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (8), 949-955. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.75133>

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (1999). Another look at SCS-CN method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4 (3), 257-264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:5\(451\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:5(451))

Mockus, V. (1949). Estimation of total (peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Rep. Grand (Neosho) River Watershed, USDA, Washington.

Özalp, D. (2009). Dere taşkın risk haritalarının cbs kullanılarak oluşturulması ve cbs ile taşkın risk analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 139s.

Özdemir, H. (2007). SCS CN Yağış-akış modelinin CBS ve uzaktan algılama yöntemleriyle uygulanması: Havran Çayı Havzası örneği (Balıkesir). *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 5 (2), 1-12. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000078

Özfidaner, M., Şapolyo, D., & Topaloğlu, F. (2016). İç Anadolu bölgesi yağış verilerinin gidiş analizi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 161-168. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.210982>

Özyavuz, M. (2011). Bitki örtüsünün ekolojik şartlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri ile analizi, Ganos (Işıklar) Dağı, Tekirdağ. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8 (2), 37-47.

Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of hydrologic engineering*, 1(1), 11-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))

Ponce, V. M., & Magallon, L. (2021). Initial abstraction revisited. Online publication. http://ponce.sdsu.edu/initial_abstraction_revisited.html. (13.05.2021)

Ramakrishnan, D., Bandyopadhyay, A., & Kusuma, K. N. (2009). SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of earth system science*, 118, 355-368. <https://doi.org/10.1007/s12040-009-0034-5>

- Saral, A. (2010). Çok Kriterli Karar Verme ve Bilgi Difüzyonu Yöntemleri Yardımıyla, Taşkın Risk Analizi Yazılımının Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü İletişim Sistemleri Anabilim Dalı, İstanbul 75s.
- Schoener, G. (2018). Urban runoff in the US Southwest: Importance of impervious surfaces for small-storm hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23 (2), 05017033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001610)
- SCS (1964). National Engineering Handbook Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington D.C.
- SCS (1972). National Engineering Handbook (NEH) Section 4. Hydrology, Soil Conservation Service, USDA, Washington D.C.
- SCS (1985). Hydrology-National Engineering Handbook, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington D.C.
- SCS (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55, USDA, Washington D.C.
- Shafuan, M. F. A., Nurhidayu, S., & Kamarudin, N. (2016). SCS-CN in Tropics: Is It Reliable?. *Pertanika J. Sch. Res. Rev.* 2 (1) 1–21.
- Sherman, L. K. (1949). The unit hydrograph method, In *Physics of the Earth*. O. E. Menizer Ed. *Dover Publications*, 514-525, New York.
- Siddi Raju, R., Sudarsana Raju, G., & Rajasekhar, M. (2018). Estimation of rainfall runoff using SCS-CN method with RS and GIS techniques for Mandavi Basin in YSR Kadapa District of Andhra Pradesh, India. *Hydrospatial Analysis*, 2 (1), 1-15. <https://doi.org/10.21523/gcj3.18020101>
- Singh, P., & Singh, V.P. (2001). *Snow and Glacier Hydrology*. The Netherlands: *Kluwer Academic Publishers*. 285.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, 33 (2), 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Turna, M. (2014). İkramiye Vadisi Florası. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı, Sakarya 151s. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.292196>
- Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G. (2000). Küresel İklim Değişikliği ve Olası Etkileri, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları, 7-24, ÇKÖK Gn. Md., Ankara.
- USACE (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 3.5. US Army Corps of Engineers, Hydrological Engineering Center. Davis, CA, USA.
- USDA (1957). Soil Conservation Service. National Engineering Handbook. Section 4. Supplement A.
- USGS (2021). United States Geological Survey Digital Elevation Model, ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu Sayısal Yükseklik Modeli, <https://earthexplorer.usgs.gov/> (ET:11.10.2021)
- Utlu, M. & Ekinci, D. (2015). Namnam Çayı Havzasının (Muğla) Uygulamalı Hidrografyası. *Coğrafya Dergisi*, (30), 38-60.
- Wang, J., Hong, Y., Li, L., Gourley, J. J., Khan, S. I., Yilmaz, K. K., Adler, R. F., Policelli, F. S., Habib, S., Irwn, D., Limaye, A.S., Korme, T. & Okello, L. (2011). The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model. *Hydrological Sciences Journal*, 56 (1), 84–98. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.543087>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 08.03.2022
Kabul Tarihi : 11.05.2022

Received Date : 08.03.2022
Accepted Date : 11.05.2022

PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH DOUBLE FRESNEL LENSES

ÇİFT FRENSEL LENSLİ BİR YOĞUNLAŞTIRILMIŞ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN PERFORMANS ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Ferhat KARTAL¹ (ORCID: 0000-0003-2790-6331)
Osman TURAN^{1*} (ORCID: 0000-0003-3421-2020)

¹ Department of Mechanical Engineering, Bursa Technical University, Bursa, Turkey

* Corresponding Author: Osman TURAN, osman.turan@btu.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the performance of a CPV system with double Fresnel lenses has been analysed experimentally. In this context, the effects of concentration ratios (C_1 , C_2) and f - numbers (f_1 , f_2) of primary and secondary lenses and distance between lenses (L_D) on the CPV system performance have been investigated for different configurations. In general, it has been observed that the CPV system performance improves with increasing L_D until it reaches a critical value ($L_{D,crit}$), but it starts to worsen after L_D exceeds $L_{D,crit}$. Besides this, CPV systems with double lenses with a high f_1 value have been seen to perform better than single applications. It has been detected that the performance of the CPV system can be improved by using a secondary Fresnel lens when $f_1 > 0.5$. Beyond these, the ANOVA analyses have been carried out in order to compare the contribution ratio of the optical properties of lens pairs on CPV system performance. It has been observed that C_1 and f_1 are predominantly effective on CPV system performance whereas f_2 has found to have the least contribution ratio. Finally, optimum C_1 , C_2 , f_1 , f_2 and $L_{D,crit}$ have been predicted by genetic algorithm and artificial neural network based studies.

Keywords: Solar energy, CPV system, fresnel lens, ANOVA, neural network

ÖZET

Bu çalışmada, yoğunlaştırıcı optik eleman olarak nokta odaklı Fresnel lens kullanılan çift optik elemanlı bir CPV sistemin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, birincil ve ikincil optik eleman yoğunlaşma oranları (C_1 , C_2), f sayıları (f_1 , f_2) ve lensler arası mesafenin (L_D) CPV sistem performansı üzerindeki etkileri tek ve çift Fresnel lensli farklı konfigürasyonlar için araştırılmıştır. Genel olarak, lensler arası mesafe belirli bir kritik değere ($L_{D,crit}$) ulaşıncaya kadar, L_D artışı ile CPV sistem performansının iyileşmekte olduğu ancak L_D 'nin kritik değerin üzerine çıktığında sistem performansının kötüleşmeye başladığı gözlenmiştir. Ayrıca, $L_{D,crit}$ 'in önemli ölçüde Fresnel lens çiftinin optik özelliklerine bağlı olduğu not edilmiştir. Bunun yanı sıra, yüksek f_1 değerine sahip çift Fresnel lensli CPV sistemlerinin, tekli Fresnel lens uygulamalarına göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür. $f_1 > 0.5$ olduğunda CPV sisteminin performansının ikincil bir Fresnel lens kullanılarak iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Bunların ötesinde, Fresnel lens çiftlerinin optik özelliklerinin CPV sistem performansına etki oranını karşılaştırmak için deneysel veriler kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. ANOVA analizi sonuçları, birincil optik eleman özellikleri C_1 ve f_1 'in çift Fresnel lensli CPV sistem performansı üzerinde ağırlıklı olarak etkili olduğunu işaret etmiştir. Öte yandan, diğer parametrelerle karşılaştırıldığında f_2 'nin CPV sistem performansı üzerinde en az etkiye sahip olduğu da görülmüştür. Son olarak, genetik algoritma ve yapay sinir ağı temelli çalışmalar ile optimum C_1 , C_2 , f_1 , f_2 and $L_{D,crit}$ tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, CPV sistem, fresnel lens, ANOVA, yapay sinir ağı

ToCite: KARTAL, F., & TURAN, O., (2022). PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH DOUBLE FRESNEL LENSES.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(2), 71-94.

INTRODUCTION

"The world is not inherited from their ancestors, people borrowed it from their children," says a wise saying. However, human beings have been using fossil fuels for many years in order to provide the energy, which is the most basic need, by ignoring the damages they may cause to the world. As is known, fossil fuels contain carbon, and when they are burned to generate energy, they release carbon dioxide. Today's scientists have revealed that carbon dioxide creates a greenhouse effect on the world and causes global climate change. For this reason, in today's world, energy is not only a basic requirement of human beings but also one of the most primary issues that needs to be solved. This situation has focused attentions on the development of new, clean and renewable energy technologies. One of these technologies is photovoltaic systems that directly generate electrical energy using solar energy. However, the seasonal variation of solar energy density depending on geographical conditions causes the yields of these applications to remain at limited levels. Therefore, in recent years, it has been observed that studies on this area have focused on the development of new applications for improving the efficiency of photovoltaic systems (Xie et. al, 2011; Yadav et. al, 2013). Among these applications, "Concentrated Photovoltaic Systems (CPV)" stands out, where the sun's rays are focused on a specific target using optical elements such as lenses or mirrors. However, CPV systems have a very complex structure, since their performance depends on many parameters such as focusing distance, geometrical and optical concentration ratio, optical efficiency of the lens and solar radiation flux. Therefore, studies to investigate the performance of CPV systems under different operating conditions are very important. There are many different studies in the literature aimed at improving the performance of CPV systems. According to the using optical element type, it is possible to be classified these studies into two main groups as Fresnel lens and mirror. One of the first applications in the literature regarding with using Fresnel lens in CPV systems is Harmon's (1977) experimental study, in which optical efficiency was investigated for different concentration ratio. It was determined that the lens has sufficient optical efficiency at low concentration rates, but the optical efficiency of the lens decreases by 20-80 % as the focus distance decreases, especially at high concentrations. In another pioneer study that the economic feasibility of CPV systems were investigated depending on their photovoltaic cell yields, optical efficiency and cost per unit area was conducted by James and Williams. (1978). It has been highlighted that the change in solar energy density over time decreases the efficiency of photovoltaic cells and thus the cost per unit cell area increases. In addition to this, it was stated that it would be possible to benefit from CPV systems more effectively by using appropriate solar tracking systems. It has been also pointed out that solar energy density, optical transmissivity, unit cell area cost and solar tracking systems are the most critical parameters for Fresnel lens type CPV systems. In the following years, interest in CPV systems has increased and many studies on CPV systems have been implemented in the 1980s. These studies generally focused on solar tracking systems, cooling technologies for solar cells, high concentration systems and different imaging Fresnel lens shapes (Nakata et. al, 1980; Shepard and Chan, 1981; Moffat and Scharlack, 1982). It is possible to observe that since the 1990s, research on CPV systems with Fresnel lenses has reached a certain level and has started to stand out in many different areas from space applications (Grilikhes et. al, 1996; Rumyantsev et. al, 2002) to terrestrial applications (Kemmmoku et. al, 2003). Essentially, an ideal CPV system is desired to concentrate sunlight uniformly onto the photovoltaic cell. However, the main problem of CPV systems is that it can generate non-uniform solar radiation intensity on the photovoltaic cell depending on the optical properties such as the focal length of the optical element and the geometric concentration ratio (Segev and Kribus, 2013). For this reason, many different methods have been developed in order to provide more uniform solar radiation intensity on the photovoltaic cell in CPV systems. The most important of these methods is the use of secondary optical elements (Tien and Shin, 2016). In the literature, there are many studies conducted using secondary optical elements with different optical properties in order to obtain a more uniform solar radiation intensity (Victoria et. al, 2009; Chen and Su, 2010; El Himer et. al, 2012; Chen and Chiang, 2015; Tien and Shin, 2016; Renzi et. al, 2017; Şahin and Yılmaz, 2019). In these studies, CPV systems with double optical elements, generally consisting of different optical element pairs, were examined and it was noticed that the use of secondary optical element significantly improved the system performance. Although Fresnel lenses are lower in cost and easier to apply compared to other optical elements, it is observed that there are not enough studies on CPV systems with double Fresnel lenses in the current literature. Besides, there is no clear answer to the question of which optical parameters are more critical on the performance of CPV system with double Fresnel lenses. This gap in the current literature is the main motivation for this study. The main purpose of this study is to experimentally investigate the effects of concentration ratio, f-number and distance between lenses on the performance of CPV systems, which consist of pairs of point-focused Fresnel lenses with different optical properties. With the help of the experimental findings, it is also aimed to make statistical predictions based on the ANOVA method in order to determine the importance order of the related

parameters. Finally, it also purposed the optical properties and distance between lenses are optimized by artificial neural network coupled with genetic algorithm to maximise the performance of CPV system.

MATERIAL AND METHODS

Experimental Apparatus

In this study, the performance parameters of a CPV system with double concentrator optical elements with different optical properties were investigated experimentally. For this purpose, a CPV system consisting of a lighting unit, two-piece of concentrator optical elements and a multi-junction photovoltaic cell was designed (Fig. 1). Eight point-focus PMMA Fresnel lenses with different optical properties were used as optical elements in the experimental study, and the optical properties of lens were specified in Table 1. In the designed CPV system, (10 mmx10 mm) 3C42 type triple junction (*InGaP – InGaAs – Ge*) a photovoltaic cell belonging to Azur Space Company was used (Fig.1). The experiments were carried out under indoor test condition. In order to simulate solar radiation, a lighting unit consisting of Philips tungsten-halogen bar lamps with 1000 W and projector was designed (Fig. 1), as in many studies in the literature (Tawfik et. al, 2018). Vernier PYR-BTA pyranometer was used to measure the solar radiation flux coming from the lighting unit onto the photovoltaic cell. The lighting unit has also a PLC-based control unit that works synchronously with the pyranometer and ensures that the CPV system remains constant at the required solar radiation level. In order to determine the performance parameters of the CPV system, the current-voltage ($I - V$) and power-voltage ($P - V$) characteristics of the photovoltaic cell were measured using the PROVA 210 solar module analyser.

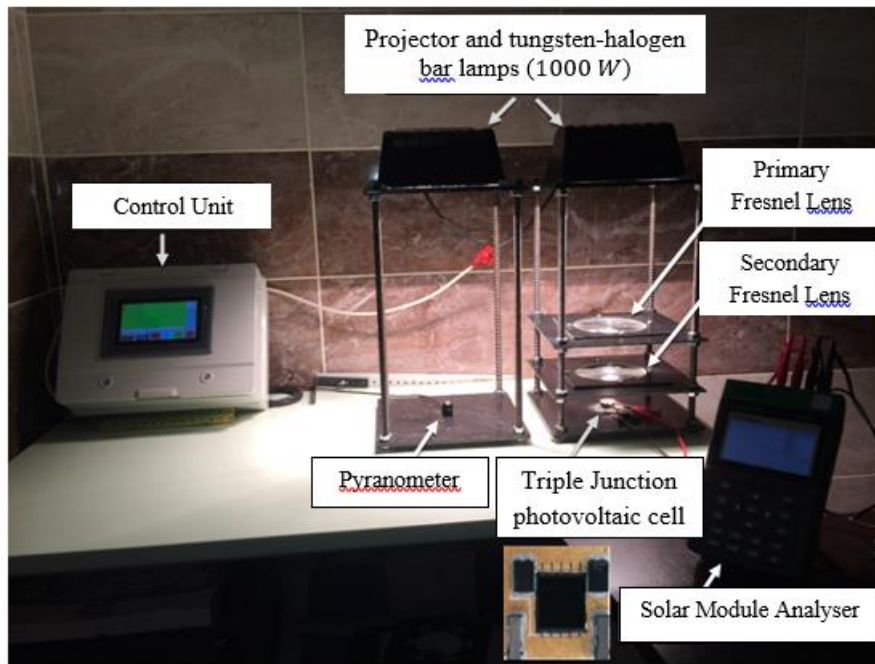


Figure 1. Experimental Setup and Equipment

Table 1. Optical Properties of the Fresnel Lenses Used in the Study

Fresnel lens	Diameter (\varnothing) (mm)	Focal length* (F_L) (mm)	Concentration** ratio (C)	f - number***
F1	150	140	176.7	0.9
F2	150	100	176.7	0.7
F3	150	70	176.7	0.5
F4	100	90	78.5	0.9
F5	100	70	78.5	0.7
F6	100	50	78.5	0.5
F7	52	35	21.2	0.7
F8	52	25	21.2	0.5

* Optimum distance from the lens to the photovoltaic cell, ** ratio of lens area to photovoltaic cell area, *** ratio of lens focal length to lens diameter.

Indoor Tests

Indoor tests were carried out under 1000 W/m^2 solar irradiance for 33 different situations consisting of different combinations of Fresnel lenses (Table 2). Accordingly, $D1 - D8$ represent the experiments where a single optical element is used, whereas $D9 - D33$ represent the experiments where double optical elements are used. In $D9 - D33$ experiments, the primary optical element was kept constant at its focal length, while the secondary optical element was moved vertically. The performance of CPV system configurations have been examined by determining $I - V$ and $P - V$ characteristics for different L_D values. $I - V$ and $P - V$ characteristic curves of photovoltaic cell were obtained by curve fitting to the discrete data read from the solar module analyzer with using the model proposed by Akbaba and Alattawi (1995). They proposed the following model based on the V_{OC} and I_{SC} read for the I-V characteristic of photovoltaic cell:

$$I = \frac{V_{oc} - V}{A + BV^2 - CV} \quad (1)$$

$$A = V_{oc}/I_{sc}, B = (K_1 - K_2)/K_3, C = (K_1V_a - K_2V_b)/K_3 \quad (2a)$$

$$K_1 = V_a I_a (V_{oc} - V_b - AI_b) \quad (2b)$$

$$K_2 = V_b I_b (V_{oc} - V_a - AI_a) \quad (2c)$$

$$K_3 = V_a I_a V_b I_b (V_b - V_a) \quad (2d)$$

In the above equations, $0.94I_{sc}$ and $0.64I_{sc}$ values are suggested respectively for I_a and I_b and curve fitting process is completed by selecting the appropriate values for V_a and V_b . In addition, it is also worth noting that the effect of temperature on the performance of CPV system has been ignored since the measurements made to determine the $I - V$ and $P - V$ characteristics of the photovoltaic cell are carried out in a very short time (i.e. within 30 seconds).

Table 2. Experiment Configuration List

Test No	POE	SOE
D1	F – 150 – 140 *	–
D2	F – 150 – 100	–
D3	F – 150 – 70	–
D4	F – 100 – 90	–
D5	F – 100 – 70	–
D6	F – 100 – 50	–
D7	F – 52 – 35	–
D8	F – 52 – 25	–
D9	F – 150 – 140	F – 150 – 100
D10	F – 150 – 140	F – 150 – 70
D11	F – 150 – 140	F – 100 – 90
D12	F – 150 – 140	F – 100 – 70
D13	F – 150 – 140	F – 100 – 50
D14	F – 150 – 140	F – 52 – 35
D15	F – 150 – 140	F – 52 – 25
D16	F – 150 – 100	F – 150 – 70
D17	F – 150 – 100	F – 100 – 90
D18	F – 150 – 100	F – 100 – 70
D19	F – 150 – 100	F – 100 – 50
D20	F – 150 – 100	F – 52 – 35
D21	F – 150 – 100	F – 52 – 25
D22	F – 150 – 70	F – 100 – 50
D23	F – 150 – 70	F – 52 – 35
D24	F – 150 – 70	F – 52 – 25
D25	F – 100 – 90	F – 100 – 70
D26	F – 100 – 90	F – 100 – 50
D27	F – 100 – 90	F – 52 – 35
D28	F – 100 – 90	F – 52 – 25
D29	F – 100 – 70	F – 100 – 50
D30	F – 100 – 70	F – 52 – 35
D31	F – 100 – 70	F – 52 – 25
D32	F – 100 – 50	F – 52 – 35
D33	F – 100 – 50	F – 52 – 25

* F – 150 (diameter of the lens, mm) – 140 (focal length of the lens, mm)

Reliability Analysis of Experimental Measurement

In order to test the repeatability of the experimental measurements, each *I – V* measurement was repeated three times and the reliability analyses were performed. One of the most commonly used indicators to reflect the consistency level of repeated experimental measurement is the Cronbach's alpha coefficient (Pallant, 2016). Essentially, the Cronbach's alpha coefficient is an internal consistency measure used to demonstrate the relationship level between different tests or measurements performed for the same situation. The Cronbach's alpha coefficient is defined as a function of the number of measurement data and the mean correlation between measurements:

$$\alpha_{\text{Cronbach}} = \frac{n}{n - 1} \left(1 - \frac{\sum V_i}{V_m} \right) \tag{3}$$

Here, *n* is the number of measurements, *V_i* is the average covariance between the measurement pairs and *V_m* is the mean variance. An ideal measurement result is expected to be Cronbach's alpha coefficient above 0.7 (Pallant, 2016). The outputs of reliability analysis are presented in Table 3 for some selected measurements. It is shown in Table 3 that the values of correlation among the repeated measurements and Cronbach's alpha coefficient are higher than 0.9. This indicates that the consistency level of the repeated experimental measurements is extremely high.

Table 3. The Outputs of Reliability Analysis for *I – V* Measurements

D9	Correlation Matrix			Cronbach's Alpha Coefficient
	M1	M2	M3	
M1	1.000	0.960	0.995	0.992

M2	0.960	1.000	0.981	
M3	0.995	0.981	1.000	
D10	Correlation Matrix			
	M1	M2	M3	
M1	1.000	0.985	0.922	0.970
M2	0.985	1.000	0.892	
M3	0.922	0.892	1.000	
D16	Correlation Matrix			Cronbach's Alpha Coefficient
	M1	M2	M3	
M1	1.000	0.870	0.820	0.901
M2	0.870	1.000	0.991	
M3	0.820	0.991	1.000	
D25	Correlation Matrix			Cronbach's Alpha Coefficient
	M1	M2	M3	
M1	1.000	0.959	0.973	0.974
M2	0.959	1.000	0.901	
M3	0.973	0.901	1.000	
D26	Correlation Matrix			Cronbach's Alpha Coefficient
	M1	M2	M3	
M1	1.000	0.906	0.922	0.970
M2	0.906	1.000	0.994	
M3	0.922	0.994	1.000	

RESULTS AND DISCUSSIONS

Effect of Distance between Lenses

For $D9 - D33$ configurations, using secondary optical elements, measurements at different L_D values were taken and the $I - V$, $P - V$ characteristic curves and performance parameters were compared with the CPV system with a single optical element, and the effect of L_D on the performance of CPV systems using double optical elements was examined in detail. In Figure 2, the results of $D12$ and $D14$ configurations are given, consisting of $F - 150 - 140 \times F - 100 - 70$ and $F - 150 - 140 \times F - 52 - 35$ optical element pairs, respectively. For both configurations, it is possible to observe that, the CPV system performance improves with increasing L_D until L_D reaches a critical value ($L_{D,crit}$), but it starts to worsen after L_D exceeds $L_{D,crit}$. For $D12$ ve $D14$ configurations, $L_{D,crit}$ values, where the highest performance was obtained, were determined as 100 mm and 120 mm, respectively. On the other hand, for the $D12$ ($D14$) configuration, the change in L_D does not affect the V_{OC} value of the photovoltaic cell, whereas the highest I_{SC} and P_{max} values were measured as 44 mA (47 mA) and 100.92 (110.17) respectively, $L_D = 100$ mm ($L_D = 120$ mm). These values for $D12$ ($D14$) configuration correspond to an increase of approximately 260 % (285 %) and 257 % (289 %) for I_{SC} and P_{max} , respectively, when compared to $D1$ configuration where single optical element is used.

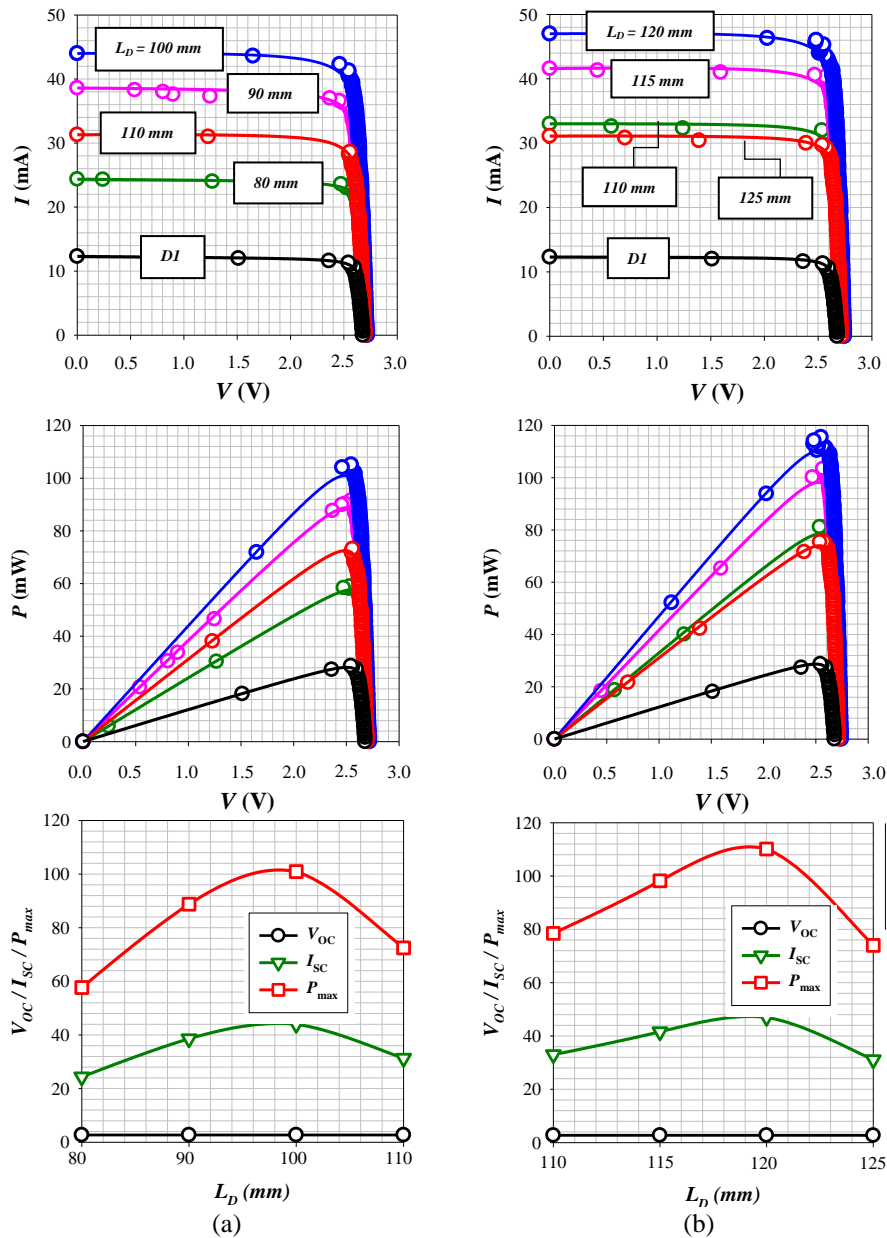


Figure 2. The Effect of L_D on Characteristic Curves and Performance Parameters of CPV System for a) D12 and b) D14 Configurations

The findings for D25 ($F - 100 - 90 \times F - 100 - 70$) and D27 ($F - 100 - 90 \times F - 52 - 35$) configurations have been presented in Figure 3. Similar to D12 and D14 configurations (see Fig. 2), there is a non-monotonic relationship between L_D and CPV system performance parameters for the D27 configuration. In other words, up to a critical distance of L_D , CPV system performance enhances with increasing the distance between lenses, but it tends to deteriorate when this critical distance is exceeded. For the D27 configuration, it is seen that the values of maximum power and short-circuit current are obtained as $I_{SC} = 38.3 \text{ mA}$ and $P_{max} = 91.81 \text{ mW}$, respectively at $L_D = 70 \text{ mm}$ and the CPV system performance parameters tend to decrease for $L_D > 70 \text{ mm}$. In other respects, it is observed that the system performance increases with increasing L_D for the D25 configuration. In Fig. 3, at low L_D distances, it is also remarkable that the CPV system performance stays under the performance of D4 configuration that consists of the single optical element, which has the same optical properties as POE of D25 configuration. The findings in Figures 2 and 3 indicate that the performance of CPV systems with double optical elements will be lower than CPV systems with single optical elements if the distance between the lenses is not properly set up.

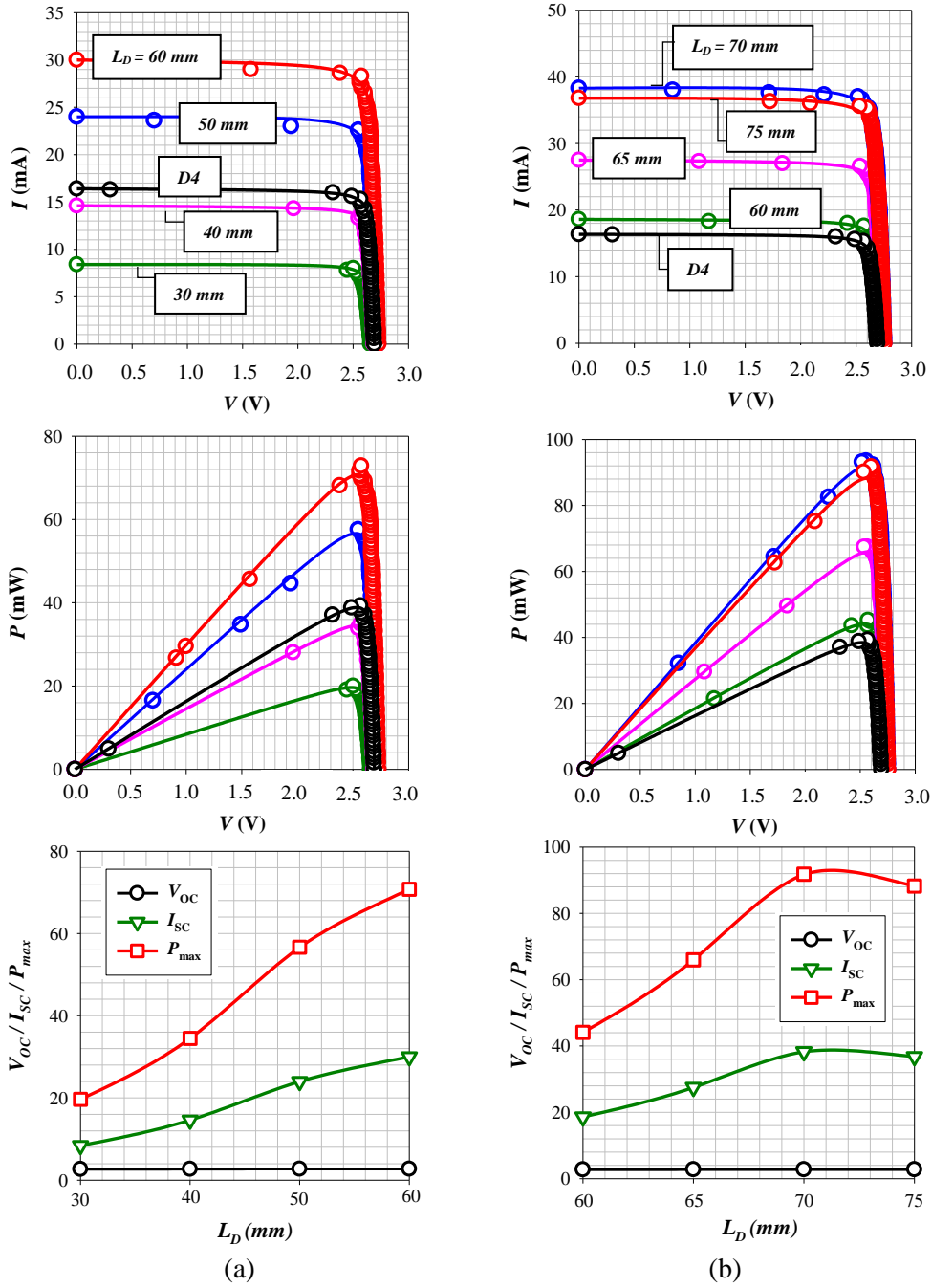


Figure 3. The Effect of L_D on Characteristic Curves and Performance Parameters of CPV System for a) D25 and b) D27 Configurations

Table 4. The Optical Properties of the Fresnel Lens Pairs and the Values of $L_{D,crit}$ and P_{max}

Experiment No	\varnothing_1 (mm)	F_{L1} (mm)	\varnothing_2 (mm)	F_{L2} (mm)	C_1	C_2	f_1	f_2	$L_{D,crit}$ (mm)	Pmax (mW) Double Lens	Pmax (mW) Single Lens
D9	150	140	150	100	176.71	176.71	0.9	0.7	80	71.31	28.30
D10	150	140	150	70	176.71	176.71	0.9	0.5	100	98.85	28.30
D11	150	140	100	90	176.71	78.54	0.9	0.9	90	89.47	28.30
D12	150	140	100	70	176.71	78.54	0.9	0.7	100	100.92	28.30
D13	150	140	100	50	176.71	78.54	0.9	0.5	110	113.45	28.30
D14	150	140	52	35	176.71	21.24	0.9	0.7	120	110.17	28.30
D15	150	140	52	25	176.71	21.24	0.9	0.5	120	114.52	28.30
D16	150	100	150	70	176.71	176.71	0.7	0.5	70	77.84	46.89
D17	150	100	100	90	176.71	78.54	0.7	0.9	70	93.63	46.89
D18	150	100	100	70	176.71	78.54	0.7	0.7	70	98.44	46.89
D19	150	100	100	50	176.71	78.54	0.7	0.5	80	102.58	46.89
D20	150	100	52	35	176.71	21.24	0.7	0.7	85	118.22	46.89
D21	150	100	52	25	176.71	21.24	0.7	0.5	85	117.47	46.89
D22	150	70	100	50	176.71	78.54	0.5	0.5	50	80.98	79.53
D23	150	70	52	35	176.71	21.24	0.5	0.7	55	94.62	79.53
D24	150	70	52	25	176.71	21.24	0.5	0.5	55	84.76	79.53
D25	100	90	100	70	78.54	78.54	0.9	0.7	60	70.74	38.44
D26	100	90	100	50	78.54	78.54	0.9	0.5	60	74.03	38.44
D27	100	90	52	35	78.54	21.24	0.9	0.7	70	91.81	38.44
D28	100	90	52	25	78.54	21.24	0.9	0.5	75	100.37	38.44
D29	100	70	100	50	78.54	78.54	0.7	0.5	40	51.06	54.19
D30	100	70	52	35	78.54	21.24	0.7	0.7	55	90.18	54.19
D31	100	70	52	25	78.54	21.24	0.7	0.5	55	80.78	54.19
D32	100	50	52	35	78.54	21.24	0.5	0.7	35	60.88	60.65
D33	100	50	52	25	78.54	21.24	0.5	0.5	35	48.90	60.65

In Table 4, the optical properties of the Fresnel lens pairs, the critical distances between the lenses (where the highest performance occurs) and the maximum power outputs have been given by comparing to the CPV systems with single optical element. It is possible to observe that the $L_{D,crit}$ value, where the maximum CPV system performance occurs, varies depending on the optical properties of the Fresnel lens pairs. In addition to this, the optical properties of the secondary optical element such as the concentration ratio (C_2) and the f - number (f_2), significantly affect the value of $L_{D,crit}$. This can be detected more clearly from Figure 4 where the variation of $L_{D,crit}$ with C_2 and f_2 are given for the CPV system configuration in which the lens, which has $C_1 = 176.6$ and $f_1 = 0.9$ optical properties, is used as POE. Figure 4 indicates that when f_2 (C_2) is kept constant and C_2 (f_2) is increased, the values of $L_{D,crit}$ (where the maximum power output arises) reduce in CPV systems with double optical elements.

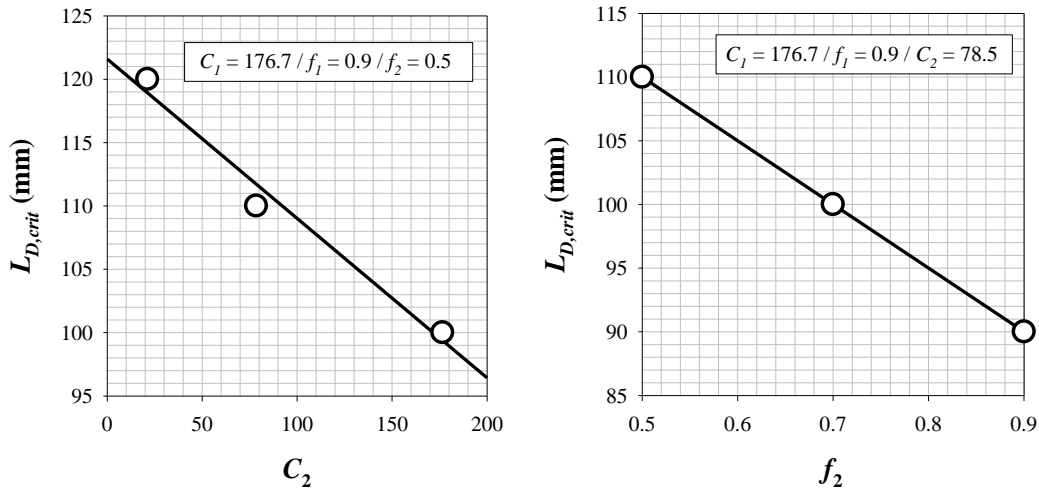


Figure 4. The Variation of $L_{D,crit}$ with Optical Properties of Secondary Fresnel Lens (i.e. C_2 and f_2)

In Figure 5, the values of maximum power output obtained from different CPV system configurations using double optical elements are compared with the cases with a single optical element. It is possible to conclude from Fig. 5 that using double lenses has positively affected the CPV system performance in general. It was observed that the highest power output was obtained from the D20 configuration consisting of the $F - 150 - 100 \times F - 52 - 35$ Fresnel lens pair with 118.22 mW. This corresponds to a power increase of approximately 152 % compared to the D2 configuration using single Fresnel lens ($F - 150 - 100$). Compared to the case with single optical element, the highest performance increase with approximately 305 % has been achieved for the D15 configuration ($F - 150 - 140 \times F - 52 - 35$). On the other hand, it has been observed that using secondary optical elements does not have a significant effect on the CPV system performance in D22 ($F - 150 - 70 \times F - 100 - 50$) and D32 ($F - 100 - 50 \times F - 52 - 35$), whereas it adversely influences the CPV system performance in the D29 ($F - 100 - 70 \times F - 100 - 50$) and D33 ($F - 100 - 50 \times F - 52 - 25$).

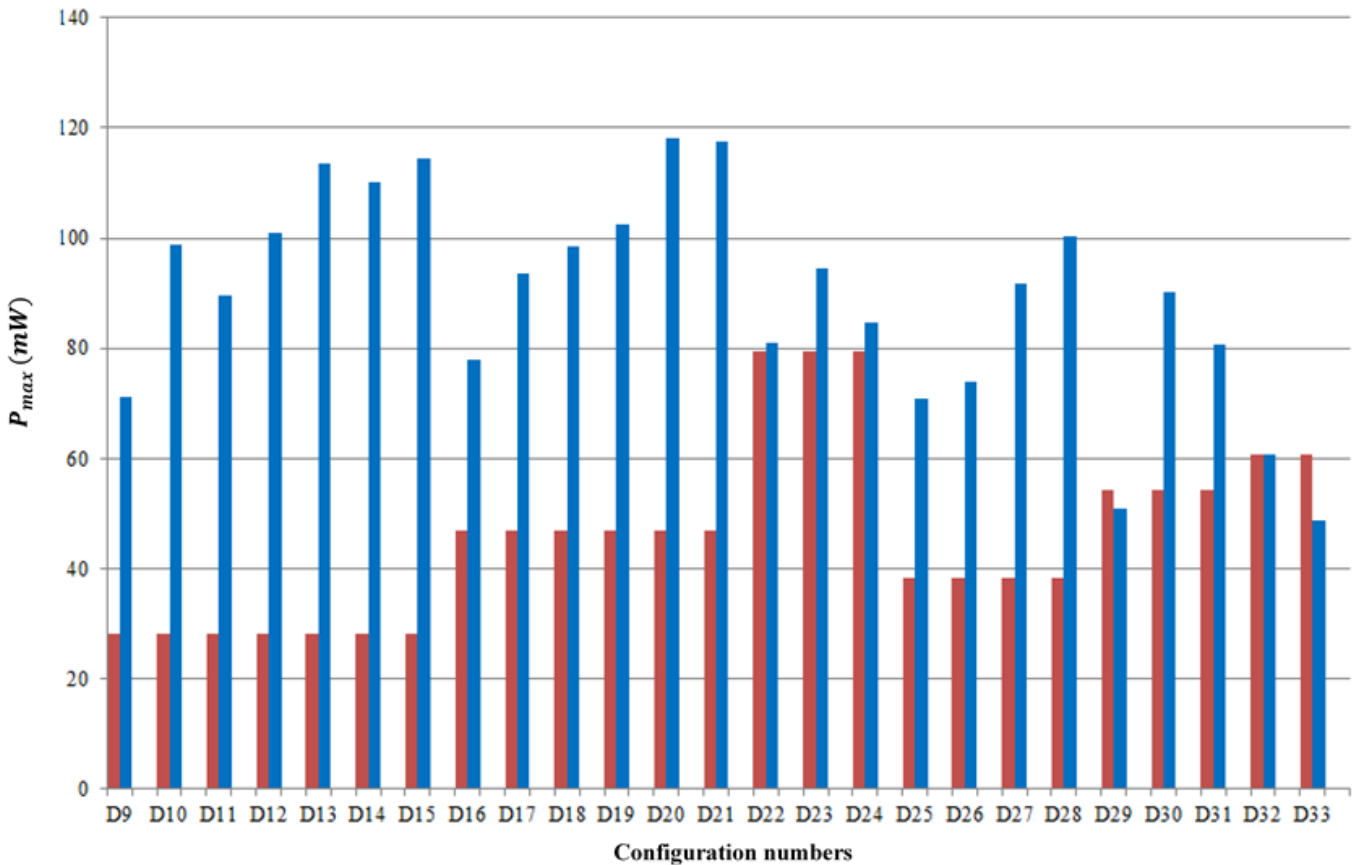


Figure 5. P_{max} Values Obtained from CPV System Configurations with Single (Red) and Double (Blue) Fresnel Lenses

Besides, it is also possible to observe from Fig. 5 that the CPV system configurations, which have high POE concentration ratio, produce higher power output than the other configurations with double lenses. In addition to this, it is worth noting that double optical element CPV systems with high f_1 value generally exhibit higher performance compared to CPV systems with single optical elements. However, the maximum power output for the CPV systems with double optical elements, which have low f_1 values, occurs rather close (or lower) levels to the systems, which have single optical element. This can be observed more explicitly from Fig. 6, where maximum power outputs of CPV system configurations with double and single optical elements are compared according to the f -number of POE (i.e. f_1). Figure 6 indicates that the performances of CPV system configurations with single Fresnel lens improve by supporting a secondary Fresnel lens when f_1 is higher than 0.5. In other words, it is possible to state that using a secondary optical element does not have a positive influence on the power output if $f_1 \leq 0.5$ for a CPV system with single Fresnel lens.

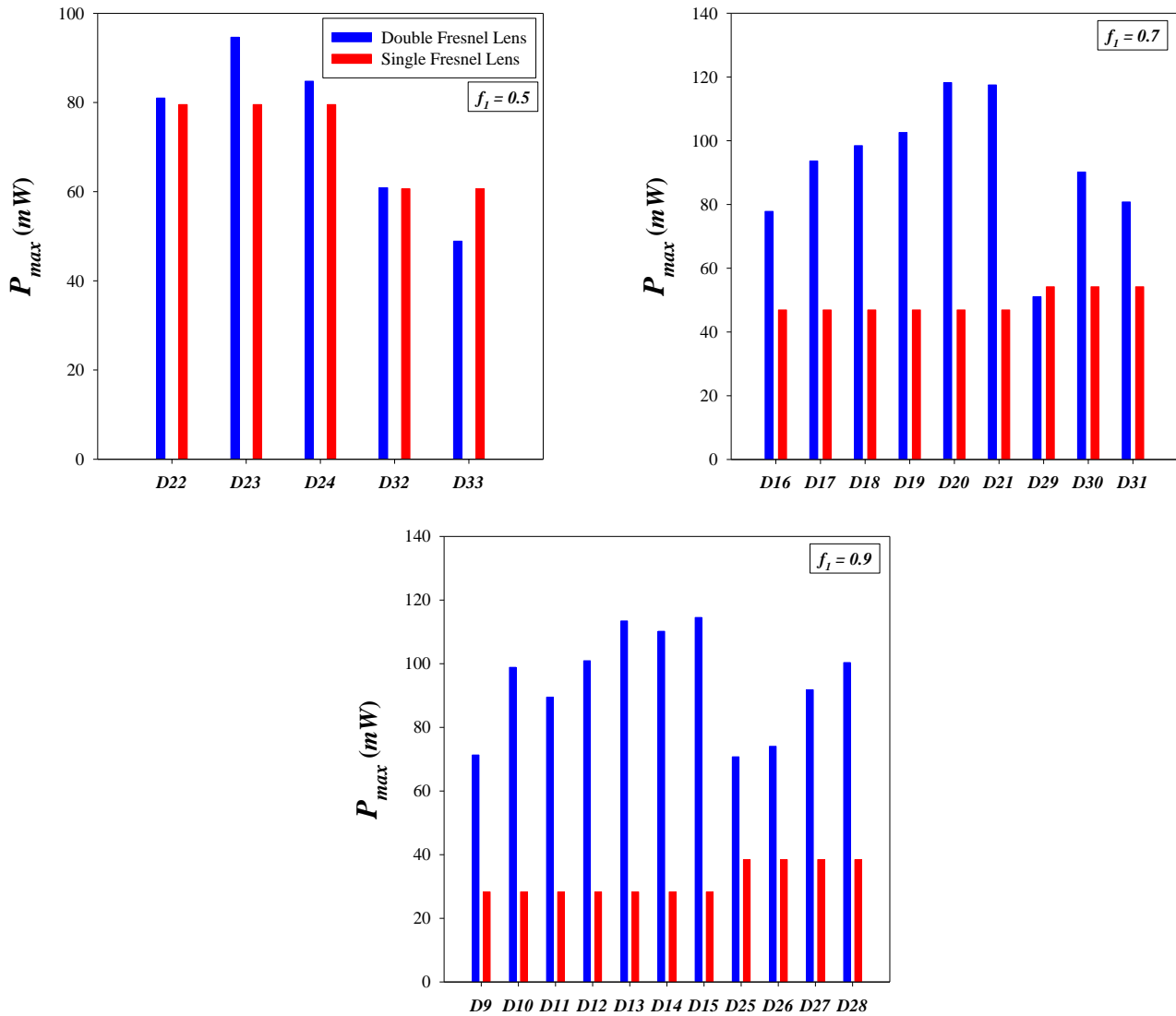


Figure 6. Comparison P_{max} Values of CPV System Configurations with Double and Single Fresnel Lens for Different f_1 Values

Effect of Concentration Ratio of Secondary Optical Element

In order to reveal the effect of concentration ratio of secondary optical element (SOE) on CPV system performance, $I - V$ and $P - V$ characteristic curves and performance parameters of CPV system configurations consisting of the SOE, which have different concentration ratios, have been compared in Figures 7 and 8. Accordingly, the findings for D10, D13 and D15 (D9, D12 and D14) configurations consisting of the same primary optical element (POE) but different SOE which have $f_2 \cong 0.5$ ($f_2 \cong 0.7$) were presented in Fig. 7a (Fig. 7b). From Figures 7a and 7b, it is possible to observe that CPV system performance improves with decreasing C_2 . Moreover, it is also attractive that this behaviour occurs more significantly especially for the cases, which have high f_2 value (Fig. 7b). For example,

among the configurations where f -number of SOE (i.e f_2) equals to 0.7 (0.5), P_{max} was obtained as 71.31 mW (98.85 mW) for D9 (D10) configuration where $C_2 = 176.7$, whereas it was measured as 110.17 mW (114.52 mW) with nearly 55 % (16 %) increasing for D14 (D15) configuration where $C_2 = 21.2$. Besides, the results for D16, D19 and D21 configurations, consisting of the POE which has lower $f_1 (\cong 0.7)$ value and the SOE which have $F - 150 - 70$, $F - 100 - 50$ and $F - 52 - 25$ optical properties respectively, were given in Fig 8. Similarly, the CPV system performance significantly increases when C_2 decreases. Finally, it is also worth noting that when Fig. 7a and Fig. 8 are compared, the performance improvement is higher in the CPV systems with double Fresnel lenses, which have low f_1 value.

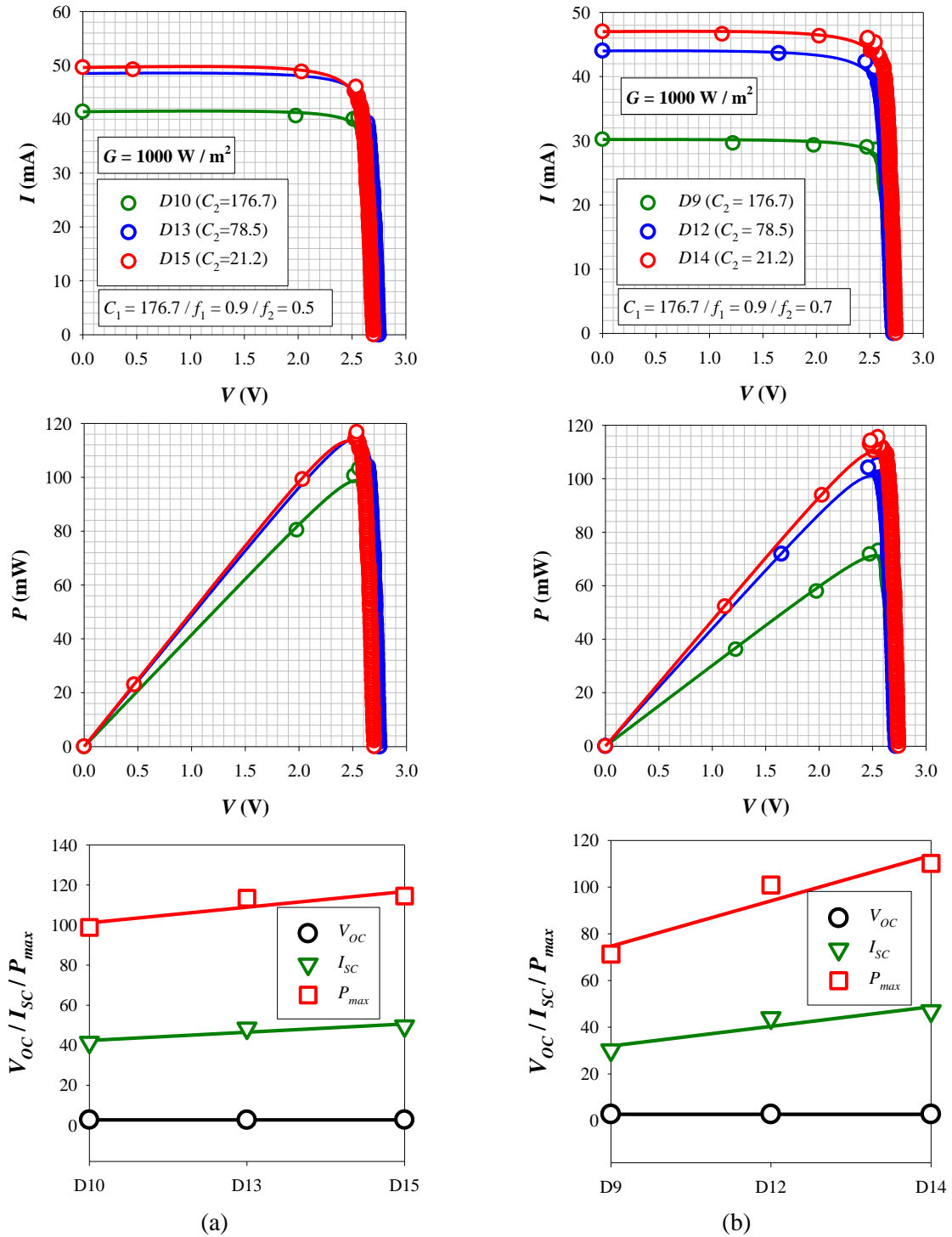


Figure 7. The Effects of C_2 on the Performance of CPV System Configurations at which $f_1 = 0.9$: (a) $f_2 = 0.5$ and (b) $f_2 = 0.7$

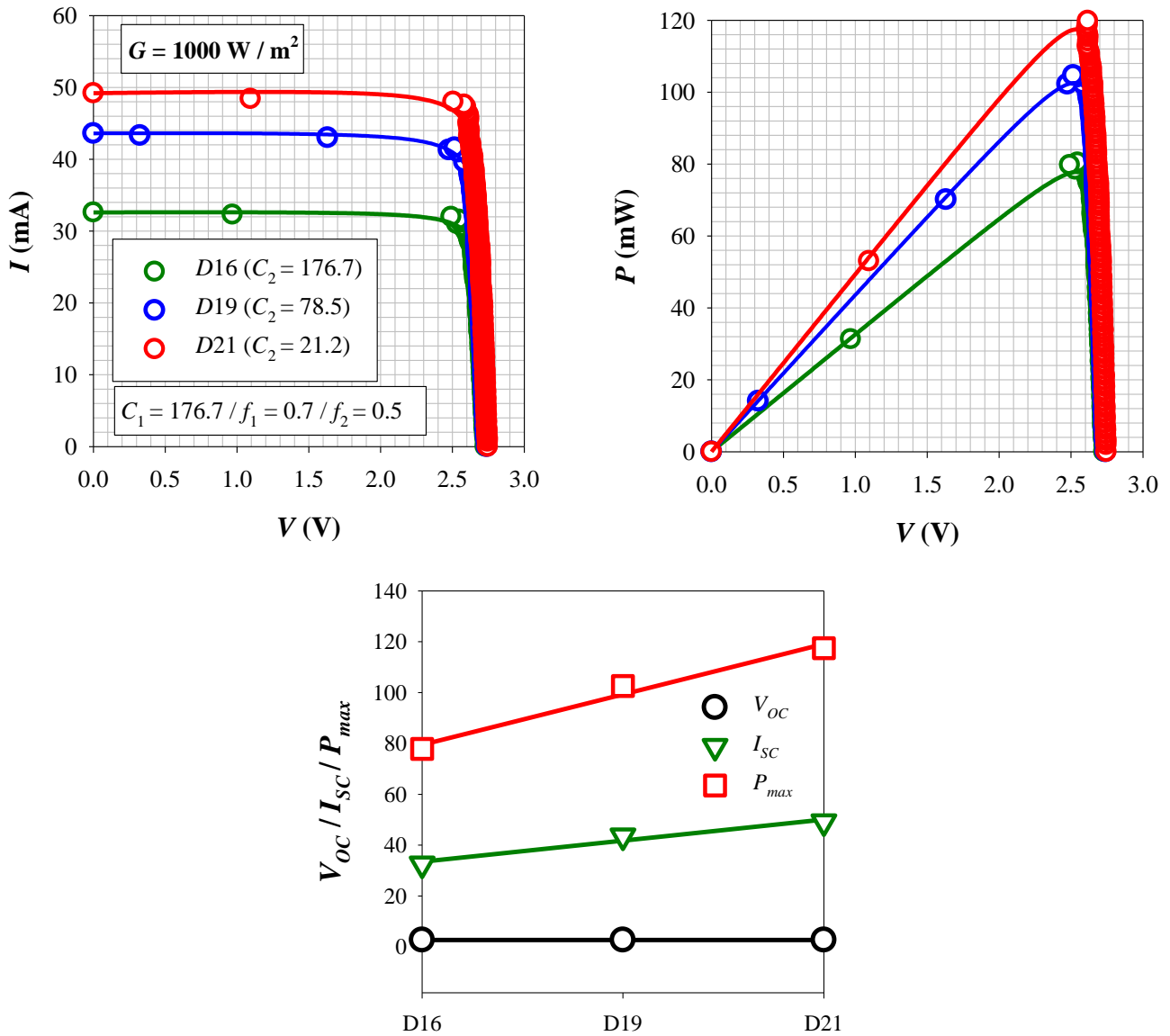


Figure 8. The Effects of C_2 on the Performance of CPV System Configurations at which $f_1 = 0.7$ and $f_2 = 0.5$.

Effect of f -Number of Secondary Optical Element

In order to observe the effects of the f - number of SOE on the double Fresnel lens CPV system performance, it will be useful to examine Figure 9 where the performances of CPV system configurations consisting of the SOE with different f_2 values, are compared. The findings have been given in Fig.9a (Fig. 9b) for the D11, D12 and D13 (D17, D18 and D19) configurations, which consist of $F - 150 - 140$ ($F - 150 - 100$) optical featured POE and $F - 100 - 90$, $F - 100 - 70$ and $F - 100 - 50$ optical featured SOE respectively. It can be noticed from Figures 9a and 9b that the performance of the double Fresnel lens CPV system improves when the f_2 value decreases. Accordingly, in the CPV system configurations using Fresnel lens in which $f_1 = 0.9$ as the POE, $P_{max} = 89.47 \text{ mW}$ for the D11 configuration in which $f_2 = 0.9$; for the D13 configuration where $f_2 = 0.5$, the maximum power output was determined as $P_{max} = 113.45 \text{ mW}$ with an increase of approximately 27 %. On the other hand, among the CPV system configurations using the POE with lower f_1 ($= 0.7$) value, $P_{max} = 93.63 \text{ mW}$ ($I_{sc} = 39.20 \text{ mA}$) for the D17 configuration where $f_2 = 0.9$ whereas P_{max} (I_{sc}) was obtained as 102.58 mW (43.6 mA) with an increase of approximately 9.5 % (11.2 %) for the D13 configuration in which $f_2 = 0.5$ (Fig. 9b). This explicitly reflects that the performance improvement with decreasing f_1 value of the secondary Fresnel lens is much more apparent in double Fresnel lens CPV system configurations which have a high f_1 value POE.

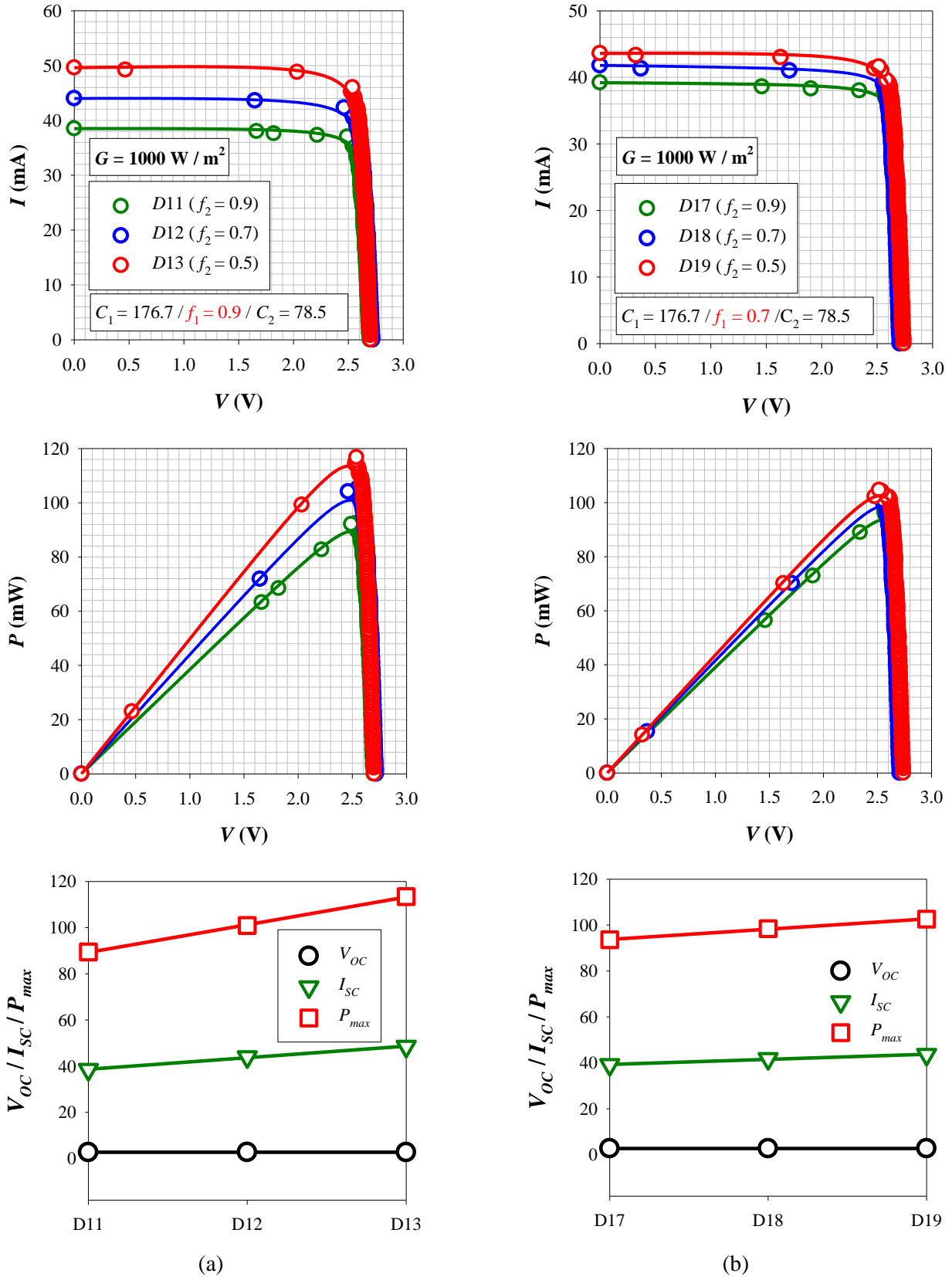


Figure 9. The Effects of f_2 on the Performance of CPV System Configurations: (a) $f_1 = 0.9$ and (b) $f_1 = 0.7$

ANOVA Analysis

In this section, the statistical studies have been carried out to reveal the weight factors of optical properties such as concentration ratio and f – number of primary and secondary Fresnel lenses on the performance of CPV systems. One of the most common statistical approaches used to reveal weight factors of independent variables on the dependent variable is Analysis of Variance (i.e. ANOVA). Essentially, the ANOVA method is applied in order to predict the importance order of the factors by revealing the proportional effect of each factor which are effective on the target function (Canbolat et. al, 2019). In the ANOVA method, degrees of freedom (DOF), sum of squares (SS), mean of squares (MS), F value and contribution ratios of the each factors in data set are calculated by using the following equations:

$$F_{factor} = \frac{V_{factor}}{V_{error}} \tag{4a}$$

$$V_{factor} = \frac{SS_{factor}}{DOF_{factor}} \tag{4b}$$

$$DOF_{factor} = k - 1 \tag{4c}$$

$$SS_{factor} = \frac{\sum \beta_{factor,i}^2}{N} - \frac{(\sum \beta_i)^2}{n} \tag{4d}$$

Here, F_{factor} represents the effect rate of the relevant parameter on the target function, and the larger the value of F_{factor} means the greater the effect rate for the relevant parameter. V_{factor} and V_{error} represent the variance value of the factor and error, respectively. DOF_{factor} is the degrees of freedom of the factor, SS_{factor} is the sum of squares depending on the factor, $\beta_{factor,i}$ is S / N (signal / noise) ratio of the factor at the i^{th} level, N is the number of repetitions of the factor at each level and n is the total number of tests or analyses. MS is also calculated as the ratio of SS value to degrees of freedom for each parameter. The values of the target function are converted to the S/N ratio, taking into account the "Biggest-Best" performance characteristic with the help of the following equation:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^{-2} \right) \tag{5}$$

Where n is the number of tests or experiments, y_i represents the result value obtained for the i^{th} performance characteristic. For this study, y_i shows maximum power output (P_{max}) obtained for each experiment, double and single optical element CPV system maximum output power ratios ($P_{max} / P_{max,single}$) or critical distance between lenses ($L_{D,crit}$) value for each experiment. The selected parameters and levels for ANOVA analysis are summarized in Table 5 in order to reveal the weight factors of optical properties of primary and secondary optical elements on P_{max} , $P_{max} / P_{max,single}$ and $L_{D,crit}$. Accordingly, one parameter with two levels (i.e. C_1) and three parameters with three levels (i.e. f_1 , f_2 and C_2) have been taken into account for ANOVA analysis.

Table 5. The Selected Parameters and Levels for ANOVA Analysis

Parameters	Levels		
C_1	78.5	176.7	-
f_1	0.5	0.7	0.9
C_2	21.2	78.5	176.7
f_2	0.5	0.7	0.9

Table 6. The Data Set Used in ANOVA Analysis

Exp. No	Parameters				P_{max} (mW)	S/N	P_R	S/N	$L_{D,crit}$ (mm)	S/N
	C_1	C_2	f_1	f_2						
D9	176.7	176.7	0.9	0.7	71.31	37.06	2.52	8.03	80	38.06
D10	176.7	176.7	0.9	0.5	98.85	39.90	3.49	10.86	100	40.00
D11	176.7	78.5	0.9	0.9	89.47	39.03	3.16	10.00	90	39.08
D12	176.7	78.5	0.9	0.7	100.92	40.08	3.57	11.04	100	40.00
D13	176.7	78.5	0.9	0.5	113.45	41.10	4.01	12.06	110	40.83
D14	176.7	21.2	0.9	0.7	110.17	40.84	3.89	11.81	120	41.58
D15	176.7	21.2	0.9	0.5	114.52	41.18	4.05	12.14	120	41.58
D16	176.7	176.7	0.7	0.5	77.84	37.82	1.66	4.40	70	36.90
D17	176.7	78.5	0.7	0.9	93.63	39.43	2.00	6.01	70	36.90
D18	176.7	78.5	0.7	0.7	98.44	39.86	2.10	6.44	70	36.90
D19	176.7	78.5	0.7	0.5	102.58	40.22	2.19	6.80	80	38.06
D20	176.7	21.2	0.7	0.7	118.22	41.45	2.52	8.03	85	38.59
D21	176.7	21.2	0.7	0.5	117.47	41.40	2.51	7.98	85	38.59
D23	176.7	21.2	0.5	0.7	94.62	39.52	1.19	1.51	55	34.81
D24	176.7	21.2	0.5	0.5	84.76	38.56	1.07	0.55	55	34.81
D25	78.5	78.5	0.9	0.7	70.74	36.99	1.84	5.30	60	35.56
D26	78.5	78.5	0.9	0.5	74.03	37.39	1.93	5.69	70	36.90
D27	78.5	21.2	0.9	0.7	91.81	39.26	2.39	7.56	70	36.90
D28	78.5	21.2	0.9	0.5	100.37	40.03	2.61	8.34	75	37.50
D30	78.5	21.2	0.7	0.7	90.18	39.10	1.66	4.42	55	34.81
D31	78.5	21.2	0.7	0.5	80.78	38.15	1.49	3.47	55	34.81

Table 7. The Results of ANOVA Analysis for P_{max} , $P_{max}/P_{max,single}$ and $L_{D,crit}$

P_{max}					
Parameters	SD	SS	MS	F	Contribution ratio (%)
C_1	1	21.03	21.03	34.89	58.23
C_2	2	20.10	10.05	16.67	27.82
f_1	2	8.39	4.20	6.96	11.62
f_2	2	1.68	0.84	1.40	2.34
Error	13	7.84	0.60		
Σ	20	38.59			
$P_R = P_{max}/P_{max,single}$					
Parameters	SD	SS	MS	F	Contribution ratio (%)
C_1	1	71.80	71.80	107.31	26.60
C_2	2	21.23	10.61	15.86	3.51
f_1	2	190.78	95.39	142.57	69.71
f_2	2	1.36	0.68	1.01	0.18
Error	13	8.70	0.67		
Σ	20	222.71			
$L_{D,crit}$					
Parameters	SD	SS	MS	F	Contribution ratio (%)
C_1	1	53.48	53.48	282.84	57.15
C_2	2	10.35	5.18	27.37	5.53
f_1	2	66.45	33.22	175.71	35.50
f_2	2	3.39	1.70	8.97	1.81
Error	13	2.46	0.19		
Σ	20	95.44			

The weight factors of double optical element CPV systems on P_{max} were analysed by ANOVA method depending on the considered levels of optical properties. The data set and analysis results are presented in Tables 6 and 7 respectively. In addition, the contribution ratio of the optical properties on P_{max} are compared in percentage in Fig. 10. Accordingly, the most effective optical parameter on P_{max} was found to be C_1 with 58.23 %. On the other hand, it was seen that the lowest contribution ratio on P_{max} is f_2 with 2.34 %. In addition to this, the other optical properties which have a significant effect on P_{max} after C_1 were found to be C_2 (27.82 %) and f_1 (11.62 %) respectively. Essentially, it needs to be stated that the outputs of the ANOVA analysis presented in Table 7 and Fig. 10a regarding the contribution ratio of optical properties on P_{max} are the expected results. Because higher power output is always expected from a CPV system with a high concentration ratio. Therefore, it will be useful to consider the maximum output power ratio of the double and single optical element CPV system ($P_R = P_{max} / P_{max,single}$) in order to better observe the contribution ratio of optical properties on the performance increase (Tables 6, 7 and Fig. 10b). Figure 10b reflects that the performance improvement in CPV systems, which reinforced with a secondary Fresnel lens significantly depends on the optical properties of the primary Fresnel lens and also f - number of secondary optical element (i.e f_2) has no effect. According to ANOVA analysis results, it was determined that the most effective optical parameter on $P_{max} / P_{max,single}$ ratio was f_1 with 69.71 %. It should also be emphasized that the results in Figure 10b are consistent with the previous findings in Fig. 6. These findings also indicate that using a secondary optical element does not have a positive effect on performance for $f_1 \leq 0.5$. Finally, the effects of optical properties of primary and secondary Fresnel lenses on $L_{D,crit}$ were analysed using the data set in Table 6 with ANOVA method and the results are presented in Table 7 and Figure 10c. Accordingly, although optical properties of both Fresnel lens are effective on the $L_{D,crit}$, it is possible to observe that C_1 and f_1 are much more effective on the $L_{D,crit}$. It was determined that the most effective optical parameter on the $L_{D,crit}$ was C_1 with 57.15 %, followed by f_1 , C_2 and f_2 with 35.5 %, 5.53 % and 1.81 % respectively. In summary, ANOVA analysis results indicate that primary optical element properties C_1 and f_1 are predominantly effective on double Fresnel lens CPV system performance, while secondary optical element f - number (i.e. f_2) is the optical parameter with the least contribution ratio.

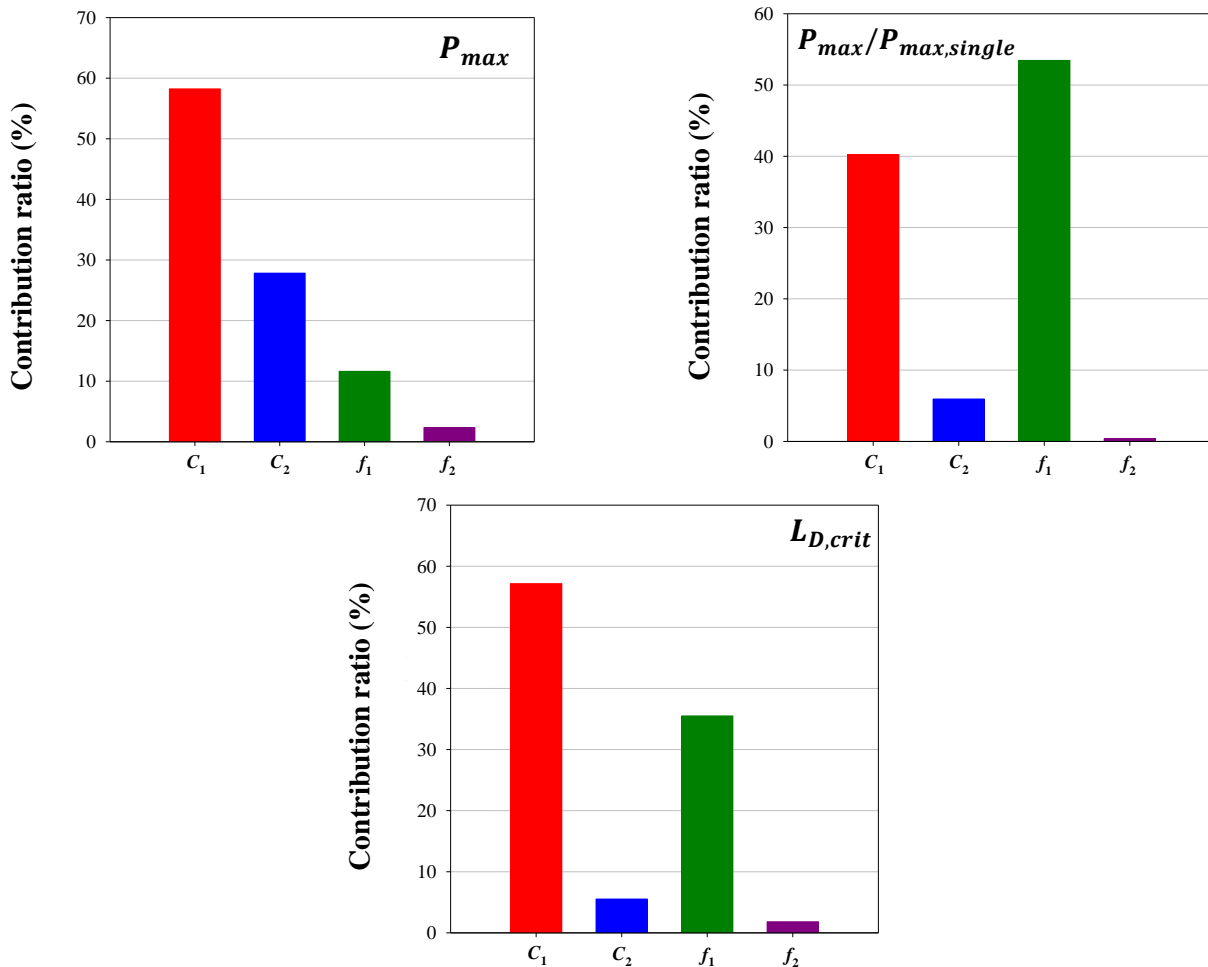


Figure 10. The Contribution Ratios of Optical Properties of Primary and Secondary Fresnel Lenses on P_{max} , $P_{max}/P_{max, single}$ and $L_{D, crit}$

OPTIMIZATION OF THE CPV SYSTEM

In this section, artificial neural network (ANN) and genetic algorithm (GA) based optimization studies are carried out in order to get the best performance of the designed CPV system. In Figure 11, the scenario of the optimization study is summarized. First, mathematical models were created in ANN for $1/P_{max}$ and $L_{D, crit}$ using input parameters (i. e. C_1, C_2, f_1, f_2). Then, the optimum input parameters were estimated by optimizing the mathematical model created for $1/P_{max}$ using GA. Finally, the optimum $L_{D, crit}$ distance was estimated by using these optimal input parameters in the mathematical model created for $L_{D, crit}$.

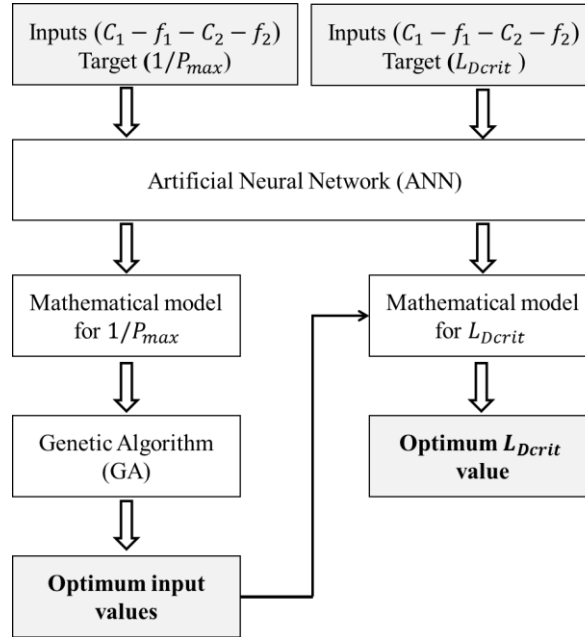


Figure 11. Flowchart of optimization methodology.

Artificial Neural Network

Artificial Neural Networks (ANNs) are computer algorithms that can learn events using examples related to a particular situation and produce solutions against changes from the environment. Similar to the functional abilities of the human brain, ANNs create their own experiences with the information getting from the examples after then make similar decisions on similar issues. Today, ANNs are effectively used in many areas such as classification, modeling, and prediction applications (Rodriguez et al., 2018; Li et al., 2022). In this study, ANNs are used to predict $1/P_{max}$ and $L_{D, crit}$ for different optical properties of POE and SOE in order to optimize CPV system. Two separate multi-layer feedforwards ANNs with sigmoid hidden neurons and linear output neurons were designed to find out mathematical model between inputs and outputs. The input layer of each ANN structures consists of 4 parameters which are $C_1, C_2, f_1,$ and f_2 . In the output layers, $1/P_{max}$ and $L_{D, crit}$ were defined as separate targets for ANNs. In addition, each ANN structure has a hidden layer, which consists of 10 neurons (Figs. 12 and 13). 70% of the experimental results given in Table 4 were used for training, 15% for validation, and 15% for testing. The ANNs were trained with Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm. The mean square error (MSE) was used to indicate difference between real and predicted data and regression values (R) were measured the correlation:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2 \quad (6)$$

$$R = \frac{N \sum Y_i Y'_i - \sum Y_i \sum Y'_i}{\sqrt{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2} \sqrt{N \sum Y'^2_i - (\sum Y'_i)^2}} \quad (7)$$

where Y_i and Y'_i represent the actual measured values and the predicted points respectively while N is the number of predictions. Figures 12 and 13, in which training performances of the ANNs are shown, indicate a strong correlation between the predictions of the ANNs and the experimental results. This reflects that the mathematical models created with ANNs can be safely used for CPV system optimization.

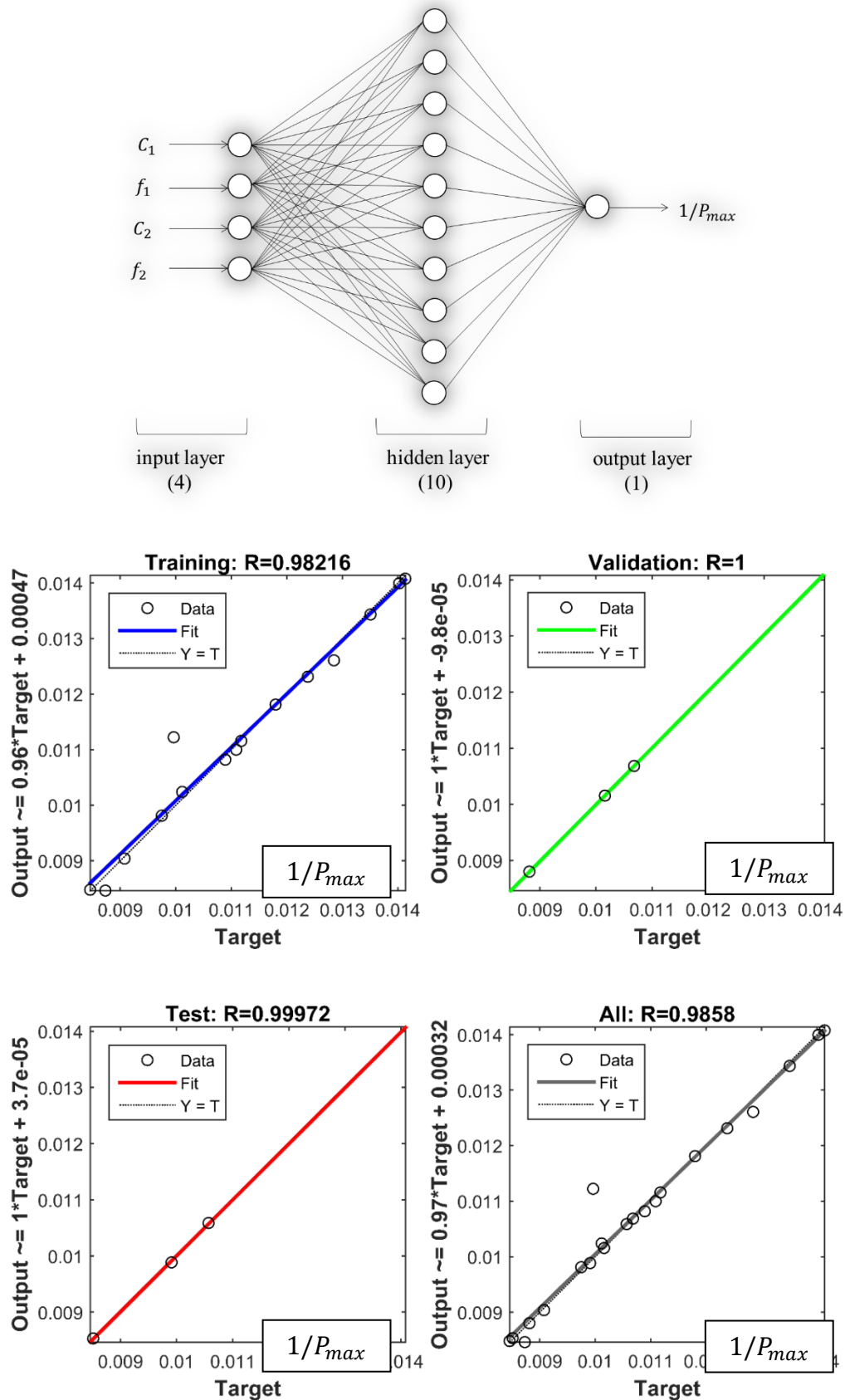


Figure 12. The Structure and Training Results of ANN Model for $1/P_{max}$ Values

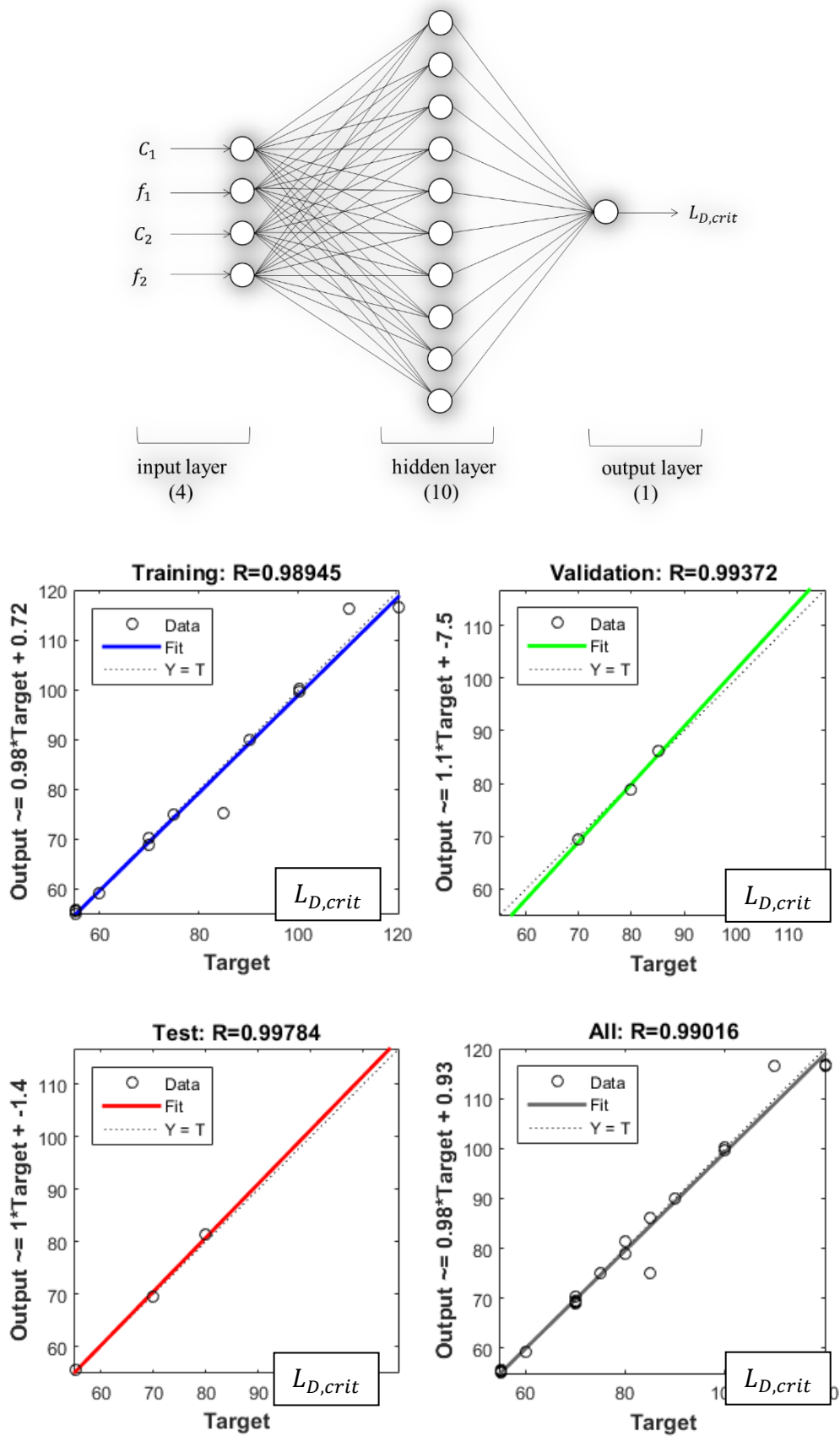


Figure 13. The Structure and Training Results of ANN Model for $L_{D,crit}$ Values

Genetic Algorithm

In this section, there are Genetic Algorithm (GA) based studies for estimating the optimum optical properties of the CPV system that will minimize the $1/P_{max}$ (i.e. maximize P_{max}) by using the mathematical model (i.e. fitness function) developed with ANN in the previous section. GA is a stochastic optimization method based on natural selection principles and working according to probability rules. It has successful applications in many areas such as function optimization, machine learning, classification and mechanism design (Cai et al., 2020; Cai et al., 2021). In this study, MATLAB *optimization toolbox* was used for GA optimization. The optimization parameters considered in this study and lower-upper bounds of variables have been given in Tables 8.

Table 8. Optimization Parameters and Lower-Upper Bounds of Variables

Parameters	Values
Population size	100
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.05
Number of generations	50
Lower bound of C_1, C_2	21.24
Upper bound of C_1, C_2	176.71
Lower bound of f_1, f_2	0.5
Upper bound of f_1, f_2	0.9

The algorithm has regenerated 50 times to observe the stability of the GA results. The variation of fitness (i.e. $1/P_{max}$) and optimum variables ($C_{1,opt}$, $C_{2,opt}$, $f_{1,opt}$ and $f_{2,opt}$) values at each generation are shown in Fig. 15. It can be seen from Fig. 15 that the GA algorithms give quite stable results for the values of fitness function and optimum variables. This explicitly indicates the reliability of the optimization results obtained with GA. According to this, the minimum (maximum) $1/P_{max}$ (P_{max}) value was obtained as 0.0077 $1/mW$ (129.87 mW) for $C_{1,opt} = 164.68$, $C_{2,opt} = 21.24$, $f_{1,opt} = 0.7$ and $f_{2,opt} = 0.61$ see Table 9. Finally, these optimum values were used as inputs in the ANN developed for critical distance between lenses and $L_{D,crit}$ was predicted as 91 mm. It is also worth noting that an additional 10% improvement in the performance of the CPV system was achieved with the optimization study.

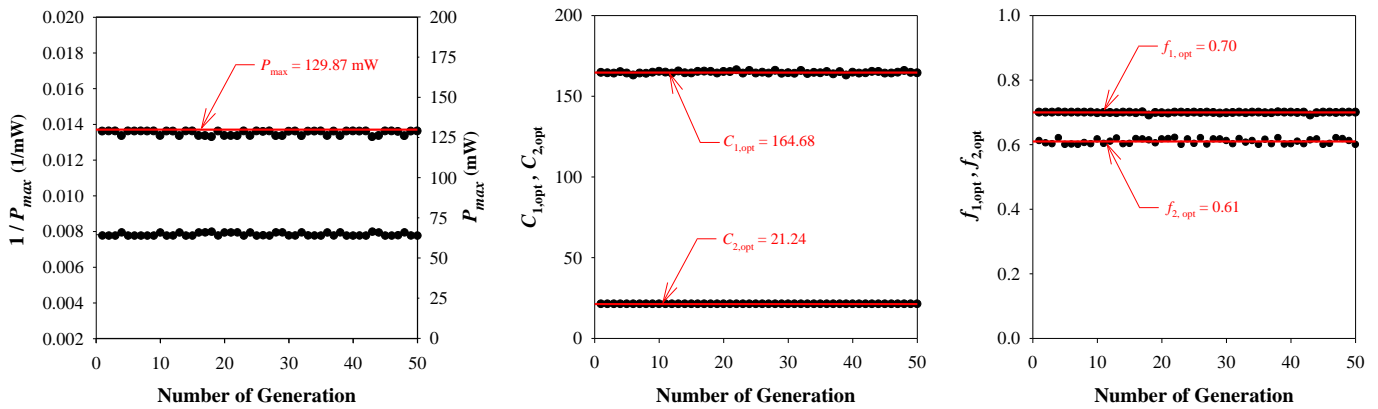


Fig. 14. The Variation of Fitness Value (i.e. $1/P_{max}$) and Optimum Optical Properties of CPV System at Each Generation

Table 9. Optimized Values of Optical Properties and Maximum Power Output

$C_{1,opt}$	$C_{2,opt}$	$f_{1,opt}$	$f_{2,opt}$	$L_{D,crit}$ (mm)	P_{max} (mW)
164.68	21.24	0.70	0.61	91.00	129.87

CONCLUSIONS

In this study, the effects of primary and secondary optical element concentration ratios, f -numbers and distance between lenses on CPV system performance have been investigated in detail, considering different CPV system configurations with single and double optical elements consisting of point-focus Fresnel lenses. It has been observed that the performance of CPV systems using double Fresnel lenses fluctuates significantly depending on the optical properties of the secondary Fresnel lens (i.e. C_2 and f_2) and the distance between the lenses. Thus, if the relevant parameters are not determined properly, the use of secondary optical elements does not positively affect CPV system performance. It has been detected that the $L_{D,crit}$ value, at which maximum CPV system performance occurs, varies depending on the optical properties of the Fresnel lens pairs and when C_2 (f_2) is increased by being kept constant f_2 (C_2), the $L_{D,crit}$ must be reduced in order to get maximum power output. In addition, CPV systems with double Fresnel lenses with a high f_1 value have been found to perform better than single Fresnel lens applications, and it has been observed that the performance of the CPV system can be improved by using a secondary Fresnel lens when $f_1 > 0.5$. Besides these, the ANOVA analyses were carried out by using the data obtained from experimental studies in order to compare the contribution ratio of the optical properties of Fresnel lens pairs on CPV system performance. ANOVA analysis results indicate that primary optical element properties C_1 and f_1 are predominantly effective on double Fresnel lens CPV system performance, while f - number of SOE (i.e. f_2) is the optical parameter with the least contribution ratio. It is also concluded that the importance order of the optical properties of the Fresnel lens pairs on CPV system performance is $C_1 > f_1 > C_2 > f_2$. Finally, ANN and GA based optimization studies were carried out in order to get the best performance of the designed CPV system. With the help of optimization studies, an additional 10% improvement in the performance of the CPV system was achieved.

NOMENCLATURE

C	[-]	Concentration ratio
CPV	[-]	Concentrated photovoltaic
DOF	[-]	Degrees of freedom
G	W/m ²	Solar radiation intensity
Ge	[-]	Germanium
$InGaAs$	[-]	Indium gallium arsenide
$InGaP$	[-]	Indium gallium phosphide
I	[mA]	Current
I_{sc}	[mA]	Short circuit current
L_D	[mm]	Distance between lenses
$L_{D,crit}$	[mm]	Critical distance between lenses where P_{max} is obtained
P	[mW]	Power output of CPV system
P_{max}	[mW]	Maximum power output of CPV system
P_R	[-]	Double and single optical element CPV system maximum output power ratios ($P_{max} / P_{max,single}$)
POE	[-]	Primary optical element
SOE	[-]	Secondary optical element
SS	[-]	Sum of squares
S/N	[-]	Signal to noise
V	[V]	Voltage
V_{oc}	[V]	Open circuit voltage
$\alpha_{Cronbach}$	[-]	Cronbach's alpha coefficient
\emptyset	[mm]	Diameter

REFERENCES

- Akbaba, M. & Alattawi, M.A.A. (1995). A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37, 123-132. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)00201-0](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)00201-0)
- Cai, H., Sun, Y., Liu, J. & Wang, X. (2021). Genetic algorithm optimization for highly efficient solar thermal absorber based on optical metamaterials. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 271, 107712. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107712>
- Cai, H., Sun, Y., Wang, X. & Zhan, S. (2020). Design of an ultra-broadband near-perfect bilayer grating metamaterial absorber based on genetic algorithm. *Opt. Express*, 28, 15347-15359. <https://doi.org/10.1364/OE.393423>
- Canbolat, A.S., Bademlioğlu, A.H., Arslanoğlu, N. & Kaynakli, O. (2019). Performance optimization of absorption refrigeration systems using Taguchi, ANOVA and grey relational analysis methods. *Journal of Cleaner Production*, 229, 874-885. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.020>
- Chen, Y.C. & Chiang, H.W., 2015. Design of the secondary optical elements for concentrated photovoltaic units with Fresnel lenses. *Applied Sciences*, 5, 770-786. <https://doi.org/10.3390/app5040770>
- Chen, Y.C. & Su, C.H. (2010). Concentrator design of a Fresnel lens and a secondary optical element. 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV- 6) (pp. 109-112).
- El Himer, S., Ahaitouf, A., El-Yahyaoui, S., Mechaqrane, A. & Ouagazzaden, A. (2012). A comparative of four secondary optical elements for CPV systems. 14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-14) (pp. 1-7).
- Grilikhes, V.A., Rummyantsev, V.D. & Shvarts, M.Z. (1996). Indoor and outdoor testing of space concentrator AlGaAs/GaAs photovoltaic modules with Fresnel lenses. Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 345-348). IEEE.
- Harmon, S. (1977). Solar-optical analyses of a mass-produced plastic circular Fresnel lens. *Solar Energy*, 19(1), 105-108. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90096-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90096-2)
- James, L.W. & Williams, J.K. (1978). Fresnel optics for solar concentration on photovoltaic cells. Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 673-679). IEEE.
- Kemmoku, Y., Sakakibara, T., Hiramatsu, M., Miyazaki, Y. & Egami, T. (2003). Field test of a concentrator photovoltaic system with flat Fresnel. Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (pp. 2379-2382).
- Li, P., Gao, X. & Zhou, X. (2022). Effect of the temperature difference between land and lake on photovoltaic power generation. *Renewable Energy*, 185, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.011>
- Moffat, A.L. & Scharlack, R.S. (1982). The design and development of a high concentration and high efficiency photovoltaic concentrator utilizing a curved Fresnel lens. Proceedings of the 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 601-606). IEEE.
- Nakata, Y., Shibuya, N., Kobe, T., Okamoto, K., Suzuki, A. & Tsuji, T. (1980). Performance of circular Fresnel lens photovoltaic concentrator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 19(2), 75-78. DOI:10.7567/JJAPS.19S2.75
- Pallant, J. (2016). SPSS survival manual. (6th ed.). A&U Academic, London.
- Renzi, M., Cioccolanti, L., Barazza, G., Egidi, L. & Comodi, G. (2017). Design and experimental test of refractive secondary optics on the electrical performance of a 3-Junction cell used in CPV systems. *Applied Energy*, 185 (1), 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.064>
- Rodriguez, F., Fleetwood, A., Galarza, A. & Fontan, L. (2018). Predicting solar energy generation through artificial neural networks using weather forecasts for microgrid control, *Renewable Energy*, 126, 855-864. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.070>
- Rummyantsev, V.D., Chosta, O.I., Grilikhes, V.A., Sadchikov, N.A., Soluyanov, A.A. & Shvarts, M.Z. (2002). Terrestrial and space concentrator PV modules with composite (glass-silicone) Fresnel lenses. Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 1596-1599). IEEE.

- Segev, G. & Kribus, A. (2013). Performance of CPV modules based on vertical multi junction cells under non-uniform illumination. *Solar Energy*, 88, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.020>
- Shepard, N.F. & Chan, T.S. (1981). The design and performance of a point-focus concentrator module. Proceedings of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 336-341). IEEE.
- Şahin, F.E. & Yılmaz, M. (2019). High concentration photovoltaics (HCPV) with diffractive secondary optical elements. *Photonics*, 6 (2), 68-76. <https://doi.org/10.3390/photonics6020068>
- Tawfik, M., Tonnellier, X. & Sansom, C. (2018). Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 802-813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.059>
- Tien, N.X. & Shin, S. (2016). A novel concentrator photovoltaic (CPV) system with the improvement of irradiance uniformity and the capturing of diffuse solar radiation. *Applied Sciences*, 6 (9), 251-265. <https://doi.org/10.3390/app6090251>
- Victoria, M., Dominguez, C., Antion, I. & Sala, G. (2009). Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses. *Optics Express*, 17 (8), 6488-6492. <https://doi.org/10.1364/OE.17.006487>
- Xie, W.T., Dai, Y.J. & Sumaty K. (2011). Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2588-2606. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.031>
- Yadav, P., Tripathi, B., Rathod, S. & Kumar, M. (2013). Real-time analysis of low-concentration photovoltaic systems: A review towards development of sustainable energy technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 812-823. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.047>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.03.2022
Kabul Tarihi : 09.05.2022

Received Date : 16.03.2022
Accepted Date : 09.05.2022

HARRAN EVİ GEOMETRİSİNİN BİNA ISIL PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HARRAN HOUSE GEOMETRY ON BUILDING THERMAL PERFORMANCE

Erdal YILDIRIM (ORCID: 0000-0002-9309-2420)

Harran Üniversitesi Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu 63200, Şanlıurfa

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Erdal YILDIRIM, erdaly@harran.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı yaz aylarında iç ortam havasını daha serin tutan Harran konik çatılı evlerini enerji verimliliği açısından, bina çatı geometrisinin iç ortam havasına etkisini araştırmaktır. Bu amaçla Harran konik çatılı evler aynı taban alanı, hacim ve termofiziksel özelliklere sahip düz çatılı bir bina ile karşılaştırılmıştır. Farklı geometrilerdeki çatılardan gerçekleşen ısı transferiyle bütün binanın ısı performansını değerlendirmek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, hangi çatı geometrisinin yaz mevsiminde daha enerji verimli olduğunu belirlemektir. Bu sebeple düz çatılı bina referans alınarak farklı geometrideki çatılarla karşılaştırılmıştır. Adyabatik hazne tekniği kullanılarak çatı tiplerinin doğal ısı transfer katsayıları ve toplam ısı transfer katsayıları deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak konik çatılı modelin dış yüzey doğal taşınım ısı transfer katsayısının ve toplam ısı transfer katsayısının düz çatıya göre sırasıyla 1,5 ve 2,5 kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Bulunan sonuçlar, yaz aylarında Harran evlerinde iç hava sıcaklığının daha düşük olmasını doğrular niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Doğal taşınım, çatı geometrisi, toplam ısı transfer katsayısı

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the effect of building roof geometry on indoor air in terms of energy efficiency in Harran conical roof houses, which keep indoor air cooler in summer. For this purpose, Harran conical roof houses were compared with a flat roofed building with the same floor area, volume and thermophysical properties. An experimental study was carried out to evaluate the thermal performance of the whole building with heat transfer from roofs of different geometries. The aim of this study is to determine which roof geometry is more energy efficient in summer. For this reason, the flat roofed building was compared with roofs of different geometry. The natural heat transfer coefficients and total heat transfer coefficients of the roof types were investigated experimentally by using the adiabatic chamber technique. As a result, the outer surface natural convection heat transfer coefficient and the total heat transfer coefficient of the conical roof model were found to be 1.5 and 2.5 times higher, respectively, than the flat roof. The results found confirm that the indoor air temperature is lower in Harran houses during the summer months.

Keywords: Natural convection, roof geometry, total heat transfer coefficient

GİRİŞ

It is known that conical domed Harran houses keep the indoor air cooler in summer than modern flat-roofed buildings (Basaran, 2011; Yıldırım et al., 2014). Experimentally examining the effect of domed roof geometries on the indoor environment and reflecting their advantageous effects on new building designs is important in terms of energy savings. There are many studies in the literature on the investigation of natural convection in closed spaces, which are associated with many other engineering and industrial applications such as electronics, room heating, solar collectors (Sarris et al., 2004; Dalal & Das, 2006; Dogan et al., 2012; Saleh & Hashim, 2014).

Computational fluid dynamics (CFD) simulations are frequently used in analyzes where the effect of building geometry on the convection heat transfer coefficient (CHTC) is investigated. Hu et al., (2018) investigated the convective heat transfer coefficient on different building surfaces and ground for a building cluster with high Reynolds number. Forced, natural and mixed convection heat transfer states are simulated. Surface-averaged Nusselt numbers for forced convection were found to be proportional to $Re^{0.79}$. The Nusselt numbers are the windward, upper, side, leeward surface and ground numbers, respectively, from largest to smallest. For natural convection, surface-averaged average Nusselt numbers were found to be proportional to $Gr^{1/3}$. Nusselt numbers were found as wall, surface and floor numbers, from largest to smallest, respectively. Montazeri & Blocken, (2018) investigated the combined effects of wind speed, building height and width, and wind direction on the surface-averaged $CHTC_{avg}$ for windward facades of buildings. High resolution CFD simulations of wind flow and forced convection heat transfer were performed and validated by wind tunnel measurements. The results show that $CHTC_{avg}$ for a given wind direction increases as the building height increases. However, increasing the building width has the opposite effect on $CHTC_{avg}$. Montazeri & Blocken, (2017) derived new generalized expressions from CFD simulations for surface-averaged forced convection on building facades and roofs, taking into account the reference wind speed, the width and height of the building facade against the wind as parameters. The results show that for a given building geometry, the relationship between surface-averaged convection heat transfer coefficient and wind speed is an exponential power law dependent on the surface type (upwind, lee, side, face, roof). In another study (Montazeri et al., 2015) in which the effect of building size and geometry on the heat transfer coefficient was examined, CFD simulations of forced convection heat transfer was carried out on the windward facade of 22 buildings with different geometries. The effect of the building geometry on the convective heat transfer coefficient distribution was investigated at different reference wind speeds: for buildings with $H \geq W$, for buildings with $H \leq W$ and for buildings with $H = W$. The results show that $CHTC/U_{10}^{0.84}$ is relatively insensitive to the reference wind speed. For $W=10$ m and increasing H from 10 m to 80 m, the surface-averaged $CHTC/U_{10}^{0.84}$ on the wind direction front increases by about 20%. However, for $H=10$ m, increasing the building width from 10 to 80 m has the opposite effect on the surface-averaged $CHTC/U_{10}^{0.84}$. Jiang et al., (2020) used CFD simulations to analyze the forced convection heat transfer in the louvered wind front, which was confirmed by wind tunnel experiments. In most cases, the surface average convection heat loss of sun-side louvers is much higher than that of the shaded side. The maximum difference was found more than twice.

In the literature, there are studies in which alternative and new approaches are tried in studies examining the relationship between building geometry and heat transfer coefficient. François et al., (2020) presented an alternative approach to estimate the value of the whole building by determining the heat flux at a particular location on the wall surface. As a result of the method used, h coefficient values close to and similar to the standard value in ISO 14683 standards were found. Yang et al., (2017) determined the radiative heat flux, convective heat flux, and total received heat flux on the outer surface of an exterior wall in different seasons with an experimental approach. The results show that radiation heat accounts for a large portion of the total heat throughout the year. In the study (Evangelisti et al., 2017), in which heat transfer processes between building walls and the environment were examined using on-site measurements, existing correlations based on wind speed, Standard recommendations and an empirical methodology, there was a percentage difference of 26.5% with the Standard and 13.4% with the ASHRAE correlation. found.

There are also studies in which building geometry and energy consumption, heat transfer coefficients are carried out with theoretical analyzes and different simulation software. The total and radiative heat transfer coefficients of an enclosure with different room sizes, heated from a single wall, were investigated by theoretical calculations and the Engineering Equation Solver (EES) program. A correlation was found that includes the effect of aspect ratio (H/L). The results showed that the average radiation coefficient is in the range of 5.4-5.5 W/m² K and it changes little according to the room dimensions (Acikgoz, 2015). This study presented an approach for calculating heat

emissions from buildings to ambient air and applied the approach in EnergyPlus. A simplified spreadsheet calculation has been made to validate the method implemented in EnergyPlus. Hong et al., (2020) conducted simulations covering 16 commercial building types, four climates and two energy efficiency levels to understand and evaluate building heat emissions. The simulation results showed that the annual site energy use of a building is different from the annual heat emissions. In 70% of the simulations, heat emissions were higher than on-site energy use. For most building typologies, it is concluded that climate has a strong influence on heat emissions. Iousef et al., (2019) investigated the effect of external CHTC models on the predicted energy performance of buildings with a wide variety of geometries. EnergyPlus six commonly used CHTC models are applied and compared. While there is a deviation of -14.5% for the annual heating demand, a maximum deviation of +42.0% is obtained for the annual cooling demand compared to the generalized CHTC model. Premrov et al., (2017) focused on the impact of building shape on annual energy needs in six different macro-climate regions in Europe. As a result, it was found that two-storey houses outperform single-storey houses in cold climate conditions. The increased aspect ratio has a positive effect on reducing the energy requirement. In the case of hot climatic conditions, the findings were almost the opposite of those obtained for cold climates.

Before the experimental work presented in this study, CFD simulations were performed for the same scenario. Harran's conical roofed building has for this purpose been compared with flat roofed building of equivalent thermo-physical properties, base area and volume (Yildirim et al., 2017). Three dimensional CFD simulations using the low-Reynolds number modeling (LRNM) and standard turbulence models are performed. The effect of roof geometry on natural ventilation is investigated. The conical roof house has higher convective heat transfer coefficient on windward side but a lower value on the roof. In the case of wind incidence angle of 90 and cross ventilation, the Harran house has better (8%) performance than flat roofed building.

The literature review clearly shows that the effects of building geometry on thermal performance have been the subject of many studies, but the relationship between natural convection and roof geometry has not been closely examined. In this study, the U-value approach, which covers all the effects of heat transfer from the roof, including convection, conduction, and radiation, was used. In order to determine which of the roof geometries is more resistant to heat loss, it was investigated experimentally using the adiabatic box technique (Yesilata & Turgut, 2007; Turgut & Yesilata, 2009). The thermal performances of different roof geometries have been determined by assuming the same volume and floor area. The walls and floors of the models are insulated, only the roof is made of metal, and the direct effect of the roof geometry on the indoor air and the natural convection from the roof are examined. The values obtained by the method used were validated with the literature values.

METHOD

Preparation of Building Models

The Conic 60 building model is a 1/5 reduced dimensions of an actual Harran house room. Model Conic 30 and Flat have same volume and base area with Model Conic 60 (Figure 1).

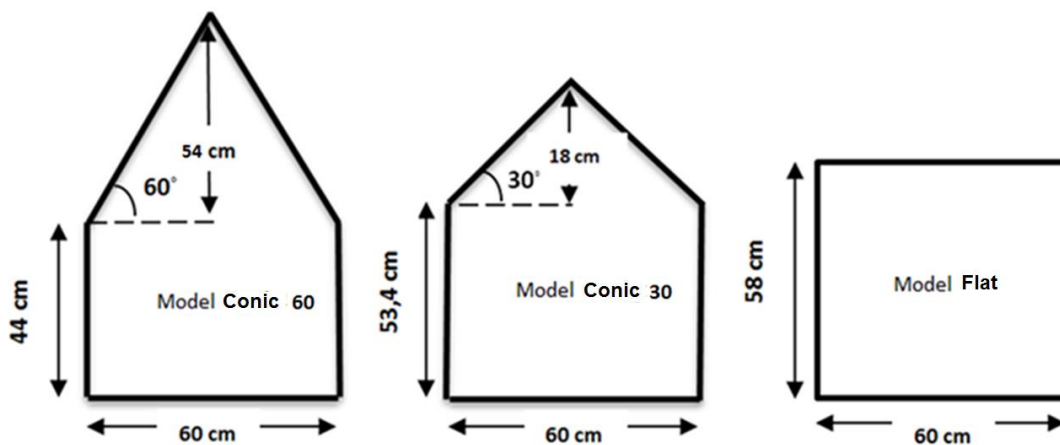


Figure 1 The Building Models and The Roof Angles Used in Experiment

As can be seen from Figure the roof slope of Model Conic 30 and 60 are respectively 30° and 60° . Walls and floors of the models are constructed from 15 cm expanded polystyrene has a thermal conductivity of ~ 0.040 W/m K. 1.5 cm galvanized iron sheet used for roofs and has thermal conductivity of 15.6 W/m K (Figure 2).



Figure 2 Model Conic 30, Flat and Conic 60



Figure 3 Water Reservoir with Resistance Heater and Placing on The Floor Closed with Aluminum Foil

30 lt of water put into reservoir made of sheet metal and closed with aluminum foil (Figure 3) Once the roof placed on the walls, the junctions were sealed with silicone adhesive to prevent indoor air leakage.

Measuring Instruments

Temperature measurement is made by using T-type thermocouple in experiments. Read error is about $\pm 0.25^\circ\text{C}$ with the thermocouple. The temperature measurement points are shown in Figure 5. Also, the ambient and the wall surface temperatures of the room are measured. Temperature measurements were made at intervals of 10 minutes and saved with 32 Channels Hioki 8422-51 Memory Hilogger (Figure 4).

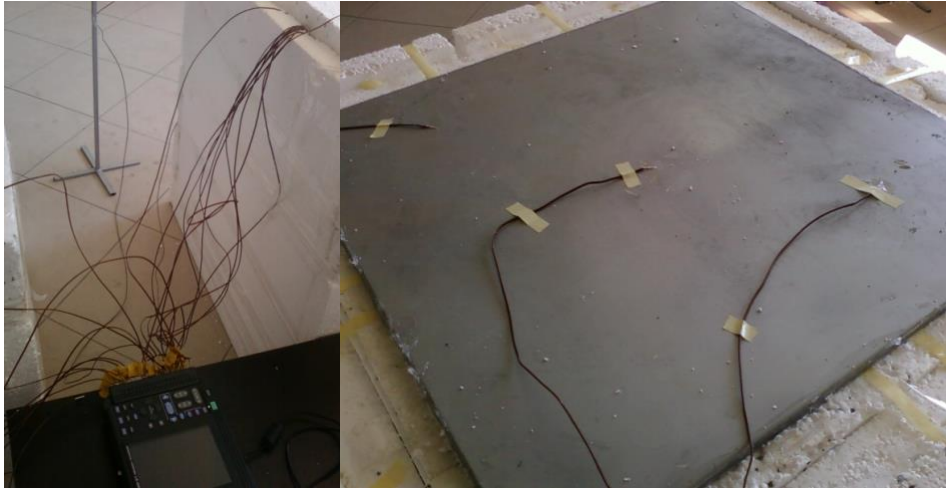


Figure 4 The Data Logger Used in Experiments and the Placement of the Thermocouples on the Outer Surface of Model Roofs

Measurements and Assumptions

Water in the reservoir is heated to a certain temperature and the electrical connection is cut off then the water is allowed to cool. Experiments were made in a closed space. During experiments average of the difference between the wall outside surface temperatures of the models and the ambient temperature are observed about 0.5°C. The temperature gradient is assumed to be along the y axis and in the horizontal (x axis) it is negligible (Figure 5). For the surface temperatures, measurements were made at many points. And then the average of the measured values used in calculations as an isothermal surface. The indoor air temperatures of the models are the average of measurements at six different points as shown in Figure 5.

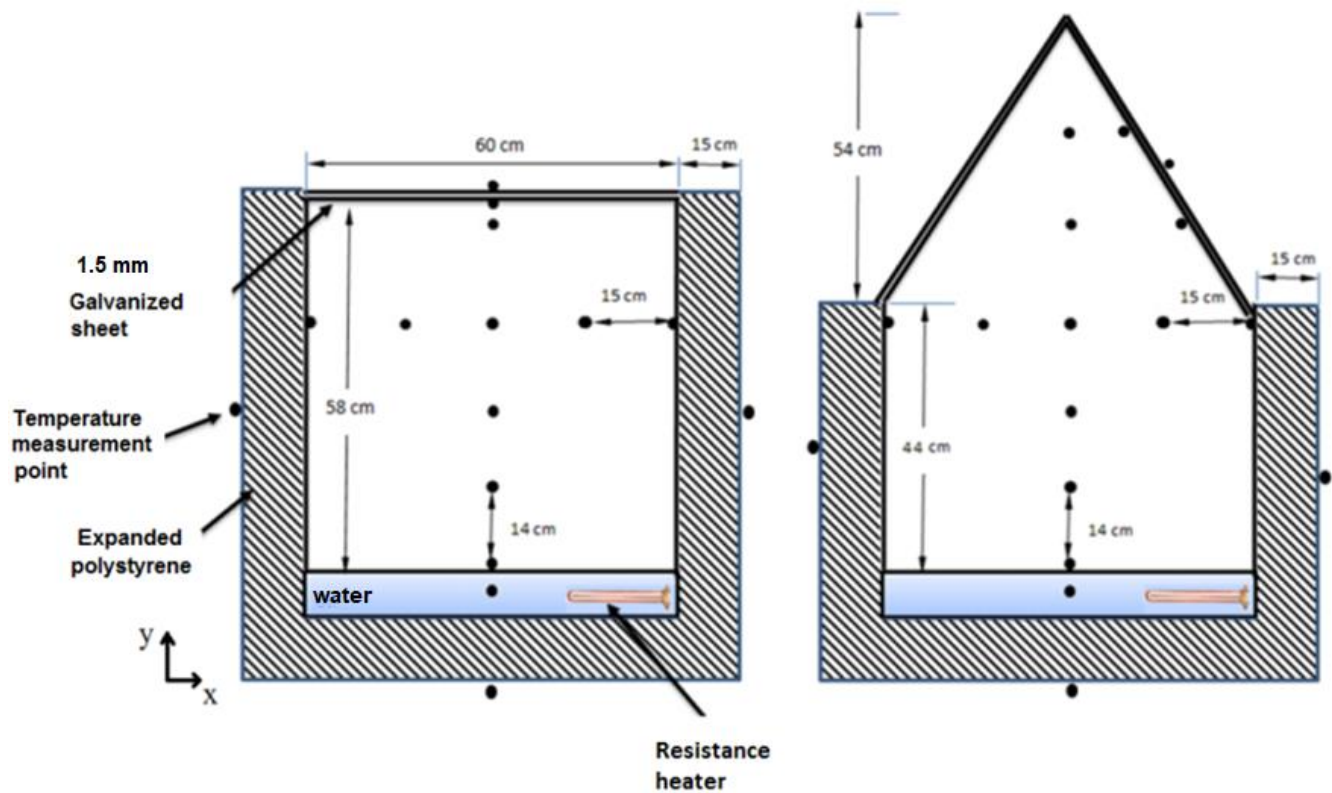


Figure 5 The Experimental Setup Belonging to Model Flat, Conic 60 and Temperature Measuring Points

Two methods are used to examine the data obtained from the measurements. These are dimensionless temperature and energy balance method

Dimensionless Temperature Method

Testing of the building models are not carried out at same time so the outdoor temperatures of models may be different. Similarly, the water temperature in the reservoir in the beginning of the test may vary slightly according to the model. To eliminate these differences between the models and to make an objective approach the dimensionless temperature method is used. The equilibrium temperature could not be obtained although experiments last more than 24 hours. This definition is useful even for building models tested at different indoor and outdoor temperatures while maintaining the same heat transfer mechanism. Since the rate of reduction of the curves at the end of the experiments is almost constant, the experimental period can be considered long enough to make a fair comparison. (Turgut & Yesilata, 2009). The dimensionless temperature is defined as below,

$$\theta^* = \frac{T(t) - T_0}{T(t=0) - T_0} \quad (1)$$

where, $T(t = 0) = T_i$ is initial temperature of water and $T(t)$, is temperature of reservoir at any time ‘t’ and T_0 is the ambient temperature. Thus, it will be possible to compare insulating properties of different roof geometries by these dimensionless temperature parameters.

Energy Balance Method

In the literature (Globe & Dropkin, 1954) there are relations for horizontal rectangular closed spaces with surfaces at constant temperature. When the hot plate is at the bottom, significant convection currents start for $Ra_L > 1708$ and the heat transfer rate increases (Figure 6). Main objective is to determine the effects of heat transfer in the cavity (Nogueira et al., 2011). By this method, the total heat transfer coefficient and the convection heat transfer coefficients of each model’s inner volume and external roof surface can be calculated. The calculation procedure is based on the energy balance applied to the roof of each model. The total heat transfer (Eq.2) taking place to the ambient air from the roof surface consists of convection (Eq.3) and radiation (Eq.4) (Figure 6)

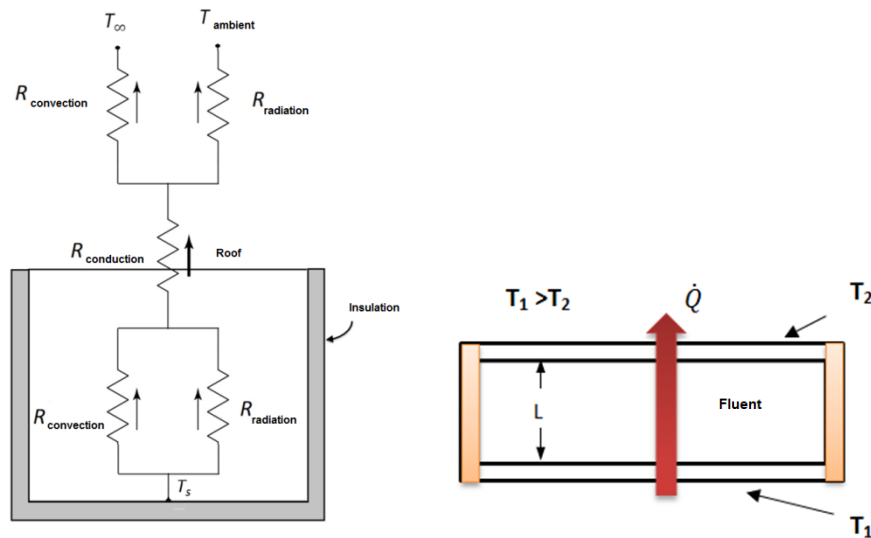


Figure 6 The Schematic Representation of The Convection and Radiation Resistances of Flat Roofed Model and a Rectangular Shaped Closed Environment Heated from Bottom Surface

$$q_{total} = q_{r,c} + q_{r,ra} \quad (2)$$

$$q_{r,c} = h_r (T_{o,s} - T_{ambient}) \quad (3)$$

$$q_{r,ra} = \epsilon \sigma (T_{o,s}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

where σ is Stefan-Boltzmann constant. Here the total heat transfer (q_{total}) is equal to heat transfer by conduction through the roof and therefore the natural convection heat transfer coefficient on the outer surface of the roof (h_r) can be calculated by the equation below,

$$h_r = \frac{k_r \frac{T_{i,s} - T_{o,s}}{L_{cr}} - \varepsilon \sigma (T_{o,s}^4 - T_{\infty}^4)}{(T_{o,s} - T_{ambient})} \quad (5)$$

where $T_{i,s}$ and $T_{o,s}$ are the temperature of inner and outer surface respectively. And the radiation heat transfer coefficient is calculated as,

$$h_{ra} = \varepsilon \sigma (T_{o,s}^2 + T_{\infty}^2)(T_{o,s} + T_{\infty}) \quad (6)$$

The temperature is Kelvin above equation, and it is observed that $T_{ambient} \approx T_{\infty}$ during experiments. The combined heat transfer coefficient is defined by

$$h_{combined} = h_r + h_{ra} \quad (7)$$

In literature there are many relations about natural convection heat transfer coefficients based on experimental studies (Cengel, 2011). Flat roof was evaluated as a cooling of horizontal hot upward plate. During the experiments Ra is observed in the range of $10^4 - 10^7$ and for this range, the relation (McAdams, 1954)

$$Nu = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (8)$$

is used to calculate the average heat transfer coefficient on the external surface of the roof. Because of the heat transfer direction is vertical, the energy balance can be written between the ground and the roof. Total heat transfer taking place to roof consists of convection (Eq. 9), radiation (Eq. 10) and conduction (Eq. 11)

$$q_{c,in} = h_{in} * (T_s - T_{in,s}) \quad (9)$$

where T_s and $T_{in,s}$ are the temperature of roof and inner surface respectively.

$$q_{ra,in} = \sigma * \frac{(T_s + 273)^4 - (T_{in,s} + 273)^4}{\left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s}\right) + \left(\frac{1}{F_{12}}\right) + \left(\frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r}\right)} \quad (10)$$

where F_{12} is the view factor for parallel rectangles.

$$q_{con,in} = k_a * \frac{T_s - T_{in,s}}{L} \quad (11)$$

Therefore, the overall heat transfer from enclosure to roof is equal to the heat conduction through the roof and energy balance can be written as follows,

$$q_{c,in} + q_{rad,in} + q_{con,in} = k_r * \frac{T_{in,s} - T_{o,s}}{L_r} \quad (12)$$

The heat transfer coefficient for the enclosure can be obtained from the above equation and written as

$$h_{in} = \frac{k_r * \frac{T_{in,s} - T_{o,s}}{L_r} - \sigma * \frac{(T_s + 273)^4 - (T_{in,s} + 273)^4}{\left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s}\right) + \left(\frac{1}{F_{12}}\right) + \left(\frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r}\right)} - k_a * \frac{T_s - T_{in,s}}{L}}{(T_z - T_{i,y})} \quad (13)$$

In literature, there are also relations for the constant temperature rectangular enclosures (Cengel, 2011). As a result of flat roof model experiments, the range of Ra_L demonstrated compliance with the following equation (Globe & Dropkin, 1959) ($3 \times 10^5 < Ra_L < 7 \times 10^9$):

$$Nu = 0.069 Ra_L^{1/3} Pr^{0.074} \quad (14)$$

So, all the convection and radiation coefficients are known, the total thermal resistance from ground to roof of the models can be calculated as below,

$$R_{Total} = \frac{1}{h_{in}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_o} \quad (15)$$

Uncertainty Analysis

Most widely used uncertainty analysis is the method of Kline and McClintock (1953). According to this method, R is the measured parameter and $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ are the independent variables. In this case, it can be written as below,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (16)$$

Each independent variable error rates are $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ and w_R is the error rate of R magnitude and is defined as,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right] \quad (17)$$

Errors in length measurement are neglected. Errors in temperature measurements depend on measurement instruments and as follows,

- (k1) Uncertainty for thermocouple = $\pm 0.25^\circ\text{C}$
- (k2) Uncertainty for data recorder = 0.1°C
- (k3) Uncertainty for the connections = 0.1°C

Uncertainty in temperature measurement is calculated as follows,

$$w_T = [k_1^2 + k_2^2 + k_3^2]^{1/2} = \pm 0.28^\circ\text{C} \quad (18)$$

Uncertainty in convection coefficients is calculated with the equation below,

$$\frac{w_h}{h} = \left[\left(\frac{w_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{w_T}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_\infty}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

where w_Q , is the uncertainty of conduction heat transfer and calculated as follows,

$$\frac{w_Q}{Q} = \left[\left(\frac{w_{T_{i,y}}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_{d,y}}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

When the above equation solved for the conduction through the flat roof, $w_Q \cong \%8.1$ for $\Delta T = 5^\circ\text{C}$. This high error rate is because of the small temperature difference. The temperature difference between the external surface of the roof and the ambient temperature is $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ and for this case $w_h \cong \%9$. The uncertainty for Nusselt number can be calculated as below,

$$w_{Nu} = \left[\left(\frac{L}{k} w_h \right)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

The average convection coefficient of flat roof surface is $4.2 \text{ W/m}^2\text{K}$, and the uncertainty for this value is about $w_{Nu} \cong \%2.1$

RESULTS AND DISCUSSION

As a result of experiments, the dimensionless temperature curves of the three roof models are drawn with using the obtained data. (Figure 7). As can be seen from the graph the flat roofed model is the most durable model in terms of losing indoor heat and the model Conic_60 tends to lose heat most quickly. Also Figure 8 is drawn for the comparison of the indoor air temperatures of the conical domed Harran house model (Conic_60) and the flat roofed model. At the same environment conditions, the water in the reservoirs of these two models is heated to same temperature ($87.5 \text{ }^\circ\text{C}$) and allowed them to cool approximately 39 hours. As Figure 8 shows that Model Conic_60 indoor air temperature is 3.4°C less than the flat roof model during the cooling period.

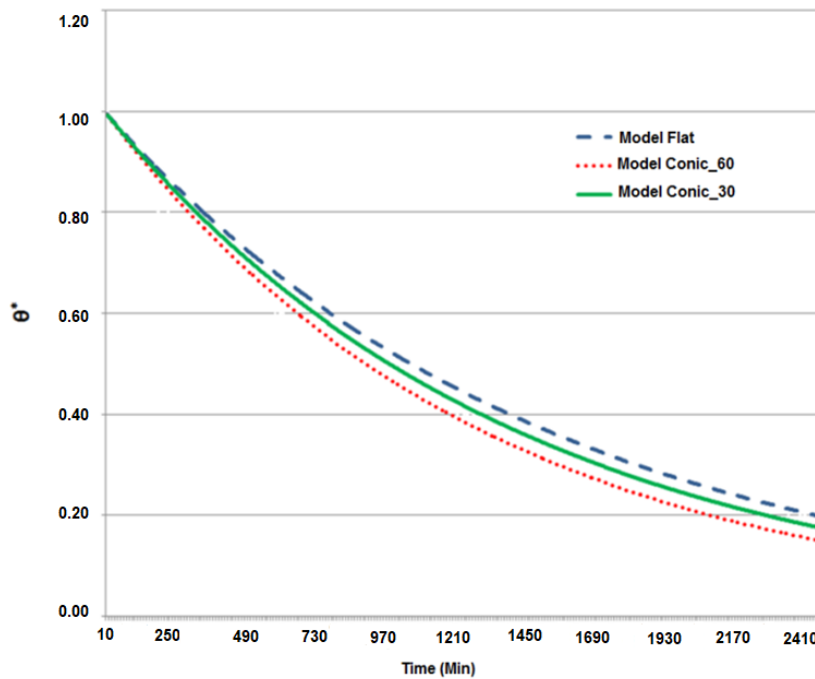


Figure 7 The Variation of Dimensionless Temperature Difference with Time

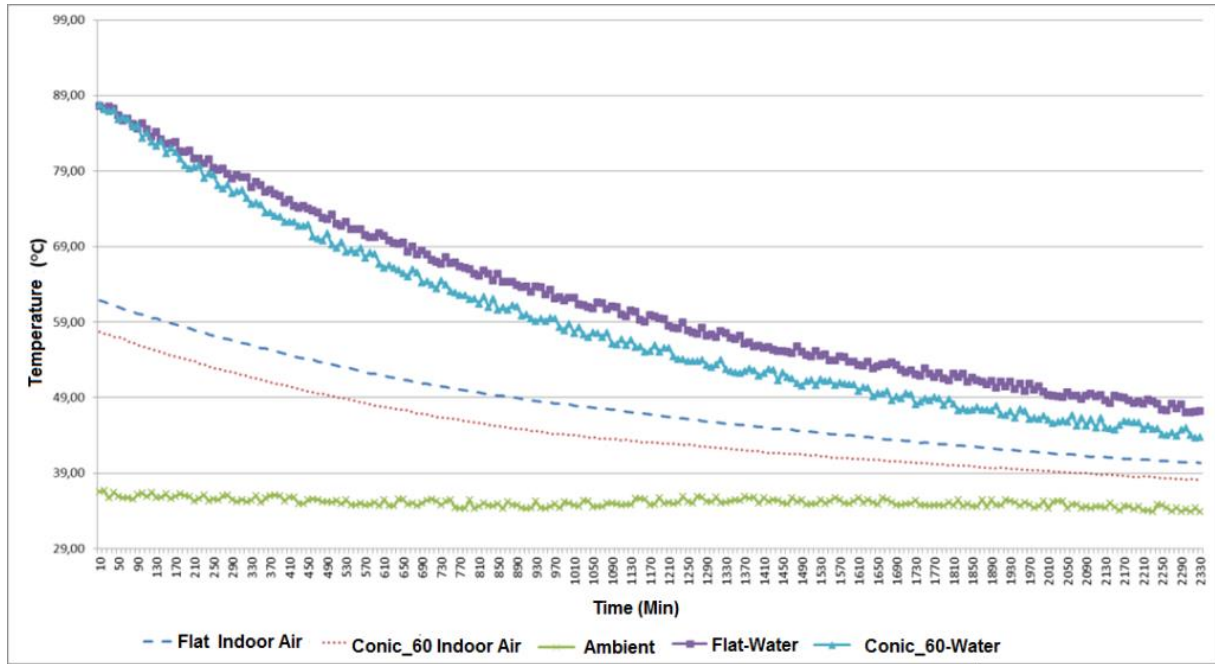


Figure 8 The Change of Indoor Temperature of The Model Flat and Model Conic_60

To determine the effect of the roof geometry to indoor air, the total thermal resistances of the models are calculated (Table 1). The total heat transfer coefficient of the Model conic_60 is found the highest.

Table 1 Total Heat Transfer Coefficient of The Models

Model	U -value (W/m^2K)	R (K/W)
Flat	1.6	1.77
Conic_30	4.6	0.34
Conic_60	5.6	0.20

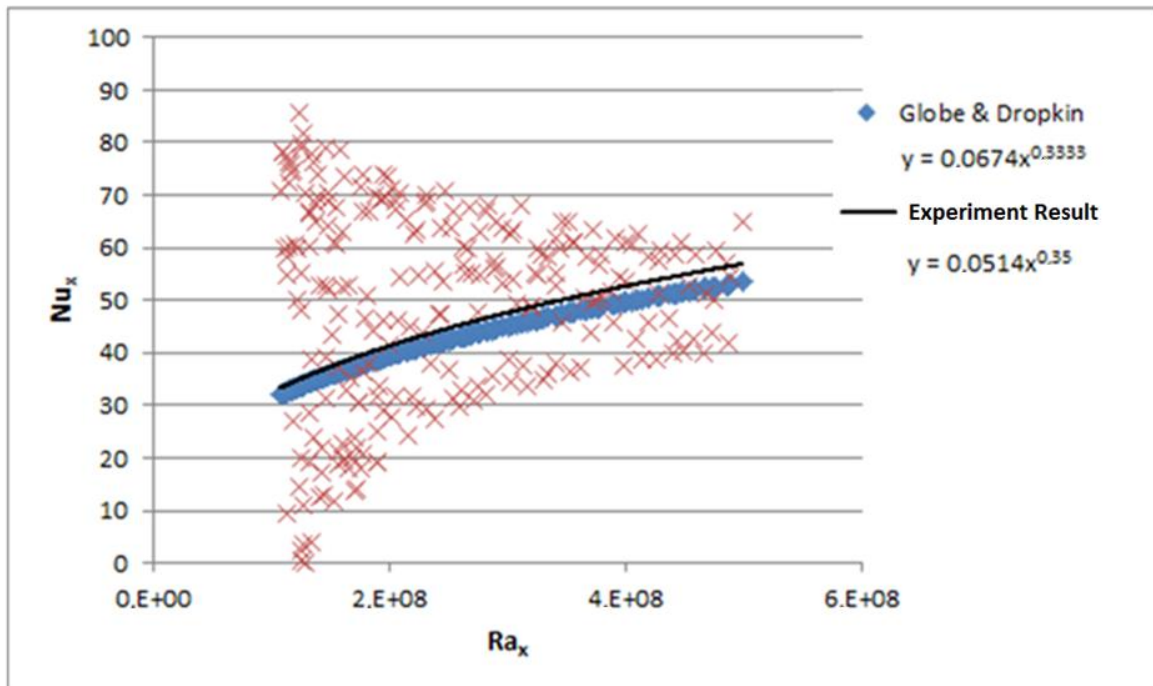


Figure 9 The Comparison of The Experiment Results and the Literature Correlations of Nu and Ra for Horizontal Rectangular Enclosures, L=58 cm

Figure 9 shows the comparison of the correlation given in literature for constant temperature horizontal enclosures and the flat roofed model experiment results. And Figure 10 shows the comparison of the correlation given in literature for cooling of constant temperature hot plate in a cold environment and the experimental results of the cooling of flat roof. As can be seen in Figure 9 and 10 the data obtained from the experiments fit to the slope of literature values. The average value of the natural convection heat transfer coefficient of the enclosure of the flat roof is found $1.9 W/m^2K$ by using the literature correlation. As a result of experimental data, its average is found $1.8 W/m^2K$.

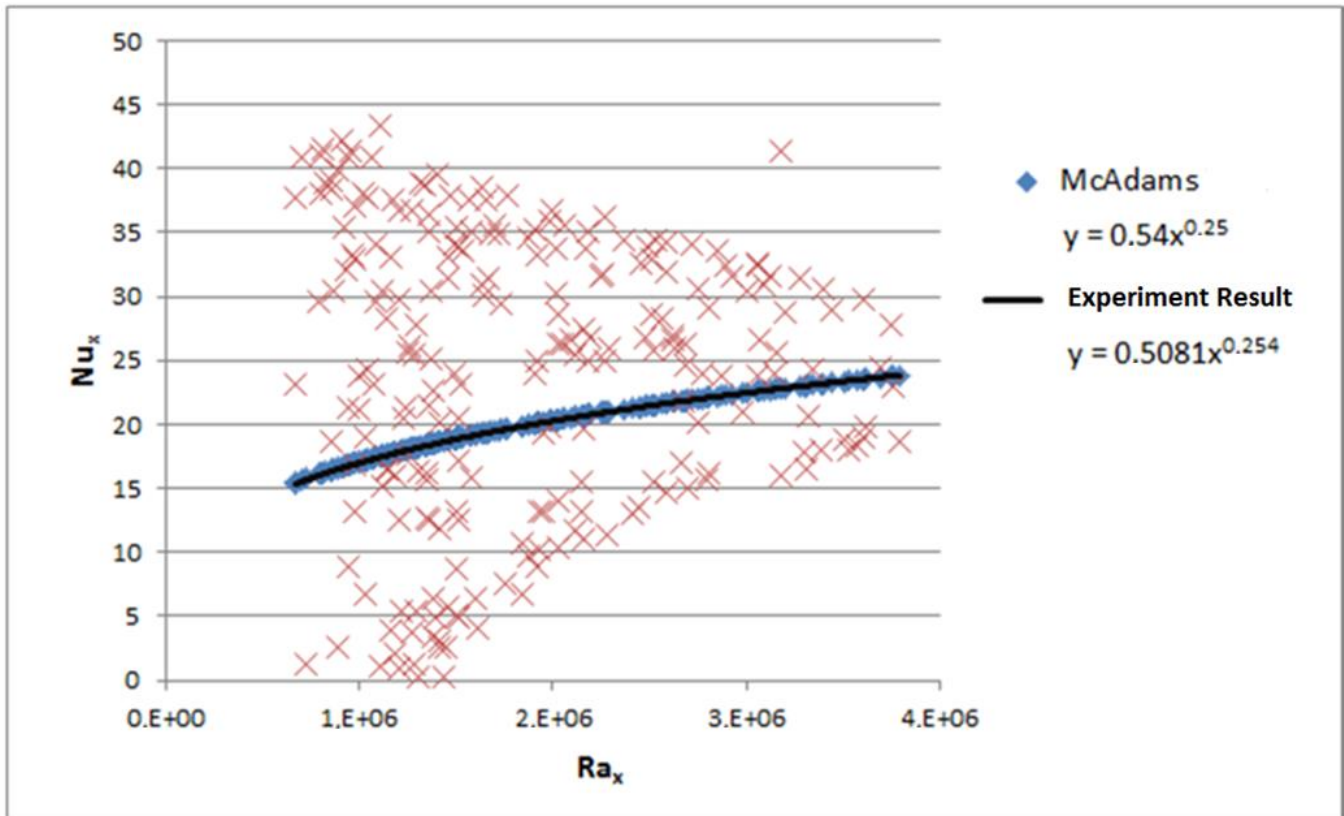


Figure 10 Comparison of Experimental Correlation with Correlation in Literature for The Average Nusselt Number of Natural Convection on a Horizontal Plate

Figure 11, 12, 13 respectively show variation of the Conic_60, Flat, Conic_30 roof outer surface convection heat transfer coefficients as a function of the temperature difference between roof outer surface and the ambient temperature. The average natural convection coefficient of outer surface of Conic_60 roof is found $10.5 W/m^2K$ and the value for indoor is $8.9 W/m^2K$. The average of the flat roofed model roof outer surface convection coefficient is found $4.2 W/m^2K$. The indoor average value of convection heat transfer coefficients of the flat roof is $1.8 W/m^2K$. The average indoor and roof outer surface radiation heat transfer coefficients for flat roofed model is respectively $0.3 W/m^2K$ and $1.6 W/m^2K$. The convection heat transfer coefficients for model Conic_30 is, $h_{in} = 8.8 W/m^2K$, $h_r = 8.3 W/m^2K$. As seen above values, the model of conical domed Harran house (Conic 60) the coefficient for roof outer surface is more than Conic_30. But the most significant difference is between the model Flat and Conic_60, because the Conic_60 's convective heat transfer coefficient is 2.5 times the outer surface value of flat roofed one.

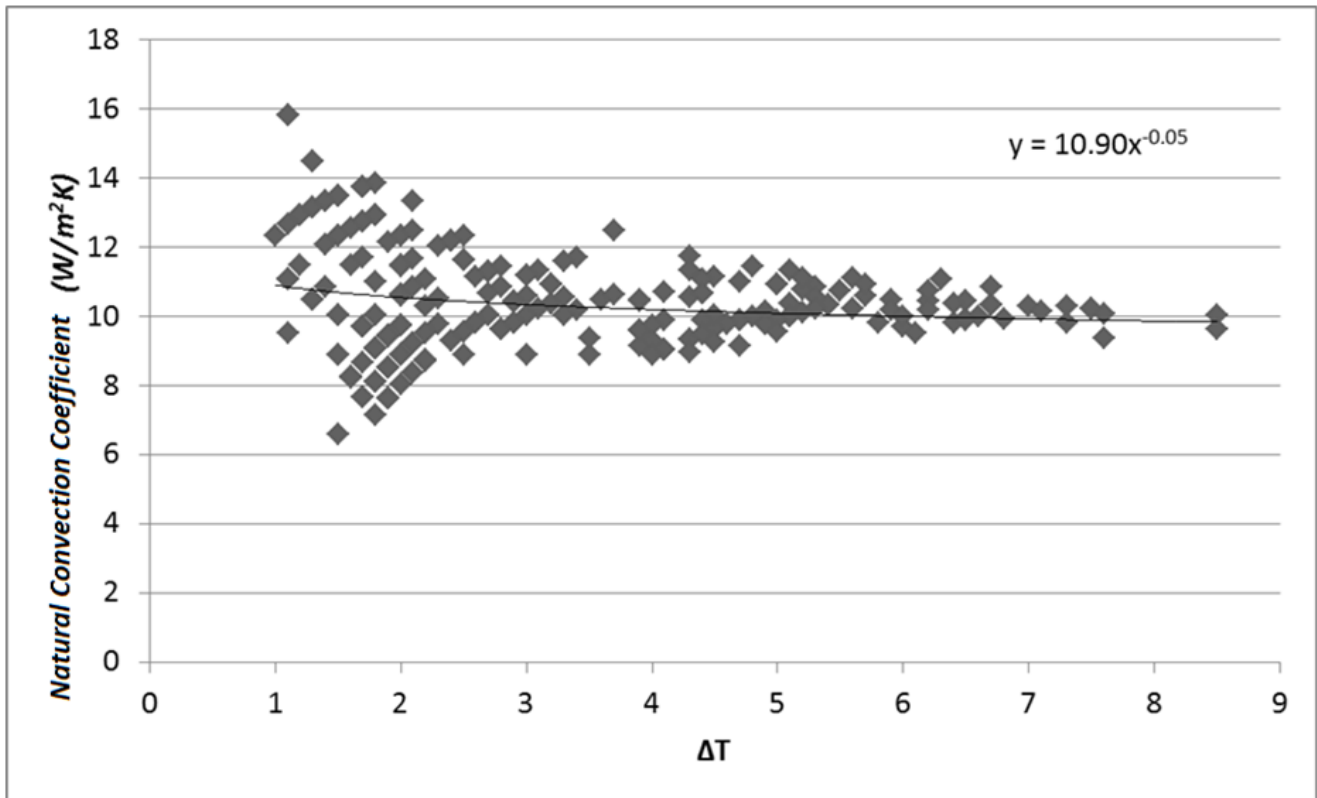


Figure 11 The Variation of The Model Conic_60 Roof Outer Surface Convection Heat Transfer Coefficient As a Function of The Temperature Difference Between The Roof Outer Surface And The Ambient Temperature

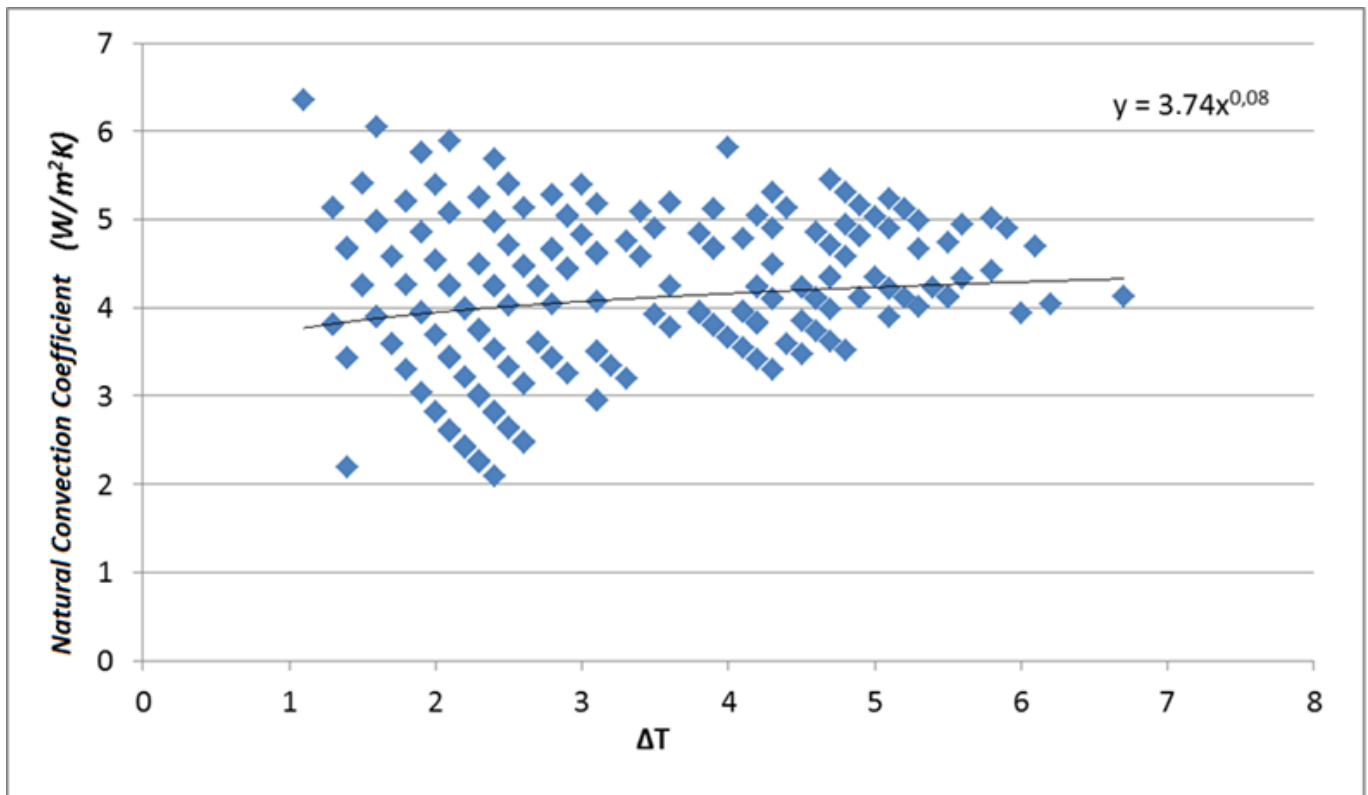


Figure 12 The Variation of The Model Flat Roof Outer Surface Convection Heat Transfer Coefficient as a Function of The Temperature Difference Between the Roof Outer Surface and The Ambient Temperature

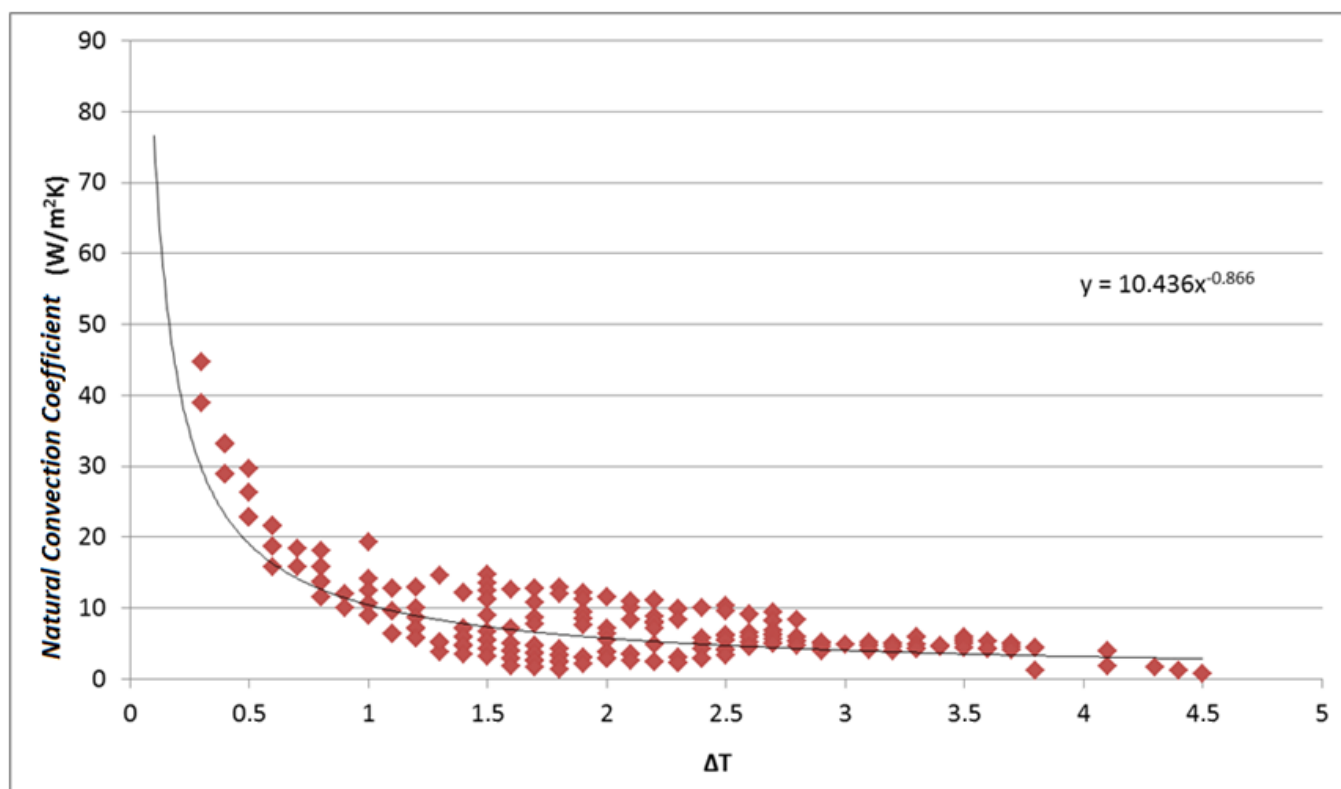


Figure 13 The Variation of The Model Conic_30 Roof Outer Surface Convection Heat Transfer Coefficient as a Function of The Temperature Difference Between the Roof Outer Surface and The Ambient Temperature

CONCLUSION

Conical roofed Harran house model at 1/5 scale (Conic_0) and the equivalent volume and base area of flat roofed model and a model has a roof slope (Conic 30) between these two roof types are used to define the total heat transfer coefficients in terms of changing roof geometry. Also, the natural convection coefficients of the inner volume and the roof outer surfaces of models are compared using experimental and literature data. Experimental results showed that,

Model of conical-roofed Harran house average indoor air temperature is 3.5°C cooler than the flat roofed model indoor air during the experiment at same environmental conditions. For the same base temperature, the roof slope increases the indoor air temperature decreases.

Conical roofed Harran house model has the lowest total thermal resistance from base to roof is and its total heat transfer coefficient is more than 2.5 times the flat roofed model.

It is found that Rayleigh number has an increasing trend with Nusselt number same time. Average convection coefficients calculated with literature correlations are consistent with obtained from experimental data.

Conical roofed Harran house model has the highest inner and outer natural convection coefficients. The average of natural convection heat transfer coefficient of the conical roofed Harran house model roof outer surface is about 1.5 times more than the flat roof model's.

REFERENCES

- Acikgoz, O. (2015). A novel evaluation regarding the influence of surface emissivity on radiative and total heat transfer coefficients in radiant heating systems by means of theoretical and numerical methods. *Energy and Buildings*, 102, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.016>.
- Basaran T. (2011). Thermal analysis of the domed vernacular houses of harran, Turkey. *Indoor and Built Environment*, 20 (5), 543-554.

- Cruickshank, C. A., Harrison, S. J. (2010). Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage. *Energy and Buildings*, 42, 1703-1710. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.013>.
- Cengel Y. A. (2011). Isı ve Kütle Transferi Pratik bir yaklaşım, 3. Baskı, Güven Bilimsel.
- Dalal, A., & Das, M. K. (2006). Natural convection in a rectangular cavity heated from below and uniformly cooled from the top and both sides. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 49:3, 301-322. <https://doi.org/10.1080/10407780500343749>
- Dogan, A., Akkus, S., Baskaya, Ş. (2012). Numerical analysis of natural convection heat transfer from annular fins on a horizontal cylinder. *Isi Bilimi ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 32. 31-41.
- Evangelisti, L., Guattari, C., Gori, P., Bianchi, F. (2017). Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications. *Energy and Buildings*. 151, 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.004>.
- François, A., Ibos, L., Feuillet, V., & Meulemans, J. (2020). Novel in situ measurement methods of the total heat transfer coefficient on building walls. *Energy and Buildings*, 219, 110004.
- Globe, S. & Dropkin, D. (1959). Natural-convection heat transfer in liquids confined by two horizontal plates and heated from below. *ASME. J. Heat Transfer*, 81(1): 24-28. <https://doi.org/10.1115/1.4008124>.
- Hong, T., Ferrando, M., Luo, X., Causone, F. (2020). Modeling and analysis of heat emissions from buildings to ambient air. *Applied Energy*, 277,115566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115566>.
- Hu, Z., Cui, G., Zhang, Z. (2018). Numerical study of mixed convective heat transfer coefficients for building cluster. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 172, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.025>.
- Iousef, S., Montazeri, H., Blocken, B. (2019). Impact of exterior convective heat transfer coefficient models on the energy demand prediction of buildings with different geometry. *Build. Simul.* 12, 797-816 <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0531-7>.
- Jiang, F., Yuan, Y., Li, Z., Zhao, Q., Zhao, K. (2020). Correlations for the forced convective heat transfer at a windward building façade with exterior louver blinds. *Solar Energy*, 209, 709-723. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.014>.
- Kline, S., McClintock, F. (1953). Describing uncertainties in single sample experiments, *Mechanical Engineer*, 75, 3-8.
- McAdams, W. H. (1954). Heat Transmission, 3rd Ed. McGraw-Hill, New York, NY.
- Montazeri, H., Blocken, B., Derome, D., Carmeliet, J. Hensen, J.L.M. (2015). CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146, 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.007>.
- Montazeri, H. & Blocken, B. (2017). New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients at building facades and roofs. *Building and Environment*, 119, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.012>.
- Montazeri, H. & Blocken, B. (2018). Extension of generalized forced convective heat transfer coefficient expressions for isolated buildings taking into account oblique wind directions, *Building and Environment*, 140, 194-208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.027>.
- Nogueira, R., Martins, M., Ampessan, F. (2011). Natural convection in rectangular cavities with different aspect ratios. *Therm Eng.* 10. 44-49. 10.5380/reterm.v10i1-2.61951.
- Premrov, M., Žigart, M., Vesna, L. (2017). Influence of the building geometry on energy efficiency of timber-glass buildings for different climatic regions. *Istrazivanja i projektovanja za privredu.* 15, 529-539. <https://doi.org/10.5937/jaes15-15256>.
- Saleh, H. & Hashim, I. (2014). Conjugate heat transfer in rayleigh-bénard convection in a square enclosure. *The Scientific World Journal*, 786102. 10.1155/2014/786102.

Sarris, I.E., Lekakis, I., Vlachos, N.S. (2004). Natural convection in rectangular tanks heated locally from below. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3549-3563. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.12.022>.

Turgut, P., Yesilata, B. (2009). Investigation of Thermo-mechanical behaviors of scrap rubber added mortar plate and bricks. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (4): 651–658.

Yang, W., Zhu, X., Liu, J. (2017). Annual experimental research on convective heat transfer coefficient of exterior surface of building external Wall. *Energy and Buildings*, 155, 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.075>.

Yesilata, B., Turgut, P. (2007). A simple dynamic measurement technique for comparing thermal insulation performances of anisotropic building materials. *Energy and Buildings*, 39(9):1027-1034.

Yıldırım, E., Firatoglu A. Z., Yesilata B. (2014). Comparison of the solar insolation on the roof of conic domed harran house and the flat roof. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34(2), 123-128.

Yıldırım, E., Firatoglu, Z., Yesilata, B., (2017). Çatı geometrisin bina ısı davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*. 22. 187-200. 10.17482/uumfd.330923.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.03.2022
Kabul Tarihi : 12.04.2022

Received Date : 20.03.2022
Accepted Date : 12.04.2022

POMZA AGREGANIN ÇİMENTO ESASLI TİKSOTROPİK RÖTRESİZ İNCE TAMİR HARCININ PERFORMANSINA ETKİSİ

THE EFFECT OF PUMICE AGGREGATE ON THE PERFORMANCE OF CEMENT-BASED THIXOTROPIC NON-SHRINKAGE THIN REPAIR MORTAR

Lütfullah GÜNDÜZ¹ (ORCID: 0000-0003-2487-467X)
Şevket Onur KALKAN^{2*} (ORCID: 0000-0003-0250-8134)

^{1,2} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şevket Onur KALKAN, sevetonur.kalkan@ikcu.edu.tr

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, 100 mikron boyut altı ve 2 mm boyut altı olarak öğütülmüş pomzanın çimentolu tamir harçlarında kullanımı ile harcın fiziksel, mekanik ve özellikle rötre yapma karakteristiği üzerine detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel analizlerde pomza agreganın ince ve iri boyutlarda kullanımında tamir harcının yoğunluğuna, gözeneklilik oranına, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite özelliklerine ve kuruma büzülmesi değerlerine olan etkileri detaylı analiz edilmiştir. Pomza bileşenli karışımlarda ince:iri oranı sırasıyla her bir karışımda ağırlıkça yüzde olarak 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30 ve 80:20 oranları kullanılmıştır. Her ne kadar pomza agregalı örneklerin kuruma büzülmesi oranları pomza kullanılmadan üretilen kontrol harcından görece yüksek bir değerde tespit edilse de bütün pomza agregalı tamir harcı örneklerinin büzülme değerleri ilgili standartların öngördüğü değer aralığında yer almaktadır. Harç karışımlarında iri boyut pomza agreganın daha fazla kullanıldığı örneklerin rötre miktarının, ince boyut pomza agregalı örneklerin rötre miktarından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum harcın gözeneklilik oranıyla ilişkilendirilmiş, gözeneklilik oranı daha yüksek olan harçların rötresi daha düşük olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tikotropik, rötre, çimento, tamir harcı, pomza

ABSTRACT

In this experimental study, a detailed investigation was carried out on the physical, mechanical, and shrinkage characteristics of cementitious repair mortars with the use of ground pumice in with 0/100 µm and 0/2 mm grain sizes. In the experimental analysis, the effects of the use of pumice aggregate in fine and coarse sizes on the density, porosity, compressive strength, flexural strength, elasticity properties and drying shrinkage values of the repair mortar were analyzed in detail. In mixtures with pumice component, the ratio of fine:coarse pumice, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30 and 80:20 by weight were used in mixtures, respectively. Although the drying shrinkage rates of test specimens were determined at a relatively higher value than the control mortar, the shrinkage values of all pumice aggregate repair mortar specimens were within the value range stipulated by the relevant standards. It was determined that the shrinkage amount of the specimens in which coarse size pumice aggregate was used more in mortar mixtures was lower than the shrinkage amount of the specimens with fine size pumice aggregate. This situation was associated with the porosity rate of the mortar, and the shrinkage of the mortars with higher porosity was determined to be lower.

Keywords: Thixotropic, shrinkage, cement, repair mortar, pumice

GİRİŞ

Betonarme yapılar soğuk ve sıcak iklim ortam koşullarına maruz kaldıklarında zamanla bozulmaktadır. Bu nedenle tarihi yapılar, rıhtımlar, köprüler, dış ve iç cephe beton birimlerin yüzeyleri vb. gibi zamanla yorulmaya uğrayan yapı birimlerin rehabilite edilmesi ve onarılması gerekmektedir (Benharzallah et al., 2018). Bu onarım işlemleri genellikle özel karışım tasarımlarına sahip tamir harçları ile yapılmaktadır. Tamir harçları ince tabaka ve kalın tabaka olarak iki farklı uygulama koşulunda uygulanan harç türleridir. İnce tabaka tamir harçları genellikle iç mekânlarda dökülmüş ince sıva kalınlığındaki sıva onarımlarında, ince çatlak oluşumlarının onarılmasında, çatlak ve delik tamirlerinde, sıva ve beton yüzeylerin tesviye amaçlı sıvanmasında ve eski yapılarda meydana gelen restorasyon çalışmaları gibi uygulamalarda brüt beton, gaz beton, prefabrik beton, tuğla ve briket türü yapı elemanlarının oluşturduğu birimlerde kullanılır. Kalın tamir harçları ise kalın dolgu yapabilen iç ve dış mekânlarda prefabrik beton, brüt beton, tuğla ve briket üzerindeki kalınlığın fazla olduğu (1-5 cm) boşlukların doldurulmasında, sıva, kalın çatlakların tamirinde, delik tamirlerinde, giriş ve kolonlarda meydana gelen çatlak ve kırılmaların onarımında sıva ve beton yüzeylerin tesviye amaçlı sıvanmasında, seramik uygulaması öncesinde sağlam ve düzgün alt yüzey oluşturmasında kullanılır.

Kimyasal polimer ve lif takviyeli, yüksek dayanıma sahip kullanıma hazır harçlar, çimento esaslı tamir harçları olarak tanımlanmaktadır. Ancak, güncel endüstriyel uygulamalarda harcın sertleşme süresinde rötre davranışı gösterip göstermediğine göre iki farklı formatta harç tanımlamaları yapılabilmektedir. Bunlardan en önemlisi formu *rötresiz* ve aynı zamanda *tiksotropik* özellik sergileyen harç türüdür. Harç uygulamalarında tiksotropik özellik, özellikle düşey konumda ve yer çekimi ivmesine direnç gösterecek şekilde uygulanan harçlarda uygulama sırasında ve/veya sonrasında aşağı eğilimli olarak sarkma, akma ve yığılarak aşağı yönde kayma olgusu göstermeden, uygulandığı ilk şekliyle yüzeye tutunan ve sarkma yapmayan harç özelliği olarak tanımlanabilmektedir (Pekmezci ve Atahan, 2014). Bu bağlamda, tiksotropik rötresiz harçlar genellikle çimento esaslı, tek bileşenli, polimer ve fiber takviyeli ve yüksek mukavemetli yapısal tamir harçlarıdır. Suya ve dona karşı dayanıklı olan tamir harçlarının farklı kullanım amaçları için farklı agrega dağılımına, farklı akışkanlığa, farklı aderans değerlerine sahip türleri bulunmaktadır (Fixa, 2017; Mohammadi et al., 2014; Rapoport and Shah, 2005; Xiong et al., 2002). Endüstriyel uygulamalarda tiksotropik rötresiz harçlar çoğunlukla erken yüksek mukavemet istenen yerlerde, segregasyona uğramış betonun tamirinde, betonarme yapı elemanlarının onarımında, betonların sülfat ve klor etkilerine karşı korunmasında, deniz yapılarının onarım ve bakımında, makine ayaklarının ankrajında, yüksek taşıma kapasiteli yataklanmalarda, filiz ve ankraj demirlerinin sabitlenmesinde, hafif ve orta ağırlıkta trafik yükü olan, özel kaplamalar gelecek döşemelerde ve yüzey tamiratlarında, pah yapılmasında, tie-rod delikleri ve karot boşluklarının doldurulmasında kullanılır (Fixa, 2017; Shaikh, 2016; Tayeh et al., 2013).

İnce tabaka tiksotropik rötresiz tamir harçlarının tasarımında kullanılan kimyasallar harcın sertleştikten sonra rötre (büzülme) yapmamasını ve çok ince yarı ve/veya çatlaklara kadar nüfuz edip beton yüzeyin tamiratlarında kolay uygulanabilirliğini sağlar. Rötresiz tamir harçları 7 gün sonunda 50 N/mm^2 , 28 gün sonunda ise 65 N/mm^2 'lik basınç dayanımından daha yüksek mukavemet değerleri gösterebilirler (Fixa, 2017; Shaikh, 2016; Rapoport and Shah, 2005). Bu yüksek dayanım özelliği sayesinde akıcı kıvamda olanlar özellikle makine ayaklarının sabitlenmesinde, tiksotropik kıvamda olanlar ise tie-rod deliklerinin ve karot boşluklarının doldurulmasında sıklıkla tercih edilirler (Fixa, 2017). Tiksotropik rötresiz tamir harçlarının üretiminde ana agrega materyali olarak alternatif birden fazla doğal, suni ve/veya yarı suni malzemenin kullanımları görülebilmektedir (Kawashima and Shah, 2011, Toledo Filho et al., 2005). En yaygın kullanılan malzemeler arasında öğütülmüş mikronize boyutlarda kuvars kumu, kalsit, ham perlit, yüksek fırın cürufu vb. malzemeler sayılabilir (Ahmadi et al., 2017). Harcın özel karışım formülasyonları ile birlikte gözenekli yapıya sahip ve mikronize edilmiş boyutlarda genleşmiş kil, volkan cürufu ve kalsine diyatomit gibi malzemelerin de kullanımları görülebilmektedir.

Bu makale, volkanik orijinli ve doğal gözenekli bir yapıya sahip olan pomza kayacının ince tabaka tiksotropik rötresiz tamir harçlarında kullanıldığında harcın performansının daha iyi anlaşılabilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Farklı tane boyut ve oranlarında pomza içeren çimento esaslı tamir harçların geliştirilmesine yönelik deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Laboratuvarında test edilen 8 farklı karışım tasarımına sahip pomza agregalı polimer modifiyeli çimento esaslı tamir harcı örneklerinin teknik bulguları detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Yapılan deneysel analizlerde pomza agreganın ince ve iri boyutlarda kullanımında tamir harcının yoğunluğuna, gözeneklilik oranına, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite özelliklerine ve kuruma büzülmesi değerlerine olan etkileri detaylı analiz edilmiş olup, elde edilen bulgular bu makale çalışmasında tartışılmıştır. Pomzanın uygun miktarlarda farklı boyut dağılımına sahip bir şekilde tamir harcı karışımlarında kullanımı, tiksotropik

özellikte sarkma ve akma yapmayan, rötre davranışı sergilemeyen ve ayrıca ilgili standartların öngördüğü teknik limitleri sağlayabilen harçların elde edilebileceğini göstermiştir.

MATERYAL VE METOT

Test Örneklerinde Kullanılan Malzemeler

Pomza agregaların çimento esaslı ince tabaka tiksotropik rötresiz tamir harcı üretiminde değerlendirilebilirliğinin analizi amacıyla, aynı orijinli iki farklı boyutta sınıflandırılmış pomza agrega kullanılmıştır. Tamir harcı test örneklerinin hazırlanmasında pomza agrega Nevşehir İli Göre bölgesinde bulunan ocaklardan ham doğal şekliyle temin edilmiştir. Laboratuvar ortamında doğal pomza agrega öncelikle $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik havalandırılmalı bir etüv ortamında bünye nemi atılncaya kadar kurutulması sağlanmış ve sonrasında bir kırıcı yardımıyla kırılarak boyut küçültme işlemi yapılmıştır. Kırıcı sonrası ufalanmış pomza malzeme, kare açıklıklı elek kullanılarak boyutlandırılmış ve özellikle tamir harcı test örnekleri için 100 mikron boyut altı mikronize pomza ve 0-2 mm pomza agrega malzeme olarak iki farklı boyutta gruplandırılmıştır. 100 mikron boyutlu pomzanın kuru yığın yoğunluğu 910 kg/m^3 olup, 0-2 mm boyut aralığındaki pomza agreganın kuru yığın yoğunluk değeri ise 740 kg/m^3 'tür.

İnce tabaka tamir harcı test örneklerinin hazırlanmasında pH düzenleyici ve kıvam ayarlayıcı özellik taşıması nedeniyle yüksek saflıkta mikronize edilmiş, CL-90-S Söndürülmüş toz kireç normal piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. CL-90-S kireci TS EN 459-1 (2015) yapı kireci standardının öngördüğü teknik değerleri sağlayan özelliktedir. Bununla birlikte bileşiminde CaO+MgO miktarı $>90\%$ ve Ca(OH)_2 miktarı ise $>85\%$ 'dir. CL-90-S kirecin kuru yığın yoğunluk değeri ortalama 540 kg/m^3 'tür.

Test örneklerinin analizi amacıyla maksimum tane boyutu 750 mikron öğütülmüş kuvars kumu gerek pomza agrega kullanmaksızın hazırlanmış tamir harcı kontrol örneklerin hazırlanmasında ana agrega malzemesi olarak gerekse pomza agregalı örneklerde de dolgu materyali olarak kullanılmıştır. Öğütülmüş kuvars kumu, normal piyasa koşullarından temin edilmiş olup, ortalama yığın yoğunluğu $1500\pm 150\text{ kg/m}^3$ 'tür. Ayrıca tamir harcı örneklerinde maksimum tane boyutu 45 mikron olan mikro silika dayanım artırıcı katkı materyali olarak kullanılmıştır.

İnce tabaka tamir harcı karışımlarında harcın tiksotropi özelliğini sağlayıcı, rötre oluşumunu minimize edici ve harcın mukavemet ve bağ kuvvetini artırmak amacıyla ticari piyasa koşullarından temin edilmiş toz formda 3 farklı kimyasal polimer katkı, harmanlanarak tek bir karışım olarak kullanılmıştır. Polimer katkıların karışımı ortalama yığın yoğunluğu 840 kg/m^3 'tür. Harcın esnekliğini artırmak ve kohezyon değerini iyileştirmek amacıyla maksimum uzunluğu 40 mikron olan organik esaslı lif harç donatı katkısı olarak kullanılmıştır. Tamir harcı hazırlanmasında CEM I 42.5R Portland Çimento (özgül ağırlık değeri $3,15\text{ g/cm}^3$) kullanılmış olup, su olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Tamir Harcı Karışım Tasarımı ve Örneklerin Hazırlanması

Çimento esaslı tiksotropik rötresiz ince tabaka tamir harcı üretiminde pomza agrega kullanımının harcın performansına etkisinin analizi amacıyla 8 ayrı karışım tasarımı yapılmış olup, karışım kombinasyonları Çizelge 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tiksotropik Rötresiz Tamir Harcı Karışım Kombinasyonları (Ağırlıkça %).

Karışım	Çimento	100 µm Pomza	0-2 mm Pomza	CL-90-S Toz Kireç	Dolgu	Mikro Silika	Organik Lif+Polimer Katkı
R0	32,00	0,00	0,00	5,00	58,10	3,60	2,30
R1	32,00	8,62	34,48	5,00	14,00	3,60	2,30
R2	32,00	12,93	30,17	5,00	14,00	3,60	2,30
R3	32,00	17,24	25,86	5,00	14,00	3,60	2,30
R4	32,00	21,55	21,55	5,00	14,00	3,60	2,30
R5	32,00	25,86	17,24	5,00	14,00	3,60	2,30
R6	32,00	30,17	12,93	5,00	14,00	3,60	2,30
R7	32,00	34,48	8,62	5,00	14,00	3,60	2,30

Pomzanın tamir harcında agrega malzeme olarak kullanımında etkinliği ve performansını analiz etmek amacıyla öncelikle karışımında pomza agrega yer almayan bir seri kontrol karışımı tasarlanmış olup, bu tasarım "R0" olarak

kodlanmıştır. Ağırlıkça %32 çimento ve 0,63 su/çimento oranında pomza agregası kullanılmadan hazırlanan test örnekleri (R0) bu çalışmada referans değer olarak irdelenmiştir. Bununla birlikte harç örneklerinde etkinliğinin incelenmesi amacıyla pomzanın (ince/iri) boyut oranlarına bağlı 7 farklı karışım tasarımı yapılmıştır. Bu karışımlarda “*ince*” pomza olarak 100 mikron pomza ve “*iri*” pomza olarak da 0-2 mm pomza agregası kullanılmıştır. Pomza bileşenli karışımlarda ince/iri oranı sırasıyla her bir karışımda (%20:%80=0,25; %30:%70=0,43; %40:%60=0,67; %50:%50=1,00; %60:%40=1,50; %70:%30=2,33 ve %80:%20=4,00) oranları kullanılmıştır. Kontrol tamir harcı karışımı için elde edilmiş yaş harç kıvamına eşdeğer olacak harç kıvamının sağlanması amacıyla pomza agregasının ana agregası olarak kullanıldığı tüm karışımlarda su/çimento=0,72 oranında sabit değer olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, pomza agregalı tüm harç karışımlarında çimento oranı, toz kireç oranı, mikro silika, organik lif ve polimer katkı oranları ağırlıkça sabit oranlarda kullanılmıştır.

Hazırlanan harç karışımları belirlenen su/çimento oranındaki su ile düşük devirli bir karıştırıcıyla öncelikle 3-4 dakika boyunca topaklanma olmaksızın homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Elde edilen taze harç yaklaşık 4 dakika dinlendirilip tekrar 30 saniye kadar ilaveten karıştırıldıktan sonra yaş harç, test örneklerinin kalıplanması için hazır hale getirilmiştir. Karıştırma sonrasında test örneklerinin kalıplanması 20°C de yaklaşık 30 dakikalık süre içerisinde yapılmıştır. Dökümü yapılan test örneklerinin yüzeyleri ilk 24 saat boyunca sudan, güneş, rüzgâr ve dondan korunmuştur. Ayrıca özel maddeler ile hızlı buharlaştırma gibi benzeri herhangi bir uygulama yapılmamıştır.

Test örnekleri için hazırlanan her bir karışımdan 50x50x50 mm boyutlu küp numuneler ve ayrıca 40x40x160 mm boyutlu prizma formlu test örneklerinin dökümleri yapılmıştır. Test örnekleri dökümden 1 gün sonra kalıplardan çıkartılmış ve termostatlı bir kür tankında test tarihinden bir gün öncesine kadar su içerisinde kür işlemi uygulanmıştır. Teste tabi tutulacak tüm örneklerin test öncesi havalandırılmalı bir etüvde değişmez kütle değerine kadar kurutulması sağlanarak, kuru durumları için testler uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlardan 1, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı 50 mm’lik küp numuneler üzerinde ASTM C109 (2017) standardında öngörülen prensiplere göre yapılmıştır. Hazırlanan karışımlardan 28 günlük eğilme dayanımı 40x40x160 mm’lik prizma numuneler üzerinde ASTM C348 (2021) standardında öngörülen prensiplere göre yapılmıştır. Ayrıca 28 günlük kür sonrası sertleşmiş harç örneklerinin Statik Elastisite Modül değerleri belirlenmiş olup, ASTM C642 (2017) standardına göre yoğunluk ve gözeneklilik değerleri analiz edilmiştir. Pomza agregası kullanımının tamir harcı örneklerinin kuruma büzülmesi davranışlarını analiz etmek amacıyla her bir karışımdan üçer adet 25x25x285 mm prizma şekilli test örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnekler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkartılmış ve 48 saat süreyle termostatlı bir su kabini içinde 20°C sıcaklıkta su içerisinde kür işlemi uygulanmıştır. Sonrasında kür kabini içinde alınan test örnekleri sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %55 olan bir ortamda ASTM C596 (2018) standardına göre bekletilmiştir. Bu bekleme süresi içerisinde test örneklerindeki boy değişimi Eşitlik 1’de verilen bağıntı yardımıyla kuruma büzülmesi (rötre) değeri olarak hesaplanmıştır.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada, S, test örneğinin kuruma büzülme % değerini; L₁, kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, mm; L, geçen günlere göre periyodik ölçüm değerini, mm; L₀, efektif ölçüm boyunu, mm, göstermektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

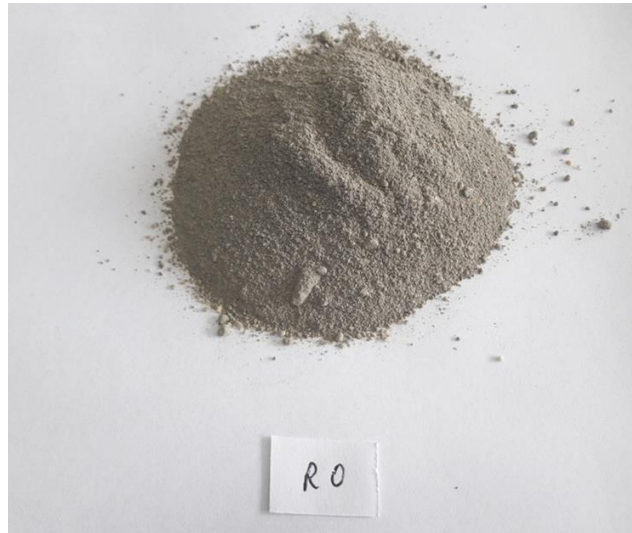
Tiksotropik rötresiz ince tabaka tamir harcı analizi için farklı alternatif karışım tasarımlarında hazırlanan test örneklerinin bazı teknik bulguları Çizelge 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tamir Harcı Örnekleriniz Analiz Bulguları

Karışım	Pomza (İnce/İri) Oranı	S/Ç	Toz Yığın Yoğunluk (kg/m ³)	Yaş Harç Yoğunluğu (kg/m ³)	Sertleşmiş Harç Yoğunluğu (kg/m ³)	Gözeneklilik Oranı (%)	Kuruma Büzülmesi (%)
R0	0,00	0,63	1398	1922	1676	5,7	0,0180
R1	0,25	0,72	1015	1502	1297	18,8	0,0193
R2	0,43	0,72	1026	1530	1329	17,6	0,0197
R3	0,67	0,72	1036	1553	1349	16,3	0,0208
R4	1,00	0,72	1038	1561	1357	15,2	0,0216
R5	1,50	0,72	1059	1599	1391	14,4	0,0219
R6	2,33	0,72	1070	1620	1410	13,7	0,0223
R7	4,00	0,72	1082	1644	1432	12,3	0,0227

Harç Karışımlarının Özellikleri

Tiksotropik ve rötresiz tamir harcı testleri için öncelikle bileşiminde pomza agrega yer almayan R0 kodlu kontrol test örneği amaçlı bir harç tasarımı yapılmış olup, kontrol harcının toz formda (Şekil 1) yığın yoğunluk değeri 1398 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bu harç karışımı 0,63 su/çimento oranında su ile karıldığında taze yaş harcın (Şekil 2) birim hacim kütlesi 1922 kg/m³ ve 28 gün kür sonrası sertleşmiş harcın kuru harcın birim hacim kütlesi ise 1676 kg/m³'tür.



Şekil 1. R0 Karışımı Tamir Harcı Toz Formu



Şekil 2. R0 Karışımı Tamir Harcı Taze Yaş Harç Formu

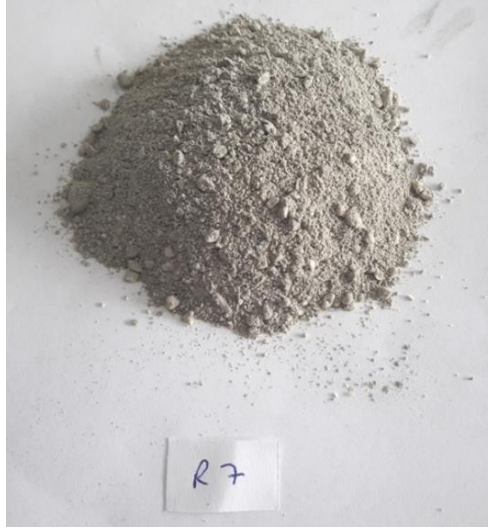
Pomzanın tamir harcı örneklerinde performansının incelenmesi amacıyla R1-R7 olarak kodlanmış 7 farklı ince/iri pomza oran kullanımında tasarlanmış örneklerin toz formda yığın yoğunluk değerleri ince/iri pomza oranına göre 1015- 1082 kg/m³ aralığında değişmektedir. Karışımdaki ince pomza oranı arttıkça toz formda yığın yoğunluk değeri de artmaktadır. En yüksek ince pomza kullanım oranlı karışımın (R7) toz yığın yoğunluk değeri, pomzanın gözenekli yapısı ve agrega olarak birim yoğunluğunun daha düşük olması sebebiyle kontrol harcından %22,6 daha hafiftir. R1 ve R7 karışımlarına ait toz formdaki tamir harcı genel görünüşleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. R1-R7 harç karışımlarının tamamı sabit 0,72 su/çimento oranında su ile karıldığında taze yaş harcın birim hacim kütlesi ince/iri pomza oran değişimine bağlı olarak 1502- 1644 kg/m³ aralığında, 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç örneklerinin kuru harcın birim hacim kütlesi ise 1297- 1432 kg/m³ aralığındadır. R1 ve R7 karışımlarına ait taze yaş formdaki tamir harcı genel görünüşleri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. En yüksek ince boyut pomza kullanım oranlı karışımın (R7) taze yaş harç ve sertleşmiş harç yoğunluk değeri kontrol harcından yaklaşık %14,5 daha hafiftir. İnce boyuttaki pomzanın tane boyutu kontrol harcında yer alan ana malzemenin tane boyutundan daha ince olduğu için, karma suyu sonrası harç karışımında daha fazla yerleşme oluşması sebebiyle kontrol harcının toz yığın yoğunluğuna kıyasla daha düşük bir yoğunluk farkı elde edilmiştir.



Şekil 3. R1 Karışımı Tamir Harcı Toz Formu



Şekil 4. R1 Karışımı Taze Yaş Harç Formu

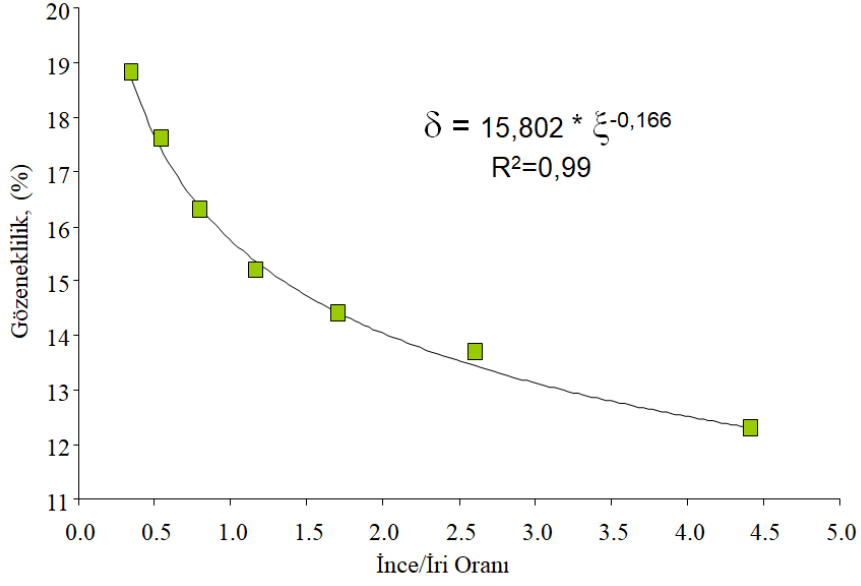


Şekil 5. R7 Karışımı Tamir Harcı Toz Formu



Şekil 6. R7 Karışımı Taze Yaş Harç Formu

Çizelge 2’den görüldüğü üzere, kontrol harcı kapalı ve açık gözeneklerin oluşturduğu toplam gözeneklilik oranı %5,7 olarak belirlenmiştir. Pomzanın harç bileşiminde yer alması, agreganın doğal gözenekli yapısı sebebiyle kullanım oranına göre değişmekle birlikte, pomza iri boyut malzeme oranı arttıkça harcın toplam gözeneklilik değeri de artmaktadır. İnce/iri pomza 0,25 – 4,00 oran değişiminde harç örneklerinin gözeneklilik oranı %12,3 - %18,8 oranında değişmektedir. İri boyutlu en az pomzanın kullanıldığı R1 karışımının gözenekliliği kontrol harcına göre 2,15 kat, iri pomzanın en çok kullanıldığı R7 karışımının gözenekliliği ise kontrol harcına göre 3,3 kat daha fazladır. Bu da pomza içerikli tamir harçlarının yapısal özelliğinin kontrol harcından oldukça farklılık göstereceğini temsil eder. Pomza bileşenli tamir harç örneklerinin toplam karışımdaki ince/iri malzeme oranı “ ξ ” ile toplam gözeneklilik “ δ ” değişimi arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 7’de verilmiştir. Grafiksel analizden de görüldüğü üzere, karışım tasarımında ince pomza boyut miktarı arttıkça, sertleşmiş harcın toplam gözeneklilik oranı azalmaktadır.



Şekil 7. İnce/İri Oranı 'ξ'– Harcın Gözeneklilik Oranı 'δ' İlişkisi

Tamir harcı örneklerinin 28 gün sonrası mikroyapı analizleri yapıldığında farklı karakteristikte matris formlarının oluşturduğu gözlenmiştir. Kontrol harcı R0 ve iki ayrı pomza (ince/iri) oran değişimine sahip R1 ve R7 karışımlarını temsilen mikroyapı görselleri sembolik olarak Şekil 8 – Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 8. Kontrol Harcı R0 Matris Yapısı



Şekil 9. %20:%80 İnce:İri Pomzalı R1 Matris Yapısı



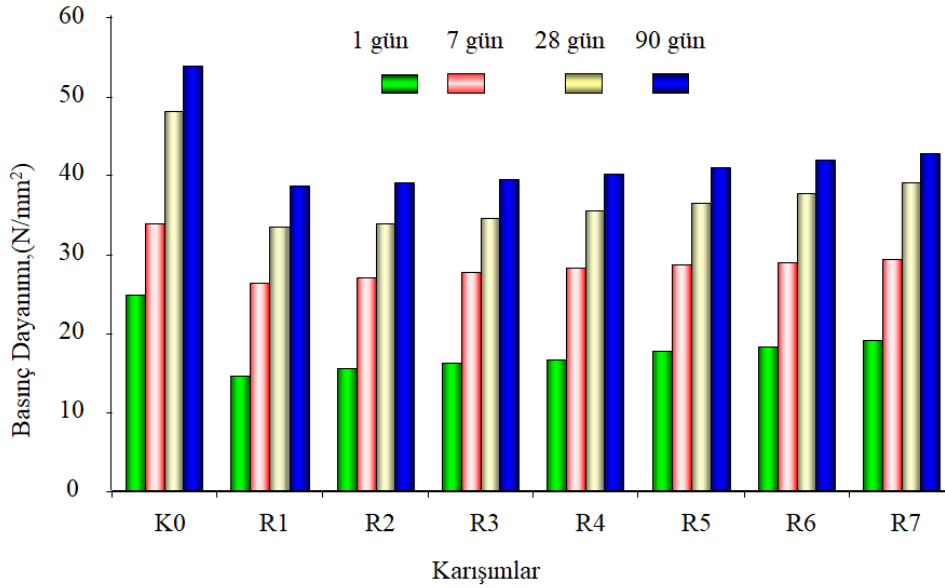
Şekil 10. %80:%20 İnce:İri Pomzalı R7 Matris Yapısı

Kontrol harcının matris yapısı, düşük gözenek oranlı bir form sergilemektedir (Şekil 8). Karışımdaki mikro silika tanelerinin matris yapıda homojen yapıda bir şekilde dağılım gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca, matris yapıyı oluşturan tüm agrega tanelerinin ince boyutlu tanelerden oluştuğu da görülmektedir. Pomza agregalı karışımlardan %20:%80 ince:iri pomza oranlı R1 matris yapısı ise iri boyutlu pomzanın varlığıyla dikkat çekmektedir (Şekil 9). İri boyutlu pomza tanelerinin matris yapıda heterojen bir dağılım sergilemiş olup, yer yer matris hamurunda gözenek oluşumlarının meydana geldiği de görülmektedir. Pomza agregalı karışımlardan %80:%20 ince:iri pomza oranlı R7 matris yapısı (Şekil 10) ise kısmen kontrol harcı matris görünümüne benzemektedir. İnce boyutlu pomza miktarının çokluğu, matris yapının daha homojen bir görsel format oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca matris hamurunda mikro ölçekli homojen dağılımlı gözeneklerin oluştuğu da görülmüştür.

Dayanım Özellikleri

İnce tabaka tamir harcı karışımları için bu çalışmada dayanım özelliklerini incelemek amacıyla başlıca üç parametre irdelenmiştir: *Basınç dayanımı*, *eğilme dayanımı* ve *elastisite modülü* değerleri analizi. İnce tabaka tamir harcı karışımlarının 1, 7, 28 ve 90 gün sonrasında basınç dayanımı sonuçları Şekil 11’de özetlenmiştir. Buradaki basınç dayanım değerleri her bir seriden üçer adet test örneğinin bulgularının ortalamasını temsil etmektedir.

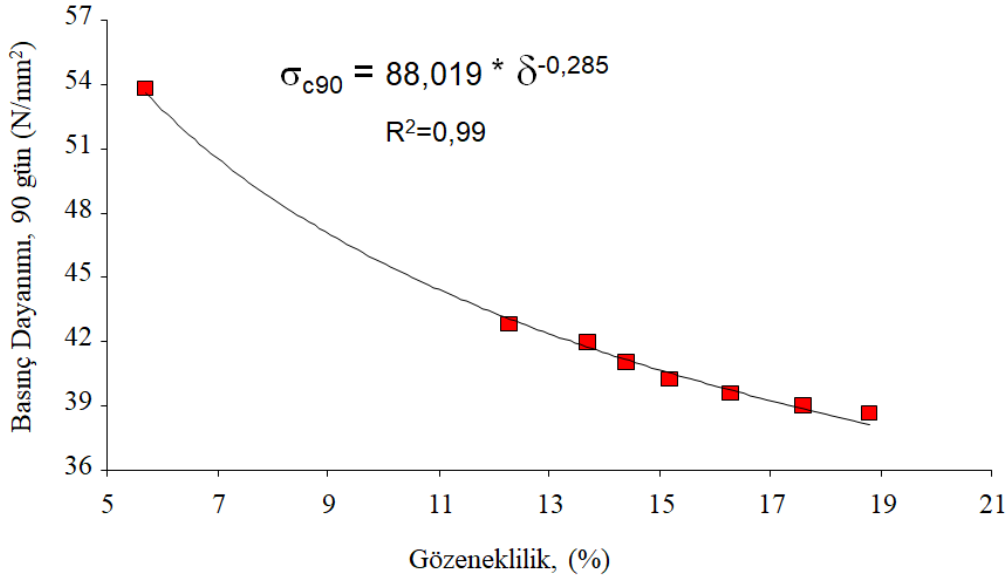
Her bir karışımın basınç dayanım değerleri zamana bağlı olarak artmıştır. Kontrol harcı karışımın zamana bağlı dayanım değerleri 1, 7, 28 ve 90. günde sırasıyla 24,8, 33,9, 48,1 ve 53,8 N/mm² değerlerine ulaşmıştır. Pomzanın karışım bileşeni olarak kullanıldığı test örneklerinde ince boyut pomza oranı arttıkça tüm kür sürelerinde dayanım değerleri artış göstermiştir. İnce boyut pomzanın en düşük oranda kullanıldığı karışımda (R1) zamana bağlı (1, 7, 28 ve 90. gün) basınç dayanım değişimi sırasıyla 14,7, 26,3, 33,5 ve 38,6 N/mm²’dir. Dayanım değerlerinin kontrol karışımına göre sırasıyla %40,7, %22,4, %30,4 ve %28,3 oranlarında daha düşük seviyede kalmıştır. Bununla birlikte, ince boyut pomzanın en yüksek oranda kullanıldığı karışımda (R7) zamana bağlı (1, 7, 28 ve 90. gün) basınç dayanım değişimi ise sırasıyla 19,2, 29,4, 39,0 ve 42,8 N/mm²’dir. Dayanım değerlerinin kontrol karışımına göre sırasıyla %22,6, %13,3, %18,9 ve %20,4 oranlarında daha düşük seviyede kalmıştır.



Şekil 11. İnce Tabaka Tamir Harcı Karışımlarının Basınç Dayanımı Analiz Bulguları

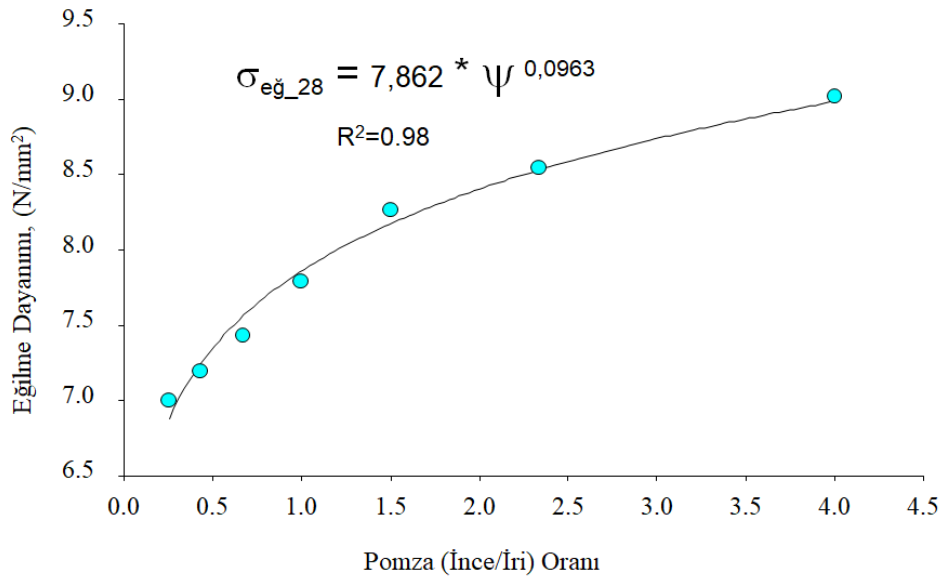
Pomza boyutu küçüldükçe, agrega malzemedeki gözenek oranının düşmesi basınç dayanım değerlerinin artmasına katkı sağlamıştır. Bununla birlikte, 100 mikron boyut altı pomza malzemesi içerisinde 40 mikron ve daha düşük boyutlu tanelerin varlığı, karışımında yer alan kireç ile birlikte pomzanın daha aktif bir puzolanlık görevi sergilediği ve harcın basınç dayanımının iyileşmesine de ilave bir katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca pomza tane boyutunun inceliği, harcın matris yapısında diğer materyaller ile daha yüksek bir bağ dokusu oluşturduğu gözlenmiş olup, dayanımı pozitif yönde etkilemiştir. İnce tabaka uygulama amaçlı tamir harçlarının endüstriyel kullanımları genel olarak literatür bağlamında irdelendiğinde zamana bağlı basınç dayanım değerlerinin genel bir eğilim olarak 1 günlük dayanım değerinin $>18 \text{ N/mm}^2$, 7 günlük dayanım değerinin $>30 \text{ N/mm}^2$ ve 28 günlük dayanım değerinin ise $>35 \text{ N/mm}^2$ olduğu tecrübe edinilmiştir (EMACO 2022; Tarmac, 2022; Curtis, 2001). Bu bağlamda test bulguları analiz edildiğinde, kontrol karışımının basınç dayanım değerleri genel eğilimle örtüşmektedir. Ancak, pomza agregalı tamir harcı örneklerinin ise erken mukavemet sağlama bakımından R6 ve R7 karışımlarının 1 günlük basınç dayanım değerleri örtüşmektedir. 28 günlük basınç dayanım değerleri açısından R4 ve sonrasındaki tüm seri test örneklerinin öngörülebilecek dayanım değerini sağlayabildiği görülmüştür.

Test örneklerinde matris yapıdaki gözeneklilik oranının “ δ ” harcın basınç dayanımına doğrudan etken bir faktör olduğu belirlenmiş olup, bu etkileşim 90 günlük harç örneklerinin dayanımı “ σ_{c90} ” için grafiksel olarak Şekil 12’de verilmiştir. Bu analizden görüldüğü üzere, harcın matris yapısında toplam gözeneklilik artışı dayanımı düşürücü bir rol üstlenmiştir. Matris yapıda %10’luk bir gözeneklilik oranının oluşmasından sonra ileri yaşlarda dahi tamir harcı dayanımını önemli düzeylerde düşüğü ve zayıfladığı görülmüştür. Ancak, agrega bünyesindeki gözenek karakteristiğinde kapalı gözenek oranı arttıkça, harç matrisinde hamur da dahil gözenekliliği artsa bile basınç dayanım değerinden eşdeğer oranda bir zayıflama meydana gelmemektedir. Burada edinilen temel tecrübe, pomza agreganın doğal yapısında yer alan gözeneklerin kapalı ve/veya açık formda olmaları, dayanım performansını doğrudan etkileyen faktörden biri olarak görülebilmektedir. Açık gözenek miktarının yüksek miktarlarda yer alması, kapalı gözenek oranına kıyasla daha düşük dayanımlı harç matrislerinin oluşmasına sebep olabilmektedir.



Şekil 12. Test Örneklerinin Gözeneklilik Oranı 'δ' - Basınç Dayanımı İlişkisi 'σc90' (90 Gün)

Araştırmada bir diğer inceleme, tüm harç karışımlarının 28 gün sonrası eğilme dayanım ($\sigma_{eğ_28}$) değerleri analiz edilmiş olup, karışım tasarımında pomza ince/iri boyut oranına "ψ" bağlı değişimi grafiksel olarak Şekil 13'de gösterilmiştir.

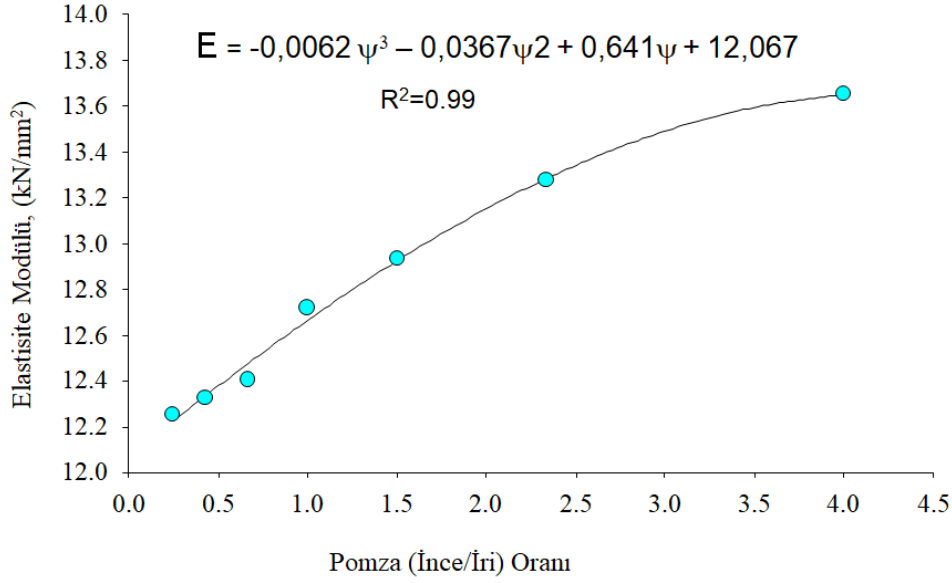


Şekil 13. Pomza (İnce/İri) Oranı 'ψ' - Eğilme Dayanımı "σeğ-28" İlişkisi (28 Gün)

Kontrol harcı örneğinin eğilme dayanım 9,79 N/mm² olup, yaklaşık eşdeğer kür süresinde basınç dayanımının %20,35'i kadardır. İnce boyut pomza malzemenin düşük oranda kullanımına (R1) ait harcın 28 günlük eğilme dayanım değeri ise ortalama 7,0 N/mm²'dir. Bu değerde aynı harç karışımına ait eşdeğer kür süresinde basınç dayanımının %20,9'u kadardır. Ancak, basınç dayanımındaki bulgulara benzer şekilde, karşımda ince boyut pomza miktarı arttığında harcın eğilme dayanım değeri de artmaktadır. İnce boyut pomzanın en yüksek kullanımlı (R7) karışımının eğilme dayanımı kontrol harcı değerinin yaklaşık %8 daha düşük olarak 9,02 N/mm²'dir. Karışım tasarımında pomza agrega boyutu ve kullanım oranına bağlı hemen hemen kontrol harcı eğilme dayanımı değerlerine ulaşılabilceği öngörülebilmiştir.

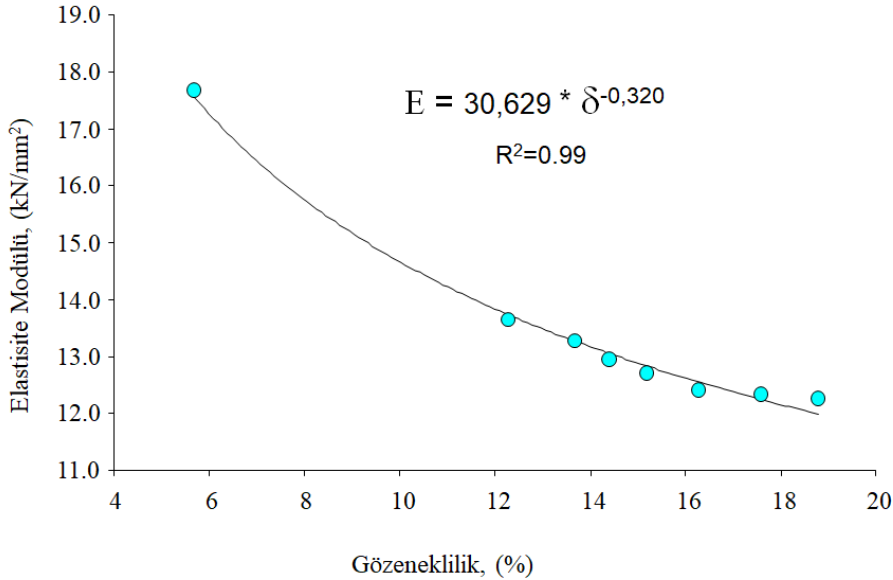
Tamir harcı test örneklerinin artan basınç dayanımlarına bağlı olarak elastisite modülü "E" değerleri de artmaktadır. Kontrol harcı örneğinin elastisite modülü 17,68 kN/mm²'dir. Pomza agregalı tamir harcı test örneklerinin elastisite modülü değerleri ise pomzanın ince/iri oran değişimine bağlı 12,26 – 13,65 kN/mm

aralığındadır. Harç karışımında pomzanın ince boyut oranı arttıkça elastisite modülü de artmaktadır. Bu değişim grafiksel olarak Şekil 14’de analiz edilmiştir.



Şekil 14. Pomza (İnce/İri) Oranı 'ψ' - Elastisite Modülü İlişkisi (28 Gün)

İnce boyutta pomzanın iri boyuta göre karışımdaki varlığı arttıkça, harcın matris yapısında gelişen kohezyona bağlı elastisite özelliğini de geliştirmektedir. Ayrıca, pomzanın ince boyutu ve harç bileşiminde kirecin varlığı ile birlikte gelişen puzolanik aktiviteye bağlı matris yapı daha da mukavemet kazanarak elastisite özelliğini iyileştirmektedir. Ancak, pomza ince/iri boyut oranı 4,00 olan R7 karışımında en yüksek oranda ince boyutlu pomza kullanımıyla birlikte, kontrol harcının elastisite modülü değerinden yaklaşık %23 daha küçük bir değere ulaşılmıştır. Bununla birlikte matris yapının gözeneklilik durumu da harcın elastisite özelliğini doğrudan etkileyen ana faktörler arasındadır. Gözenekliliğe bağlı elastisite değişimi regresyonel bir yaklaşımla Şekil 15’de verilmiştir.



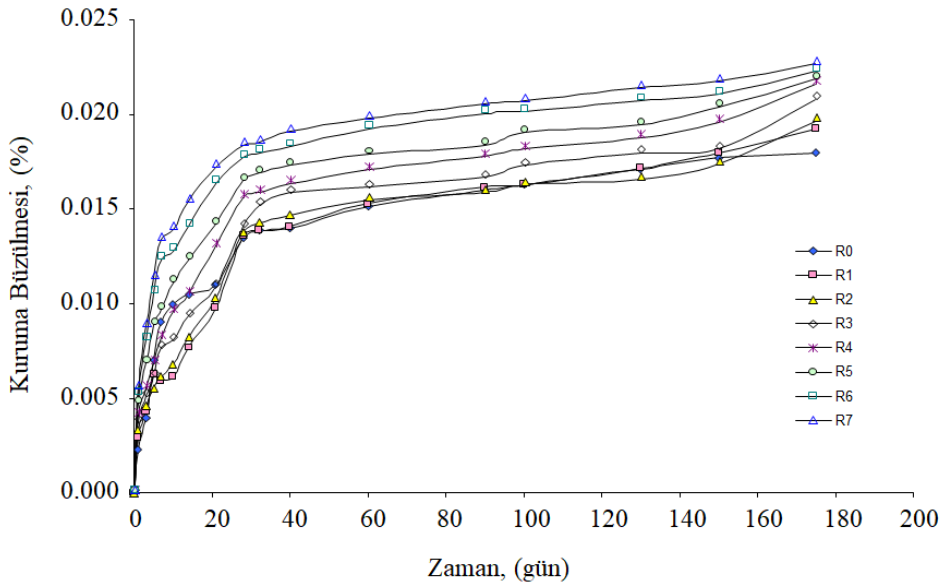
Şekil 15. Test Örneklerinin Gözeneklilik Oranı 'δ' - Elastisite Modülü İlişkisi (28 Gün)

Harcın gözenekliliği arttıkça elastisite modülü değeri düşmektedir. Gözenekliliğin artması matris yapının yük altında daha kırılabilir ve daha yerleşebilir bir nitelik kazanmasını sağlamaktadır. Bu da harcın elastisite özelliğini zayıflatan bir etki olarak görülebilmektedir. Tamir harcı uygulamalarında özellikle yüksek elastisite değerinin öngörüldüğü durumlarda, gözenekliliği düşük harç tasarımları kullanmak önem kazanırken, birim yoğunluğu düşük

ancak elastisite modülü yüksek bir malzeme uygulanması gerektiği durumlar için bileşiminde ince boyut pomzanın yer aldığı harç karışımları daha etkin bir sonuç oluşturacağı bu analiz bulgularından öngörülebilir.

Rötre Özellikleri

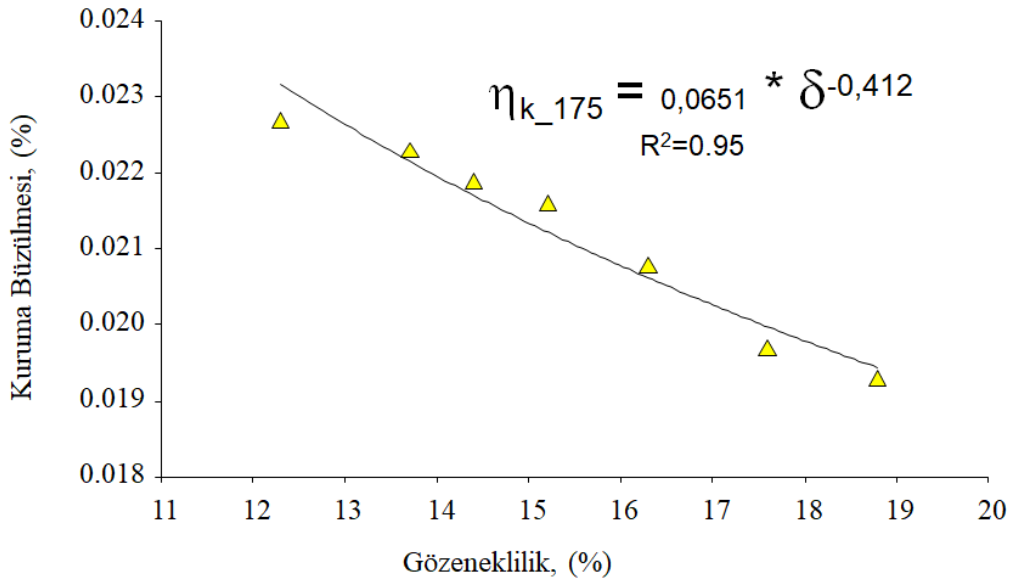
Beton onarım malzemeleri ve/veya tamir harcı performansı üzerinde en önemli etkiye sahip özelliğin genel olarak kuruma büzülmesi olduğu kaydedilmiştir (Mirza et al., 2002). Harç karışımlarının zamana bağlı kuruma büzülmesi analiz bulguları Şekil 16'de gösterilmiştir. Bu analizde her bir değer en az üç ölçüm değerinin ortalaması olarak değerlendirilmiştir. Pomza agreganın yer almadığı tamir harcı örneğinde ilk günlerde kuruma büzülme artışı hızlı olup, ilerleyen zamanlarda büzülme hızı düşmektedir. Bu olgunun pomzanın kullanıldığı tüm karışımlarda daha belirgin bir eğilim olduğu görülmektedir. Kuruma büzülmesi testleri tüm test örnekleri için 175 gün süreyle yapılmıştır. 21. günden sonra kuruma büzülme artış hızlarında belirgin bir yavaşlamanın olduğu görülmekle birlikte, 60'ıncı günden sonra neredeyse ihmal edilebilir düzeyde düşük bir hızla artışın seyrettiği belirlenmiştir. Kontrol harcının 175 gün sonrasında kuruma büzülmesi ortalama %0,018 iken pomza agregalı karışımların kuruma büzülmesi oranı %0,0193-%0,0227 aralığındadır. Her ne kadar pomza agregalı örneklerin kuruma büzülmesi oranları kontrol harcından görece yüksek bir değerde olmasına rağmen, elde edilen sayısal büyüklükler rötre açısından kabul edilebilir düzeydedir. Karışımındaki pomza ince boyut miktarı arttıkça, harcın kuruma büzülmesi de artmaktadır. Genel bir eğilim olarak gözenekliliği yüksek bir agrega malzemenin ince tabaka harçlarda kullanımında rötre değerlerinin yüksek olabileceği beklentisi kuvvetle ihtimaldir. Ancak, harç tasarımında gerek agrega boyutu, malzemeler arasındaki uyum ve gerekse katkı olarak kullanılan bileşenlerin hidrasyon sürecinde oluşturacağı reaksiyonlara bağlı olarak, harcın priz süresi ve sonrasında kuruma büzülmesi değerleri kontrol edilebilir ve arzu edilen seviyelerde değişim göstermesi yapılacak ArGe çalışmalarıyla mümkün kılınabilmektedir. Harç tasarımında kullanılan rötre önleyici polimer katkının da etkisiyle tüm harç örneklerinde düşük seviyelerde kabul edilebilecek bir kuruma büzülme olgusu elde edilmiştir. ASTM C928-92a (2005) standardına göre, beton onarımları için hızlı sertleşen çimento bağlayıcılı harç örneklerinin kuruma büzülmesi veya genişemesinin başlangıç uzunluklarının %0,15'ini geçmemesi ve ikisinin toplam mutlak değerinin, diğer bir değişle büzülme ve genişemenin %0,20'yi geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, pomza agregalı tamir harcı karışımlarının kuruma büzülmesi için bu genel trendi sağladığı görülmektedir.



Şekil 16. Test Örneklerinin Zamana Bağlı Kuruma Büzülme Oranı Değişimi

Bilindiği gibi, çimentonun ana bağlayıcı olarak kullanıldığı ince tabaka harç tasarımlarında, hidrasyon sürecinde ve sonrasında bünyede mevcut olan suyun zamanla kaybı sonucu, matris yapıda büzülme olgusu gelişebilmektedir. Bu sebeple, karışımda yer alan malzeme bileşenlerinin karakteristiklerine de bağlı matris yapının gerek gözenekliliği gerekse geçirgenlik özelliği, kuruma büzülme davranışını önemli ölçekte etkilemektedir. Bu bağlamda, gözenekliliği en düşük olan matris yapıyı oluşturan karışımların düşük geçirgenlik karakteristiği sergilemesi olası bir sonuçtur. Ancak, tamir harcı örneklerinde pomzanın ince boyutta kullanımı arttığında, azalan gözeneklilik oranına rağmen kuruma büzülmesinin arttığı sonucu elde edilmiştir. Pomzanın orijinde doğal gözenekli yapısı sebebiyle tane boyutu küçültülmesine rağmen agrega yapısında gözenekliliği tamamen

kaybolmamaktadır. Bununla birlikte, toplam gözeneklilik içerisinde ince boyutta pomza malzemelerin kapalı gözenek oranı açık gözeneklilik durumuna göre daha yüksektir. Bu da karma suyu sonrasında matris yapıda daha uzun sürede su tutulumunu sağlamakta ve bünyeden su atılım süreci de görece daha uzun zaman almaktadır. Bünyeden suyun atılma süresi uzadıkça, matris yapının büzülme davranışının da devam edebildiği görülmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak, ince taneli, su emme kapasitesi yüksek ve aynı zamanda gözenekliliği olan agrega malzemelerin ince tabaka harç tasarımlarında kuruma büzülme davranışlarının da kontrol harcı değerlerine göre farklı bir davranış sergileyebilmesi mümkün olabilmektedir. Pomza agregalı tamir harçları için hazırlanan test örneklerinin kuruma büzülme “ η_k ” davranışındaki bu değişim, harcın gözeneklilik “ δ ” oranına bağlı olarak analiz edilmiş olup, 175 gün sonrası değerlere ilişkin grafiksel değerlendirme Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Gözeneklilik Oranı “ δ ”- Kuruma Büzülme Oranı “ η_k ” İlişkisi

Grafiksel analiz irdelendiği görüldüğü üzere, tamir harcı örneklerinde pomza ince boyut oranı iri boyuta kıyasla arttığında, kuruma büzülme değerlerinde bir düşme görülmektedir. Bu analizde gözenekliliğin artışı, karışımdaki iri taneli pomza agregaların varlığı ve matris yapıda açık gözenek oranının yüksek oluşuna bağlıdır. Gözeneklilik oranının düşük olduğu pomzalı karışımlar ince boyutlu pomza agrega malzemelerin yüksek oranda olduğu karışımlara ait olup, kapalı gözenek varlığı daha yüksek olan matris yapıları temsil etmektedir. Kapalı gözenek miktarının artışı, matris yapıda suyun daha uzun sürede tutulması ve dolayısıyla suyun daha uzun bir zaman periyodunda kaybı, kısmen daha yüksek kuruma büzülme davranışı sergilemesine neden olmaktadır. Ancak, test bulgularında nihai olarak elde edilen kuruma büzülme oranı değerleri gerek ASTM C 928 gerekse endüstriyel olarak kabul edilebilen maksimum $\%0,15$ oran şartını sağladığı için, uygun birer rötne değerine sahip olduğu görülebilmektedir. Bununla birlikte, ölçülen kuruma büzülme oranı değerleri ASTM C 928 (2005) standardında öngörülen limit $\%0,15</math>'lik değer yaklaşık 6,5 kat daha az oranında gerçekleştiği için bu harç tasarımları rötresiz harç olarak düşünülebilir.$

Kuruma büzülmesinin yoğun olarak geliştiği harç uygulama yüzeylerinde çatlak oluşumları genelde gözlenen bir durumdur. Mirza et al. (2002) beton onarımı için geliştirilen harçlarda çatlama ve/veya ayrılmanın çoğunluğunun ilk 3 gün içinde meydana geldiğini ve bundan sonraki zaman diliminde stabilize olma eğilimin olduğunu belirtmişlerdir. Bu karakteristik davranışın, yüksek derecede büzülme gösteren harçlarda belirgin bir şekilde gözlemlendiğini vurgulamışlardır. Çatlak oluşumlarının genellikle çok hızlı kuruma davranışı gösteren yüzeylerde kısa bir sürede oluşurken, su atılım süresi uzayan harçlarda kuruma büzülmesi değerine bağlı olarak çatlak oluşumları da zamanla gelişim gösterebilmektedir. Bu olgunun genel bir eğilim olarak kuruma büzülme oranı $\%0,15</math>'ten fazla olduğu harç yüzeylerinde belirginlik kazandığı teknik olarak tecrübe edinilmiştir. Ancak, çalışma kapsamında analiz yapılan tüm test örneklerinde kuruma büzülme davranışı sonrası çatlak oluşumları, mikroyapı analizleriyle değerlendirilmiş olup, numune yüzeylerinde herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır.$

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, volkanik orijinli ve doğal gözenekli bir yapıya sahip olan pomza kayacının ince tabaka tiksotropik rötresiz tamir harçlarında kullanımı ile harcın performansına etkisi incelenmiştir. Laboratuvar ortamında test edilen 8 farklı karışım tasarımına sahip pomza agregalı polimer modifiyeli çimento esaslı tamir harcı örneklerinin detaylı performans bulguları tartışılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre;

- 1- Beklenildiği gibi pomza kullanımı ile birlikte tamir harcı örneklerinin taze ve sertleşmiş yığın yoğunlukları azalmıştır.
- 2- Benzer şekilde gözenekli ve hafif yapıdaki pomza agregası tamir harcının gözeneklilik oranını artırmıştır.
- 3- Yapılan mikroskobik analizlerde agregaların harç örnekleri içerisinde homojen dağılabildiğini göstermiştir.
- 4- Hafif yapısı sayesinde sertleşmiş harçlarda da hafif harç formunu oluşturabilen pomza agregası, bu çalışmada üretilen tamir harçlarının da beklenildiği üzere hafiflemesini sağlamış buna karşın birim hacim ağırlıkları düşen harçların yine beklenildiği üzere dayanımlarında kontrol harcına kıyasla düşüş kaydedilmiştir.
- 5- Bununla birlikte pomzanın mikronize boyutta kullanımının puzolanik özelliği olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada da ince pomza miktarının artması ile uzun dönem basınç dayanımlarının iyileştiği tespit edilmiştir.
- 6- Benzer şekilde ince pomza miktarındaki artış eğilme dayanımında da artışa sebep olmuştur.
- 7- Tamir harcı test örneklerinin artan basınç dayanımlarına bağlı olarak elastisite modülü “E” değerleri de artmaktadır.
- 8- Kontrol harcının 175 gün sonrasında kuruma büzülmesi ortalama %0,018 iken pomza agregalı karışımların kuruma büzülmesi oranı %0,0193-%0,0227 aralığındadır. Her ne kadar pomza agregalı örneklerin kuruma büzülmesi oranları kontrol harcından görece yüksek bir değerde olmasına rağmen, elde edilen sayısal büyüklükler rötre açısından kabul edilebilir düzeydedir. ASTM C928-92a (2005) standardına göre, beton onarımları için hızlı sertleşen çimento bağlayıcı harç örneklerinin kuruma büzülmesi veya genleşmesinin başlangıç uzunluklarının %0,15’ini geçmemesi ve ikisinin toplam mutlak değerinin, diğer bir deyişle büzülme ve genleşmenin %0,20’yi geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, pomza agregalı tamir harcı karışımlarının kuruma büzülmesi için bu genel trendi sağladığı görülmektedir.
- 9- Bununla birlikte, ölçülen kuruma büzülme oranı değerleri ASTM C 928 (2005) standardında öngörülen limit %0,15’lik değerın yaklaşık 6,5 kat daha az oranında gerçekleştiği için bu harç tasarımları rötresiz harç olarak düşünülebilir.

Pomzanın uygun miktarlarda farklı boyut dağılımına sahip bir şekilde tamir harcı karışımlarında kullanımı, tiksotropik özellikte sarkma ve akma yapmayan, rötre davranışı sergilemeyen ve ayrıca ilgili standartların öngördüğü teknik limitleri sağlayabilen harçların elde edilebileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, A. & Motamedi, M. (2017). Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215>
- ASTM, (2021). ASTM C348, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, 2021 Edition, April 1,.
- ASTM, (2018). ASTM C596, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, , ASTM International, West Conshohocken, PA,.
- ASTM, (2017). ASTM C109, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA,.
- ASTM, (2017). ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, , ASTM International, West Conshohocken, PA,.
- ASTM, (2005). ASTM C928, Standard Specification for Packaged, Dry, Rapid-Hardening Cementitious Materials for Concrete Repairs, ASTM International, 2005 Edition, May 1,.
- Benharzallah, K., Bouhicha, M., Kenai, S. & Courard, L. (2018). Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and Stipa tenacissima microfibers plant. *Construction and Building Materials*, 171, 950–959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200>
- Curtis, (2001). Lightweight Repair Mortar, *Fast-setting repair mortar*, A technical Report, ISSUE 02ASS, <https://curtis-enterprises.com/html/Industrial%20Flooring/Mortars%20&%20Grouts/Repair%20Mortars/Lightweight%20Repair%20Mortar.pdf> Accessed 20.03.22.

- EMACO, (2022). EMACO S88C (Thixotropic), Cementitious trowel applied shrinkage compensated structural repair mortar, A technical document, BASF Construction Chemicals New Zealand Ltd.
- Fixa, (2017). Rötresiz grout harçları ne tip uygulamalarda kullanılır?.. <http://fixa.com.tr/?sss/rotresiz-grout-harclari-ne-tip-uygulamalarda-kullanilir> Accessed 20.03.22.
- Kawashima, S. & Shah, S. P. (2011). Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 33, 2, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>
- Mirza J., Mirza M. S. & Lapointe R. (2002). Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates. *Construction and Building Materials*, 16(6), 365–374. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00027-2)
- Mohammadi, M., Moghtadaei, R. M. & Samani, R. A. (2014). Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.048>
- Pekmezci, B. Y., & Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, Mayıs-Haziran, 69, 82.
- Rapoport, J. R. & Shah, S. P. (2005). Cast-in-place cellulose fiber-reinforced cement paste, mortar, and concrete. *ACI Materials Journal*, 102, 5, 299–306. Retrieved from <https://www.proquest.com/scholarly-journals/cast-place-cellulose-fiber-reinforced-cement/docview/197991522/se-2?accountid=141837>
- Shaikh, F. U. A. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.05.009>
- Tarmac, (2022). “Pozament Concrete Repair”, Pozament – Tarmac Building Products Ltd, Swains Park Industrial Estate. www.pozament.co.uk Accessed 20.03.22.
- Tayeh, B. A., Bakar, B. H. A. & Johari, M. A. M. (2013). The relationship between substrate roughness parameters and bond strength of ultra-high-performance fiber concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(16), 1790–1810. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.761543>
- Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., Sanjuán, M. A. & England, G. L. (2005). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005>
- TSE, (2015). TS EN 459-1, Yapı kireci - Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri,.
- Xiong, G., Liu, J. & Li, G. (2002). A way for improving interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1877–1881. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00840-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00840-2)



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.03.2022
Kabul Tarihi : 20.05.2022

Received Date : 31.03.2022
Accepted Date : 20.05.2022

DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BİTKİ YAPRAĞINDAKİ HASTALIKLARIN SINIFLANDIRILMASI

CLASSIFICATION OF PLANT LEAF DISEASES USING DEEP LEARNING METHODS

*Ipek ATİK*¹ (ORCID: 0000-0002-9761-1347)

¹ Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ipek ATİK, ipek.atik@gibtu.edu.tr,

ÖZET

Bitkilerin yetiştirilme süreci zahmetli ve uzun süren bir işlemdir. Bitki yetiştiriciliği ile uğraşan kişilerin en önemli sorunlarından biri bitki hastalığıdır. Hastalıkla mücadelede ilk olarak yapılması gereken hastalığın tanınmasıdır. Hastalıkla mücadelede hastalığın doğru bir şekilde tespit edip gereken önlemleri hızlı bir şekilde alabilmek oldukça önemlidir. Çalışmada domates yapraklarındaki hastalık belirlenmesinde derin öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setinde 9 hastalıklı ve 1 sağlıklı sınıftan oluşan toplam 18.160 domates yaprağı görüntüsü bulunmaktadır. Görüntü hastalık sınıflandırmasında derin evrişimli sinir ağları (ESA) modellerden ön eğitilmiş ağlar olan GoogleNet, AlexNet, SqueezeNet, ShuffleNet ve ResNet-18 modelleri kullanılmıştır. Analizlerde veri seti %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test verisi olarak ayrılmıştır. Eğitilmiş ağların test verisi ile performans ölçütleri doğruluk, kesinlik, özgüllük ve f-puanı değerleri hesaplanmıştır. Modellerin doğruluk oranları AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet ve ResNet-18 için sırasıyla %93,93, %95,18, %94,82, %94,29 ve %81,79 olarak elde edilmiştir. Yapılan analizlere göre ön eğitilmiş ağların domates yaprağı hastalık sınıflandırma çalışmasında, en iyi performans gösteren modelin GoogleNet olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Derin Öğrenme, evrişimsel sinir ağları, görüntü sınıflandırma, domates bitkisi, hastalık

ABSTRACT

The process of growing plants is laborious and time-consuming. Plant diseases are one of the most significant problems facing people who deal with plant breeding. The first thing to do in the fight against the disease is to recognize the disease. It is essential to detect the disease quickly and take the necessary measures quickly. In the study, deep learning methods were applied to determine the disease in tomato leaves. The data set included 18,160 images of tomato leaves, which were divided into 10 classes. GoogleNet, AlexNet, SqueezeNet, ShuffleNet, and ResNet-18 networks, which are pre-trained deep convolutional neural networks (CNN) models, were used to classify images of diseases. In the models, 70% of the training dataset is used for training, 15% for validation, and 15% for testing. Based on the test data of the trained networks, accuracy, precision, specificity, and f-score values were calculated. For AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet and ResNet-18, the accuracy rates were 93.93%, 95.18%, 94.82%, 94.29% and 81.79%, respectively. A study of pre-trained networks for the classification of tomato leaf diseases showed that GoogleNet was the highest performing model.

Keywords: Deep Learning, convolutional neural networks, image classification, tomato plant, disease

GİRİŞ

Dünyada beş yüz bin den fazla bitki türü olduğu bilinmektedir. Her geçen gün yeni bitki türleri keşfedilirken bazı bitki türleri de yok olmaktadır (Arivazhagan, Shebiah, Ananthi, & Varthini, 2013). Bitki türlerinin korunup gelecek nesillere aktarılabilmesi ekolojik denge açısından oldukça önemlidir. Dünyada değişen iklim koşulları, hava kirliliği, yetiştirme aşamasında bakteri, mantar ve virüs saldırılarına maruz kalma gibi sebeplere bağlı olarak bitkilerde hastalıklar meydana gelmektedir. Günümüzde bitkilerdeki birçok hastalığın tespiti geleneksel yöntemler ile yapılmaktadır (Brahimi, Boukhalfa, & Moussaoui, 2017a). Hastalık belirlemede üretici hastalığı fark edebilir ama tanımlaması zahmetlidir. Bazı durumlarda hastalık tanımını doğru yapsa da hastalığı gidermek için uygulanması gereken yöntem hakkında bilgi sahibi olmayabilir (Ferentinos, 2018; Sannakki, Rajpurohit, Sumira, & Venkatesh, 2013).

Gelişen teknoloji ve yapay zekâ uygulamaları birçok alanda olduğu gibi tarım alanında hastalık tespiti ve bitki türü sınıflandırma çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır (Ferentinos, 2018). Yapay zeka yöntemleri hızlı ve yüksek güvenilirlikle sınıflandırma çalışmaları ile zaman ve iş gücü bakımından tasarruf sağlamaktadır (Arsenovic, Karanovic, Sladojevic, Anderla, & Stefanovic, 2019). Çalışmada domates bitkisinin yapraklarında görülen hastalık sınıflandırma çalışması yapılmıştır. Domates bitkisi subtropikal, tropikal ve ılıman bölgelerde yetişen zengin besin değeri olan bir sebzedir. Birçok kullanım alanı olduğu için geniş bir pazar payına sahiptir. Sağlıklı ve verimli üretim için bakım gerektiren bir sebzedir (Durmuş, Güneş, & Kırıcı, 2017; H. Sabrol & K. Satish, 2016). Bu bağlamda veri setinde RGB renkte gerçek yaprak görüntülerinden oluşan 10 farklı sınıfta toplam 18160 görüntü bulunmaktadır (Kaggle, 2021). Çalışmada ön eğitilmiş ESA algoritmalarından GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet, AlexNet ve ResNet-18 algoritmaları ile hastalık sınıfı belirleme çalışması yapılmıştır. Ön eğitilmiş modellerin başarı performansları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın Önemi;

- Bitki üretiminde verimi etkileyen en önemli faktörlerden biri hastalıktır. Hastalığın geleneksel yöntemlerle tespiti uzun, zaman alıcı, maliyetli ve ek iş gücü gerektiren bir işlemdir.
- Derin öğrenme yöntemleri hastalık tespiti hızlı ve doğru şekilde analiz edilebilmektedir.
- Hastalık tespitinde uzman kişilere ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Çalışmada ön eğitilmiş evrişimli sinir ağlarının performans karşılaştırması detaylı olarak incelenmiştir.
- Domates bitkisinin yaprağında görülen hastalık konusunda birçok sınıflandırma çalışması yapılmıştır. Çalışma diğer modellerden yüksek performans göstermesi ve beş farklı ön eğitilmiş model sonuçlarının da kıyaslanması açısından literatüre katkı sağlayacaktır.

Çalışmada ilerleyen bölümlerde konu hakkında literatür araştırması yapılmış, yapılan çalışmalar hakkında araştırma sonuçlarına yer verilmiştir. Materyal ve metot başlığı altında önerilen derin öğrenme modeli, kullanılan veri seti açıklanmış, ön eğitilmiş evrişimsel sinir ağları, performans ölçütleri hakkında bilgi verilmiştir. Bulgular bölümünde çalışmada analizlerden elde edilen deneysel sonuçlara verilmiştir. Tartışma başlığı altında bitki yaprağı sınıflandırma çalışmaları ile yapılan çalışmalarla başarı performansları karşılaştırılmıştır. Ve son olarak sonuçlar bölümünde çalışmadan elde edilen çıkarımlar özetlenmiş ilerideki yapılacak çalışmalardan bahsedilmiştir.

Literatür İncelemesi

Bitki hastalık sınıflandırması konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Derin algoritma yöntemleri hızlı ve güvenilir performans göstermesi sebebi ile çalışmalarda tercih edilmektedir. Bitki hastalık sınıflandırma alanında yapılmış çalışmalar, çalışmada kullanılan model, veri seti ve doğruluk sonuçları bu bölümde özetlenmiştir.

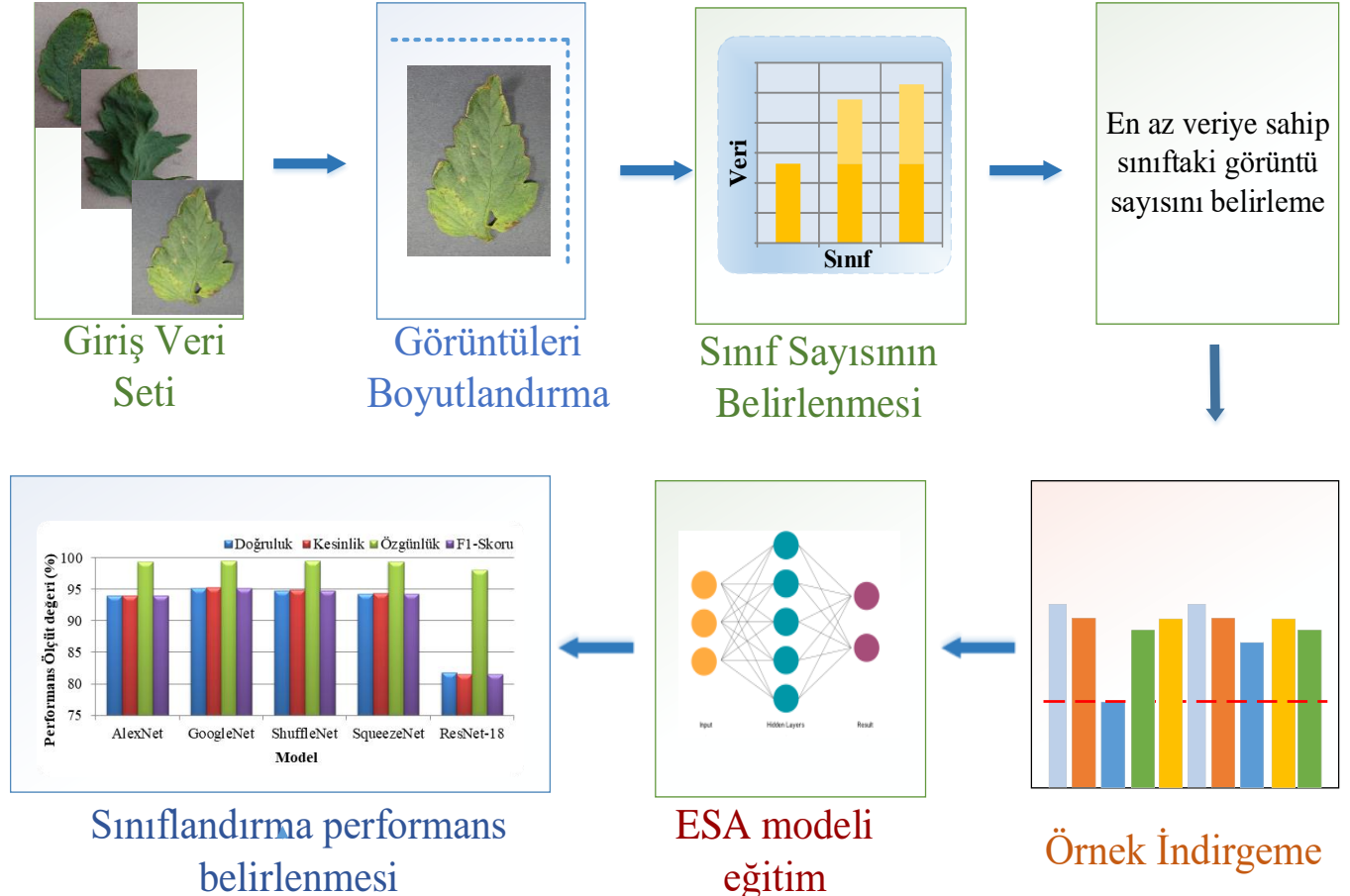
Liu ve diğ. (Liu, Tang, Zhou, Meng, & Dong, 2016) 13.689 görüntüden oluşan 4 sınıflı bir çalışma yapmıştır. Çalışmada AlexNet ve GoogleNet yöntemlerini kullanmış %97,92 doğruluk oranı elde etmiştir. Wang ve diğ. (Wang, Sun, & Wang, 2017) 2086 görüntüden oluşan 4 sınıf için sınıflandırma çalışması yapmıştır. Çalışmada VGG16, VGG19, Inception V3 ve ResNet50 yöntemlerini kullanmış ve %90,42 doğruluk oranı elde etmiştir. Ferentinos (Ferentinos, 2018) 87.848 görüntüden oluşan 58 sınıflı veri setini sınıflandırmıştır. Çalışmada VGGNet yöntemini kullanmış ve %99,53 doğruluk oranı elde etmiştir. Lu, Y. et al.(Liu et al., 2016) %95,48 başarı oranını AlexNet ile elde etmiştir. Çalışmada 500 görüntü ve 10 sınıftan oluşan veri seti kullanılmıştır. Mohanty ve diğ. (Mohanty, Hughes, & Salathé, 2016) AlexNet ve GoogleNet yöntemini kullanmış ve %99,34 başarı oranı elde etmiştir. Çalışmada 38 sınıflı 54.308 görüntüden oluşan veri seti kullanmıştır. Sladojevic ve diğ. (Sladojevic,

Arsenovic, Anderla, Culibrk, & Stefanović, 2016) CaffeNet yöntemini kullanmış ve %96,30 başarı oranı elde etmiştir. Çalışmada 4483 görüntüden oluşan 15 sınıflık veri seti kullanmıştır. Brahimi, M. et al.(Brahimi, Boukhalfa, & Moussaoui, 2017b) AlexNet, DenseNet 169, Inception V3, ResNet 34, SqueezeNet 1.1 ve VGG 13 yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmada %99,76 başarı oranı elde ettiği çalışmada 54,323 görüntüden oluşan 38 sınıflı veri setini kullanmıştır. Geetharamani ve diğ. (G & J, 2019) ESA yöntemini kullandığı 38 sınıftan oluşan 54.323 göründen oluşan veri setinde %99,76 doğruluk oranı elde etmiştir. Too ve diğ. (Too, Yujian, Njuki, & Yingchun, 2019) VGG16, Inception-v4, ResNet50, ResNet101, ResNet152 ve DenseNet121 yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmada 38 sınıf ve 54.306 görüntüden oluşan veri seti kullanmış ve %99,75 doğruluk oranı elde etmiştir. Arsenovic ve diğ. (Arsenovic et al., 2019) AlexNet, VGG19, Inceptionv3, DenseNet201 ve ResNet152 yöntemlerini kullanmış ve %93,67 doğruluk oranı elde ettiği çalışmada 139.011 ve 42 sınıftan oluşan veri seti kullanmıştır.

Yapılan çalışmalardan incelendiğinde yapılan çalışmaların büyük veri setlerinde yüksek doğruluk oranıyla hastalık tespit ve sınıflandırma çalışması yapılabildiği görülmektedir. Bitkilerde hastalık sınıflandırma konusunda yüksek performans sağlamasından dolayı yapılan bu çalışmada da ön eğitilmiş ESA modelleri tercih edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada uygulanan sistemin genel aşamaları Şekil 1'de gösterilmektedir. Çalışmada domates yaprak görüntülerinin bulunduğu 10 sınıflık veri seti kullanılmıştır (Kaggle, 2021). Veri setindeki görüntüler ilk olarak ön işlem aşamasında yeniden boyutlandırılmıştır. Tüm görüntüler eğitim modelinin giriş boyutuna getirilmiştir. Veri etiketlerine göre sınıf sayısı belirlenmiştir. Veri setinde sınıf örneklerini en düşük elemanlı sınıfa göre eşitlemek örnek indirgeme (undersampling) yöntemi kullanılmıştır. Alınan görüntülerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test verisi olarak ayrılmıştır. Eğitim seti ile model eğitilip, modelin hiç görmediği test verileri ile test edilip sınıf etiketi belirlenmiştir.

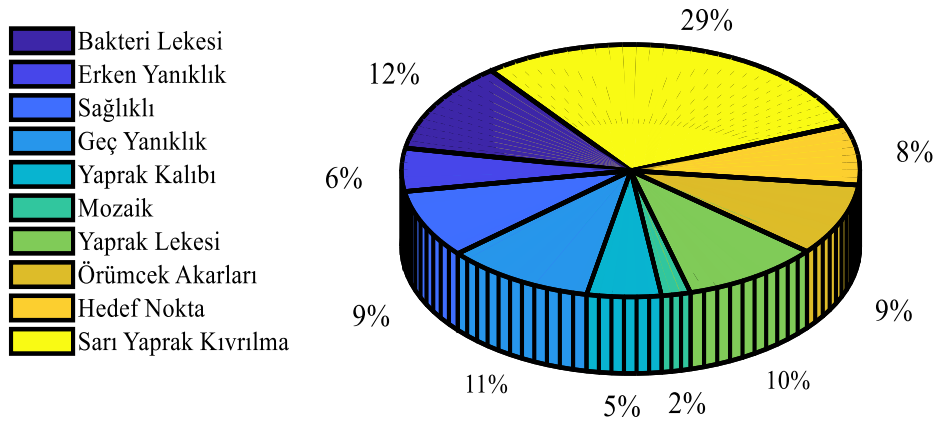


Veri Seti

Açık erişim veri tabanında alınan toplam 10 sınıf ve toplam 18.160 domates yaprak görüntüsü bulunmaktadır (Kaggle, 2021) . Veri setinde bulunan her bir sınıfa ait örnek görüntü ve toplam veri setinde her sınıfın yüzdelik oranı sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Ayrıca her sınıfa ait görüntü sayıları Tablo 1'de belirtilmiştir.



Şekil 2. Veri Setinde Bulunan Her Sınıf İçin Örnek Görüntüler (Kaggle, 2021)



Şekil 3. Veri seti sınıf verilerinin dağılımı (Kaggle, 2021)

Tablo 1. Veri Setinde Bulunan Sınıflara Ait Görüntü Sayısı (Kaggle, 2021)

Sınıf	Görüntü Sayısı	Sınıf	Görüntü Sayısı
Bakteri Lekesi	2127	Mozaik	373
Erken Yanıklık	1000	Septoria Yaprak Lekesi	1771
Sağlıklı	1591	Örümcek Akarları	1676
Geç Yanıklık	1909	Hedef Nokta	1404
Yaprak Kalıbı	952	Sarı Yaprak Kıvrılma	5357

Veri seti bakteri lekesi, mozaik, erken yanıklık, septoria yaprak lekesi, sağlıklı, örümcek akarları, geç yanıklık, hedef nokta, yaprak kalıbı ve sarı yaprak kıvrılma sınıfından oluşmaktadır. Veri setinde bulunan toplam 18160 görüntünün 2127 adeti bakteri lekesi, 1000 adeti erken yanıklık, 1591 adeti sağlıklı, 1909

adeti geç yanıklık, 952 adeti yaprak kalıbı, 373 adeti mozaik, 1771 adeti septoria yaprak lekesi, 1676 adeti örümcek akarı, 1404 adeti hedef nokta ve 5357 adeti sarı yaprak kıvrılma yaprak görüntülerinden oluşmaktadır. Veri setinde her görüntünün yüzdelik olarak dağılımı incelendiğinde en yüksek ondalık değere %29 ile sarı yaprak kıvrılma sınıfından oluşurken en az veriye sahip sınıf %2 ile mozaik sınıfıdır. Çalışmada dengeli veri seti yapabilmek için örnekleme indirgeme işlemi yapılmıştır.

Ön eğitilmiş ESA Modelleri

Ön eğitilmiş ESA'lar bir milyondan fazla sayıda görüntü üzerinde eğitilmiştir. Ön eğitilmiş ESA'lar yeni veri kümesini kullanarak eğitilip tipik bir sınıflandırma için uyarlanabilir ve ince ayar yapılabilir. Çalışmada AlexNet, GoogleNet, SqueezeNet, ShuffleNet ve ResNet-18 ön eğitilmiş ESA modelleri ile sınıflandırma çalışması yapılmıştır. Bu modellere ait derinlik, parametre sayısı ve giriş görüntü boyutu verileri Tablo 2'de özetlenmiştir (Krizhevsky, 2012; Szegedy, Ioffe, Vanhoucke, & Alemi, 2017; Ucar & Korkmaz, 2020; X. Zhang, Zhou, Lin, & Sun, 2018).

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Ön Eğitilmiş Modellere Ait Derinlik, Parametre Sayısı ve Giriş Görüntü Boyutu (Acikgoz, 2022; Atik, 2022a)

Model	Derinlik	Parametre sayısı (Milyon)	Giriş görüntü boyutu
SqueezeNet	18	1.24	227-by-227
GoogleNet	22	7.0	224-by-224
ResNet18	18	11.7	224-by-224
ShuffleNet	50	1.4	224-by-224
AlexNet	8	61.0	227-by-227

Öğrenme parametresinin artması modelin eğitim süresinin uzamasına sebep olur. Örneğin GoogleNet modeli Alexnet'ten 12 kat daha fazla parametre içerir. SqueezeNet mimarisi AlexNet mimarisinden yaklaşık 50 kat daha az parametre sahiptir. Veri setindeki görüntüler modelin giriş boyutuna getirilmelidir (Szegedy et al., 2017; Ucar & Korkmaz, 2020; X. Zhang et al., 2018).

Performans Ölçüm Metrikleri

Ön eğitilmiş modeller ile eğitilen veri setlerinin doğru sınıflandırma oranını hesaplamak için doğru sınıfa atılan veri bilgisinin elde edilmesi gerekir. Şekil 4'deki gibi hata matrisi oluşturulur. Hata matrisinde tahmin ve gerçek değerlerin gerçek pozitif, gerçek negatif, yanlış negatif ve yanlış pozitif parametreleri verilir. Bu parametre değerlerine göre doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F-skor performans ölçüm metrikleri hesaplanır. Tablo 3'de bu metrikler ve eşitlikleri verilmiştir (Atik, 2022b; Öter, Aydoğan, Kıymık, & Tuncel, 2016; Öztürk & Paksoy, 2018; Ucar & Korkmaz, 2020).

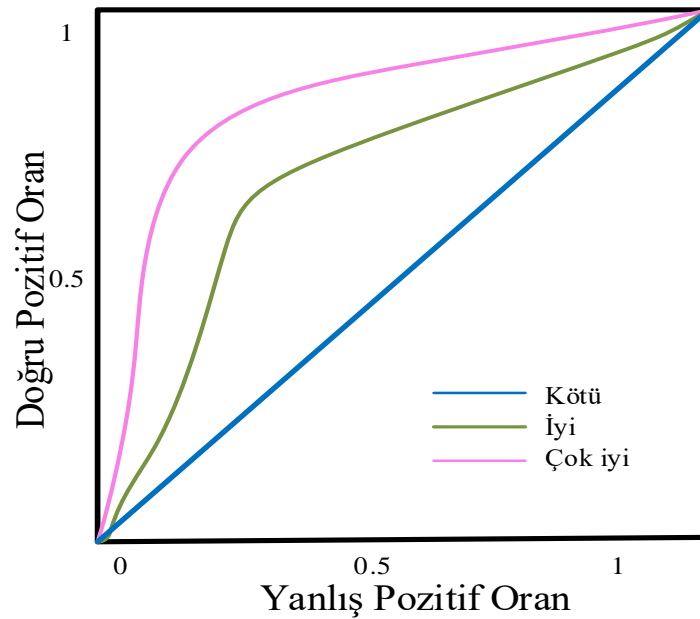
		Tahmin	
		Pozitif	Negatif
Gerçek	Pozitif	Gerçek pozitif (GP)	Yanlış negatif (YN)
	Negatif	Yanlış pozitif (YP)	Gerçek negatif (GN)

Şekil 4. Hata Matrisi (Atik, 2022a)

Modelin sınıflandırma performansını değerlendirirken kullanılan ifadelerden biri de ROC (Alıcı işlem karakteristikleri, Receiver Operating Characteristic) eğrisi yöntemidir. ROC eğrisi doğru pozitif oran (duyarlılık) ve yanlış pozitif oran (1-özgüllük) parametrelerinin oranının grafiğidir. ROC puanı 1 (bir) olduğunda, pozitifler negatiflerden mükemmel bir şekilde ayrılmıştır, ROC puanı 0 (sıfır) olduğunda ise herhangi bir pozitif bulunmadığı çıkarımı yapılır. Kötü, iyi ve çok iyi (mükemmel) performans gösteren testlere ait ROC eğrileri Şekil 5'de verilmiştir (Hoo, Candlish, & Teare, 2017).

Tablo 3. Sınıflandırma Çalışmasında Kullanılan Performans Ölçüm Metrikleri (Dyrmann, Karstoft, & Midtiby, 2016; Krizhevsky, Sutskever, & Hinton, 2012)

Metrik	Eşitlik	Tanım
Doğruluk	$\frac{GP + GN}{GP + YP + YN + GN}$	Doğruluk değeri modelde doğru tahmin edilen değerlerin toplam veri kümesine oranıdır.
Kesinlik	$\frac{GP}{GP + YP}$	Pozitif olarak tahmin edilen değerlerin gerçekten kaç tanesinin pozitif olduğunu göstermektedir.
Duyarlılık	$\frac{GP}{GP + YN}$	Pozitif tahmin etmemiz gereken işlemlerin ne kadarını pozitif olarak tahmin ettiğimizi gösteren metriktir.
Özgüllük	$\frac{GN}{GN + YP}$	Modelin negatif durumları ne kadar iyi tahmin ettiğini gösteren metriktir.
F1-skor	$2 * \frac{Kesinlik * Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık}$	Kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasını göstermektedir.



Şekil 5. Performanslarına Göre Temel ROC Eğrileri (Hoo Et Al., 2017)

ROC eğrisinde mükemmel olan analizde eğri (0,0), (0,1) ve (1,1) noktalarından geçer. Kötü bir olan ROC eğrisi (0,0) dan (1,1) e kadar uzanan köşegen biçimindedir. Analiz sonucu bu iki eğriye göre değerlendirilir (Hoo et al., 2017).

BULGULAR

Çalışmada domates bitkisi yaprağındaki hastalık türlerinin sınıflandırma çalışması yapılmıştır. Veri tabanında bulunan 10 sınıf ve 18.160 adet yaprak görüntüsünden oluşan veri seri kullanılmıştır. Yaprak görüntülerinin boyutları 256 × 256 piksel iken ön eğitilmiş derin öğrenme algoritmalarında kullanılmak için 224 × 224 ve 227 × 227 boyutlarına getirilmiştir. Veri setinde homojen dağılım sağlanması için en az veriye sahip sınıf mozaik sınıfındaki veri adeti kadar diğer tüm sınıflardan da veri rastgele alınmıştır. Bu görüntülerin %70'i eğitim için %15'i doğrulama ve %15'i test için kullanılmıştır.

Eğitim aşamasında model her iterasyonda eğitilir ve test veri seti ile test edilerek başarı performansı belirlenir. Sürekli test veri seti ile test edilen modelde aşırı uyum (overfitting) durumu gerçekleşebilir. Eğitilen modelin test veri setine aşırı uyumunu engellemek için doğrulama veri seti kullanılmıştır (Atik, 2022a). Kullanılan bilgisayar sisteminde i7-10750 H CPU @2.60 GHz, NVIDIA Quadro P620 GPU, ve 16 GB RAM özelliklerine sahip donanım bulunmaktadır. Uygulama için Matlab R2020a da tanımlı ön eğitilmiş derin öğrenme algoritmaları AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet and SqueezeNet ve ResNet-18 kullanılmıştır. ESA modelleri için hiperparametre değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. ESA Modellerinde Kullanılan Eğitim Hiperparametreleri

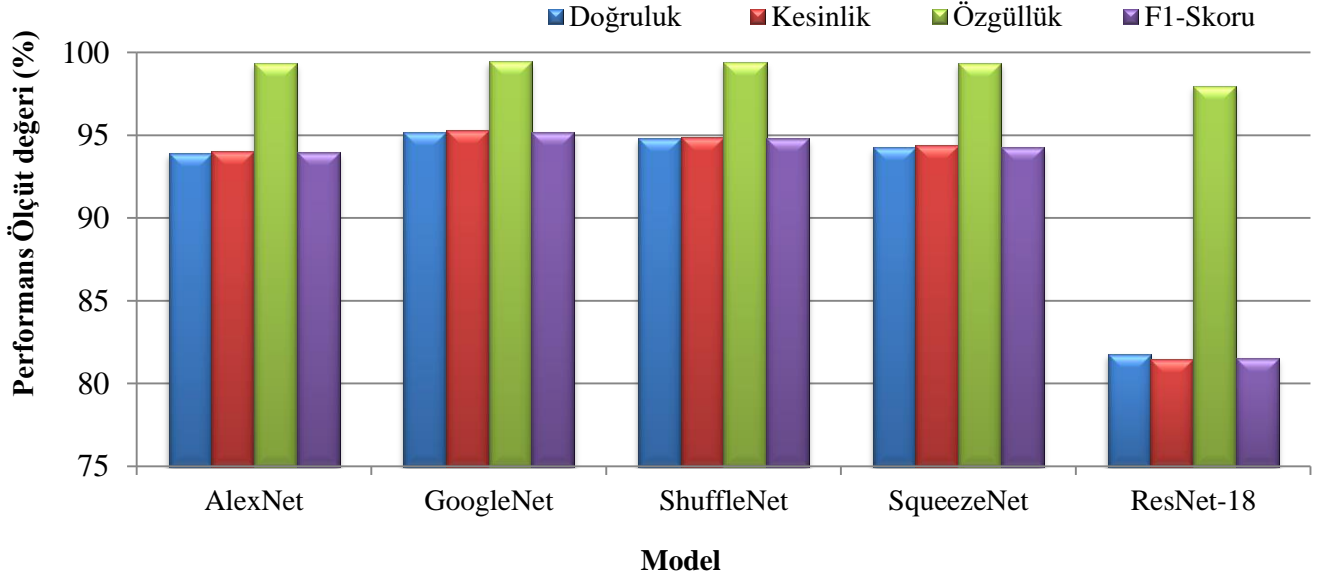
Hiperparametre	Değer
Mini topluluk boyutu	16
Maksimum epoch	50
Başlangıç öğrenme oranı	1e-4
Optimize yöntemi	SGDM

Veri seti ile eğitilen modeller test veri seti ile test edilmiştir. Test analizi sonuçlarına göre elde edilen ön eğitilmiş ESA modellerine ait doğruluk, kesinlik, özgüllük ve F-skor parametre değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Her modelin kesinlik, özgüllük ve F-skor parametrelerinin karşılaştırması Şekil 6’da görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet ve ResNet-18 için doğruluk oranları sırasıyla %93,93, %95,18, %94,82, %94,29 ve %81,79 olarak hesaplanmıştır.

Modellerin kesinlik değerleri incelendiğinde en yüksek performansı %95,29 ile GoogleNet modeli gösterirken en düşük performansı gösteren model %81,49 ile ResNet-18 modeli olmuştur. Özgüllük değerleri AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet ve ResNet-18 için sırasıyla %99,33, %99,46, %99,42, %99,37 ve %97,98 olarak elde edilmiştir. Son olarak F1 puanı değerlerinde de benzer durum söz konusudur. Modellerin başarı performansına göre yüksekte düşüğe doğru sırasıyla GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet, AlexNet ve ResNet-18’dir.

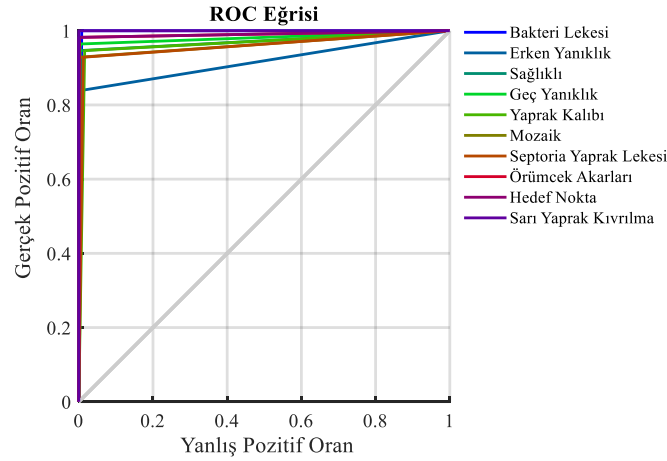
Tablo 5. ESA Modelleri Performans Ölçüt Değerleri (%)

Model	Doğruluk	Kesinlik	Özgüllük	F1-Puanı
AlexNet	93,93	94,03	99,33	93,95
GoogleNet	95,18	95,29	99,46	95,17
ShuffleNet	94,82	94,86	99,42	94,79
SqueezeNet	94,29	94,37	99,37	94,29
ResNet-18	81,79	81,49	97,98	81,55



Şekil 6. ESA Modelleri Performans Ölçüt Değerleri Karşılaştırma

Elde edilen sonuçlara göre GoogleNet modeli diğer tüm ESA modellerine göre daha yüksek bir başarı göstermiştir. En iyi performans gösteren model GoogleNet için her sınıfın belirtildiği ROC eğrisi de Şekil 7’de verildiği gibidir. Modelin performansı başarı ölçüt parametrelerinin belirttiği numerik değerlerin yanı sıra ROC eğrisinde de görüldüğü üzere 1’e yakın mükemmel değerlerdir.

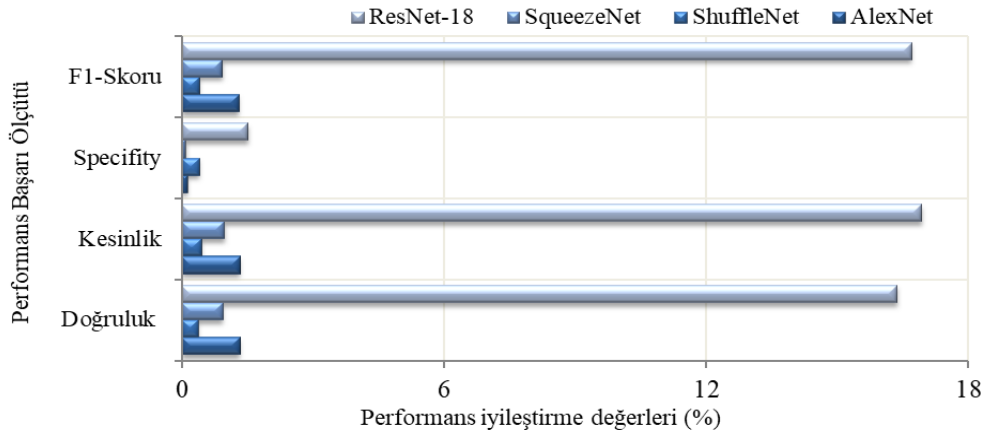


Şekil 7. GoogleNet Modeli Analiz Değerleri ROC Eğrisi

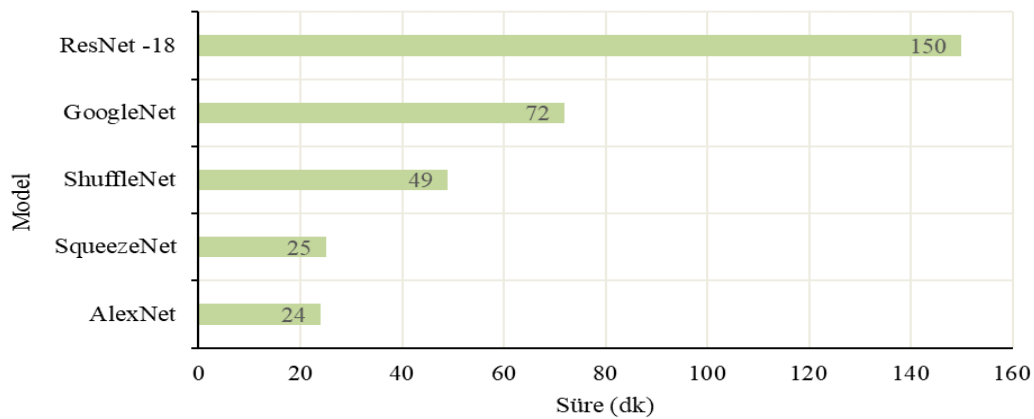
Çalışmada en iyi performans gösteren model GoogleNet’in çalışmada kullanılan diğer ön eğitilmiş ESA modellerinden yüzde kaç oranında daha iyi sonuç elde ettiği de çalışmada incelenmiştir. Buna göre GoogleNet modelin performans ölçüt metrikleri doğruluk, kesinlik, özgüllük ve F1-puanı için diğer modellere göre iyileştirme değerleri hesaplanmış Tablo 6’da verilmiştir. Bu bağlamda analiz sonuçları iyileştirme yüzdelerinin karşılaştırması Şekil 8’de verildiği gibidir.

Tablo 6. GoogleNet Modelin Diğer ESA Modellere Göre İyileştirme Değerleri (%)

Model	Doğruluk	Kesinlik	Özgüllük	F1-Puanı
AlexNet	1,33	1,33	0,13	1,30
ShuffleNet	0,37	0,45	0,40	0,40
SqueezeNet	0,94	0,97	0,09	0,93
ResNet-18	16,37	16,93	1,51	16,70

**Şekil 8.** GoogleNet Modelin Diğer ESA Modellere Göre İyileştirme Değerleri (%)

Tablo 7'deki numerik değerler ve Şekil 8'deki görsel grafikten görüldüğü üzere başarı performansları iyileştirme değerleri karşılaştırmasında GoogleNet modelin doğruluk değeri AlexNet, ShuffleNet, SqueezeNet ve ResNet-18 için sırasıyla %1,33, %0,37, %0,94 ve %16,37 daha iyidir. Kesinlik değerleri kıyaslamasında GoogleNet modeli AlexNet, ShuffleNet, SqueezeNet ve ResNet-18 için sırasıyla %1,33, %0,45, %0,97 ve %16,93 daha iyi sonuç elde edilmiştir. Analizlerde üstün özellik gösteren GoogleNet mimarisi başlangıç modüllerinden dolayı karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu model konvolüsyon ve havuzlama katmalarını üst üste istiflemekten uzaklaşan ilk evrişimli sinir ağı modellerindedir. Model bu sayede bellek kullanımı ve güç kullanımı yönünde avantaj sağlamaktadır. Analiz yapılan veri seti için en iyi sınıflandırma performansı gösteren GoogleNet mimarisi 22 derinlik değeri, 27MB boyut değeri, 7 milyon parametreye sahiptir. Çalışmada ikinci en yüksek performans gösteren ShuffleNet mimarisi 50 derinlik, 5.4MB boyut ve 1.4 milyon parametreye sahiptir. Bu modelin derinlik değeri GoogleNet'ten fazla olmakla beraber parametre sayısı GoogleNet'ten düşüktür. SqueezeNet mimarisi de öğrenme parametre sayısı bakımından GoogleNet'ten düşüktür. AlexNet mimarisinin parametre sayısı GoogleNet'ten fazla olmakla beraber derinlik değeri GoogleNet mimarisinden düşüktür. Modellerin analiz sonuçları her veri seti için farklılık gösterebilir. Modellerin performans karşılaştırmasında eğitim ve test süresi de özellikle büyük ölçekli çalışmalarda önemlidir. Çalışmada kullanılan modellere ait eğitim ve test süreleri Şekil 9'da verilmiştir.

**Şekil 9.** Modellere ait analiz süresi

Şekil 9'dan görüldüğü üzere analiz süreleri AlexNet, SqueezeNet, ShuffleNet, GoogLeNet ve ResNet-18 için sırasıyla 24 dk, 25 dk, 49 dk, 72 dk ve 150 dk olmuştur. Veri setinin boyutu, modellerin derinlik, parametre değerleri, ve analiz yapılan bilgisayarın özelliklerine göre birçok etkene bağlı olarak analiz süresi değişkenlik göstermektedir.

TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde görüntü sınıflandırma alanında yapılan çalışmalar ile önerilen çalışmanın performans karşılaştırmasına yer verilmiştir. Bu bağlamda, bu çalışmalara ait, veri setindeki örnek sayıları, kullanılan veri seti, sınıf sayıları, sınıflandırma başarı oranları göz önüne alınarak bir Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Domates Yaprağı Hastalık Sınıflandırması İle İlgili Yapılan Çalışmalar Ve Başarı Performans Değerleri

Referans	Model/Algoritma	Veri seti	Kullanılan Veri	Başarı performans ölçütü ve elde edilen değer
(Yamamoto, Togami, & Yamaguchi, 2017)	Super-Resolution Convolutional Neural Network (SCRNN)	PlantVillage	Domates yaprağı	Doğruluk değeri yaklaşık ~%90 olarak elde edilmiştir.
(Durmuş et al., 2017)	AlexNet and SqueezeNet v1.1	PlantVillage	Domates yaprağı	Sınıflandırma Doğruluk değeri, AlexNet modeli ile %95,65 olarak elde edilmiştir.
(Fuentes, Yoon, Kim, & Park, 2017)	AlexNet, GoogleNet, VGG-16, ResNet-50,101, ResNetXt-101, Faster RCNN, SSD, R-FCN, ZFNet	Image taken in real fields	Domates yaprağı	Kesinlik değeri ResNet-50 ve Region based Fully Convolutional Network (R-FCN) modeli ile %85,98 olarak elde edilmiştir.
Yapılan çalışma	AlexNet, GoogleNet, ShuffleNet, SqueezeNet ve ResNet-18	PlantVillage	Domates yaprağı	En iyi doğruluk değeri GoogleNet modeli %95,18 olarak elde edilmiştir.

Tabloda domates yaprağı hastalık sınıflandırma çalışmalarının ile bu çalışmada elde edilen başarı performans değeri karşılaştırması verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere Yamamoto ve ark. SCRNN modeli ile doğruluk değerini yaklaşık %90 olarak elde etmiştir. Durmuş ve ark. Ön eğitilmiş modellerden sadece AlexNet ve SqueezeNet modellerini kullanmıştır. En yüksek doğruluk değerini AlexNet mimarisi ile %95,65 olarak hesaplamıştır. Fuentes ve ark. R-FCN modeli ile doğruluk değeri %85,98 olarak elde edilmiştir. Domates yaprağı sınıflandırma çalışmaları için analizlerde bu çalışmada elde edilen doğruluk değerinin (%95,18) diğer çalışmalardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çalışmada ön eğitilmiş beş farklı model için analiz karşılaştırma sonuçlarına yer verilmesi daha geniş kıyaslama imkânı sunmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, domates yaprağı hastalık görüntülerinin sınıflandırılması için çeşitli derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yaklaşımları kullanılmıştır. Çalışmada toplam 10 sınıf ve toplam 18.160 domates yaprak görüntüsü bulunan veri seti kullanılmıştır. Analizlerde ön eğitilmiş derin öğrenme algoritmalarından GoogleNet, ShuffleNet, AlexNet, GoogleNet ve ResNet-18 modelleri kullanılmıştır. Kullanılan modeller içinde en yüksek performans değerine GoogleNet mimarisi ile ulaşılmıştır. GoogleNet modeli ile yapılan sınıflandırma çalışmasında doğruluk, kesinlik, özgüllük ve F1-puanı değerleri sırasıyla %95,18, %95,29, %99,46 ve %95,17 olarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer modeller içinde ikinci en yüksek başarı gösteren model ShuffleNet modeli olmuştur. ShuffleNet modeli için doğruluk, kesinlik, özgüllük ve F1-puanı değerleri sırasıyla %94,82, %94,86, %99,42 ve %94,79 olarak elde edilmiştir. GoogleNet ve ShuffleNet modellerinden sonra en performans değerleri en yüksekte doğru sırasıyla SqueezeNet, AlexNet ve ResNet-18'dir. Bu modellere ait doğruluk değerleri SqueezeNet için %94,29, AlexNet için %93,93 iken ResNet-18 için %81,79 olarak elde edilmiştir. Model performanslarında görüldüğü üzere en başarılı model GoogleNet iken, en düşük performans gösteren model ResNet-18 modeli olmuştur. İlerleyen çalışmalarda; Yapılan çalışma hastalık tespit çalışmalarının geliştirilmesi bu alandaki en büyük sorunlardan olan verim kaybını önleyecektir. Hastalıkların daha hızlı ve daha kolay şekilde tespit edilmesi zaman ve işgücü bakımından özellikle bu alanda çalışan kişilere büyük kolaylık sağlayacaktır. Sınıflandırma alanında yeni ve az parametreye sahip modellerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılacaktır.

KAYNAKLAR

- Acikgoz, H. (2022). A novel approach based on integration of convolutional neural networks and deep feature selection for short-term solar radiation forecasting. *Applied Energy*, (305). doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117912.
- Arivazhagan, S., Shebiah, R. N., Ananthi, S. N., & Varthini, S. V. (2013). Detection of unhealthy region of plant leaves and classification of plant leaf diseases using texture features. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*, 15, 211–217.
- Arsenovic, M., Karanovic, M., Sladojevic, S., Anderla, A., & Stefanovic, D. (2019). Solving Current Limitations of Deep Learning Based Approaches for Plant Disease Detection. *Symmetry*, 11(7). doi:10.3390/sym11070939
- Atik, I. (2022a). Classification of Electronic Components Based on Convolutional Neural Network Architecture. *Energies*, 15(7). doi:10.3390/en15072347
- Atik, I. (2022b). Performance Comparison of Pre-Trained Convolutional Neural Networks in Flower Image Classification. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 315–321. doi:10.31590/ejosat.1082023
- Brahimi, M., Boukhalfa, K., & Moussaoui, A. (2017a). Deep Learning for Tomato Diseases: Classification and Symptoms Visualization. *Applied Artificial Intelligence*, 31(4), 299–315. doi:10.1080/08839514.2017.1315516
- Durmuş, H., Güneş, E. O., & Kırcı, M. (2017). Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning. In *2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics* (pp. 1–5). doi:10.1109/Agro-Geoinformatics.2017.8047016
- Dyrmann, M., Karstoft, H., & Midtby, H. S. (2016). Plant species classification using deep convolutional neural network. *Biosystems Engineering*, 151, 72–80. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.08.024
- Ferentinos, K. P. (2018). Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 311–318. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.009
- Fuentes, A., Yoon, S., Kim, S. C., & Park, D. S. (2017). A Robust Deep-Learning-Based Detector for Real-Time Tomato Plant Diseases and Pests Recognition. *Sensors*, 17(9). doi:10.3390/s17092022
- G, G., & J, A. P. (2019). Identification of plant leaf diseases using a nine-layer deep convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*, 76, 323–338. doi:https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.04.011
- H. Sabrol, & K. Satish. (2016). Tomato plant disease classification in digital images using classification tree (pp. 1242–1246). Presented at the 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). doi:10.1109/ICCSP.2016.7754351
- Hoo, Z. H., Candlish, J., & Teare, D. (2017). What is an ROC curve? *Emergency Medicine Journal*, 34(6), 357–359. doi:10.1136/emermed-2017-206735
- Kaggle. (2021, December 6). Kaggle. *Kaggle data set*. dataset. Retrieved from https://www.kaggle.com/datasets (Erişim tarihi:15.01.2022)
- Krizhevsky, A. (2012). *Convolutional Deep Belief Networks on CIFAR-10*. https://www.cs.toronto.edu/~kriz/conv-cifar10-aug2010.pdf
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25, 1097–1105.
- Liu, Y., Tang, F., Zhou, D., Meng, Y., & Dong, W. (2016). Flower classification via convolutional neural network. In *2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA)* (pp. 110–116). doi:10.1109/FSPMA.2016.7818296
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection. *Frontiers in Plant Science*, 7.
- Öter, A., Aydoğan, O., Kıymık, M., & Tuncel, D. (2016). Tıkayıcı Uyku Apnesinin Yapay Sinir Ağları ve Morfolojik Filtreler kullanılarak Sınıflandırılması İçin Yeni Yöntem. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 52. doi:10.17780/ksujes.74055

- Öztürk, M., & Paksoy, T. (2018). Buğday Tipi Sınıflandırma için Yapay Sinir Ağı Uygulaması: Yeni Bir Yapay Zeka Eğitimi Yazılımı. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21, 246–257. doi:10.17780/ksujes.332770
- Sannakki, S., Rajpurohit, V. S., Sumira, F., & Venkatesh, H. (2013). A neural network approach for disease forecasting in grapes using weather parameters. In *2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1–5). doi:10.1109/ICCCNT.2013.6726613
- Sladojevic, S., Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D., & Stefanović, D. (2016). Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016.
- Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., & Alemi, A. (2017). Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 31(1). Retrieved from <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/11231>
- Too, E. C., Yujian, L., Njuki, S., & Yingchun, L. (2019). A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification. *Comput. Electron. Agric.*, 161, 272–279.
- Ucar, F., & Korkmaz, D. (2020). COVIDiagnosis-Net: Deep Bayes-SqueezeNet based diagnosis of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) from X-ray images. *Medical Hypotheses*, 140, 109761–109761. doi:10.1016/j.mehy.2020.109761
- Wang, G., Sun, Y., & Wang, J. (2017). Automatic Image-Based Plant Disease Severity Estimation Using Deep Learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017, 1–8. doi:10.1155/2017/2917536
- Yamamoto, K., Togami, T., & Yamaguchi, N. (2017). Super-Resolution of Plant Disease Images for the Acceleration of Image-based Phenotyping and Vigor Diagnosis in Agriculture. *Sensors*, 17(11). doi:10.3390/s17112557
- Zhang, S., Huang, W., & Zhng, C. (2019). Three-channel convolutional neural networks for vegetable leaf disease recognition. *Cognitive Systems Research*, 53, 31–41.
- Zhang, X., Zhou, X., Lin, M., & Sun, J. (2018). Shufflenet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices (pp. 6848–6856). Presented at the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.04.2022
Kabul Tarihi : 23.05.2022

Received Date : 16.04.2022
Accepted Date : 23.05.2022

DİELEKTRİK TABAN DESTEKLİ EŞ DÜZLEMLİ DALGA KILAVUZLARI İÇİN GENETİK PROGRAMLAMA İLE GELİŞTİRİLMİŞ QUASI-STATİK ANALİZ MODELLERİ

QUASI-STATIC ANALYSIS MODELS FOR DIELECTRIC BASE SUPPORTED COPLANAR WAVEGUIDES IMPROVED BY GENETIC PROGRAMMING

Hakan KİŞİOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0002-5913-9758)

Celal YILDIZ² (ORCID: 0000-0003-3369-4777)

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye
² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan KİŞİOĞLU, hakan,kisioglu@yobu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada dielektrik taban destekli eş düzlemlı dalga kılavuzlarının (DTDEDDK) efektif dielektrik sabitini ve karakteristik empedansını belirlemek amacıyla genetik programlama (GP) ile geliştirilmiş doğru ve çok basit quasi-statik analiz modelleri sunulmuştur, GP kullanılarak elde edilen quasi-statik analiz modellerinin geçerliliğini ve doğruluğunu göstermek için, bu çalışmada sunulan modelden elde edilen sonuçlar literatürde var olan quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır, Bu karşılaştırma sonuçları önerilen quasi-statik analiz modellerinin sonuçları ile literatürdeki mevcut quasi-statik analiz sonuçları arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir, Bu çalışmadaki tasarım parametrelerinin değer aralıkları $2 \leq \epsilon_{r1} \leq 10$, $10 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $20 \mu m \leq h \leq 2000 \mu m$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $0.1 \leq s/h \leq 4$ ve DTDEDDK'larının bu parametre değerlerine karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $19 \Omega \leq Z_0 \leq 117 \Omega$ aralığındadır, Bu çalışmada önerilen DTDEDDK'lar için önerilen quasi-statik analiz modellerinin doğruluklarının pratik uygulamalar için yeterince iyi olduğu gözlemlenmiştir,

Anahtar Kelimeler: Quasi-statik analiz modeli, eş düzlemlı dalga kılavuzu, genetik programlama

ABSTRACT

In this study, accurate and very simple quasi-static analysis models developed with genetic programming (GP) are presented in order to determine the effective dielectric constant and characteristic impedance of dielectric base supported coplanar waveguides, In order to demonstrate the validity and accuracy of the quasi-static analysis models improved by using GP, the results of proposed models in this work were compared with the quasi-static analysis results available in the literature, These comparison results show that there is a good agreement between the results of the proposed quasi-static analysis models and the quasi-static analysis results available in the literature, The design parameter ranges in this study are $2 \leq \epsilon_{r1} \leq 10$, $10 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $20 \mu m \leq h \leq 2000 \mu m$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $0.1 \leq s/h \leq 4$ and the characteristic impedance values of dielectric base supported coplanar waveguides corresponding these design parameter values are between $19 \Omega \leq Z_0 \leq 117 \Omega$, It has been observed that the accuracy of the proposed quasi-static analysis models for dielectric base supported coplanar waveguides proposed in this study is good enough for the practical applications.

Keywords: Quasi-static analysis model, coplanar waveguide, genetic programming

ToCite: KİŞİOĞLU, H., & YILDIZ, C., (2022). DİELEKTRİK TABAN DESTEKLİ EŞ DÜZLEMLİ DALGA KILAVUZLARININ GENETİK PROGRAMLAMA İLE GELİŞTİRİLMİŞ QUASI-STATİK ANALİZ MODELLERİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(2), 138-144.

GİRİŞ

Eş düzlemlerli dalga kılavuzları (EDDK) ve çok katmanlı EDDK'lar, mikrodalga entegre devrelerin (MED) tasarımında ve üretiminde geleneksel mikroşerit hatlar üzerindeki cazip özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür ("Special Issue on, Microwave Integrated Circuits", 1968; "Special Issue on, Microwave Integrated Circuits", 1971; Gupta and Singh, 1974; Frey, 1974; Simons, 2001), MED ve monolitik MED uygulamaları için ideal olan EDDK'ları, şönt ve seri bağlantı kolaylığı, düşük radyasyon, düşük dağılım, kolay imalat ve düzlemsel olmaları nedeniyle delik ihtiyacının ortadan kaldırılması gibi birçok avantaj bulunmaktadır (Wen, 1969), EDDK'ların analizi 1969 yılında ilk kez Wen (1969) tarafından konform dönüşüm tekniği (KDT) kullanılarak yapılmıştır, EDDK'lar, bir dielektrik tabakanın üstüne aynı düzlemde olmak üzere bir merkez iletken ve bu iletkenin iki tarafına, iki yarıktan sonra konulmuş bulunan toprak düzlemlerinden oluşmaktadır, Çok tabakalı iletim hattı yapıları, alt ve üst tabakalara uygun dielektrik taban malzemesi kullanılmasıyla, tek bir dielektrik katmana sahip iletim hatlarına göre temel frekans bölgesinin kontrol edilmesi ve kaçak alanları daha iyi önleyebilmektedir (Das and Pozar, 1987; Frankel, Voelker and Hilfiker, 1994; Gevorgian, Linner and Kollberg, 1995; Erli and Chou, 1997), Ayrıca EDDK yapılarında dielektrik katmanın kırılgen olması durumunda yapının mekanik dayanımını ve ortalama güç taşıma kapasitesini arttırmak için kırılgen alt katmanın başka bir dielektrik alt katmana birleştirilmesi ile çözüm elde edilebilir (Shih and Itoh, 1982; Jackson, 1986; Riazat, Bandy and Zdasiuk, 1987; Morkoc and Aksun, 1988; Cai, Kooi, Leong and Yeo, 1993),

Literatürde yaygın bir şekilde kullanılan çok katmanlı EDDK'lardan biride DTDEDDK'lardır, DTDEDDK'ların karakteristik parametreleri ilk kez 1992 yılında Bedair ve Wolff (1992) tarafından KDT kullanılarak elde etmiş ve bu sonuçlar spektral domain analizi (SDA) sonuçlarıyla kıyaslanmıştır, Ayrıca DTDEDDK'ların quasi-TEM parametreleri, geliştirilmiş SDA (GSDA) metodunu kullanarak belirlenmiştir (Cheng and Robertson, 1994), Görür vd, (1996) 1996 yılında çok katmanlı asimetrik EDDK'ların quasi statik TEM parametrelerini hesaplamak için analitik formüller önermişlerdir, Yıldız, Guney, Turkmen ve Kaya (2007) ise DTDEDDK'ların karakteristik parametrelerinin hesaplamalarında yapay sinir ağlarını kullanmışlardır,

Literatürdeki bu modellerin bazı dezavantajları vardır, Literatürde son model (Yıldız et al., 2007) dışında önerilen analiz modelleri (Bedair and Wolff, 1992; Cheng and Robertson, 1994; Görür et al, 1996), hesaplanması oldukça güç olan eliptik integraller içerir ve DTDEDDK'ların karakteristik parametrelerini belirlemek için kapsamlı hesaplamalar gerektirir, Ref, (Yıldız et al., 2007) ile literatüre önerilen bulanık sinir ağları tabanlı modeller ise kapalı kutu modelleridir ve kapalı form denklemler içermemektedir,

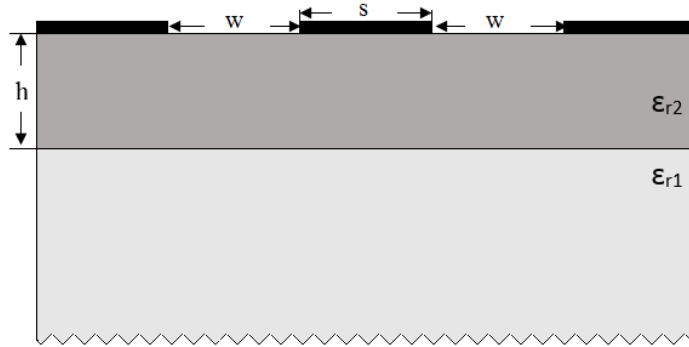
Bu çalışmada, DTDEDDK'ların karakteristik parametrelerini belirlemek amacıyla GP kullanılarak elde edilmiş olan doğru ve çok basit quasi-statik analiz modelleri önerilmiştir, GP, evrimsel algoritma tekniklerinden biri olup, DTDEDDK'ların karakteristik parametrelerini başarılı bir şekilde hesaplamaktadır, Önerilen quasi-statik analiz modellerinin geçerliliğini ve doğruluğunu kanıtlamak amacıyla birçok kıyaslama yapılmıştır, Bu kıyaslamalar kapsamında, önerilen quasi-statik analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992), GSDA (Cheng and Robertson, 1994)'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır, GP ve mikrodalga düzlemsel iletim hatlarının analiz ve tasarım problemlerine ait uygulamalar hakkında ayrıntılı bilgiler (Kisioglu and Yıldız, 2016; Yıldız and Kisioglu, 2017)'da verilmiştir,

GENETİK PROGRAMLAMA KULLANILAN GELİŞTİRİLEN ANALİZ MODELLERİ

DTDEDDK'ların kesit görünümü Şekil 1'de verilmiştir, Bu şekilde, w 'lar yarık genişliklerini, w yarık genişlikleri arasında kalan kısım s şerit genişliğini, h dielektrik tabakanın kalınlığıdır, ϵ_{r1} ve ϵ_{r2} ise tabakaların bağıl dielektrik sabitleridir, İletim hattında kullanılan tüm iletkenlerin kalınlıklarının ihmal edilecek kadar ince ve mükemmel iletken olduğu varsayılmıştır, DTDEDDK'ların analiz modelleri GP kullanılarak geliştirilmiştir, GP, DTDEDDK'ların analizini gerçekleştirmek için giriş ve çıkış değişkenleri arasında fonksiyonel bir ilişki kurmaktadır, Önerilen analiz modellerinde giriş parametreleri; bağıl dielektrik sabitleri (ϵ_{r1} , ϵ_{r2}), dielektrik tabakanın kalınlığı (h), iletim hattının fiziksel boyutları olan normalize yarık genişliği (w/h) ve normalize şerit genişliği (s/h), Çıkış parametresi ise efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) veya karakteristik empedanstır (Z_0),

DTDEDDK'ların quasi-statik analiz modellerinin oluşturulmasında kullanmak amacı ile Bedair ve Wolff (1992) tarafından yapılan çalışmadan 8000 adet veri seti üretilmiştir, Veri setindeki tasarım parametreleri; $20\mu m \leq h \leq 2000\mu m$, $2 \leq \epsilon_{r1} \leq 10$ ve $10 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$ olarak alınmıştır, Ayrıca iletim hattı yapısının normalize yarık

genişliği $0.1 \leq w/h \leq 1$ ve normalize şerit genişliği $0.1 \leq s/h \leq 4$ aralığında tutulmuştur, Bu tasarım parametre değerlerine karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $19\Omega \leq Z_0 \leq 117\Omega$ aralığında olduğu hesaplanmıştır,



Şekil 1, DTDEDDK'ların Kesit Görünümü

DTDEDDK'ların quasi-statik analizi için GP kullanarak türetilen uygun analiz modellerini elde etmek amacıyla birçok deneme gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde GP'nin, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, çoğalma oranı ve popülasyon büyüklüğü en uygun değer olarak sırasıyla 0,8, 0,1, 0,1 ve 150 olarak alınmıştır. Birçok deneme sonunda, belirli bir $(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, h)$ dielektrik taban malzemesi ve iletim hattının $(w/h, s/h)$ geometrik boyutları seçildikten sonra DTDEDDK'ların (karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti) karakteristik parametrelerini hesaplayan hata oranları düşük, doğru ve çok basit analiz modelleri GP kullanarak türetilmiştir. Türetilen DTDEDDK'ların karakteristik empedansını (Z_0) ve efektif dielektrik sabitini (ϵ_{eff}) hesaplayan analiz modelleri sırasıyla denklem (1) ve (2)'de verilmiştir,

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[\frac{\frac{x_1 \cdot w}{h} + \frac{x_2 \cdot h}{w} + \frac{x_3 \cdot \epsilon_{r1} \cdot h}{s}}{\frac{x_4 + x_5 \cdot \epsilon_{r2} + x_6 \cdot \log\left(\frac{s}{h}\right) \cdot \log\left(x_7 + \frac{w}{h} + x_8 \cdot \epsilon_{r2}\right)}{x_9 + \frac{w}{h}}} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{x_1 + x_2 \cdot \epsilon_{r2} + \frac{x_3 \cdot \epsilon_{r1} \cdot w}{h} + \frac{x_4 \cdot \epsilon_{r1} \cdot s}{h} - \frac{x_5 \cdot \epsilon_{r2} \cdot s}{h} - \frac{x_6 \cdot \epsilon_{r2} \cdot w}{h}}{-\frac{x_7 \cdot \epsilon_{r2} \cdot w}{h} \cdot \sin\left(\frac{x_8 \cdot s}{h}\right)} \right] \quad (2)$$

Burada (x_1, x_2, \dots, x_9) DTDEDDK'lar için önerilen analiz modellerinin katsayılarıdır, $\eta_0 = 120\pi \Omega$ ise hava ortamının öz empedansdır, Tablo 1'de DTDEDDK'lar için önerilen karakteristik empedansa ve efektif dielektrik sabitine ait analiz modellerindeki katsayıların değerleri verilmiştir,

Tablo 1, DTDEDDK'lar için Önerilen Analiz Modellerindeki Katsayı Değerleri

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
(Z_0) Karakteristik Empedans	1,1261	0,1446	0,0552	4,0994	0,3069	4,1489	0,3938	0,6735	0,6914
(ϵ_{eff}) Efektif Dielektrik Sabiti	0,4789	0,5080	0,0780	0,0353	0,0339	0,0592	0,0442	0,5954	-----

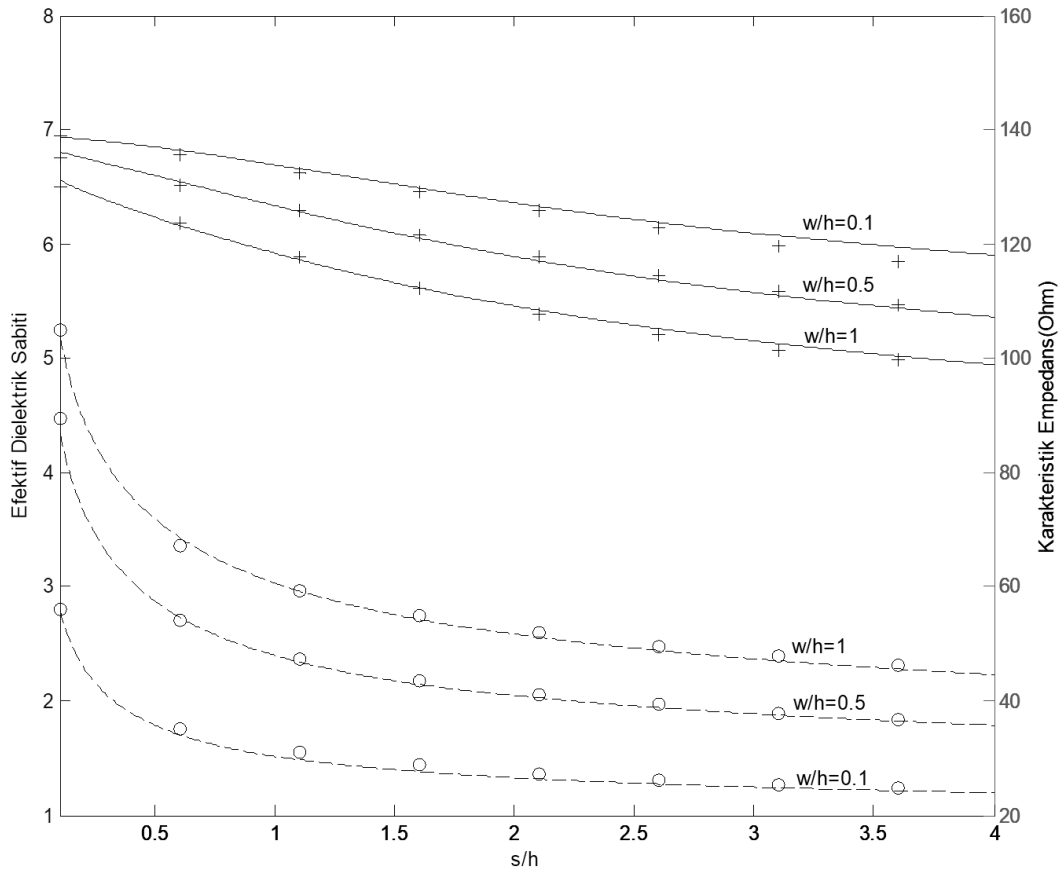
SONUÇLAR VE TARTIşMALAR

Bu çalışmada DTDEDDK'lar quasi-statik analizleri için GP kullanılarak türetilmiş analiz modelleri önerilmiştir. DTDEDDK'lar için bu çalışmada önerilen analiz modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlamak amacıyla

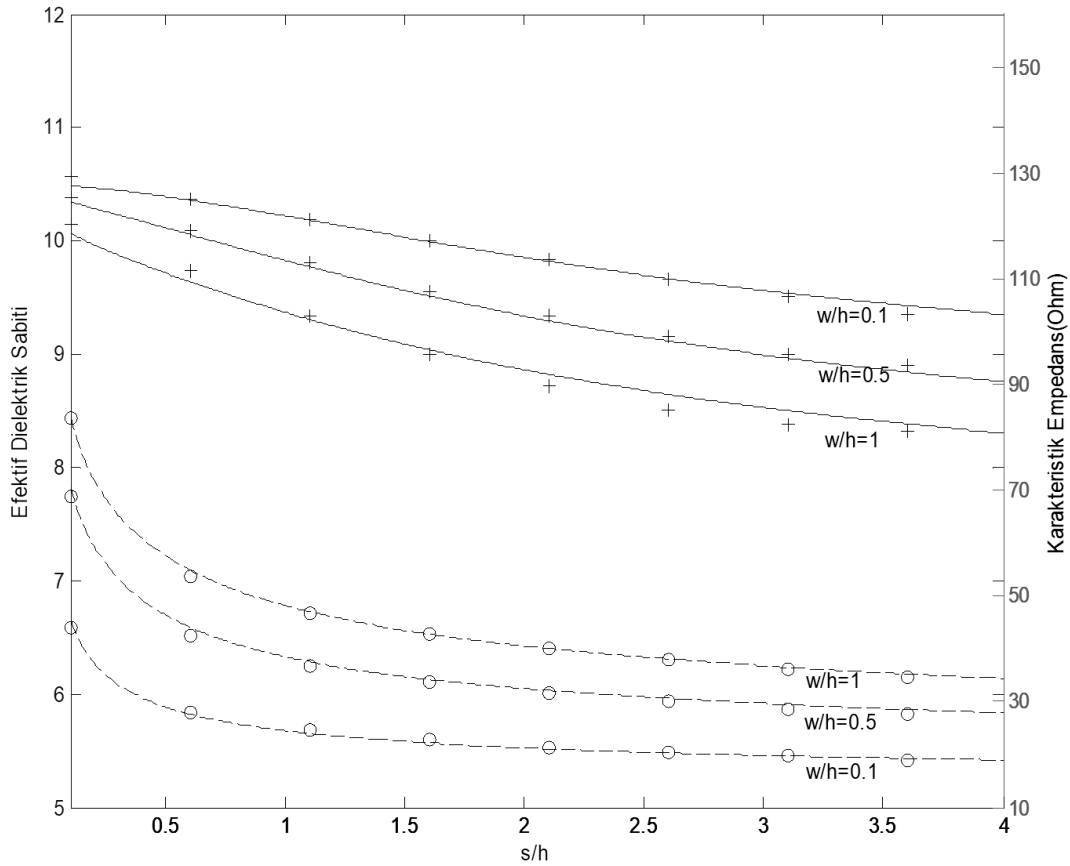
detaylı kıyaslamalar yapılmıştır. Bu kapsamda, önerilen analiz modellerinden bulunan sonuçlar, KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992), GSDA (Cheng and Robertson, 1994) sonuçları ile karşılaştırılmıştır,

İlk karşılaştırma farklı (ϵ_{r1} , ϵ_{r2}) dielektrik sabiti değerleri ve farklı w/h değerleri için karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitinin (s/h) normalize şerit genişliğine göre değişimi hem önerilen analiz modelleri hemde literatürdeki KDT (Bedair and Wolff, 1992) modeli için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekillerden açıkça görülebileceği gibi, önerilen analiz model sonuçları ile KDT (Bedair and Wolff, 1992) sonuçları arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır,

İkinci karşılaştırma ise önerilen analiz modellerinden hesaplanan karakteristik empedans değerleriyle literatürdeki KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992), ve GSDA (Cheng and Robertson, 1994) modellerinden hesaplanan karakteristik empedans değerleri için yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 2 verilmiştir. Bu tabloda, w^+ ve s^+ gerçek boyutlar olup bu değerleri kullanılarak hesaplanan KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992) ve GSDA (Cheng and Robertson, 1994) için $Z_0(w^+, s^+)$ karakteristik empedans değerlerini ve bu çalışmada önerilen analiz modelinden bulunan karakteristik empedans değerleri $Z_0^*(w^+, s^+)$ şeklinde gösterilmektedir. Bu karşılaştırmalardan da açıkça görüldüğü gibi önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçlar ile KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992) ve GSDA (Cheng and Robertson, 1994) modellerinden elde edilen sonuçlar arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır,



Şekil 2, DTDEDDK'lar Karakteristik Parametreleri için Önerilen Analiz Modelinin Sonuçlarıyla Literatürdeki Quasi Statik Analiz (Bedair and Wolff, 1992) Sonuçlarıyla Karşılaştırılması ($h=200 \mu m$, $\epsilon_{r1}=3,78$, $\epsilon_{r2}=12,9$),
--- Karakteristik Empedans (Bedair and Wolff, 1992), ——— Efektif Dielektrik sabiti (Bedair and Wolff, 1992), (o o o Karakteristik Empedans, + + + Efektif Dielektrik sabiti) Sunulan Analiz Modelleri



Şekil 3, DTDEDDK'lar Karakteristik Parametreleri için Önerilen Analiz Modelinin Sonuçlarıyla Literatürdeki Quasi Statik Analiz (Bedair and Wolff, 1992) Sonuçlarıyla Karşılaştırılması ($h=200 \mu m$, $\epsilon_{r1}=10$, $\epsilon_{r2}=20$),
- - - Karakteristik Empedans (Bedair and Wolff, 1992) ——— Efektif Dielektrik sabiti (Bedair and Wolff, 1992), (o o o Karakteristik Empedans, + + + Efektif Dielektrik sabiti) Sunulan Analiz Modelleri

Benzer iyi sonuçlar analiz edilecek tüm DTDEDDK'lar için de gözlenebilir, nitekim karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti için önerilen analiz modellerinin literatürdeki KDT (Bedair and Wolff, 1992) model sonuçlarına göre ortalama yüzde hataları, 8000 adet DTDEDDK örnekleri için sırasıyla %1,42 ve %0,61 olarak belirlenmiştir,

Sonuç olarak, GP tarafından geliştirilen analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992) ve GSDA (Cheng and Robertson, 1994) model sonuçları arasındaki bu çok iyi uyum, bu çalışmada önerilen analiz modellerinin geçerliliğini ve GP'nin doğru çözümler elde etmedeki üstün performansını da göstermektedir,

SONUÇLAR

Bu çalışmada DTDEDDK'ların karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini hesaplayan, GP kullanılarak türetilmiş olan, doğru ve çok basit analiz modelleri önerilmiştir, Analiz modellerinin doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlamak amacıyla elde edilen sonuçlar literatürdeki KDT (Bedair and Wolff, 1992), SDA (Bedair and Wolff, 1992), GSDA (Cheng and Robertson, 1994) model sonuçları ile karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir, Ayrıca önerilen analiz modellerinin hem doğruluğundan hem de basitliğinden anlaşılacağı üzere, GP'nin üstün bir performansa sahip olduğu açıkça görülmektedir, Son olarak burada kullanılan yöntem, farklı fiziksel boyuttaki diğer mikrodalga iletim hatlarının analizi ve tasarımı için arzu edilen basit ve doğru modelleri üretmek amacıyla da kullanılabilir.

Tablo 2, Farklı Taban Malzemeleri için DTDEDDK’ların Karakteristik Empedansı için Önerilen Model Sonuçları ile Literatürdeki Mevcut Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

w^+ (μm)	s^+ (μm)	$\epsilon_{r1} = 10, \epsilon_{r2} = 20, h = 200 \mu\text{m}$				$\epsilon_{r1} = 3,78, \epsilon_{r2} = 12,9, h = 200 \mu\text{m}$				$\epsilon_{r1} = 10, \epsilon_{r2} = 12,9, h = 200 \mu\text{m}$			
		KDT (Bedair and Wolff, 1992)	SDA (Bedair and Wolff, 1992)	GSDA (Cheng and Robertso n, 1994)	Önerilen Analiz Modeli	KDT (Bedair and Wolff, 1992)	SDA (Bedair and Wolff, 1992)	GSDA (Cheng and Robertson, 1994)	Önerilen Analiz Modeli	KDT (Bedair and Wolff, 1992)	SDA (Bedair and Wolff, 1992)	GSDA (Cheng and Robertson, 1994)	Önerilen Analiz Modeli
		$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0^+(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0^+(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0(w^+, s^+)$ (Ω)	$Z_0^+(w^+, s^+)$ (Ω)
20	20	45,51	45,85	45,38	44,11	55,96	56,37	55,79	56,15	55,91	56,33	55,75	55,87
	60	33,24	33,38	33,15	32,72	40,90	41,08	40,79	41,14	40,79	40,98	40,69	40,68
	120	27,68	27,12	27,56	27,94	34,11	34,16	33,96	35,08	33,90	33,96	33,76	34,42
	200	24,52	24,50	24,37	25,05	30,30	30,28	30,12	31,55	29,98	29,92	29,77	30,67
	800	19,01	18,83	18,76	18,56	23,73	23,72	23,63	24,14	22,60	22,47	22,40	22,19
60	20	61,82	62,01	61,49	59,05	76,09	76,32	75,69	76,93	75,84	76,09	75,46	76,40
	60	45,81	45,83	45,60	42,87	56,46	56,50	55,21	54,77	56,07	56,14	55,86	53,96
	120	37,73	37,67	37,51	36,22	46,62	46,56	46,37	46,14	46,01	46,00	45,82	45,00
	200	32,95	32,61	32,70	32,22	40,88	40,72	40,58	41,17	39,96	39,89	39,75	39,68
	800	24,41	24,05	24,00	23,19	30,99	30,56	30,49	30,82	28,69	28,43	28,38	27,71
100	20	70,56	70,60	70,02	68,92	86,97	87,03	86,32	89,35	86,36	86,48	85,77	88,63
	60	53,26	53,18	52,90	50,24	65,80	65,71	65,37	63,99	64,98	64,97	64,64	62,89
	120	44,09	43,90	43,73	42,44	54,65	54,44	54,23	53,99	53,92	53,42	53,22	52,44
	200	38,47	38,19	38,07	37,71	47,91	47,60	47,44	48,18	46,39	46,22	46,07	46,15
	800	27,98	27,48	27,43	26,78	35,76	35,16	35,09	35,87	32,61	32,25	32,22	31,73
200	20	83,77	83,24	82,62	83,71	103,80	103,20	102,42	104,89	101,80	101,50	100,60	103,89
	60	65,28	64,80	64,45	62,98	81,22	80,66	80,21	78,37	78,85	78,94	78,12	76,72
	120	54,87	54,31	54,09	53,73	68,62	67,95	67,67	67,15	65,81	65,44	65,18	64,77
	200	48,95	47,50	47,34	47,87	60,58	59,80	59,61	60,38	57,26	56,22	56,66	57,23
	800	34,42	33,66	33,63	33,47	44,60	43,65	43,59	45,14	39,47	38,95	38,95	38,76

KAYNAKLAR

- Bedair, S, S., & Wolff, I, (1992), Fast, accurate and simple approximate analytic formulas for calculating the parameters of supported coplanar waveguides for (M)MIC's, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 40(1), 41–48, <https://doi.org/10,1109/22,108321>
- Cai, M., Kooi, P, S., Leong, M, S., & Yeo, T, S, (1993), Symmetrical coplanar waveguide with finite ground plane, *Microwave and Optical Technology Letters*, 6(3), 218–220, <https://doi.org/10,1002/MOP,4650060320>
- Cheng, K, K, M., & Robertson, I, D, (1994), Numerically efficient spectral domain approach to the quasi-TEM analysis of supported coplanar waveguide structures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42(10), 1958–1965, <https://doi.org/10,1109/22,320780>
- Das, N, K., & Pozar, D, M, (1987), A generalized spectral-domain green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 35(3), 326–335, <https://doi.org/10,1109/TMTT,1987,1133646>
- Erli, C., & Chou, S, Y, (1997), Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45(6), 939–945, <https://doi.org/10,1109/22,588606>
- Frankel, M, Y., Voelker, R, H., & Hilfiker, J, N, (1994), Coplanar transmission lines on thin substrates for high-speed low-loss propagation, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42(3), 396–402, <https://doi.org/10,1109/22,277432>
- Frey, J, (1974), *Microwave Integrated Circuits*, Artech House, Dedham,

- Gevorgian, S., Linner, L, J, P., & Kollberg, E, L, (1995), CAD models for shielded multilayered CPW, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 43(4), 772–779, <https://doi.org/10.1109/22.375223>
- Görür, A., Karpuz, C., & Alkan, M, (1996), Quasi-static TEM characteristics of overlaid supported asymmetric coplanar waveguides, *International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, 6(5), 297–304, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-6301\(199609\)6:5<297::AID-MMCE1>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-6301(199609)6:5<297::AID-MMCE1>3.0.CO;2-H)
- Gupta, K, C., & Singh, A, (1974), *Microwave Integrated Circuits*, Wiley Eastern Ltd, New Delhi,
- Jackson, R, W, (1986), Considerations in the use of coplanar waveguide for millimeter-wave integrated circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 34(12), 1450–1456, <https://doi.org/10.1109/TMTT.1986.1133562>
- Kisioglu, H., & Yildiz, C, (2016), New synthesis models for the coplanar waveguide with a finite width ground plane, 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), 558–561,
- Morkoc, H., & Aksun, M, I, (1988), GaAs on Si as a Substrate for Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Integration, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 36(1), 160–162, <https://doi.org/10.1109/22.3500>
- Riazat, M., Bandy, S., & Zdasiuk, G, (1987), Coplanar waveguides for MMICs, *Microwave Journal*, 30, 125,
- Shih, Y, C., & Itoh, T, (1982), Analysis of printed transmission lines for monolithic integrated circuits, *EIL*, 18(14), 585, <https://doi.org/10.1049/EL:19820401>
- Simons, R, (2001), *Coplanar waveguide circuits, components, and systems*, John Wiley and Sons, Cleveland, Ohio, 439s,
- Special issue on, microwave integrated circuits, (1968), *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-19,
- Special issue on, microwave integrated circuits, (1971), *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-19,
- Wen, C, P, (1969), Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 17(12), 1087–1090, <https://doi.org/10.1109/TMTT.1969.1127105>
- Yildiz, C, & Kisioglu, H, (2017), Very simple and accurate computer-aided-design (CAD) models developed by genetic programming for the quasi-static analysis of unshielded suspended and inverted microstrip lines, *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Istanbul University*, 17(2), 3303–3309,
- Yildiz, C, Guney, K., Turkmen, M., & Kaya, S, (2007), Neural models for quasi-static analysis of conventional and supported coplanar waveguides, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 61(8), 521–527, <https://doi.org/10.1016/J.AEUE.2006.09.003>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.05.2022
Kabul Tarihi : 30.05.2022

Received Date : 24.05.2022
Accepted Date : 30.05.2022

MİKROSKOBİK GÖRÜNTÜLERDE MULTİPL MİYELOM PLAZMA HÜCRELERİNİN TESPİTİ

DETECTION OF MULTIPLE MYELOMA PLASMA CELLS IN MICROSCOPIC IMAGES

Mücahid GÜNAY¹ (ORCID: 0000-0003-1190-4016)
Mehmet TAZE^{2*} (ORCID: 0000-0002-8458-7376)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Enformatik ABD, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mücahid GÜNAY, gunay@ksu.edu.tr

ÖZET

Multipl Miyelom, dünyada kansere bağlı ölümlerin yaklaşık %2'sine sebep olan bir hastalıktır. Bu hastalık nedeniyle normalde vücudun bağışıklık sistemi için antikor üreten plazma hücrelerinin sayısı kontrolsüz bir şekilde artmaktadır. Dolayısıyla plazma hücrelerinin tespiti hastalığın teşhisi için önemli bir faktördür. Hastalığın teşhisi için kemik iliğinden alınan örnekler öncelikle uzmanlar tarafından boyanmaktadır. Daha sonra boyanan örneklerdeki plazma hücreleri mikroskopla incelenmektedir. Bu inceleme işlemi insan hatalarına açık ve aynı zamanda da çok zaman alıcıdır. Bu çalışmada plazma hücrelerinin tespiti için yapay zekâ tekniklerine dayalı otomatik bir sınıflandırıcı geliştirilmiştir. Plazma hücrelerinin tespiti için hücre çekirdeği ve sitoplazması farklı yöntemlerle ayrı ayrı segmente edilmiştir. Hücre çekirdeğine ait bölgeler Çok Seviyeli Eşikleme yöntemiyle, sitoplazması ise U-net evrişimsel sinir ağı kullanılarak segmente edilmiştir. Segmente edilen bölgeler morfolojik işlemlerle iyileştirilmiştir. Segmente edilen çekirdek ve sitoplazma bölgelerinin birlikte değerlendirildiği görüntülerdeki her bir hücre için Çekirdek Hücre Oranı kriterine göre plazma hücreleri tespit edilmiştir. Veri setindeki 85 görüntü üzerinde yöntem uygulandığında, toplam 320 plazma hücresinden 279'u başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda %87,19 duyarlılık, %74,6 kesinlik ve %80,4 F1-skor değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Multipl Miyelom, Plazma Hücresi, Segmentasyon, U-net, Çok Seviyeli Eşikleme.

ABSTRACT

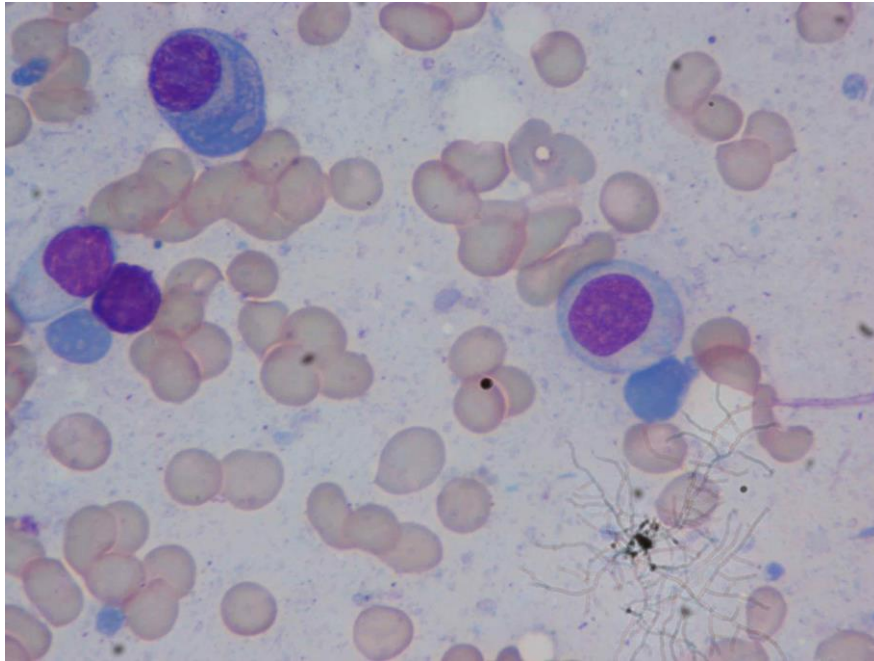
Multiple Myeloma is a disease that causes approximately 2% of cancer-related deaths in the world. Due to this disease, the number of plasma cells that normally produce antibodies for the body's immune system increases uncontrollably. Therefore, detection of plasma cells is an important factor for the diagnosis of the disease. Samples containing plasma cells are examined under a microscope. This examination is prone to human error and also takes a lot of time. In this study, an automatic system was developed for the detection of plasma cells. For the detection of plasma cells, the cell nucleus and cytoplasm were segmented separately by different methods. The regions of the cell nucleus were segmented by Multilevel Thresholding method and the cytoplasm was segmented using U-net convolutional neural network. The segmented regions were enhanced by applied morphological operations. Plasma cells were determined according to the Nuclear Cell Ratio criterion for each cell in the images in which the segmented nuclei and cytoplasm regions were evaluated together. When the proposed method was applied on 85 images of the data set, 279 of 320 plasma cells were successfully detected. As a result of the study, 87.19% sensitivity, 74.6% precision and 80.4% F1-score values were obtained.

Keywords: Multiple Myeloma, Plasma Cell, Segmentation, U-net, Multilevel thresholding

GİRİŞ

Plazma hücreleri, kemik iliğinde üretilen bir tür beyaz kan hücresidir. Multipl Miyelom ise, kemik iliğinde bulunan anormal plazma hücrelerinin oluşturduğu bir kanser türüdür (Saeedizadeh vd., 2016). Tüm kanser hastalıkları içinde Multipl Miyelomun görülme oranı yaklaşık %1'dir (Paing vd., 2022). Bununla beraber tüm kansere bağlı ölümler arasında Multipl Miyelom %2'lik bir orana sahiptir. Birçok kanser türünde olduğu gibi Multipl Miyelom kanserinin erken teşhisi ölüm oranını azaltmaktadır (Paing vd., 2022; Saeedizadeh vd., 2016).

Kemik iliği aspirasyonu yöntemiyle alınan örnekler kimyasal boyama (lekelendirme) işlemiyle renklendirilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi örnek mikroskopik görüntü üzerinde lekeli hücre çekirdekleri mor tonlarda ve sitoplazmaları ise mavi tonlardadır. Renklendirilen bu örnekler mikroskopla incelenmekte ve lekeli plazma hücreleri uzman tarafından incelenmektedir. Fakat bu işlem insan hatalarına açık, zaman alıcı ve yorucudur. Bu sebeplerle Multipl Miyelom plazma hücrelerinin yapay zekâ teknikleriyle tespiti oldukça önemlidir (Paing vd., 2022; Gupta vd., 2018; Saeedizadeh vd., 2016). Kan hücreleriyle ilgili literatürde çok sayıda çalışma olmasına rağmen Multipl Miyelomun görüntü işleme yöntemleriyle tespiti için yapılan segmentasyon çalışmaları 2015 yılından sonra başlamıştır (Saeedizadeh vd., 2016). Bunun sebebi plazma hücrelerinin (özellikle plazma hücresine ait sitoplazmanın) segmentasyonunun oldukça zor olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde ortaya konan az sayıdaki çalışma üç farklı veri seti üzerinden çalışılmıştır.



Şekil 1. Veri Setinin İlk Görüntüsü

İlk veri setinde 50 görüntü bulunmakta ve bu veri seti iki farklı çalışmada çalışılmıştır. Bunlar; Saeedizadeh vd., (2016) çalışmalarında, veri setine ön işleme, renk uzayı dönüşümü, K-ortalama, Otsu eşikleme, Watershed, SVM sınıflandırıcıları barındıran çok aşamalı yöntemler uygulayarak Multipl Miyelom plazma hücrelerini %55,49 F1-score oranıyla bölütlemiştir (Gupta vd., 2018). Gupta vd., (2017) aynı veri setindeki görüntüler üzerinde sırasıyla renk normalizasyonu, renk uzayı dönüşümleri, morfolojik yöntemler ve level set yöntemleri kullanarak tek plazma hücrelerini 141/165 oranında ve küme plazma hücrelerini 16/21 doğrulukla segmente etmişlerdir.

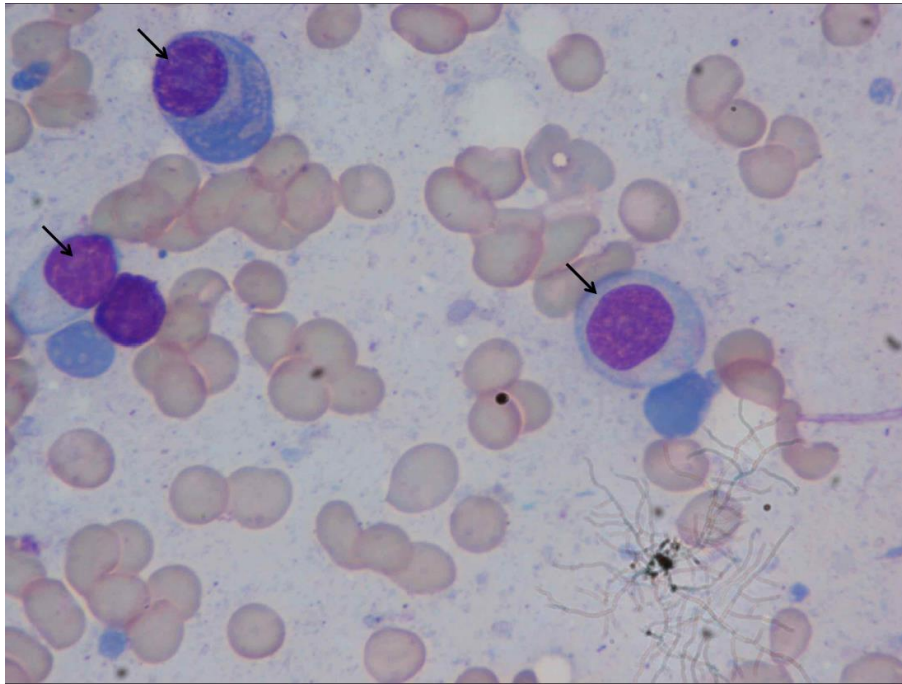
Diğer bir veri seti üzerinde yapılan çalışmalar (Gupta & Gupta, 2019) tarafından 85 görüntü üzerinde denenmiştir. Gupta vd., (2018) çalışmasında kontrast germe renk uzayı dönüşümleri yaparak lekelenmemiş hücreler görüntülerden ayıklanmış, çok fazlı level set ve morfolojik işlemler yardımıyla ilgili alanlar segmente edilmiştir. Bu çalışmanın başarımı Saeedizadeh vd., (2016) çalışması ile kıyaslanmış ve %81,66 Duyarlılık (Recall), %76,56 Kesinlik (Precision) ve %79,03'lük F1-score oranlarına ulaşıldığı vurgulanmıştır. Bu veri setiyle ilgili literatürde başka yayıma rastlanamamıştır.

Üçüncü veri seti SegPC-2021 isimli bir görüntü segmentasyon yarışmasında yayınlanan ve 775 adet Multipl Miyelom plazma hücresi içeren görüntülerden oluşan veri setidir. Yarışmaya konu bu veri seti üzerinde daha çok Mask R-CNN (Faura vd., 2022; Paing vd., 2022; Qiu vd., 2022; Vyshnav vd., 2020), U-Net (Afshin vd., 2021; Vyshnav vd., 2020), DeepLab3+ Modeli (Afshin vd., 2021), ResNet (Faura vd., 2022; Afshin vd., 2021) gibi yapay zekâ ve derin öğrenme temelli segmentasyon yöntemlerinin kullanıldığı uygulamalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, plazma hücrelerinin doğru tespit edilmesi oranı yerine; daha çok yapay zekâ temelli yöntemlerin başarımını ölçmek adına IoU (Intersection-over-Union) değeri gözetilmiş ve çoğu çalışmada %90'ın üzerinde başarımlar elde edilmiştir.

Önerilen bu çalışmada yukarıda bahsedilen ikinci veri seti kullanılmıştır. Önerilen bu çalışmada, çalışmanın esas hedefi Multipl Miyelom kanserinin teşhisi için plazma hücrelerinin doğru tespit edilmesi olduğundan bu doğrultuda açıklamalı görüntüleri de beraberinde sunan, yukarıda bahsedilen ikinci veri seti tercih edilmiştir. Ayrıca bu veri seti üzerinde kullanılacak yeni yöntemler sonucunda elde edilmiş olan Duyarlılık (Recall), Kesinlik (Precision) ve F1-score gibi başarımlar önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır.

MATERYAL

Çalışmada kullanılan mikroskopik görüntülere ait veri seti TCIA (The Cancer Imaging Archive) (Clark vd., 2013) web kaynağı üzerinden elde edilmiştir. Multipl Miyelom hastalarından kemik iliği aspirasyonu ile alınan örnekler, Jenner-Giemsa boyasıyla lekelenmiş lamalara konulmuştur. Dijital kamerayla donatılmış Nikon Eclipse-200 mikroskop kullanılarak lamalar bin kat yakınlaştırılmış ve BMP (bitmap) formatında hücre görüntüleri kayıt edilmiştir. 85 adet farklı örnekten oluşan veri setindeki tüm görüntüler 2560x1920 piksel boyutlarındadır (Gupta & Gupta, 2019). Veri setinde bulunan görüntüler zaten normalize edilmiştir (Gupta vd., 2020). Bu görüntüler içerisinde, çalışmada kesin referans olarak kullanılacak ve plazma hücrelerinin işaretlendiği açıklama görüntülerini de içermektedir (Gupta vd., 2018). Yalnız burada ilgilenilen plazma hücrelerinin sınırları tam olarak belirten maskeler verilmemiş, sadece ilgili plazma hücreleri okla gösterilmiştir. Şekil 2'de plazma hücrelerini gösteren siyah oklara dair örnek görsel verilmiştir.

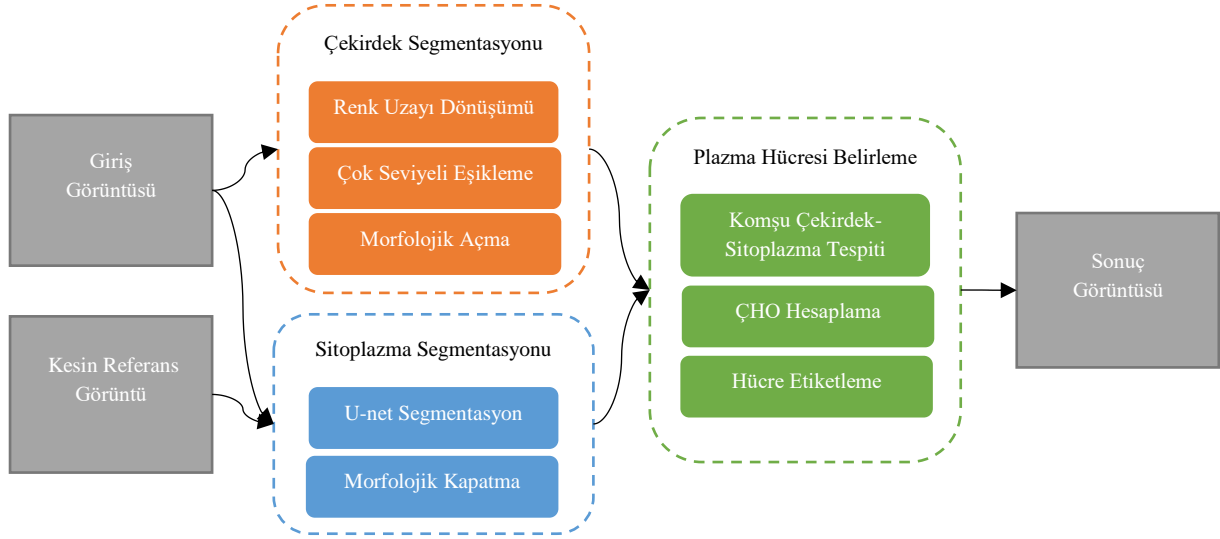


Şekil 2. Siyah Oklarla İlgilenilen Plazma Hücrelerini Gösterir Açıklama Görüntüsü

Veri setindeki görüntüler dört farklı sınıfa ayrılabilir. Bunlar, lekelenmiş hücrelerin çekirdeği, lekelenmiş hücrelerin sitoplazması, lekelenmemiş hücreler ve arka plandır. Lekelenmiş plazma hücrelerinde, hücre çekirdekleri, birbirine çok yakın mor tonlarda, sitoplazmaları ise koyu mavi ile açık mavi arasında değişen, hatta arka plana çok yakın tonlarda bulunabilmektedir. Lekelenmemiş hücreler ise genelde belirgin kenarlara sahip, sitoplazmaya ve arka plana yakın renk tonlarındadır. Arka plan ise genel olarak beyaza yakın, mavi-mor görüntülere sahip en açık renkli alan olarak tanımlanabilir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, Multipl Miyelom plazma hücrelerinin tespiti için hücre çekirdeği ve sitoplazması ayrı ayrı segmente edilmiştir. Çünkü Multipl Miyelom plazma hücrelerinin tespiti için her bir lekelenmiş hücrenin, Çekirdek Hücre Oranı (ÇHO) yani; çekirdek alanı/toplam hücre alanı oranının 0,8'den küçük olması gerekmektedir. 0,8 veya daha büyük bir orana sahip hücreler çekirdek hücresi (sitoplazması yok veya çok az) olarak adlandırılmaktadır (Saeedizadeh vd., 2016).

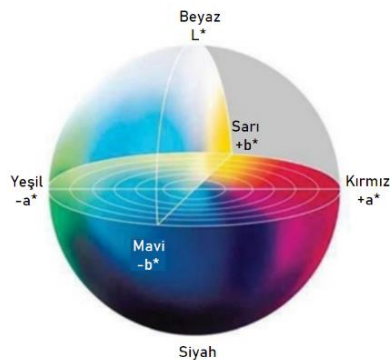


Şekil 3. Plazma Hücrelerinin Segmentasyonu için Önerilen Yöntemin Şematik Gösterimi

Birinci adımda, sitoplazma segmentasyonuna göre çok daha kolay olan hücre çekirdeğinin segmentasyonu için $L^*a^*b^*$ renk uzayı dönüşümü ve Çok seviyeli Otsu Eşikleme yöntemi kullanılmıştır. İkinci adımda ise sitoplazmanın segmente edilmesi için derin öğrenme temelli U-net mimarisinden faydalanılmıştır. Her iki adımdan elde edilen sonuçlar üzerinde görüntü açma, görüntü kapatma gibi temel morfolojik işlemler uygulanmıştır. Üçüncü adımda görüntülerde tespit edilen her bir hücre çekirdeği için, -varsa- komşu olan sitoplazmaları etiketleyerek Çekirdek Hücre Oranını hesaplanmıştır. Bu orana göre hücrenin ilgilenilen plazma hücresi olup olmadığına karar verilmiştir. Plazma hücrelerinin segmentasyonu için önerilen bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.

$L^*a^*b^*$ Renk Uzayı

CIE 1976(L^* , a^* , b^*) veya CIE LAB adıyla da bilinen $L^*a^*b^*$ renk uzayı insan gözünün görebileceği tüm renkleri tanımlayan, cihaz bağımsız bir modeldir. Bu modelde L^* katmanı 0-100 arası koyudan açığa doğru aydınlığı temsil eder. a^* katmanı ve b^* katmanının teorik olarak limitleri olmasa da sayısallaştırılabilmesi adına genelde -128,+127 aralığında değer alırlar. a^* katmanı pozitif uçta kırmızı, negatif uçta yeşil renk tonlarını temsil ederken, b^* katmanı ise pozitif uçta sarı, negatif uçta mavi renk tonlarını ifade eder (Taşgetiren, 2019; Connolly & Fleiss, 1997).



Şekil 4. $L^*a^*b^*$ Renk Uzayı Gösterimi (Kuru, 2014)

Çok Seviyeli Eşikleme

Global (tekli) eşikleme yöntemleri, görüntüye ait renk dağılımı üzerinde en uygun eşik değerini belirlemeye çalışır. Bulunan eşik değeri ile ilgilenilen nesne ve arka plan segmente edilmiş olur. Fakat görüntüde ikiden çok bölge varsa global eşikleme yöntemi istenilen başarıyı sağlamayabilir. Böyle durumlarda çok seviyeli eşikleme yöntemleri görüntü histogramı üzerinde birden çok eşik değeri belirleyerek görüntünün ikiden fazla bölgeye segmente edilmesine olanak sağlar (Merzban & Elbayoumi, 2019; Senthilkumaran & Vaithegi, 2016).

En popüler eşikleme yöntemi olan Otsu Eşikleme yöntemi, sınıflar arası varyansın maksimize edilmesini amaçlamaktadır. Otsu eşikleme yöntemi, görüntü segmentasyonunda, yaygın olarak tek eşik değeri belirlemek için kullanılsa da aslında çok eşik belirleme yeteneğine de sahiptir. Kaynak görüntüde genel olarak k adet farklı ton varsa, k-1 adet eşik değeri Otsu yöntemiyle hesaplanarak bu eşik değerlere göre k-seviyeli görüntü elde edilir (Tuba, 2014).

İki seviyeli eşikleme, bir görüntünün t eşik değeriyle eşiklenmesiyle, I görüntüsünü t değerinden küçük olan gri seviyeleri (M_0) ve t'ye eşit veya daha büyük olan gri seviye değerleri (M_1) olmak üzere iki alt kümeye ayırır. Eşiklemenin sonucunda, iki grubu temsil eden mantıksal 0 ve mantıksal 1'lerden oluşan bir ikili görüntü elde edilir. L adet gri seviyeden oluşan bir görüntü için, iki seviyeli eşikleme Denklem (1)'deki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} M_0 &= \{g(x, y) \in I \mid 0 \leq g(x, y) \leq t - 1\} \\ M_1 &= \{g(x, y) \in I \mid t \leq g(x, y) \leq L - 1\} \end{aligned} \quad (1)$$

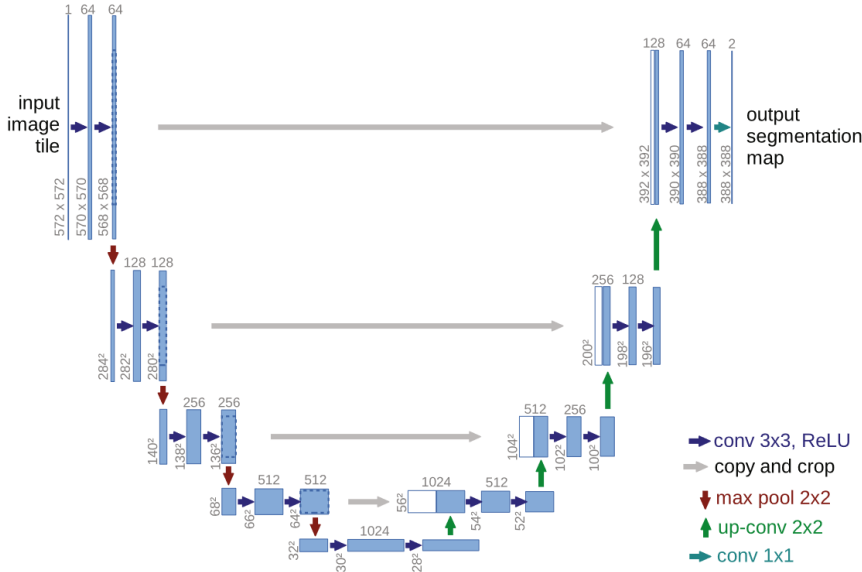
Çok seviyeli eşiklemede ise birden fazla eşik değeri için çok gruplu bir çıkış görüntüsü elde edilir. Bu durum Denklem (2)'de şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} M_0 &= \{g(x, y) \in I \mid 0 \leq g(x, y) \leq t_1 - 1\} \\ M_1 &= \{g(x, y) \in I \mid t_1 \leq g(x, y) \leq t_2 - 1\} \\ M_i &= \{g(x, y) \in I \mid t_i \leq g(x, y) \leq t_{i+1} - 1\} \\ M_m &= \{g(x, y) \in I \mid t_m \leq g(x, y) \leq L - 1\} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada t_i ($i = 1, \dots, m$) i. Eşik değeri olmak üzere m adet eşik değeri bulunmaktadır (Akay, 2013).

U-net

Evrişimli sinir ağı olan U-net, görüntüleri hassas ve hızlı bir şekilde bölütlemeye yaygın olarak kullanılmaktadır. U-net, benzer algoritmalara göre daha basit yapıya sahiptir ve uygulamada daha az veriye ihtiyaç duyar (Koç & Akgün, 2021). U-net ortaya çıkış tarihinden(2015) itibaren tıbbi görüntüleme yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli araştırmacıların çalışmalarına özel bir şekilde geliştirilmesi nedeniyle zaman içinde U-net mimarisinde gelişmeler olmuştur (Siddique vd., 2021).

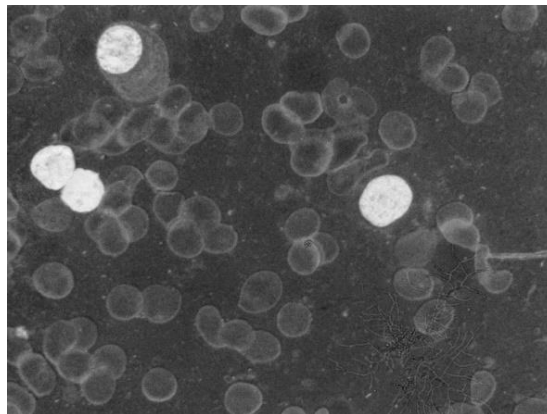


Şekil 5. U-net Mimarisi (Ronneberger vd., 2015)

Şekil 5’te verilen ve Ronneberger vd., (2015) tarafından geliştirilen U-net mimarisinde, ağ yapısı daralan ve genişleyen bir yoldan oluşmaktadır. Daralan yol evrişimli ağır tipik mimarisini izler. Her biri alt-örnekleme için adım 2 ile birlikte doğrultulmuş doğrusal birim (ReLU) ve 2x2 maksimum havuzlama katmanı tarafından takip edilen 3x3 evrişim katmanının tekrarlanan iki uygulamasından meydana gelmektedir. Her örnekleme adımında, özellik kanallarının sayısı 2 katına çıkarılmıştır. Genişletilmiş yoldaki her adım, özellik haritasının bir üst-örneklemesinin ardından özellik kanallarının sayısını yarıya indiren 2x2 evrişim katmanından, her biri ReLU tarafından takip edilen 2 adet 3x3 evrişim katmanı ve daralan yoldan gelen kırılmış özellik haritasıyla bir birleştirmeden meydana gelmektedir. Final katmanında 64 bileşenli her özellik vektörünü gerekli olan sınıf sayısına eşlemek için 1x1 evrişim katmanı kullanılmıştır. U-net ağında toplam 23 adet evrişim katmanı bulunmaktadır (Ronneberger vd., 2015).

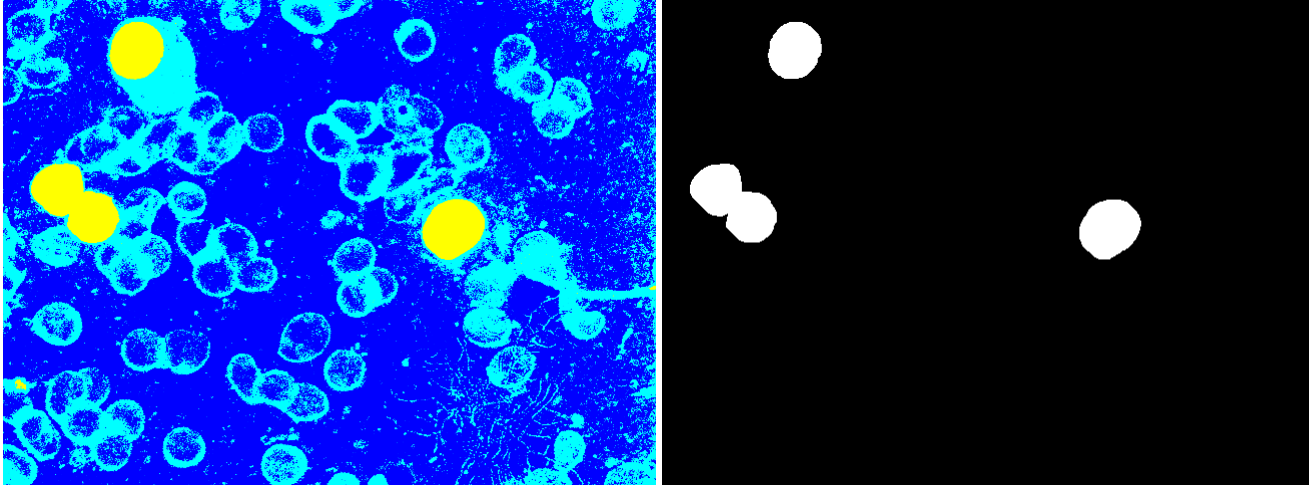
BULGULAR VE TARTIŞMA

Lekeli hücrelerdeki çekirdek segmentasyonu için, Çok Seviyeli Otsu Eşikleme yöntemi seçilmiştir. Bu seçimin sebebi hücre çekirdeklerinin çok yakın tonlarda ve genelde düz bir dokuya sahip olmasıdır. Bu tip bölgelerin segmentasyonu için eşikleme yöntemleri başarılı ve hızlı sonuçlar vermektedir. Çok Seviyeli Otsu Eşikleme yöntemi görüntüdeki piksellerin renk farklarından yararlanarak bölütleme yaptığından, bölütleme başarımını artırmak için görüntüler, bu renk farkının daha bariz olduğu $L^*a^*b^*$ renk uzayına dönüştürülmüştür. Bu uzaydaki a^* kanalı $-a^*$ ’dan $+a^*$ ’ya, sırasıyla yeşilden kırmızıya olan renk değerlerini temsil etmektedir. Çekirdekler ise görüntüdeki diğer alanlara göre en çok kırmızı renk değeri içeren alanlar olduğundan a^* katmanında diğer alanlardan kolayca ayrılmaktadır (Saadedzadeh vd., 2016). Şekil 6’da 0-1 aralığına normalize edilmiş a^* katmanı gösterilmektedir.



Şekil 6. Görüntüye ait a^* katmanı.

İlk olarak veri setindeki tüm görüntüler $L^*a^*b^*$ renk uzayına dönüştürülerek a^* katmanı üzerinde Çok Seviyeli Otsu Eşikleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde iki eşik değeri belirlenmiş ve görüntü üç seviyeye ayrılmıştır. Elde edilen görüntüler; çekirdeği oluşturan mor tonlar, sitoplazmayı ve bazen de lekelenmemiş hücreleri içeren mavi tonlar ve arka planı ve lekelenmemiş görüntüleri içeren gürültülü açık (beyaz) renk tonları içeren 3 ana seviyeden oluştuğundan yaygın olarak kullanılan iki seviyeli eşikleme yöntemi yerine üç seviyeli eşikleme yöntemi tercih edilerek segmentasyon kalitesi artırılmıştır. Bu görüntüler Şekil 7(a)'da gösterilmiştir. Her bir görüntü için ayrı ayrı belirlenen iki eşikten büyük olanının üstündeki değerlere sahip olan pikseller mantıksal 1, diğer pikseller mantıksal 0 olarak belirlenmiş ve böylece çekirdek alanlarını ifade eden ikili (binary) görüntüler oluşturulmuştur.

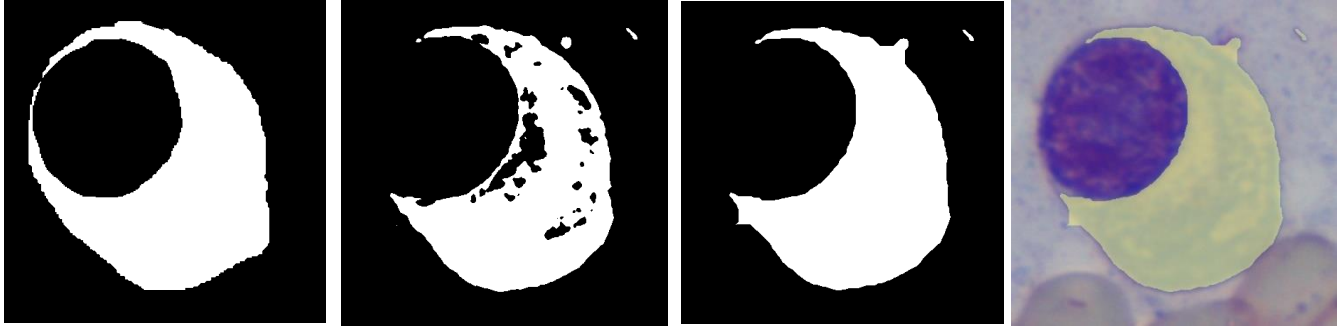


Şekil 7. a. 3-Seviyeli Eşikleme Sonucu (Solda) b. Hücre Çekirdeklerini Gösterir İkili Görüntü (Sağda)

Boyar maddeden kaynaklanan ve hücre çekirdeğinin renk tonlarına benzer tonlarda oluşan mor renkli gürültüler görüntünün geneline yayıldığından, bu gürültüleri temizlemek için alanı 10.000 pikselden küçük olan bağlı bileşenler ikili görüntülerden kaldırılmıştır. Bu işlemin sonucunda gürültüler azaltılmış olsa da hücre çekirdeği sınırlarındaki bazı istenmeyen kısımlar giderilememiştir. Bu sorunu çözmek için ikili görüntü üzerine morfolojik açma işlemi uygulanmıştır. Böylece daire şekline benzer çekirdek alanlarının şekli korunarak bu şekli bozan çıkıntılar yok edilmiştir. Şekil 7(b)'de segmente edilmiş hücre çekirdeklerini gösteren örnek bir ikili görüntü verilmiştir. Bu işlemler sonucu elde edilen ikili görüntüler segmente edilen sitoplazma görüntüleriyle beraber değerlendirilmiştir.

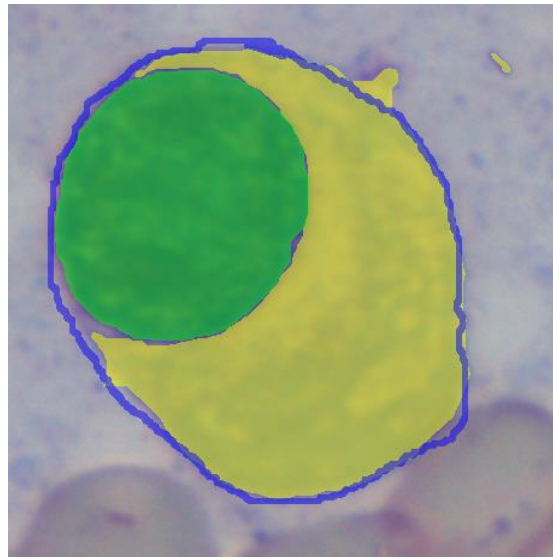
Sitoplazmanın segmentasyonunda ise klasik yöntemler başarılı sonuçlar vermediğinden (Saadedzadeh vd., 2016) derin öğrenme temelli U-net ağı kullanılarak segmentasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla veri setiyle birlikte sunulan, plazma hücrelerinin işaretlendiği açıklama görüntüleri esas alınarak, elle çizilen kesin referans görüntüleri, modeli eğitmek ve modelin kendi doğrulamasını yapması için ham görüntülerle beraber U-net ağına giriş olarak uygulanmıştır. 85 görüntüye ait başarımlar bu veri setiyle yapılmış önceki çalışmayla (Gupta vd., 2018) kıyaslanacağından, test edilecek görüntü sayısını azaltmamak için 85 adet görüntü eğitim doğrulama ve test alt kümelerine sabit olarak ayrılmamıştır. Bunun yerine görüntüler; rasgele 17'şer adet görüntü içeren 5 alt kümeye ayrılarak her bir alt küme, test verisi olarak kullanılmıştır. Kalan 68 adet görüntünün kendi içerisinde %75'i (51 adedi) eğitim, %25'i (17 adedi) doğrulama için kullanılmıştır. Her bir alt küme U-net ağına ayrı ayrı test edilmiştir. Bu işlemlerin uygulaması için MATLAB üzerinde çalışan Microscopy Image Browser (Belevich vd., 2016) yazılım paketinin, derin öğrenme aracı olan DeepMIB (Belevich & Jokitalo, 2021) kullanılmıştır.

Bu işlemler sonucunda elde edilen sitoplazma alanlarının belirlendiği ikili görüntülerin içerdiği gürültüler için de morfolojik yöntemler kullanılmıştır. İlk olarak morfolojik kapatma işlemi uygulanarak ikili görüntüde sitoplazmaya ait bağlantısız yakın bölgeler birleştirilerek sitoplazma alanını daha iyi temsil etmesi sağlanmıştır. İyileştirilmiş bu görüntü sitoplazmanın nihai segmentasyonunu ifade eden ikili bir görüntüdür. Şekil 8'de örnek bir hücreye ait sitoplazma segmentasyonu adımları gösterilmiştir.



Şekil 8. İlgilenilen Örnek Bir Hücre Sitoplazması İçin: **A.** Elle Çizilen Kesin Referans Maskesi **B.** 2D U-net Segmentasyonu Sonucu **C.** Morfolojik Kapatma Sonucu **D.** Orijinal Görüntü Üzerinde Nihai Sitoplazma Segmentasyonu Gösterimi

Hücre çekirdekleri üzerine uygulanan Çok Seviyeli Otsu Eşikleme yöntemi herhangi bir eğitime tabi tutulmadığından görüntüdeki tüm lekelenmiş çekirdekleri segmente etmek için kullanılmıştır. Buna karşın sitoplazma segmentasyonunda eğitim verisi kullanıldığından genellikle Multipl Miyelom plazma hücreleri segmente edilmiştir Plazma hücrelerinin mutlaka lekeli bir çekirdek ve lekeli sitoplazmadan oluşması gerektiği için çekirdeklere ait ikili görüntüler ve sitoplazmalara ait ikili görüntüler beraber değerlendirilerek birbiriyle komşu olan çekirdek ve sitoplazmaların birleşim alanları olan hücre alanları, CHO (Çekirdek Hücre Oranı) kriterine göre değerlendirilmiştir. CHO'su 0,8 değerinin altındaki hücreler (komşu çekirdek ve sitoplazmalar) ilgilenilen plazma hücresi olarak etiketlenmiştir.



Şekil 9. Örnek Hücre için CHO:0,38. Mavi Çizgi: Kesin Referans Sınırları, Yeşil Bölge: Hücre Çekirdeği Segmentasyonu Sonucu, Sarı Bölge: Sitoplazma Segmentasyonu Sonucu

Şekil 9'da başarılı olarak segmente edildiği değerlendirilen bir örnek hücrenin, ayrı ayrı segmente edilen çekirdek ve sitoplazma alanları sırasıyla yeşil ve sarı renklerde gösterilmiştir. Görsel başarımın değerlendirilebilmesi için kesin referans için elle oluşturulan hücreye ait sınırlar ise mavi çizgiyle çizilmiştir. Fakat çalışmada önerilen yöntemin amacı ilgilenilen plazma hücrelerini tespit etmek olduğundan her bir hücreye ait piksel bazlı başarım değerlendirmeleri yerine ilgilenilen plazma hücrelerinin ne kadar doğru bulunabildiğine dair istatistiksel başarım değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Önerilen yöntem tarafından tespit edilen hücreler, açıklamalı görüntülerle karşılaştırılarak başarım hesaplanmıştır. 85 görüntü için açıklamalı görüntülerde belirtilen 320 Multipl Miyelom plazma hücresinin 279 adedi doğru (TP: True Positive) tespit edilmiştir. 41 adedi ise tespit edilememiştir (FN: False Negative). 95 adet lekeli hücre ise ilgilenilen plazma hücresi olmamasına rağmen yanlış etiketlenmiştir (FP: False Positive). İlgilenilmeyen hücre sayısı veri seti içerisinde çok fazla olduğundan (TN: True Negative) sayısı literatürdeki aynı veri setiyle çalışan

diğer yayındaki (Gupta vd., 2018) gibi hesaplanamamıştır. TN değeri, ilgilenilen plazma hücreleri dışında kalan hücrelerin hangilerinin olduğu açıklanmalı görüntülerde verilmediğinden net olarak hesaplanamamıştır.

Hesaplanabilen TP, FN ve FP sayıları ile Duyarlılık ($Recall = TP / (TP + FN)$), Kesinlik ($Precision = TP / (TP + FP)$) ve F1-skorumları ($F1-Score = 2 * Precision * Recall / (Precision + Recall)$) Tablo 1'de aynı veri setiyle çalışan diğer yayındaki değerlerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Özellikle Duyarlılık oranını, yani ilgilenilen tüm plazma hücreleri içerisinde doğru etiketlenen plazma hücrelerinin oranı önceki çalışmaya kıyasla oldukça başarılıdır.

Tablo 1. Plazma Hücresi Tespitinin İstatistiksel Sonuçları

	Duyarlılık (%) (Recall)	Kesinlik (%) (Precision)	F1-Skor (%) (F1-Score)
Önerilen Yöntem	87,19	74,6	80,4
Gupta vd., (2018)	81,66	76,56	79,03
Saeedizadeh vd., (2016)	58,88	52,47	55,49

SONUÇLAR

Multipl Miyelom plazma hücrelerinin tespitinde, sitoplazma segmentasyonu kritik önemdedir. Fakat sitoplazma çok farklı şekillerde ve tonlarda olabileceğinden segmente edilmesi oldukça zorlu olabilmektedir. Çalışmamızın sonucunda, derin öğrenme temelli segmentasyon algoritmalarının, bu zorlu konuda klasik yöntemlere göre daha başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Bu konuda gelecekteki çalışmalarımızda, kısıtlı sayıda olan Multipl Miyelom kanserine ait mikroskopik görüntülerin artması durumunda derin öğrenme temelli algoritmaların daha çok eğitim verisine sahip olacağı, dolayısıyla da daha başarılı sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Afshin, B., Reza, A., Eman, S., & Alaa, S. (2021, September). Multi-scale Regional Attention Deeplab3+: Multiple Myeloma Plasma Cells Segmentation in Microscopic Images. In MICCAI Workshop on Computational Pathology (pp. 47-56). PMLR.

Akay, B. (2013). A study on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithms for multilevel thresholding. *Applied Soft Computing*, 13(6), 3066-3091.

Belevich, I., Joensuu, M., Kumar, D., Vihinen, H., & Jokitalo, E. (2016). Microscopy image browser: a platform for segmentation and analysis of multidimensional datasets. *PLoS biology*, 14(1), e1002340.

Belevich, I., & Jokitalo, E. (2021). DeepMIB: user-friendly and open-source software for training of deep learning network for biological image segmentation. *PLoS computational biology*, 17(3), e1008374.

Clark, K., Vendt, B., Smith, K., Freymann, J., Kirby, J., Koppel, P., Moore, S., Phillips, S., Maffitt, D., Pringle, M., Tarbox, L., & Prior, F. (2013). The Cancer Imaging Archive (TCIA): Maintaining and Operating a Public Information Repository. *Journal of Digital Imaging*, 26(6), 1045–1057.

Connolly, C., & Fleiss, T. (1997). A study of efficiency and accuracy in the transformation from RGB to CIELAB color space. *IEEE transactions on image processing*, 6(7), 1046-1048.

Faura, Á. G., Štepec, D., Martinčič, T., & Skočaj, D. (2022, April). Segmentation of multiple myeloma plasma cells in microscopy images with noisy labels. In *Medical Imaging 2022: Computer-Aided Diagnosis* (Vol. 12033, pp. 160-167). SPIE.

Gupta, R., Mallick, P., Duggal, R., Gupta, A., & Sharma, O. (2017). Stain color normalization and segmentation of plasma cells in microscopic images as a prelude to development of computer assisted automated disease diagnostic tool in multiple myeloma. *Clinical Lymphoma, Myeloma and Leukemia*, 17(1), e99.

Gupta, A., Mallick, P., Sharma, O., Gupta, R., & Duggal, R. (2018). PCSeg: Color model driven probabilistic multiphase level set based tool for plasma cell segmentation in multiple myeloma. *PloS one*, 13(12), e0207908.

- Gupta, R., & Gupta, A. (2019). MiMM_SBI Lab Dataset: Microscopic Images of Multiple Myeloma [Data set]. The Cancer Imaging Archive.
- Gupta, A., Duggal, R., Gehlot, S., Gupta, R., Mangal, A., Kumar, L., Thakkar, N., & Satpathy, D. (2020). GCTI-SN: Geometry-inspired chemical and tissue invariant stain normalization of microscopic medical images. *Medical Image Analysis*, 65, 101788.
- Koç, A. B., & Akgün, D. (2021). U-net Mimarıleri ile Glioma Tümör Segmentasyonu Üzerine Bir Literatür Çalışması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 407-414.
- Kuru, K. (2014). Optimization and enhancement of H&E stained microscopical images by applying bilinear interpolation method on lab color mode. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 11(1), 1-22.
- Merzban, M. H., & Elbayoumi, M. (2019). Efficient solution of Otsu multilevel image thresholding: A comparative study. *Expert Systems with Applications*, 116, 299-309.
- Paing, M. P., Sento, A., Bui, T. H., & Pintavirooj, C. (2022). Instance Segmentation of Multiple Myeloma Cells Using Deep-Wise Data Augmentation and Mask R-CNN. *Entropy*, 24(1), 134.
- Qiu, X., Lei, H., Xie, H., & Lei, B. (2022, March). Segmentation of Multiple Myeloma Cells Using Feature Selection Pyramid Network and Semantic Cascade Mask RCNN. In *2022 IEEE 19th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)* (pp. 1-4). IEEE.
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015, October). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention* (pp. 234-241). Springer, Cham.
- Saeedizadeh, Z., Mehri Dehnavi, A., Talebi, A., Rabbani, H., Sarrafzadeh, O., & Vard, A. (2016). Automatic recognition of myeloma cells in microscopic images using bottleneck algorithm, modified watershed and SVM classifier. *Journal of microscopy*, 261(1), 46-56.
- Senthilkumaran, N., & Vaithegi, S. (2016). Image segmentation by using thresholding techniques for medical images. *Computer Science & Engineering: An International Journal*, 6(1), 1-13.
- Siddique, N., Paheding, S., Elkin, C. P., & Devabhaktuni, V. (2021). U-net and its variants for medical image segmentation: A review of theory and applications. *IEEE Access*.
- Taşgetiren, N. (2019). Renkli histopatolojik görüntüde meme kanseri hücre çekirdeği segmentasyonu (Master's thesis, KSÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tuba, M. (2014). Multilevel image thresholding by nature-inspired algorithms: A short review. *Computer Science Journal of Moldova*, 66(3), 318-338.
- Vyshnav, M. T., Sowmya, V., Gopalakrishnan, E. A., & Menon, V. K. (2020, July). Deep learning based approach for multiple myeloma detection. In *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-7). IEEE.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.06.2021
Kabul Tarihi : 30.12.2021

Received Date : 18.06.2021
Accepted Date : 30.12.2021

KRİTİK MİNERALLER İÇİN GELENEKSEL OLMAYAN BİR KAYNAK; DÜŞÜK KALİTELİ BAZI TÜRK KÖMÜRLERİNİN NADİR TOPRAK + Y VE Sc İÇERİĞİ

A NON-TRADITIONAL RESOURCE FOR CRITICAL MINERALS: RARE EARTHS +Y (REY), AND Sc CONTENTS OF SOME TURKISH LOW-RANK COALS

Nazan YALÇIN ERİK (ORCID: 0000-0001-7849-8660)

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nazan YALÇIN ERİK, nyalcin@cumhuriyet.edu.tr

ABSTRACT

REY (Rare Earth Elements + Y) and Sc are strategic materials that are needed globally for areas requiring high technology such as the energy sector and electronics. Coals contain Rare Earth Elements along with many trace elements in their composition. In recent years, as the gap between REE's global demand and supply increases, the search for alternative sources has become increasingly important, especially for countries that depend heavily on imports of these materials. Particularly considered as waste material, coal and coal ash are considered a possible source for many elements, including REE. Turkish low-rank coals analyzed in this study have an average critical mineral abundance of 73.73 ppm (on a dry whole coal basis). Materials collected from the various Neogene coal fields in Turkey were found to contain a relatively higher amount of REY (>100 ppm) relative to the rest of the samples, which may be attributed to the volcanoclastic character of the sediment associated with the seams. In this study, it was determined that although the critical mineral contents of the investigated coals were higher than Turkish, World, USA, and China coals, they were not economic for production and could be taken into consideration by the development of production techniques.

Keywords: Rare earth elements, yttrium, Sc, Turkish lignites, critical minerals.

ÖZET

NTE (Nadir Toprak Elementleri + Y) ve Sc, enerji sektörü ve elektronik gibi yüksek teknoloji gerektiren alanlar için küresel olarak ihtiyaç duyulan stratejik malzemelerdir. Kömürler, bileşimlerinde birçok eser element ile birlikte Nadir Toprak Elementleri içerir. Son yıllarda, NTE'nin küresel talep ve arzı arasındaki uçurum arttıkça, özellikle bu malzemelerin ithalatına büyük ölçüde bağımlı olan ülkeler için alternatif kaynak arayışları giderek daha önemli hale gelmiştir. Özellikle atık madde olarak değerlendirilen kömür ve kömür külü, NTE dahil birçok element için olası bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada incelenen Türk düşük dereceli kömürleri (kuru tam kömür bazında) ortalama 73,73 ppm kritik mineral bolluğuna sahiptir. Türkiye'deki çeşitli Neojen kömür yataklarından toplanan materyallerin, diğer örneklerle göre nispeten daha yüksek miktarda NTE (>100 ppm) içerdiği bulunmuştur, bu durum, kömür damarlarının ilişkili sedimanter birimlerin volkaniklastik özelliğine atfedilebilir. Bu çalışmada incelenen kömürlerin kritik mineral içerikleri Türk, Dünya, ABD ve Çin kömürlerine göre daha yüksek olmasına rağmen üretim açısından ekonomik olmadığı ve üretim tekniklerinin geliştirilmesi ile dikkate alınabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nadir toprak elementi, yitrium, Sc, Türk Linyit, Kritik mineral

INTRODUCTION

Rare earth elements (REE) are a group of seventeen elements of the periodic table, with the inclusion of fifteen lanthanides (lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, together with lutetium) plus yttrium and scandium. Rare Earth Elements and Scandium have gained more importance and started to be researched due to the developing technology and the need for raw materials needed in this context. The need for these elements of technological developments has caused them to be defined as the strategic elements of the century (Alonso et al. 2012, Franus et al. 2015; Haque et al. 2014, Kumar et al. 2018). The fact that REE-containing materials are more stable, high-temperature and corrosion-resistant lightweight materials has been vital for the production of indispensable components of normal life, especially refining technology, computers, hybrid vehicles, batteries, mobile phones, flat television screens (U.S. Department of Energy, 2011; Humphries, 2013; Massari and Ruberti, 2013; Zhang and Honaker, 2018). Because of their critical role in the modern economy, both the European Commission (2014, 2017) and the US Department of Energy (2011) refer to REE as critical raw materials. The fact that their production is difficult and high in cost has also caused the development of production methods to meet the market demand. Removing these elements from the earth's crust, then turning them into metals or alloys is extremely costly, environmentally hazardous, especially dangerous for workers' health. For this reason, some countries do not prefer to produce these elements despite the existence of reserves. As such, more than eighty percent of global production is made by China alone due to the advantage of cheap and negligible craftsmanship (Haxel et al. 2002).

The rare earth elements (REE) and yttrium (hereinafter referred to as REY) are a group of 16 elements, including the lanthanides and yttrium, which exhibit similar physicochemical properties and tend to coexist in nature (McLennan, 1989; IUPAC, 2005). Scandium is chemically similar to the lanthanides and yttrium and is sometimes included in REEs (Long et al. 2012). The increasing global demand for REY (or REE and Y), especially in China, and the decrease in supply in recent years necessitated the discovery of new source areas or production methods to these materials. The increase in the variety of metal used in the industry and the high price of the end high-tech products directed the countries to investigate their underground resources more effectively and to supply the mines necessary for their domestic consumption either from their resources or through imports. For this reason, several kind of research are ongoing around the world to obtain REE not only in ores but also in coal and coal-bearing rocks (Zheng et al. 2007; Ketris and Yudovich, 2009, Całus-Moszek and Białecka, 2013, Dai et al. 2011a and 2012; Adamczyk et al. 2015). Many studies have suggested that coal ash is a potential alternative source for REY (Seredin and Dai, 2012; Franus et al. 2015; Hower et al. 2016; Hower et al. 2015; Zhang et al. 2015), and with traditional REY deposits. In comparison, some fly ash generally contains a higher critical REY fraction (Seredin and Dai, 2013; Seredin et al. 2012; Pazand, 2015; Taggart et al. 2016).

The coal industry globally generates significant amounts of mineral waste, both during mining and during its use, the bulk of which consists of components of economic importance. Therefore, recovering REY from alternative sources such as coal by-products and waste can maintain the sustainability of coal mining and ensure the reliable supply of high-tech materials. REY recovery as a by-product from coal deposits actively mined in many countries could alleviate the current raw material crisis and, from the environmental point of view, make “dirty” coals into a REY source for “clean” energy. In this context, low-rank coal/lignite is especially noteworthy.

In this study, REY properties of low-quality coal in Turkey were evaluated and conducted an investigation as to whether the production potential in future periods. The total coal reserves of Turkey reach around 19 Gt and are mostly composed of Cenozoic, low-rank coals, which display high ash yields and total sulfur contents (Tuncalı et al. 2002; MTA, 2020). In addition, environmentally sensitive elements (B, Cr, As, Ni) have been enriched in these coals (Querol et al. 1997; Karayiğit et al. 2000; Palmer et al. 2004) and therefore have potential adverse effects on the environment and human health. There are notable studies evaluating the major and trace element characteristics of Turkish Tertiary low rank coals (Altunsoy et al. 2017; Altunsoy et al. 2016; Altunsoy et al. 2015; Cicioğlu ve Karayiğit, 2015; Çelik et al. 2017; Demir & Kurşun, 2012; Eraslan et al. 2014; Eraslan & Öngün, 2017; Erkoyun et al. 2017; Gürdal, 2011; Gürdal, 2008; Hoş Çebi et al. 2009; Kalender & Karamazi, 2017; Karayiğit et al. 2019; Karayiğit et al. 2017; Karayiğit & Çelik, 2003; Karayiğit et al. 2001; Karayiğit & Gayer, 2000; Karayiğit et al. 2000; Karayiğit et al. 1999; Özçelik et al. 2016; Palmer et al. 2004; Saydam Eker et al. 2016; Tozşin, 2014; Yalçın Erik & Ay, 2020; Yalçın Erik, 2019; Yalçın Erik & Ay, 2018; Yalçın Erik, 2018).

Also, due to environmental concerns and inadequate competitiveness during mining, the REE supply of Turkey is only covered by imports. In this study, some literature data and the author's recent studies of REY values in some Turkish coal basins are interpreted to explain whether coal deposits are potential new sources for REY elements. Therefore, the study is of great importance in terms of protecting the environment from the effects of the harmful components that emerge as a result of the use of coal and exposing the industrial use potential of Turkish coals.

Usage Areas, Industrial And Economic Importance Of REY

The demand for rare earth elements containing scandium and yttrium as well as lanthanides in the World has increased over the last few decades (Zhao et al. 2017; Balaram, 2019). In modern life, they have unique magnetic and chemical properties that are utilized in many areas such as crude oil extraction or refining, in the production of electronic and optical products. They are also widely used in the manufacture of the special compounds, catalysts, industrial ceramics, high-quality glass, superconductors, fiber optics, and accumulators. With the widespread use of renewable energy sources on a global scale, the need for such elements has started to grow. For example, the construction of electric vehicles and wind turbines requires high-tech generators and motors using super strong magnets (Neomagnets) made of neodymium and dysprosium. Elements such as yttrium, terbium, and europium are the most important components in laptops, mobile phones, and TV screens (Seredin et al. 2013; Balaram, 2019).

Conventionally, REY is extracted and taken it back from rare earth minerals such as monazite, xenotime, and bastnasite or ion-adsorbed clays (Taggart et al. 2016). The production of REY has been limited to a few countries due to the limited areas of reserve areas, technical difficulties, legal difficulties, and capital costs. Reserves are not homogeneously distributed throughout the world for geological reasons, and China, Brazil, Vietnam and Russia have more than 88% of the estimated global reserves (US Geological Survey, 2018). While supplying > 80% of all REEs consumed, China has long been the leading REE producing country with proven reserves of more than 30% (US Geological Survey, 2018). Increasing global REY demand with the continuous development of modern technology, together with the tight export quota imposed by China, has led to significant fluctuations in the REY global supply market, especially in the last decade. Given the global impacts of the rare earth element scarcity, a large number of private companies and national governments have started promoting alternative REY resources. World REE production is approximately 130×10^5 tons/year and the monetary value of this production is around 4×10^9 \$/year and China is the main manufacturer country of this sector (WEC, 2007). A similar trend is also valid for REY prices. For example, the price of some critical metals hit historic records in mid-2011 (Cox and Kynicky, 2018).

REY Geochemistry

"Rare earth elements nomenclature refers to scandium and yttrium together with lanthanide group elements (lanthanides), which are chemically similar metallic elements" (IUPAC, 1968). These elements feature high melting points, high density, high thermal and electrical conductivity (Huang et al. 2018). Lanthanide elements are divided into two main groups as cerium and yttrium. The Cerium (or light) group consists of elements Ce, La, Pr, Eu, Pm, Sm, and Nd, and the Yttrium (or heavy) group consists of Ho, Lu, Dy, Gd, Y, Tm, Yb, Tb, and Er elements.

According to geochemical evaluations, REY elements can be classified as total REY, light, medium, and heavy. The light REY elements (also called cerium group; La, Pr, Nd, and Ce; LREY), medium (Sm, Gd, and Eu; MREY), and heavy (also called yttrium group Lu, Er, Ho, Tb, Yb, Dy, Sc, Tm and Y; HREY) groups (Zhang et al. 2015). In addition, as suggested by Seredin and Dai (2012), according to abundance and potential uses of use, critical (Y, Dy, Eu, Er, Nd, Tb), excessive (Lferenru, Tm, Ho, Yb, Ce), and non-critical (La, Pr, Sm Gd). Recently, the US Secretary of the Interior (2018) classified the REY + Sc group as "critical minerals".

The total content of lanthanide in the Earth's crust is 0.0015% and is the same as the copper content. Traditionally, REY is commercial product from rare earth deposits that contain REY-bearing minerals such as bastnaesite, monazite, and xenotime (Haxel et al. 2002; Jordens et al. 2013). Also, ion-adsorbed clays are another important source, especially for HREY (Jha et al. 2016). The world's rare earth reserves are estimated to be 130 million tons in total, 44 million tons of which is in China. The other major producers are Australia, the USA, Russia, Malaysia, and Vietnam (Balaram, 2019).

REY Characteristics In Coals and Abundance Of Coals

Coal is a sedimentary rock formed as a result of a heterogeneous mixture of inorganic materials (quartz, clay minerals, carbonate minerals, sulfur minerals, etc.), mainly terrestrial organic materials (Swain, 1990). Each coal layer is unique due to its formation process (deposition environment, origin material, and other Pysico-chemical factors) and has the different elemental composition (Swain, 1990). While many elements are related the mineral matter in coal, some elements are also related to organic matter. Elements with inorganic affinity are mostly concentrated in ash as a result of the combustion reaction (Dai et al. 2012). The primary sources of REEs in coal ash are clay minerals (Kokowska-Pawłowska et al. 2013). Coal contains many metallic elements that can be used as a source of industrially valuable, critical elements. In particular, it reminds us that the major environmental impacts of coal for domestic or energy purposes can be evaluated with different uses. Instead of burning low-calorie and dense ash composition coals, the evaluation of mineral compositions seems to be a more appropriate solution for the environment and industry (Kumar et al. 2018).

According to the abundance in coal, four different types of REY can be defined in terms of their origin; 1) Terrigenous type, REY transported by surface waters; 2) tuffaceous type, relates to acid and alkali volcanic ash; 3) meteoric water leaking from the surface or groundwater driven type, and 4) hydrothermal type. The first two types are formed in the peat bog stage, while the seepage type is epigenetic and the hydrothermal type can occur at any stage of coal formation (Ward, 1978; Eskenazy, 1987a,b, 1995; Finkelman, 1993; Hower et al. 1999; Arbuzov, et al. 2000; Dill, 2001; Arbuzov and Ershov, 2007; Dai et al. 2010a, 2011c; 2008).

This elemental richness (REY) in coal-bearing units did not attract attention for a long time, because conventional deposits (e.g., carbonatites, alkaline granites) were thought to have sufficient levels of these metals and there was no need to search for different resources. Although this situation started to change significantly after 2009, by this time the world economy was already faced with a crisis in REY supply (Lifton, 2009). Trace element studies in coal and coal by-products in different coal areas indicate that the average abundance of REY + Sc varies between coals (Hower et al. 1999; Arbuzov et al. 2000; Nifantov, 2003; Seredin et al. 2006b; Dai et al. 2011b). For example, the average REY content of Chinese and US coals is reported to be 136 ppm (Dai et al. 2012) and 65.5 ppm (Lin et al. 2018), respectively. At the Far East coal mines in Russia with a content of 300 to 1000 ppm, in the East Clayton Fire Clay coal bed at a content of 500–4000 ppm (Hower et al. 1999), in the Sydney Basin of Nova Scotia, Canada, it has a high content of REE content of 72-483 ppm are found in coal deposits (Birk & White, 1991) and Mazino Coal Mine, Iran, this ratio range of 16.4184 mg/g with an average of 88.9 mg/g (Pazand, 2015). A recent study suggests that combustion waste from the Appalachian coalfield may contain one of the largest sources of REE in the United States (Taggart et al. 2016). Moreover, the coals of the Democratic People's Republic of Korea contain about 77 ppm REY (Kumar et al. 2018) while Turkish coals contain about 116 ppm REY + Sc. (Karayigit et al. 2000; Özbayoğlu, 2010; Palmer et al. 2004).

According to the studies on REY + Sc distributions, the total amount of critical minerals in the world's coal is estimated to be 50 million metric tons; this equates to about 50% of the reserves detected in traditional rare earth minerals (Zhang et al. 2015; Mohr & Evans, 2009; World Energy Council, 2007). Sun et al. (2016) and Ketris and Yudovich (2009), 300 mg/kg REY content in coal constitute the minimum value for mining. Based on the calculation of average lanthanide and Y concentration, the average total REY content of world coals (Ketris & Yudovich, 2009) is estimated to be 68.5 million metric tons (Mohr & Evans, 2009; Wang et al. 2012; Zhang et al. 2015). The most interesting situation in this regard is; Rare earth concentrations in the ashes of some types of coal are a hundred times higher than those found naturally in the Earth's crust (Zhang et al. 2015).

According to experimental data on REY production from combustion wastes of some Russian Far Eastern coals in pre-crisis periods, the REO content in ash was ≥ 1000 ppm (0.1%), which was accepted as the threshold value for useful recovery of metals from low carbonization grade coals (Seredin & Dai, 2012). However, current REY prices are much higher than in the past and so it is believed that values below this value can be used for coals. In addition, this threshold value can be reduced to 800-900 ppm for coal seams greater than 5 m thick; here, relatively thick coal seams with $REO \geq 1000$ ppm (in ash) suitable for selective mining can be found (Seredin & Dai, 2012).

In addition, as a result of electricity generation using coal in thermal power plants all over the world, a large amount of trace element-rich coal by-products are obtained. For example, the USA produces about 81.0 million tons of ash per year, of which about 44% is used for cement making and soil enrichment. The remaining part is usually stored in open ground. When we consider the figures given for a single country (US) for countries that use

coal as the primary energy source all over the world, the size of the figures will be remarkable (US Geological Survey, 2018).

Physical And Chemical Characteristics Of Turkish Lignites

As mentioned earlier, Turkey's main energy source is low-grade coal. Among these coals, bituminous coals are mostly in the Carboniferous Zonguldak Basin on the western Black Sea coast of Turkey, while lignite and to a lesser extent lower bituminous coal are Tertiary Basins in the country (Figure 1) (Tuncalı et al. 2002; Palmer et al. 2004). The maximum depth and thickness of lignite seams in Turkey shows significant differences between the different basins: the Eocene basin 605 m and 0.35-14.90 m, in the Oligocene basin 332 m and 0.05 – 5.10 m, in the Miocene basin 828 m and 0.10-57.00 m, and Pliocene basin respectively 426 m and 0.10-87.00 m (Tuncalı et al. 2002).

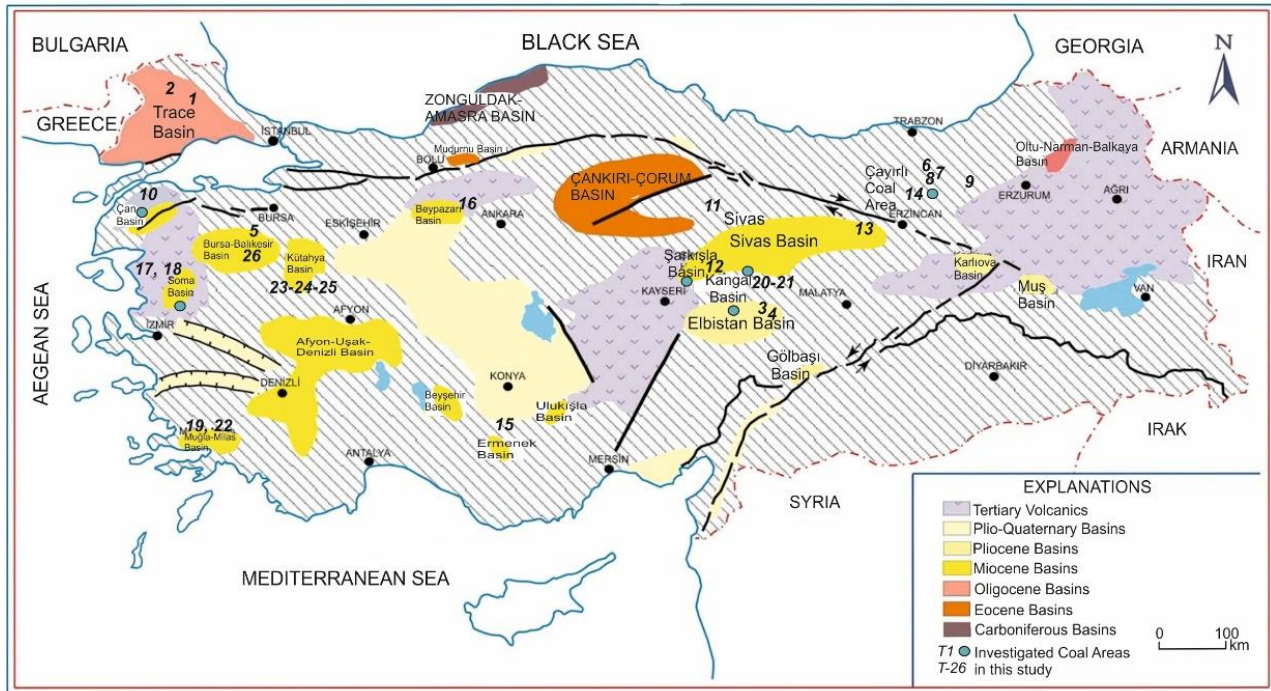


Figure 1. Location of Turkish Tertiary Coal Fields and Investigated Coal Mines

Basins containing lignite show quite different geological environment characteristics from each other (Görür and Okay, 1996; Şengüler, 2010; MTA, 2010) but the most common basins are the grabens and half-grabens, which were formed in the Aegean Region as a consequence of the westerly escape of the Anatolian continent during Neogene (e.g., Barka et al. 1994). Lignite veins are mainly formed with volcano-clastics and carbonates accumulating in lakes and streams in tectonically active basins (Tuncalı et al. 2002). Lignites formed in such environments are mostly limnic and the continuity of the veins is generally not found due to faults limiting the coal-forming environments. In addition, the deposition conditions in these basins caused the coal seams and mineral-dense layers (clay, carbonate alternation) to be abundant. These geological features both reduce the quality of Turkish lignite and make the coal uneconomical for the mine as it is very thin and fragmented (MTA, 2010).

Lignites in Turkey are mostly low calorie, high volatile matter, moisture, ash, and sulfur content (Palmer et al. 2004; Tuncalı et al. 2002). Chemical properties are quite different; for example, its calorific values vary between 1185 kcal/kg and 5574 kcal/kg (Tuncalı et al. 2002). According to Şengüler (2010), approximately 75% of Turkish lignites have caloric values below 2500 kcal/kg, 17% between 2500 and 3000 kcal/kg and only 8% above 3000 kcal/kg.

Having performed proximate and ultimate analyses they found that the moisture, ash, volatile matter, fixed carbon, and sulfur contents of Turkish lignites range between 1.2 and 57.7%, 5.2–56.1%, 18.3–43.8%, 8.9–44.1%, and 0.2–10.7%, respectively. However, according to the ultimate analysis results, elementary carbon between 14.31% and 61.39%, hydrogen range between 1.30% and 4.29%, nitrogen 0.21% and 3.31%, and oxygen at 0.0%, It ranges

from 8.0 to 23.20%. The most common minerals are oxides (quartz and opal), clays (kaolinite and smectite), silicates (mica, chlorite, zeolite), carbonates (calcite, siderite, dolomite), sulfur (pyrite) and sulphates (gypsum).

MATERIALS AND METHODS

For this study, trace element data belonging to 26 coal fields made by different researchers and the research results made by the author of this study were evaluated together (Table 1 and Fig.1). In the selection of these coal sites, it was taken into consideration that coal fields to be of similar age (Tertiary), the data were the result of whole dry coal-based analyzes and that the analyzes were performed in the same laboratories.

Data for 420 samples from 26 underground and open-pit mines, drill holes, and natural outcrops located outside of mines are listed in Table 1. The content of some REY (Sc, Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) was determined using Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA). Loss on ignition (LOI) was measured gravimetrically. These tests were carried out at ACME Laboratories Ltd. (ACMELABS) in Canada.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Rare Earth Element Characteristics Of Turkish Low-Rank Coals

In this study, Seredin and Dai (2012) REY classification was used and includes classes such as light (LREY), medium (MREY) and heavy (HREY) REY and critical, Non-critical and extreme groups (Seredin, 2010).

The results of the REE and ash yield are provided in Table 1. Based on the results of the coals examined for this study, the total REY concentration ranges from 18.69 ppm to 177.2 ppm, and for coal and coal-bearing lithologies, a total average abundance of REY + Sc was found to be 73.73 ppm (21.83 to 185.20 ppm) on dry whole coal basis (Fig.2). The \sum LREE value in the analyzed samples is between 10.11 and 113.8 ppm (avg. 48.12 ppm). The \sum LREE / \sum HREE ratios in the studied coals range from 1.19 to 11.48 (avg. 3.36) and indicate that LREEs are enriched according to HREEs (Table 2).

Table 1. Rare-Earth Element (REE) Content (whole coal basis, in ppm) Of The Investigated Coal Area Samples.

Coal Area	Reference	Area Code	Element Values (ppm)														Ash
			Sc	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Saray (Tekirdağ)	Eraslan & Ergün (2017)	T1	5.5	9.09	7.8	15.64	7.08	1.38	0.34	0.26	1.41	0.32	0.99	0.15	0.99	0.15	28.31
Pınarhisar (Kırklareli)	Eraslan & Ergün (2017)	T2	3.94	12.64	8.58	16.18	7.34	1.57	0.39	0.3	5.39	0.77	1.18	0.17	1.14	0.18	24.36
Afşin-Elbistan Outcrop (K.Maraş)	Cicioğlu & Karayiğit (2015)	T3	1.82	4.37	6.03	11.93	5.48	1.05	0.26	0.15	0.95	0.17	0.5	0.07	0.43	0.06	31.15
Afşin-Elbistan Well (K.Maraş)	Cicioğlu & Karayiğit (2015)	T4	4.81	8.62	11.6	21.54	10.08	1.95	0.48	0.29	1.54	0.32	0.92	0.12	0.75	0.11	39.86
Orhaneli (Bursa)	Karayiğit et al. (2003)	T5	3.9	4.8	10.0	16.0	7.0	1.2	0.4	0.2	1.0	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	41.0
Özyurt (Gümüşhane)	Saydam Eker et al. (2016)	T6	n.d.	n.d.	7.72	14.73	7.18	1.6	0.46	0.3	1.66	0.36	1.02	0.16	0.91	0.15	n.d.
Kayadibi (Gümüşhane)	Saydam Eker et al. (2016)	T7	n.d.	n.d.	19.35	35.1	17.3	3.89	1.02	0.75	4.42	0.89	2.5	0.37	2.32	0.36	n.d.
Tarhanas (Gümüşhane)	Saydam Eker et al. (2016)	T8	n.d.	n.d.	25.9	51.48	19.55	3.61	0.86	0.56	3.32	0.66	1.88	0.3	1.9	0.3	n.d.
Manas (Bayburt)	Saydam Eker et al. (2016)	T9	n.d.	n.d.	30.85	47.3	21.88	4.43	0.93	0.71	4.27	0.88	2.59	0.39	2.62	0.42	n.d.
Çan (Çanakkale)	Gürdal (2008)	T10	n.d.	3.81	3.78	8.3	2.73	0.57	0.14	0.1	0.49	0.13	0.36	0.043	0.339	0.07	11.69
Arguvan (Malatya)	Yalçın Erik & Ay (2020)	T11	6.83	7.05	7.77	13.85	5.93	1.17	0.27	0.19	1.31	0.24	0.73	0.09	0.74	0.11	63.26
Gemerek (Sivas)	Yalçın Erik (2018)	T12	3.8	3.47	4.3	7.43	3.3	0.59	0.15	0.1	0.57	0.12	0.33	0.06	0.33	0.06	37.0
Divriği (Sivas)	Yalçın Erik (2019)	T13	13.86	7.97	7.99	14.5	6.57	1.38	0.31	0.22	1.47	0.3	0.98	0.13	0.91	0.14	28.43
Çilhoroz (Erzincan)	Yalçın Erik & Ay (2018)	T14	3.14	2.46	2.75	4.66	2.21	0.42	0.25	0.09	0.64	0.15	0.45	0.08	0.45	0.08	34.0
Iğın (Konya)	Altunsoy et al. (2017)	T15	5.86	9.09	12.31	23.97	10.34	1.86	0.44	0.28	1.51	0.31	0.89	0.13	0.85	0.13	26.0
Çayırhan (Ankara)	Karayiğit et al. (2011)	T16	4.4	8.1	12.0	23.0	10.0	2.1	0.6	0.4	2.0	0.4	1.2	0.2	1.2	0.2	n.d.
Işıklar (Muğla)	Karayiğit et al. (2017)	T17	3.45	9.35	13.1	21.73	11.15	1.58	0.41	0.25	1.44	0.27	0.73	0.13	0.8	0.14	12.1
Deniş (Muğla)	Karayiğit et al. (2017)	T18	7.6	3.81	24	39.5	26.1	2.95	0.71	0.49	2.85	0.55	1.45	0.26	1.55	0.25	24.96
Yeniköy (Muğla)	Çelik et al. (2017)	T19	8.78	5.74	5.54	10.43	5.3	0.81	0.22	0.15	0.89	0.34	0.48	0.1	0.5	0.13	13.6

Kangal (Outcrop)	Kalender & Karamazi (2017)	T20	2.59	4.18	4.95	9.24	4.09	0.76	0.18	0.12	0.68	0.14	0.38	0.25	0.35	0.13	73.23
Kangal (well/core sample)	Kalender & Karamazi (2017)	T21	3.53	4.73	7.25	14.07	5.83	1.08	0.26	0.12	0.84	0.14	0.41	0.25	0.45	0.14	37.27
Yatağan (Muğla)	Karayığit et al. (2000)	T22	8.0	29.0	26.0	55.0	26.0	5.4	1.1	0.9	5.2	1.1	3.2	0.5	3.0	0.5	39.0
Seyitömer	Karayığit et al. (2000)	T23	12.0	11.0	19.0	36.0	15.0	2.8	0.8	0.4	2.2	0.4	1.2	0.2	1.3	0.2	50.0
Tunçbilek (A3) (Kütahya)	Karayığit et al. (2002)	T24	4.4	8.1	14.0	29.0	12.0	2.2	0.5	0.3	1.5	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	23.0
Tunçbilek (B4-5) (Kütahya)	Karayığit et al. (2001)	T25	6.5	13.0	39.0	7.7	32.0	5.4	1.3	0.6	3.0	0.5	1.5	0.2	1.4	0.2	53.0
İsaalan (Balıkesir)	Karayığit et al. (2017)	T26	2.5	4.16	4.21	8.05	4.2	0.62	0.9	0.45	0.6	0.35	0.2	0.2	0.59	0.2	37.0

Also, the relationship between ash ratio and REY and HREE / LREE ratios for coal samples are shown in Figures 3a and 3b, respectively. The correlation between the REY and coal ash yield is a nonlinear relationship (Fig.3). Further, as shown in Figure 4 HREE / LREE ratio and yield visible in the ash sample are not inclined. This is because HREY has a greater affinity with organic matter in coal (Eskenazy, 1987a, 1999; Arbuzov and Ershov, 2007; Pazand, 2015; Dai et al. 2016a, 2016b) and therefore HREY is released from coal and subsequently incorporated or adsorbed into the fly ash. This result is not consistent with previous studies stating that REEs are associated with aluminosilicate groups (Lin et al. 2017a, b). In the samples, L / H ratios are greater than 1 (avg. 3.36; Table 2) and La / Yb values (avg. 6.49) indicate that the coals are enriched in light REE and the LREE-HREE is highly fractionated. Table 3 shows the correlation coefficients of REE (based on whole coal).

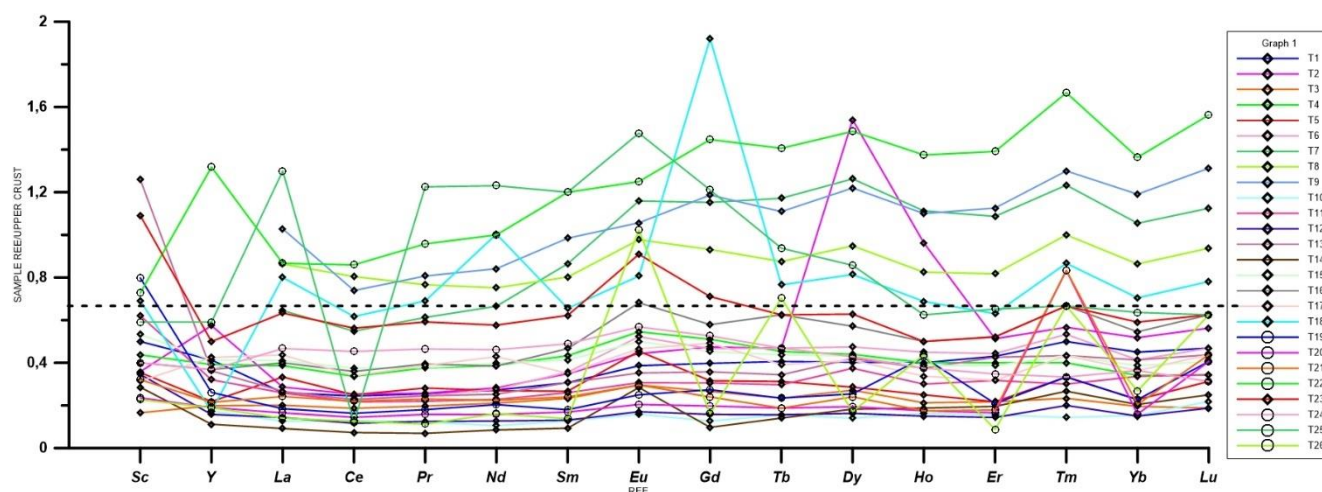


Figure 2. Upper Continental Crust Normalized Rare-Earth-Element (REE) Content of Investigated coals

The light REY elements are slightly depleted in T-8 (Tarhanas), T-9 (Manas), T-18 (Deniş), T-22 (Yatağan), and T-25 (Tunçbilek B4-5) coal samples. Heavy REY elements are slightly enriched in T-2 (Pınarhisar), T-13 (Divriği), T-22 (Yatağan), and T-25 (Tunçbilek B4-5) samples but slightly depleted in the T-6 (Özyurt) coal sample.

LREY elements are highly depleted in T-14 (Çilhoroz) coal samples, whereas MREY and HREY are moderately depleted compared with the upper continental crust (Taylor & McLennan, 1995). Eu in all samples shows slight or no anomalies. In addition, the critical element content of the investigated coal samples is 21.58 ppm (6.10ppm to 65.4 ppm) on average and the most important coalfield is Yatağan. Based on these results, the studied samples were characterized by LREY enrichment types.

Comparison Of Turkish Lignites With Other Coals And Crustal Materials

As stated in the previous sections, the average REY abundance for studied Turkish coals is 73.73 ppm; this value is slightly higher than the world, US an average rare-earth content and lower than Chinese coals (i.e. 69 ppm, 65.5 ppm, and 138 ppm, Ketris & Yudovich, 2009; Lin et al. 2018; Dai et al. 2008). According to an early study of Dai et al. (2016b), the smoothness of a normalized REY distribution pattern (to Upper Continental Crust, UCC) provides a simple but reliable way to validate the quality of REE chemical analyses of coal and other sedimentary rocks.

The normalized REY dispersion model (Upper Continental Crust, UCC) is a simple but reliable way to validate the quality of REE chemical analysis of coal and other sedimentary rocks (Dai et al.2016b). In this study, the normalized REY distribution model of average World, Chinese, US and, Turkish coals is drawn (Fig. 4).

Table 2. Various Rare Earth Element Ratios (based on whole coal) Of The Studied Coal Samples.

Coal Area Symbol	Total REE	Total LREE	Total HREE	Critical Elements	UnCritical El. Ratio	Excessive El. Ratio	L/H Ratio	REE+Sc Ratio	La/Sm Ratio	Gd/Yb Ratio	H/L Ratio	Med. REE Ratio
T1	54.42	32.33	18.86	190017	12.5	17.25	1.71	59.92	5.65	1.53	0.58	3.23
T2	63.40	33.93	25.71	27.24	13.78	18.44	1.32	67.34	5.46	1.58	0.76	3.76
T3	35.68	24.84	8.52	11.71	9.49	12.66	2.92	37.50	5.74	2.35	0.34	2.32
T4	67.74	45.89	17.48	21.93	18.16	22.84	2.63	72.55	5.95	2.59	0.38	4.37
T5	49.10	35	11.3	13.9	14.4	16.9	3.10	53.00	8.33	2.40	0.32	2.80
T6	39.77	31.38	4.56	10.62	12.84	16.31	6.88	39.77	4.83	1.95	0.15	3.83
T7	97.00	76.1	11.61	25.99	31.97	39.04	6.55	97.00	4.97	1.89	0.15	9.29
T8	119.30	102.37	8.92	26.17	38.49	54.64	11.48	119.30	7.17	1.86	0.09	8.01
T9	127.51	105.76	11.88	30.38	45.52	51.61	8.90	127.51	6.96	1.72	0.11	9.87
T10	22.21	15.68	5.342	7.63	5.70	8.882	2.94	22.21	6.63	1.42	0.34	1.19
T11	49.00	29.11	17.29	15.48	11.66	15.03	1.68	55.83	6.64	1.57	0.59	2.60
T12	26.10	15.92	8.84	7.92	6.38	8	1.80	29.90	7.29	1.82	0.56	1.34
T13	59.83	30.8	25.98	17.52	12.47	15.98	1.19	73.69	5.79	1.49	0.84	3.05
T14	18.69	10.11	7.54	6.1	4.03	5.42	1.34	21.83	6.55	0.82	0.75	1.04
T15	72.37	49.3	19.05	22.55	18.57	25.39	2.59	78.23	6.62	2.02	0.39	4.02
T16	70.80	47.8	18.1	22.3	19.1	25	2.64	75.20	5.71	1.83	0.38	4.90
T17	69.15	48.73	16.56	23.33	19.3	23.07	2.94	72.60	8.29	2.34	0.34	3.86
T18	124.27	94.5	18.81	35.41	39.15	42.11	5.02	131.87	8.14	4.71	0.20	10.96
T19	41.73	22.55	17.11	12.78	8.67	11.5	1.32	50.51	6.84	2.08	0.76	2.07
T20	29.91	19.4	8.82	9.63	7.58	10.11	2.20	32.50	6.51	2.14	0.45	1.69
T21	41.64	28.78	10.61	12.19	10.87	15.05	2.71	45.17	6.71	2.02	0.37	2.25
T22	177.20	113.8	51.4	65.4	43.7	60.1	2.21	185.20	4.81	1.83	0.45	12.00
T23	109.40	74.2	28.9	30.6	28.7	38.1	2.57	121.40	6.79	2.08	0.39	6.30
T24	79.40	58.3	16.4	23.2	21.5	30.3	3.55	83.80	6.36	2.50	0.28	4.70
T25	125.60	87.4	26.9	51.4	57.7	10	3.25	132.10	7.22	3.29	0.31	11.30
T26	28.64	17.26	9.25	10.51	6.24	9.39	1.87	31.14	6.79	1.03	0.54	2.13

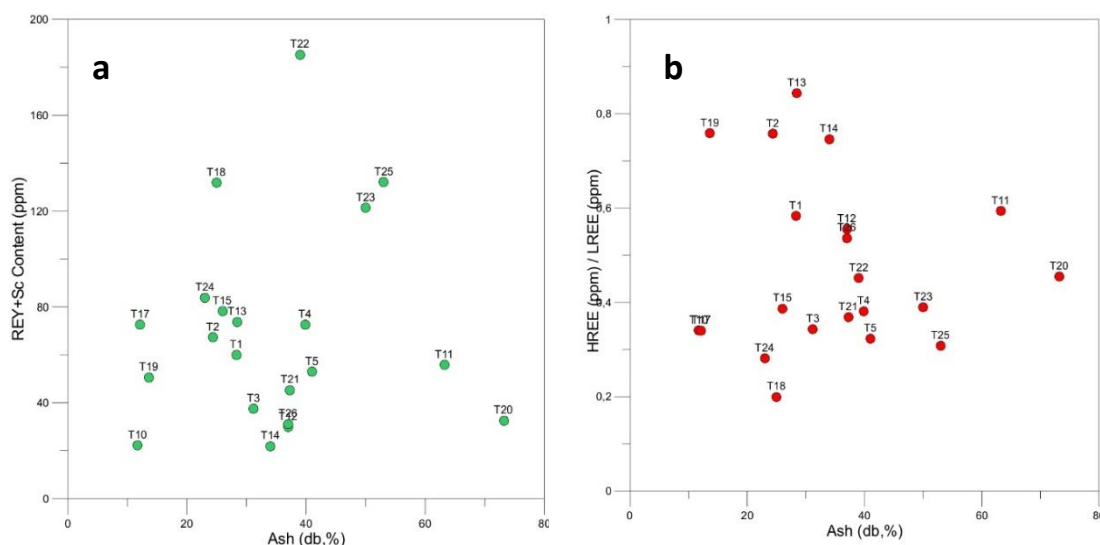


Figure 3a. REY+Sc Content **b)** HREE/LREE Ratios For Investigated Coal Samples As A Function Of Coal Ash Yield On The Bulk Analysis.

Table 3. Correlation Coefficients of Rare-Earth Elements (REE, whole coal basis) With Other Elements In Investigated Coal Area Samples.

	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Sc																
Y	0.336															
La	0.346	0.591														
Ce	0.398	0.679	0.531													
Pr	0.348	0.672	0.992	0.573												
Nd	0.343	0.602	0.982	0.617	0.978											
Sm	0.369	0.785	0.955	0.641	0.982	0.952										
Eu	0.246	0.607	0.844	0.473	0.853	0.836	0.852									
Gd	0.363	0.520	0.850	0.730	0.841	0.929	0.829	0.697								
Tb	0.306	0.805	0.792	0.704	0.830	0.837	0.885	0.913	0.793							
Dy	0.261	0.796	0.595	0.604	0.628	0.634	0.708	0.547	0.660	0.724						
Ho	0.318	0.860	0.591	0.691	0.642	0.659	0.739	0.657	0.699	0.861	0.935					
Er	0.437	0.914	0.724	0.797	0.782	0.778	0.872	0.661	0.784	0.872	0.835	0.897				
Tm	0.193	0.705	0.512	0.662	0.571	0.590	0.652	0.600	0.629	0.773	0.613	0.735	0.762			
Yb	0.441	0.893	0.727	0.818	0.778	0.789	0.863	0.723	0.809	0.919	0.829	0.917	0.985	0.798		
Lu	0.341	0.830	0.599	0.748	0.657	0.679	0.747	0.713	0.718	0.906	0.737	0.890	0.888	0.927	0.934	
Ash	0.037	0.009	0.113	0.139	0.116	0.049	0.120	0.140	0.049	0.043	0.083	0.127	0.003	0.212	0.016	0.039

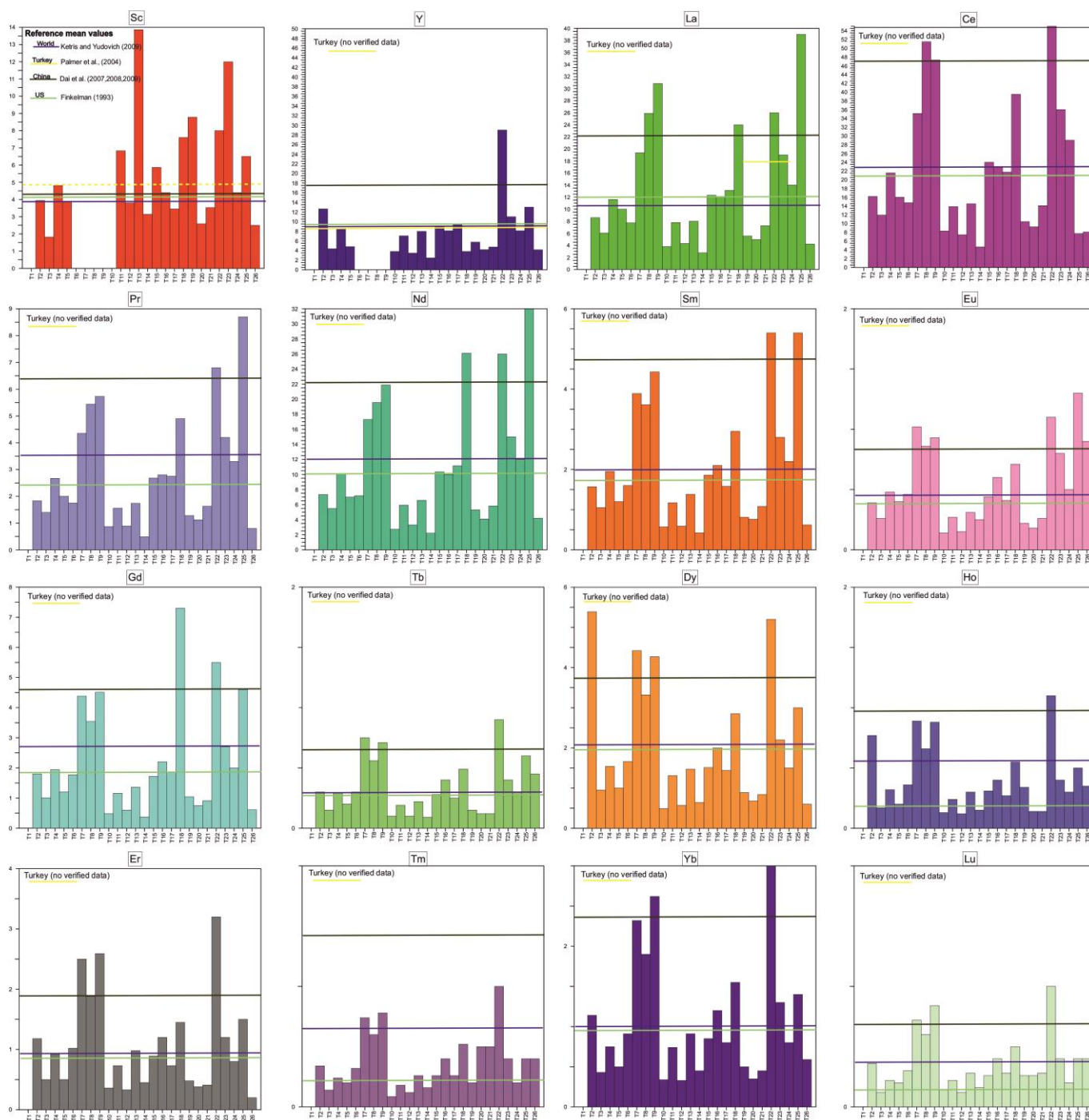


Figure 4. The Concentration Of Rare-Earth Elements (REE; whole coal basis, in ppm) In Investigated Different Turkish Coal Areas In Comparison With REE Contents Worldwide (Ketris & Yudovich, 2009), US (Finkelman, 1993), Chinese (Dai et al. 2012, 2008, 2007) and Turkish coal (Palmer et al. 2004) Average Ratios.

CONCLUSIONS

In this study, 26 coalfield samples from Tertiary coal basins in Turkey were examined, evaluated in terms of rare earth elements richness, and found that the \sum REE concentration based on of all coal varied between 18.69 and 177.2 ppm. It was determined that REE enrichment in the studied coal samples is related to both organic and inorganic materials of coal components. The most important result obtained from this study is that the coals in the Turkish Tertiary coal basins have an important richness in rare earth elements. For the analyzed coal samples, an average of 73.73 ppm REY + Sc abundance was determined based on dry whole coal. Also, there is no linear relationship between REY + Sc and sample ash yields. REE content normalized to the upper continental crust indicates that it is a similar origin for all investigated samples and one of the possible REE sources identified as volcanic ash. With the further development of extraction techniques for REE from coal, the increase in the

production of these elements and the widespread use of clean coal technologies may provide great environmental benefits.

Considering the environmental and industrial effects of coal and REE from coal and coal by-products, which are indispensable, reliable and, cheap energy resources for Turkey, it is very important to create technologies and methods that will provide selective production. The results of this study clearly show how important it is to conduct detailed research on the extraction process of Turkish lignite CFA. Coal and coal by-products are a potential source of REEs, but the concentration of REEs is currently very low compared to resources provided by REE and, production technologies need to be improved to have commercial value.

REFERENCES

- Adamczyk, Z., Białecka, B., Całus-Moszko, J., Komorek, J., and Lewandowska, M. (2015). Rare earth elements of orzeskie beds of south-west part Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Arch. Min. Sci.*, 60 (14); 157-172.
- Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R., and Kirchain, R.E. (2012). Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (6): 3406-3414.
- Altunsoy, M., Özçelik, O., and Güllüdağ, C.B. (2017). Comparison of Major and Trace Element Enrichments of Pliocene Coal Fields from Karapınar and Ilgın (Konya) Basins (Turkey), *Journal of Scientific and Engineering Research*. 4, 269-275.
- Altunsoy, M., Sarı, A., Özçelik, O., Engin, H., and Hökerek, S. (2016). Major and trace-element enrichments in the Karapınar coals (Konya, Turkey). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.*, 38(1): 88-99.
- Altunsoy, M., Ozcelik, O., Ozdogan, M., and Güllüdağ, C.B. (2015). Major and Trace Element Contents in Coaly Units of the Pliocene Dursunlu Formation. *Procedia Earth and Planetary Science*. 15, 774-780.
- Arbuzov, S.I., Ershov, V.V. (2007). Geochemistry of Rare Elements in Coals of Siberia. DPrint, Tomsk, pp. 468.
- Arbuzov, S.I., Ershov, V.V., Potseluev, A.A., and Rikhvanov, L.P. (2000). Rare Elements in Coals of the Kuznetsk Basin. Kemerovo. 248pp. (in Russian).
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact, *Geoscience Frontiers*. 10, 1285-1303.
- Barka, A.A., Sakıncı, M., Görür, N., Yılmaz, Y., Şengör, A.M.C., and Ediger, V.Ş. (1994). Is Aegean extension a consequence of the westerly escape of Turkey? American Geophysical Union (ASU) Spring Meeting, Baltimore, U.S.A. Abstracts, 75(16): 116–117.
- Birk, D., & White, J.C. (1991). Rare earth elements in bituminous coals and underclays of the Sydney Basin, Nova Scotia: element sites, distribution, mineralogy. *Int. J. Coal Geol.* 19, 219–251.
- Całus-Moszko J., & Białecka B. (2013). Analiza możliwości pozyskania pierwiastków ziem rzadkich z węgla kamiennych i popiołów lotnych z elektrowni. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 29 (1): 67-80.
- Cicioğlu Sutcu, E., & Karayigit, A.I. (2015). Mineral matter, major and trace element content of the Afşin–Elbistan coals, Kahramanmaraş, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 144, 111-129.
- Cox, C., & Kynicky, J. (2018). The rapid evolution of speculative investment in the REE market before, during, and after the rare earth crisis of 2010–2012. *Ext. Ind. Soc.* 5, 8–17.
- Çelik, Y., Karayığit, A.İ., Querol, X., Oskay, R.G., Mastalerz, M., and Özer, M. S.K. (2017). Coal characteristics, palynology, and palaeoenvironmental interpretation of the Yeniköy coal of Late Oligocene age in the Thrace Basin (NW Turkey). *Int. J. Coal Geol.* 181, 103-123.
- Dai, S., Chekryzhov, I.Y., Seredin, V.V., Nechaev, V.P., Graham, I.T., Hower, J.C., Ward, C.R., Ren, D., and Wang, X. (2016a). Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): a review of geodynamic controls and styles of mineralization. *Gondwana Res.*, 29, 60–82.
- Dai, S., Graham, I.T., and Ward, C.R.(2016b). A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal. *Int. J. Coal Geol.* 159, 82–95.

- Dai, S., Y. Jiang, C. R. Ward, L. Gu, V. V. Seredin, H. Liu, D. Zhou, X. Wang, Y. Sun, J. Zou, and D. Ren. (2012). "Mineralogical and geochemical compositions of the coal in the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, China: Further evidence for the existence of an Al (Ga and REE) ore deposit in the Jungar Coalfield", *Int. J. Coal Geol.* 98, 10–40.
- Dai, S., Ren, D., Chou, C.L., Finkelman, R.B., Seredin, V.V., and Zhou, Y. (2011a). Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *Int. J. Coal Geol.* 94, 3-21.
- Dai, S., Wang, X., Zhou, Y., Hower, J.C., Li, D., Chen, W., and Zhu, X. (2011b). Chemical and mineralogical compositions of silicic, mafic, and alkali tonsteins in the late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, Southwest China. *Chemical Geology.* 282, 29–44.
- Dai, S., Zou, J., Jiang, Y., Ward, C.R., Wang, X., Li, T., Xue, W., Liu, S., Tian, H., Sun, X., and Zhou, D. (2011c). Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Adaohai Mine, Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, China: modes of occurrence and origin of diasporite, gorceixite, and ammonian illite. *Int. J. Coal Geol.*
- Dai S, Zhao L, Peng S, Chou C-L, Wang X, and Zhang Y, (2010a). Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China. *Int J Coal Geol* 81(4):320–32.
- Demir, I., & Kursun, I. (2012). Investigation of radioactive content of Manisa-Soma and Istanbul-Agacli coals (Turkey). *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 48(2), 341-353.
- Dill, H.G. (2001). The geology of aluminum phosphates and sulfates of the alunite group minerals: a review. *Earth-Science Reviews.* 53, 35–93.
- Erarslan, C., & Örgün, Y. (2017). Mineralogical and geochemical characterization of the Saray and Pınarhisar coals, Northwest Thrace Basin, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 173, 9-25.
- Erarslan, C., Örgün, Y., and Bozkurtoğlu, E. (2014). Geochemistry of trace elements in the Keşan coal and its effect on the physicochemical features of ground-and surface waters in the coal fields, Edirne, Thrace Region, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 133, 1-12.
- Erkoyun, H., Kadir, S., Kūlah, T., and Huggett, J. (2017). Mineralogy, geochemistry and genesis of clays interlayered coal seams succession in the Neogene lacustrine Seyitömer coal deposit, Kūtahya, western Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 172, 112-133.
- Eskenazy, G.M. (1999). Aspects of the geochemistry of rare earth elements in coal: an experimental approach. *Int. J. Coal Geol.* 38, 285–295.
- Eskenazy, G.M. (1995). Geochemistry of rare earth elements in Bulgarian coals. *Ann. De L' Univ. de Sofia 'St. Kl. Ohridski'*, Livre -1. 88, 39–65.
- Eskenazy, G.M. (1987a). Rare earth elements and yttrium in lithotypes of Bulgarian coals. *Org. Geochem.* 11, 83-89.
- Eskenazy, G.M. (1987b). Rare earth elements in a sampled coal from the Pirin deposit, Bulgaria. *Int. Geol. Rev.*, 7, 301-314.
- European Commission. European Commission. Report on critical raw materials for The EU. May 2014. European Coal Combustion Products Association e.V. Production and utilisation of CCPs in 2008 in Europe; 2008. http://www.ecoba.com/evjm,media/ccps/Ecoba_Stat_2008_EU15.pdf [accessed 25.10.11].
- European Commission. European Commission. Study on the review of the list of critical minerals. 2017. 92 p.
- Finkelman, R.B. (1993). Trace and minor elements in coal. In: *Org Geochem.* vol. 11. Springer, Boston, MA. pp. 593–607. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6_28
- Franus, W., Wiatros-Motyka, M.M., Wdowin, M. (2015). Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 9464-9474.
- Görür, N., & Okay, A.I. (1996). A fore-arc origin for the Thrace Basin. *Geol. Rundsch.* 85, 662–668.

- Gürdal, G. (2011). Abundances and modes of occurrence of trace elements in the Çan coals (Miocene), Çanakkale-Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 87(2): 157-173.
- Gürdal, G. (2008). Geochemistry of trace elements in Çan coal (Miocene), Çanakkale, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 74(1), 28-40.
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., and Vernon, C. (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact, Resources. 3, 614-635.
- Haxel, G.B., Hedrick, J.B., and Orris, G.J. (2014). Rare Earth Elements—Critical Resources for High. Technology, USGS Fact Sheet 087–02. Available online: <http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/> (accessed on 20 October 2014).
- Hoş-Çebi, F. H., Korkmaz, S., and Akçay, M. (2009). Trace element geochemistry of Jurassic coals from eastern Black Sea region, NE-Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* 31(8), 664-670.
- Hower, J.C., Granite, E.J., Mayfield, D.B., Lewis, A.S., and Finkelman, R.B. (2016). Notes on contributions to the science of rare earth element enrichment in coal and coal combustion byproducts: *Minerals.* 6/32, 9 p.
- Hower, J.C., Eble, C.F., O’Keefe, J.M.K., Dai, S., Wang, P., Xie, P., Liu, J., Ward, C.R., and French, D. (2015b). Petrology, palynology, and geochemistry of Gray Hawk Coal (Early Pennsylvanian, Langsettian) in eastern Kentucky, USA: *Minerals.* 5(3): 592–622.
- Hower, J.C., Ruppert, L.F., and Eble, C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *Int J Coal Geol.* 1999, 39(1- 3):141–53.
- Huang, Q., Noble, A., Herbst, J., and Honaker, R. (2018). Liberation and release of rare earth minerals from Middle Kittanning, Fire Clay, and West Kentucky no. 13 coal sources. *Powder Technol.* 332, 242–252.
- Humphries M. (2013). *Rare earth elements: The global supply chain.* December 16.
- IUPAC Technical Reports and Recommendations. 1968. Ottmar Leuchs. *The Classifying of High Polymers.* 16/ 4, 491-701.
- IUPAC, 2005. In: Connelly, N.G., Hartshorn, R.M., Damhus, T., Hutton, A.T. (Eds.), Nomenclature of Inorganic Chemistry-IUPAC Recommendations.
- Jha, M.K., Kumari, A., Panda, R., Kumar, J.R., Yoo, K., and Lee, J.Y. (2016). Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*, 165, 2-26.
- Jordens, A., Cheng, Y.P., and Waters, K.E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering.* 41, 97-114.
- Kalender, L., & Karamazi, K. (2017). A comparison of the Kalburçayırı lignites in the Kangal-Sivas basin and various worldwide coal compositions. *Int. Journal of Oil, Gas and Coal Technology,* 15(4), 394-424.
- Karayiğit, A.İ., Oskay, R.G., and Gayer, R.A. (2019). Mineralogy and geochemistry of feed coals and combustion residues of the Kangal power plant (Sivas, Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences.* 28(3): 438-456.
- Karayiğit, A. İ., Littke, R., Querol, X., Jones, T., Oskay, R. G., and Christanis, K. (2017). The Miocene coal seams in the Soma Basin (W. Turkey): Insights from coal petrography, mineralogy and geochemistry. *Int. J. Coal Geol.* 173, 110-128.
- Karayigit, A. I., & Celik, Y. (2003). Mineral matter and trace elements in Miocene coals of the Tuncbilek-Domanic basin, Kutahya, Turkey. *Energy Source.* 25(4): 339-355.
- Karayigit, A.I., Gayer, R.A., Ortac, F.E., and Goldsmith, S. (2001). Trace elements in the lower Pliocene fossiliferous Kangal lignites, Sivas, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 47(2): 73-89.
- Karayigit, A.I., & Gayer, R.A. (2000). Trace elements in a Pliocene-Pleistocene lignite profile from the Afsin-Elbistan field, Eastern Turkey. *Energy Sources.* 22(1): 13-21.
- Karayigit, A.I., Akgun, F., Gayer, R. A., and Temel, A. (1999). Quality, palynology, and palaeoenvironmental interpretation of the Ilgin lignite, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 38(3-4), 219-236.

- Karayigit, A.I., Gayer, R.A., Querol, X., and Onacak, T. (2000). Contents of major and trace elements in feed coals from Turkish coal-fired power plants. *Int. J. Coal Geol.* 44, 169–184.
- Ketris M, & Yudovich Y. (2009). Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *Int J Coal Geol.* 78(2):135–48.
- Kokowska-Pawłowska M., Hanak B., and Nowak J. (2013). Rare Earth Elements (REEs) in the rocks accompanying selected coal seams of the Mudstone and Sandstone Series of the Upper Silesian Coal Basin. *65nd Meeting of the International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP)*, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, Abstrakt, 99-100.
- Kumar, V., Kumar, A., & Holuszko, M.E. (2018). Occurrence of Rare-Earth Elements in Selected British Columbian Coal Deposits and their Derivative Products, *Geoscience BC Report 2018-1*.
- Lifton, J., <http://www.jackliftonreport.com/2009/11/the-rare-earth-crisis-of-2009.html>2009.
- Lin, R., Soong, Y., and Granite, E.J. (2018). Evaluation of trace elements in US coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part I: rare earth elements and yttrium (REY). *Int. J. Coal Geol.* 192, 1–13.
- Lin, R., Howard, B.H., Roth, E.A., Bank, T.L., Granite, E.J., and Soong, Y. (2017a). Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. *Fuel*, 200, 506–520.
- Lin, R., Bank, T.L., Roth, E.A., Granite, E.J., and Soong, Y. (2017b). Organic and inorganic associations of rare earth elements in central Appalachian coal. *Int. J. Coal Geol.* 179, 295–301.
- Long, K.R., Van Gosen, B.S., Foley, N.K., and Cordier, D., 2012. The principal rare earth element deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective. In: *Non-Renewable Resource Issues*. Springer, pp. 131–155.
- McLennan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes. *Rev. Mineral. Geochem.* 21 (1), 169–200.
- Massari, S., & Ruberti, M. (2013). Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. *Res. Policy.* 38, 36–43.
- Mohr, S.H., & Evans, G.M. (2009). Forecasting coal production until 2100. *Fuel.* 88, 2059–2067.
- MTA (General Directorate of Mineral Research and Exploration). Türkiye Linyit Envanteri (2010). Lignite Inventory of Turkey). Inventory Series No. 202, *MTA Publications*, Ankara.
- Nifantov, B.F. (2003). Valuable and toxic elements in coals. *Coal Resources of Russia*, vol. II. Geoinformmark, Moscow, pp. 77–91 (in Russian).
- Ozcelik, O., Pehlivanli, B. Y., Sarı, A., Altunsoy, M., Hokerek, S., and Unal, N. (2016). Geochemical characteristics of major and trace elements in Sahinali Coals, Aydin, Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* 38(10): 1435-1447.
- Özbayoğlu, G. (2010). Potential of removing trace elements from a Turkish lignite. *Int. Journal of Coal Preparation and Utilization.* 30(6), 322-330.
- Palmer, C. A., Tuncalı, E., Dennen, K. O., Coburn, T. C., and Finkelman, R.B. (2004). Characterization of Turkish coals: a nationwide perspective. *Int. J. Coal Geol.* 60(2-4): 85-115.
- Pazand, K. (2015). Concentration and distribution of selenium in Iranian coals. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management.* 3, 55-60.
- Querol, X., Whateley, M.K.G., Fernandez-Turiel, J.L. and Tuncali, E. (1997). Geological controls on the mineralogy of the Beypazari lignite, central Anatolia, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 33(3): 255–271.
- Saydam Eker, Ç., Akpınar, I., and Sipahi, F. (2016). Organic geochemistry and element distribution in coals formed in Eocene Lagoon facies from the Eastern Black Sea Region, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Science.* 25(5): 467-489.
- Seredin V, Arbuzov S, and Alekseev V. (2006B). Sc-bearing coals from Yakhlink deposit, Western Siberia. *Doklady Earth Sci.* 409 (2):967–72.

- Seredin VV, Dai S, Sun Y, and Chekryzhov IY. (2013). Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies. *Appl Geochem.*, 31, 1–11.
- Seredin, V.V., & Dai, S. (2012). Coal deposits as a potential alternative source for lanthanides and yttrium: *Int. J. Coal Geol.*, 94, 67- 93.
- Seredin, V.V. (2010). A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores. *Geology of Ore Deposits*, 52, 428–433.
- Sun, Y., Zhao, C., Qin, S., Xiao, L., Li, Z., and Lin, M. (2016). Occurrence of some valuable elements in the unique ‘high-aluminum coals’ from the Jungar coalfield, China. *Ore Geology Reviews*, 72, 659-668.
- Swaine, D.J. *Trace Elements in Coal*. Butterworth, London. 278p. 1990.
- Şengüler, İ. (2010). Lignite explorations in Turkey: new projects and new reserves. *27th Annual International Pittsburgh Coal Conference*, October 2010, İstanbul, Turkey.
- Taggart, R.K., Hower, J.C., Dwyer, G.S., and Hsu-Kim, H. (2016). Trends in rare earth element content of U.S.-based coal combustion fly ashes: *Environmental Science and Technology*, 50(11).
- Taylor SR, & McLennan SM. (1995). The geochemical evolution of the continental crust. *Rev Geophys.* 33(2):241–65.
- Tozsın, G. Hazardous elements in soil and coal from the Oltu coal mine district, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 2014, 131, 1-6.
- Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker, A., Gencer, Z., Ayçık, and H., Şahin. (2002). Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri (Chemical and Technological Properties of Tertiary Lignites of Turkey). *MTA Publications*. Ankara
- U.S. Geological Survey (2018). Mineral Commodity Summaries 2018. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 132e133. <https://doi.org/10.3133/70194932>.
- US Department of Energy. 2011. Critical Materials Strategy. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/2011%20Critical%20Materials%20Strategy%20Report.pdf> (accessed 1 April 2019)
- US Secretary of the Interior (2018). Final List of Critical Minerals, Federal Register. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2018-05-18/pdf/2018-10667.pdf>.
- Wang, M., Liu, G.J., Sun R.Y., Chou C.L., & Zheng L.G. (2012). Characterization of intrusive rocks and REE geochemistry of coals from the Zhuji Coal Mine, Huainan Coalfield, Anhui, China. *Int. J. Coal Geol.* 94, 283-295.
- Ward, C.R. (1978). Mineral matter in Australian bituminous coals, *Australasian Institute of Mining Metallurgy Proceedings*. 267, 7-25.
- WEC (World Energy Council). 2007. Survey of Energy Resource. http://ny.whlib.ac.cn/pdf/Survey_of_Energy_Resources_2007.pdf (accessed 1 April 2019)
- Yalçın Erik, N., & Ay, F., (2020). Use of petrological and organic geochemical data in determining hydrocarbon generation potential of coals: miocene coals of Malatya Basin (Eastern Anatolia-Turkey). *International Journal of Coal Science Technology*, 7(3), <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00376-3>
- Yalçın Erik, N., (2019). Chemical Composition and Ree Contents in Coals and Bituminous Shales From Divriği- Selimoğlu Coal Field, Sivas-Turkey. *WMESS2019*, Prague, Czech Rep.
- Yalçın Erik, N., (2018). The Coalification Process And Use Of Saturate Biomarker Data In The Determination Of Paleoenvironmental Features Yeniçubuk- Gemerek Coals (Sivas-Turkey). *WMESS2018*, Prague, Czech Rep.
- Yalçın Erik, N., & Ay, F., (2018). Çilhoroz (Çayırılı-Erzincan) Kömürlerinin Paleo-Çökelim Ortamı ve Kömürleşme Süreci Özellikleri. *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 3(1), 11-29.
- Zhang, W., & Honaker, R.Q. (2018). Rare earth elements recovery using staged precipitation from a leachate generated from coarse coal refuse. *Int. J. Coal Geol.* 195, 189–199.

Zhang, W., Rezaee, M., Bhagavatula, A., Li, Y., Groppo, J., and Honaker, R. A. (2015). Review of the Occurrence and Promising Recovery Methods of Rare Earth Elements from Coal and Coal By-Products, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 35: 6, 295-330.

Zhao, L., Dai, S., Graham, I.T., Li, X., Liu, H., Song, X., Hower, J.C., and Zhou, Y. (2017). Cryptic sediment-hosted critical element mineralization from eastern Yunnan Province, southwestern China: mineralogy, geochemistry, relationship to Emeishan alkaline magmatism and possible origin. *Ore Geol. Rev.* 80, 116–140.

Zheng L., Liu G., Chou Ch.L., Qi C., and Zhang Y. (2007). Geochemistry of rare earth elements in Permian coals from the Huaibei Coalfield, China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 31, 167-176.