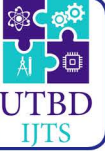




# Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi International Journal of Technological Sciences

Elektronik Dergi, e-ISSN: 1309-1220  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



biomedical simulation  
**manufacturing** electrical robotics  
artificial intelligence  
research ecology biomimetics information analysis  
ethics software  
From theory to practise  
data ecology architecture wind energy  
renewable energy machine learning computer digital ethics  
analog innovation knowledge  
cad/cam science design data technology  
human robotics optimization analysis hardware construction  
smart buildings object mechatronic human digital  
mechanical electronic innovation human digital  
computational software application  
smart materials ecology

# Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technological Sciences

Sahibi / Owner  
Ali Kemal YAKUT

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager  
Reşat SELBAŞ

Editör / Editor in Chief  
Nihat YILMAZ

Yardımcı Editörler / Vice Editors  
Önder KIZILKAN  
Ergün KORKMAZ

Alan Editörleri/Associate Editors  
Abdullah ÖZSOY  
Cengiz ÖZEL  
Okan BİNGÖL  
İsmail Serkan ÜNCÜ  
Fatih YILMAZ

Editör Kurulu / Editorial Board  
Ali Kemal YAKUT  
Reşat SELBAŞ  
Arzu ŞENCAN ŞAHİN  
Ahmet KABUL

## Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Hiroshi YAMAGUCHI, Doshisha University  
İbrahim DİNÇER, Ontario Tech University  
Mustafa ACAROĞLU, Konya Teknik Üniversitesi  
Mustafa Reşit USAL, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Ramazan KÖSEOĞLU, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi  
Refik KAYALI, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Bekir YALÇIN, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Turkey  
Özlem TERZİ, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Mustafa AY, Marmara Üniversitesi  
Şemsettin KILINÇARSLAN, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Ömer Necati CORA, Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Mehmet Akif EZAN, Dokuz Eylül Üniversitesi  
Nabi İBADOV, Warsaw University of Technology, Poland  
Murat Öztürk, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Turkey

Grafik Tasarım / Graphic Design  
Sinan İLKAZ

Teknik Sorumlu / Technical Manager  
Serap ERGÜN  
Nejat TÜKENMEZ

Mizanpaj / Make-up  
Serpil ÇELİK TOKER

## Dergi Adresi / Journal Address

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi Editörlüğü  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi  
32260, Batı Kampüsü, Isparta, Türkiye  
Tel: +90 246 2111569  
Fax : +90 246 2111984  
E-posta/E-mail: [utbd@isparta.edu.tr](mailto:utbd@isparta.edu.tr)

Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi tarafından yılda 3 sayı elektronik olarak yayınlanmaktadır.  
International Journal of Technological Sciences is published three times a year electronically by Isparta University of Applied Sciences.

Cilt / Volume: 14

Sayı/Number: 3

Aralık/December 2022

e - ISSN : 1309-1220



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Sayfa No

Araştırma Makalesi

- Diatomitin bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılabilirliğinin araştırılması**  
Investigation of usability of diatomite in a hot mix asphalt as a filler ..... 103-115  
Bilge Kaan KARIŞMAZ, Nihat MOROVA
- Mozaiklemede geometrik bozulma düzeltme ve göz verilerinde uygulanması**  
Correction of geometric distortion for mosaicing and applied in eye data ..... 116-123  
Ömer Can ESKİCİOĞLU, Ali Hakan IŞIK
- Monocular depth estimation and detection of near objects**  
Monoküler derinlik tahmini ve yakın nesnelerin tespiti ..... 124-131  
M. Kenan DÖŞOĞLU, Enes KAYMAZ, Muhammet DEMİRBAŞ
- Investigation of the usability of apple tree pruning chips as an alternative raw material to produce cement-bonded particleboard**  
Elma ağacı budama yongalarının çimentolu yonga levha üretimi için alternatif ham malzeme olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi ..... 132-137  
Hasan Hüseyin TAŞ, Kaan ACAR
- CAN haberleşmesinde gürültü filtreleme yöntemleri**  
Noise filtering methods in CAN communications ..... 138-143  
Buğra ER, Okan BİNGÖL
- Mathematical modeling of a photovoltaic/thermal (PV/T) collector**  
Bir fotovoltaik termal (PV/T) kollektörün matematiksel modellemesi ..... 144-152  
Gamze SOYTÜRK, Onder KIZILKAN, Mehmet Akif EZAN
- Trajectory tracking performance comparison of kinematic bicycle model with LQR and Lyapunov-based controllers on a circular trajectory**  
LQR ve Lyapunov temelli iki kontrolcünün kinematik bisiklet tipi model için güzergah izleme performansının dairesel bir güzergahta karşılaştırılması ..... 153-162  
Halit Ege CEYHUN, Aytaç GÖREN



Araştırma Makalesi/Research Article

## Diatomitin bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılabilirliğinin araştırılması

Bilge Kaan Karışmaz<sup>1</sup>, Nihat Morova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK),  
Diatomit  
Binder tabakası  
Mineral filler  
Marshall deneyi

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 06.08.2022  
Kabul Tarihi: 12.11.2022

**Öz:** Çalışmada, diatomitin asfalt beton kaplamalarda filler olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla kireçtaşı agrega ve kırmataş tozu filler kullanılarak %3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 bitüm içeriklerinde Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelere Marshall stabilite ve akma deney prosedürü uygulanarak stabilite, akma, pratik özgül ağırlık (Dp), boşluk yüzdesi (Vh) asfaltla dolu boşluk oranı (Vfa), agregalar arası boşluk miktarı (VMA) değerleri bulunmuştur. Kireçtaşı numune sonuçlarından yola çıkılarak ilgili grafikler çizilerek optimum bitüm miktarı %4.68 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum bitüm miktarı esas alınarak ve aynı gradasyon kullanılarak kireçtaşı filler ile diatomit filler malzemesi %0, 25, 50, 75, 100 oranlarında yer değiştirilerek diatomit ikameli asfalt beton numuneler üretilmiştir. Diatomit filler ikameli briketlerin stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa, VMA değerleri tespit edilerek deney sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde %25 diatomit filler içeren numunelerin yüksek stabilite ve uygun akma değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

### Atıf için/To Cite:

Karışmaz B.K. Morova N. Diatomitin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Ulusallararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(3), 103-115, 2022.

## Investigation of usability of diatomite in a hot mix asphalt as a filler

### Keywords

Hotmix asphalt concrete (HMA),  
Diatomite  
Mineral filler  
Marshall experiment test  
Binder course

### Article history:

Received: 06.08.2022  
Accepted: 12.11.2022

**Abstract:** In the study, the usability of diatomite as filler in asphalt concrete pavements was investigated. For this purpose, Marshall briquettes were prepared with bitumen content of 3.0-3.5-4.0-4.5-5.0% by using limestone aggregate and crushed stone dust filler. These samples were prepared using the Marshall stability and flow test procedure, and the following results were discovered: stability value, flow value, bulk specific gravity (Dp), percentage of voids (Vf), percent voids filled with asphalt (vfa) and voids in mineral aggregate (VMA). The optimum bitumen content was determined as 4.68% after the relevant graphs were created based on the results of the limestone sample. Based on the optimum amount of bitumen determined and using the same gradation, limestone fillers and diatomite fillers were replaced at the rates of 0, 25, 50, 75, 100%, and diatomite-modified asphalt concrete samples were produced. After the stability, flow, Dp, Vh, Vfa, VMA values of the diatomite filler briquettes were determined, the test results were evaluated. As a result of the research, it was determined that the samples containing 25% diatomite fillers had high stability and acceptable flow values.

### 1. Giriş

Asfalt beton kaplamaların yapımında en çok tercih edilen tip sıcak karışım asfalt betonudur (BSK). BSK kaplamalar suya karşı olan dayanımı, seyir konforu, yüksek servis kabiliyeti yeteneğine sahip olmasından

dolayı tercih edilmektedir. Materyallerin ekonomik boyutu, enerji ve kaynakların iyi kullanımı gibi konular üstyapı mühendislerini alternatif malzeme ve yol yapım yöntemlerine yöneltmektedir. Agrega birçok inşaat imalatında olduğu gibi yol üstyapılarının da başlıca hammaddesidir. Üstyapıda kullanılan BSK'nın büyük

\* İlgili yazar/Corresponding author: nihatomorova@isparta.edu.tr

bir bölümünü oluşturan agreganın özellikleri karışım performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle BSK'lar için gerekli özellikleri sağlayan agrega temininde sıkıntılar yaşanabilmekte ve agrega maliyetleri daha yüksek olmaktadır [1].

Bağlayıcısız temel ve alt temel tabakalarının tamamı, BSK'larının ağırlıkça %90-95'i, hacimce ise %85'lik kısmı agregalardan oluşur. Beton ve asfalt kaplamalardaki bozulmaların birincil veya ikincil nedeni uygun olmayan agrega kullanımı ya da kullanılan agregaların istenmeyen maddeler içermesidir. Agreganın tipi, yüzey pürüzlülüğü, yassılık durumu, gradasyonu gibi özellikleri BSK'nın yorulma ve tekerlek izi açısından performansları üzerinde büyük bir öneme sahiptir [1].

Esnek üstyapılar, mineral agrega, filler, bitüm ve havadan oluşan çok fazlı kompleks bir malzemedir. Asfalt-agrega karışımlarında agreganın belirli bir miktar filler ihtiva etmesi, arzu edilen karışım özelliklerini ve performansı sağlamak için şarttır. Filler, asfalt karışımlarda ince agrega oranını arttırmak, boşluk miktarını azaltmak ve asfalt betonunun dayanımını arttırmak için karışımların ana bileşenlerinden biri olarak dikkate alınır. Mineral filler malzemesinin özellikleri, onun asfalt betonunun performansını geliştirmedeki potansiyelini tespit etmek, özellikle de sıcak karışımın stabilitesini ve durabilitesini artırarak ötelenme ve tekerlek izi oluşumu ile ilgili sorunları azaltmak için araştırılmıştır.

Belirli mineral filler malzemelerinin kullanımı, asfalt betonundaki tekerlek izi derinliği, rijitlik ve gerilme artışı üzerinde olumlu bir değer artışı sağlar. Ayrıca kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve nem hasarına karşı olumlu bir etkiye sahiptir [2]. Mineral fillerin iki ana görevi vardır. İlki karışımda oluşan boşlukları doldurmaktır. Bu sayede daha yoğun ve daha sert tabakalar oluşturulur. İkincisi ise daneler arası temas noktası sağlamaktır. Genellikle BSK'da kırmataş tozu, mineral filler olarak kullanılmaktadır [3].

Kizelgur veya diatome toprağı olarak isimlendirilen mineral, su yosunları sınıfına ait tek hücreli mikroskobik alglerin fosilleşmiş silisli kavkılarında oluşan bir çökeldir. Bugün işletilen diatomit rezervlerinin günümüzden 5-6 milyon yıl önce oluştuğu düşünülmektedir. Diatomit organik kökenli bir mineraldir. Beyazdan kahverengiye renklerde, porozif bir yapıda ve oldukça hafiftir. Ancak mikroskobik görünüş ile mineralin kesin tanısı konabilir. Natural diatomit olarak kurutulmuş kullanılabildiği gibi, en yaygın olan kullanım şekli ise üretime tabi tutularak elde edilen flaks kalsine ve kalsine ürünlerin, filtre yardımcısı göreviyle her türlü filtrasyon işlemlerinde kullanılmasıdır [4].

Diatomların yaklaşık olarak 15000 türü olduğu tespit edilmiştir. Her türün kendine özgü olan gözenek yapısı, büyüklüğü ve geometrik şekli vardır. Sahip oldukları büyüklükleri 2-500 mikron arasında değişiklik göstermektedir. Ülkemizde büyüklükleri 5-150 mikron arasında değişiklik gösteren diatomit türlerine rastlanmaktadır. Bahsi geçen diatomların çeşitli nedenlerden ötürü yaşamlarının son bulmasıyla silisli kavkuları bir araya toplanıp çökelerek diatomit rezervlerini oluşturmaktadırlar [4].

Sıcak karışım asfalt betonunda agrega veya filler olarak kullanılmak üzere birçok doğal taş veya atık malzeme araştırılmıştır: pirinç kabuğu külü [5], siyah karbon [6], atık olivin [7], bor atıkları [8], zeolit ve pomza [9], endüstriyel atıklar [10], cam elyaf takviyeli polyster boru atık tozu [11], arduvaz (kayrak) [12], uçucu kül [13] ve mermer tozu [14].

Üstünkol ve Turabi (2010), BSK'larda önemli sorunlardan biri olarak sudan kaynaklanan bozulmalar kabul edildiğinden ve suyun verdiği zararların en aza indirilmesi amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Suyun koheziona etkisini belirlemek için gerçekleştirilen koşullandırılmış Marshall stabilite ve akma deneyinde %0 taş tozu - %7 endüstriyel atık filler kullanılarak akma ve stabilite değerleri yönünden en elverişsiz durum irdelenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarına göre, kullanılan endüstriyel atık filler malzemelerin değişen kür şartlarında ve yüksek sıcaklıklarda, asfalt betonu kaplamalarda taş tozu filler yerine kullanılabileceği görülmüştür. [10]

Elmacı (2011), tarafından İzmir Çimstone fabrikasından elde edilen kuvars esaslı granit arıtma çamurunun bitümlü sıcak kaplamalarda filler olarak kullanımı araştırılmıştır. Marshall numunelerinin optimum bitüm oranları belirlenmiş ve %0, 2, 4, 6, 8 oranlarında granit arıtma filleri eklenerek sonuçları incelenmiştir. Sonuç olarak kuvars esaslı granit arıtma çamurunun filler olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. [15]

Çubuk (1998), tarafından yapılan çalışmalarda diatomit kullanılarak modifiye edilen asfalt betonu karışımlarının elastiklik modülü ve Marshall stabilitesi incelenmiştir. Her asfalt yüzdesinde, katkı maddesi olarak kullanılan diatomit oranı arttıkça bir maksimum noktaya ulaşmaktadır ve o noktadan sonra belirli düşüşler olmaktadır. Maksimum stabilite değerini veren %2 diatomit oranına ve %7.5 asfalt oranına sahip numunelerde, diatomit oranı sabit tutularak asfalt oranı arttırıldıkça stabilite düşmektedir. Katkısız olarak dizayn edilen numunelerin stabilite değerleri, tüm diatomit katkılı karışımların stabilite değerlerinden daha düşüktür. Diatomit karışımının stabilitesini arttıran bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. [16]

Bu çalışmada ülkemizin sahip olduğu kaynakların etkili ve doğru kullanımı ile atık malzemelerin asfalt beton üretiminde kullanılabilirliği amaçlanmıştır. Bu amaçla diatomitin asfalt betonunda mineral filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ülkemizin çeşitli bölgelerinden çıkarılan bu kayacın mekanik ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak karayollarında dayanımın artırılması ve doğal kaynakların tüketiminde daha tasarruflu olunabilmesi için filler malzemesi yerine kullanılabilirliği amaçlanmıştır.

## 2. Materyal

Deneysel çalışmalarda kireçtaşı (kalker) agrega, kireçtaşı (kırmataş tozu) filler, diatomit filler ve 50/70 penetrasyona sahip asfalt çimentosu kullanılmıştır. Marshall dizayn kriterleri doğrultusunda asfalt beton (binder tabakası) numuneler üretilmiştir.

Çalışmada filler olarak kullanılan diatomit öğütülmüş olarak temin edilmiştir. Diatomit tozu etüvde kurutulmuş ve No:200 elekten elenerek filler malzemesi olarak kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Diatomit için zahiri özgül ağırlık deneyi ASTM C127 [17], ASTM C128 [18] ve BS812 [19] deney standartlarına göre yapılmıştır. Bulunan değerlere göre diatomitin zahiri özgül ağırlığı Tablo 1’de verilen formül ile hesaplanmıştır.

Tablo 1. Diatomit zahiri özgül ağırlık hesabı

		Ağırlıklar (gr)
<b>A</b>	Piknometre ağırlığı	123.2
<b>B</b>	Piknometre+ Su ağırlığı	369.32
<b>C</b>	Piknometre+ Numune ağırlığı	168.54
<b>D</b>	Piknometre+ Numune+ Su ağırlığı	388.06
<b>E</b>	Kuru numune ağırlığı	41.94
<b>Formül</b>	SGzahiri	$E/[(B-A)-(D-C)]$
	SGzahiri	1.58

Ağırlıkça %0, %25, %50, %75, %100 diatomit ikameli (kalker filler ile yer değiştirilen) asfalt beton numuneler hazırlanmış ve Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur.

Bağlayıcı asfalt çimentosu olarak Aliğa rafinerisinde üretilmiş olan bitüm kullanılmıştır. Sıcak karışım asfalt beton numunelerin üretiminde kullanılan bitüm Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden alınmıştır. Çalışmada kullanılan bitüm B50-70 penetrasyon sınıfındadır. Özgül ağırlığı 1.037 gr/cm<sup>3</sup> [20] olan bitüm kullanılmıştır. Tablo 2’de asfalt çimentosunun özellikleri verilmiştir. Bitüm üzerinde yapılan deney çalışmaları sonucundan kullanılan bitümün Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) [21] standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. 50/70 Penetrasyon sınıfındaki bitümün özellikleri

Deney Adı	Deney Sonucu	Şartname Değerleri	Standart
Bitüm Özgül Ağırlığı	1.037		TS-1087 [20]
Bitüm Penetrasyon, (25 °C) 0.1 mm	58	50-70	TS EN 1426 [22]
Yumuşama Noktası (22-80 °C)	51	46-54	TS EN 1427 [23]
<b>İmalatta Kullanılacak Bitümlü Bağlayıcı</b>	<b>Rafinerisi</b>	Aliğa	
	<b>Tipi</b>	Bitüm	
	<b>Sınıfı</b>	B 50/70	

Diatomit ikameli asfalt betonu numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agregalara uygulanan deneylere ait sonuçlar Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kireçtaşı agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

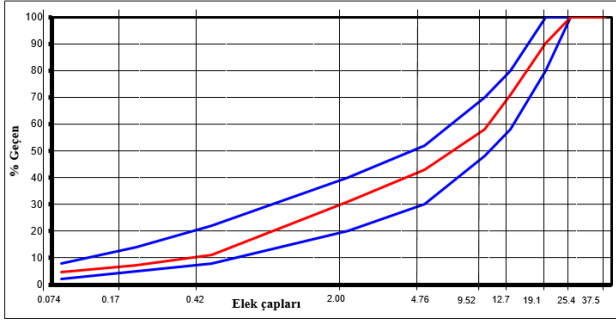
Kayacın Cinsi	Kalker			Deney Standardı
	Kaba Agrega	İnce Agrega	Kireçtaşı Filler	
Deney Adı				
Hacim Özgül Ağırlık	2.686	2.674		ASTM C 127 [17] ASTM C128 [18]
Zahiri Özgül Ağırlık	2.714	2.716	2.73	ASTM C 127 ASTM C128 BS812 [19]
Absorpsiyon (%)	0.4	0.6		ASTM C 127 ASTM C128
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (deneyle)			2.699	ASTM D-2041 [24]
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (hesapla)			2.699	
Cilalanma Değeri			-	TS-EN 1097-8 [25]
MgSO4 Donma Kaybı %			10.2	TS-EN 1367-2 [26]
Los Angeles Aşınma Kaybı %			22	ASTM C-131
Aşınma Direnci (Mikro-Deval)			9.1	TS-EN 1097-1 [27]
Yassılık İndeksi %			19.1	BS 812
Soyulma Mukavemet %			60-65	KTŞ Kısım 403 Ek-A [21]
Metilen Mavisi %			0.25	TS EN 933-10 [28]

Çalışmada kullanılan agregalara uygulanan elek analizi deneyi KTŞ binder tabakası için belirlenen standartlara uygun gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda belirlenen

agrega gradasyonu Tablo 4'te ve granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu

Elek Açıklığı		Karışım Gradasyonu	KTŞ Binder	
mm	inch			
25.4	1"	100	100	100
19.1	3/4"	90.3	80	100
12.7	1/2"	71.1	58	80
9.52	3/8"	58.1	48	70
4.76	No.4	42.9	30	52
2.00	No.10	31.1	20	40
0.42	No.42	11.2	8	22
0.177	No.80	7.3	5	14
0.075	No.200	4.6	2	8



Şekil 1. Çalışmada kullanılan granülometri eğrisi

Hazırlanan karışım gradasyonu doğrultusunda diatomitin kireçtaşı filler ile yer değiştirilerek üretilen diatomit ikameli asfalt beton numunelerin hazırlanmasında filler oranı olarak %4.6 toplam filler oranı kullanılmıştır.

### 3. Metot

#### 3.1. Marshall stabilite ve Akma Deneyi

Marshall tasarımı Bruce Marshall tarafından 1939 yılında geliştirilip formülize edilmiştir. 1943'te Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği gradasyon ve trafik koşulları fonksiyonlarına dayanarak optimum bitüm miktarı tayininde kullanmak üzere Marshall metodunu kabul etmiştir. Marshall metodu istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerlerine sağlama kriteri ile optimum bitüm oranı tayininde kullanılmaktadır. Marshall tasarım metodunun Türk standartlarındaki karşılığı TS3720'de verilmiştir [29]. Asfalt betonu içerisinde kullanılacak optimum bitüm miktarını tayin etmek için yapılmaktadır.

Marshall karışım tasarımı altı adımdan oluşmaktadır:

- Agregası seçimi
- Bitüm seçimi
- Numune hazırlama

- Hava boşluğu ve yoğunluk değerlerinin tespiti
- Marshall deney aleti kullanarak stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarı tayini

Marshall stabilite ve akma deneyi bitümlü karışım tasarım yöntemlerinden en yaygın kullanılan yöntemdir. Marshall stabilitesi bir esnek kaplamanın yapısal durumu hakkında bilgi vermektedir. Üstyapının yapısal durumu denildiği zaman genellikle akla kaplamanın stabilitesi gelir. Stabilite, BSK'nın yapısal durumunu ifade eder. Bu yapısal durum karışım içeriğindeki asfalt çimentosunun özellikleri ve miktarı, kaplamanın imalatında kullanılan agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri ile agrega gradasyonuna bağlıdır.

Marshall stabilite ve akma deneyinde, çelik kalıplar ve sıkıştırıcı kompaktörler yardımıyla 101 mm çapında ve 63.5 mm yüksekliğe sahip silindir şeklinde numuneler üretilir. Marshall deney cihazı ile 50 mm/dk'lık sabit bir hızda ve uygun sıcaklıkta (60 °C sıcaklık altında) numunelere yükleme yapılarak stabilite (deformasyona karşı dirençleri) ve akma değerleri belirlenmektedir [30].

Marshall stabilite ve akma deneyinde numunenin kırılmadan taşıyabileceği maksimum yük Marshall stabilitesi ve kırılma anına kadar oluşan deformasyon miktarı ise Marshall akması olarak isimlendirilir.

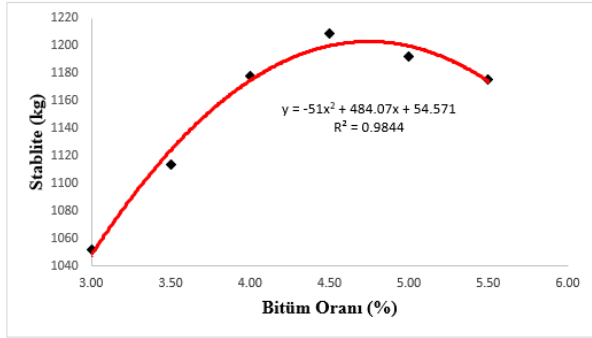
### 4. Bulgular ve Tartışma

#### 4.1. Kireç taşının filler olarak kullanıldığı numunelere ait Marshall stabilite ile akma deneyi sonuçları ve grafikleri

Kireçtaşı tozunun filler olarak kullanıldığı numunelere ait bitüm oranı-stabilite, bitüm oranı-akma, bitüm oranı- pratik özgül ağırlık (Dp), bitüm oranı- asfaltla dolu boşluk miktarı (Vfa) yüzdesi, bitüm oranı- boşluk (Vh), bitüm oranı- agregalar arası boşluk miktarı (VMA) yüzdesi grafikleri sırasıyla Şekil 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir.

BSK'nın en önemli özelliklerinden biri Marshall stabilite değeridir. Marshall stabilitesi bir esnek kaplamanın yapısal durumu hakkında bilgi vermektedir. Stabilite değeri arttıkça sıcak karışım asfalt kaplamaların sürekli dinamik yükler ile taşıtlardan gelen uzun dönem statik yükler, hızlanma ve yavaşlamadan kaynaklı düşey ve yatay gerilmeler (kayma-çekme) ile kayma gerilmelerine karşı direnci artar [31]. KTŞ'de binder tabakası dizaynında stabilite değeri için min.750 kg değeri verilmiştir.

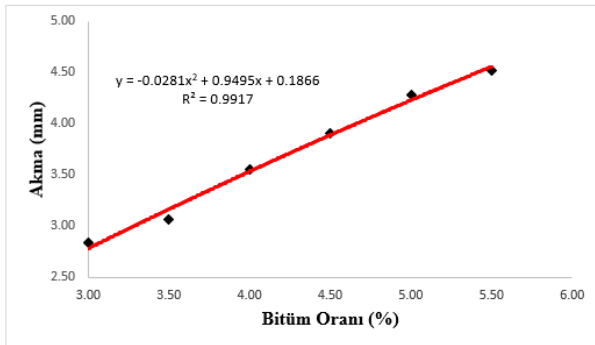
Deney sonuçlarına göre numunelerin ihtiva ettikleri bitüm oranlarına (%) karşılık gelen stabilite değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Verilen değerlere göre;



Şekil 2. Marshall stabilite değerinin bitüm oranına (%) göre değişimi

- Bitüm oranı %3.0, 3.5, 4.0, 4.5 olan numunelerde bitüm oranı arttıkça stabilite değerinde artış tespit edilmiştir.
- Bitüm oranı %4 ile %4.5 olan numuneler arasında stabilite düşük bir artış göstermiştir.
- %4.5 bitüm oranına sahip numunelere göre %5, 5.5 bitüm oranına sahip numunelerde stabilite değeri düşüş göstermiştir.
- %4.5 bitüm oranına sahip numune en yüksek stabilite değeri olan 1209 kg değerini vermiştir.
- Şartname sınırının altında stabilite değeri olan numune tespit edilmemiştir.

Akma dayanımı değeri esneklik ve plastik özelliklerini gösteren bir değerdir. Marshall numunelerinin uygulanan kuvvet ile kırıldığı anda uygulanan yüke karşılık gelen deformasyon değeridir. Akma, sıkıştırılmış karışımların içsel sürtünmelerinin ölçüsüdür. İç sürtünme ve akma arasında doğrusal ve ters bir oran vardır. KTŞ'ye göre binder dizaynında akma değeri 2-4 mm değerleri arasında olmalıdır. Farklı bitüm oranlarına göre karşılık gelen ortalama akma değerleri Şekil 3'te verilmiştir.

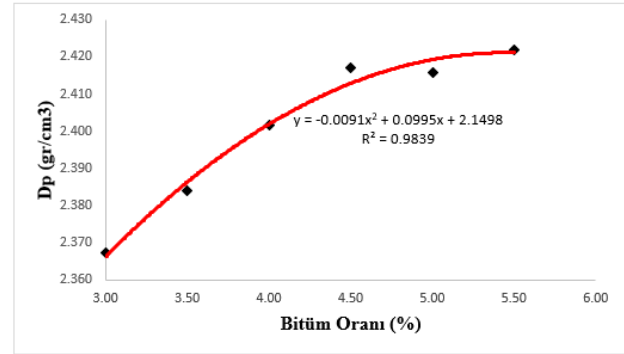


Şekil 3. Akma - bitüm oranı (%) grafiği

Akma ve bitüm içeriğine göre hazırlanan grafik incelendiğinde;

- Numune içerisinde bulunan bitüm arttıkça akma değerinin de artış görülmüştür.
- KTŞ'de binder tabakası için belirtilen 2-4mm sınır değerlerini %3, %3.5, %4 ve %4.5 bitüm oranına sahip numuneler sağlamıştır.
- Bitüm oranı %5 ve %5.5 olan numunelerin şartname sınırlarından fazla bir akma değerine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Karışımda bulunan bitüm miktarı arttıkça Dp'nin arttığı tespit edilmiştir. %4.5 bitüm oranına sahip numune ve sonrasında artış hızında düşüş görülmüştür. Deneyde %3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 oranlarında bitüm içeren numuneler hazırlanmış ve sırasıyla pratik özgül ağırlık değerleri 2.367, 2.384, 2.402, 2.417, 2.416, 2.422 olarak belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en yüksek pratik özgül ağırlık değeri %5.5 bitüm içeren numunelerde tespit edilmiştir. Pratik özgül ağırlık değerinin bitüm oranına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Dp- Bitüm oranı (%) grafiği

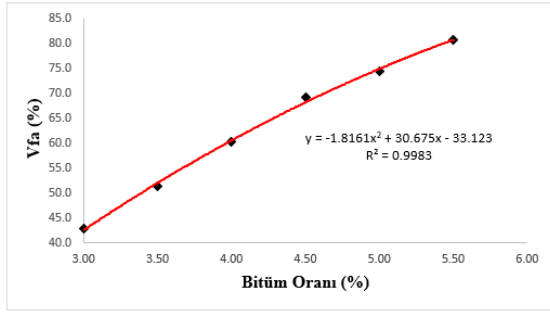
BSK'lar için Vfa oranı önemli bir özelliktir. Binder dizaynında bu özellik için KTŞ'de aralık olarak %60-75 değerleri verilmiştir. BSK kaplamalarda diğer bir önemli özellik de Vh değeridir. KTŞ'de boşluk değeri için %4-6 sınırları verilmiştir. Verilen aralıkta kalmak oluşabilecek bir kuma bozulması durumunu önlemek için önemlidir. Şartnamede bir üst sınır belirlenmesinin sebebi bitümlü sıcak karışımların yeterli stabilitesinin oluşması, alt katmanlara su geçirimsizliğinin ve bitüm oksidasyonunun düşürülmesidir [31].

İçerdiği bitüm oranlarına göre Vfa oranı grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Vh ve bitüm oranı grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre hazırlanan Vfa oranı ve Vh grafiğine göre;

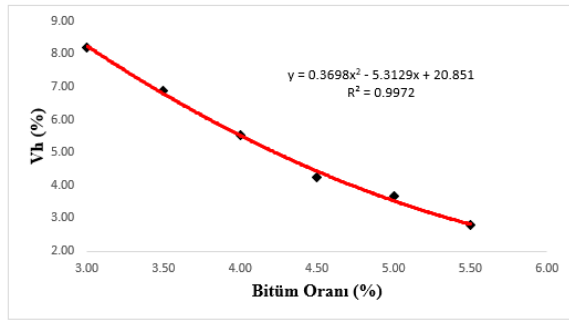
- Karışımda bulunan bitüm miktarı arttıkça Vfa oranının doğrusal bir şekilde arttığı görülmüştür.
- KTŞ sınır değerleri olan %60-75 Vfa oranlarını %4.0 ve %4.5 bitüm içeren numuneler sağlamıştır.



- KTŞ sınır değerleri olan %4-6 Vh oranlarını %4.00 ve %4.5 bitüm içeren numuneler sağlamıştır.
- Vfa artıka boşluk oranı düşmüştür.



Şekil 5. Vfa - Bitüm oranı (%) grafiği

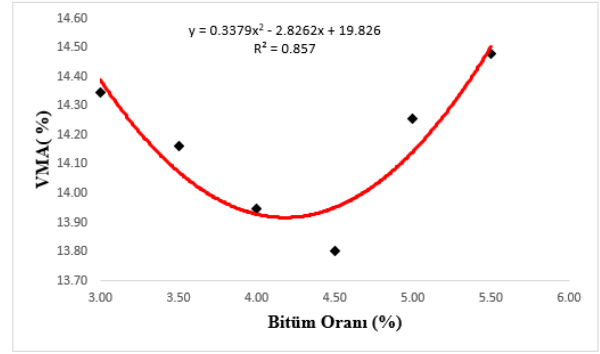


Şekil 6. Vh - Bitüm oranı (%) grafiği

VMA değeri sıkıştırılmış kaplama karışımları içerisindeki bitümlü dolu boşluklar da dâhil olmak üzere agrega danecikleri arasındaki hava boşluklarıdır. Mineral agregalar arasındaki boşluk, karışımdaki bitüm ve hava boşluğu için gerekli olan hacme tekabül eden kullanılabilir hacmi temsil eder. Dolayısıyla mineral agregalar arasındaki boşluk arttıkça agregalar üzerindeki bitüm film kalınlığının artacağı ve karışımın durabilitesinin yükseleceği söylenebilir [31].

KTŞ'de binder dizaynı VMA değerleri için sınırlar 13-15'dir. Bu değerlerin dışına çıkılırsa sıcak havalarda bitüm boşluklara akar, eğer yeterli VMA olmaz ise kuma meydana gelir. Bitüm oranı (%) ve VMA arasında ki ilişki Şekil 7'deki grafikte verilmiştir. Deney sonucunda tespit edilen verilere göre;

- Karışım içerisinde bulunan bitüm miktarı arttıkça, agregalar arasındaki boşluk miktarının %4.5 bitüm içeren numuneye kadar kararlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.
- %4.5'dan sonra agregalar arası boşluk oranı kararlı bir şekilde artış göstermiştir.
- En düşük değer %4.5 bitüm oranına sahip numunelerde tespit edilmiştir.
- Numunelerin tamamı KTŞ'de verilen (%13-15) sınır değerlerini sağlamıştır.



Şekil 7. VMA - Bitüm oranı (%) grafiği

Agrega granülometrisi sabit tutularak %3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 değerlerinde bitüm içeriği kullanılarak asfalt beton numuneler hazırlanmıştır. Optimum bitüm içeriğini belirlemek amacıyla stabilite, akma, Dp, Vh, Vfa ve VMA grafikleri çizilmiştir. Maksimum Dp'ye karşılık gelen bitüm yüzdesi (%5.40), Vh yüzdesi şartname sınırlarının ortalaması olan %5'e karşılık gelen bitüm yüzdesi (%4.20), Vfa %67.5'a denk gelen bitüm yüzdesi (%4.45) ve maksimum stabiliteyi veren bitüm yüzdesi (%4.70) değerlerinin ortalaması alınarak optimum bitüm yüzdesi Tablo 5'te verilen formül ile %4.68 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın sonraki aşamalarında bu değer esas alınmıştır. Kireçtaşı filler içeren numunelere ait deney sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca asfalt betonu binder tabakası dizayn kriterleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 5. Optimum bitüm oranının belirlenmesi (Binder Tabakası)

	İstenilen	Oran (%)
Pratik Özgül Ağırlık (Dp), (gr/cm <sup>3</sup> )	Maksimum	5.40
Marshall Stabilitesi, (kg)	Maksimum	4.70
Boşluk (Vh), (%)	4-6 (5)	4.20
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (Vfa), (%)	60-75 (67.5)	4.45
Optimum Bitüm İçeriği (Dp, MS, Vh ve Vfa ortalaması)		4.68 (%)

Tablo 6. Kireçtaşı filler içeren numunelere ait Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları

	Dizayn	Şartname [21]
Optimum Bitüm	4.68	3.5-6.5
Pratik Özgül Ağırlık (Dp), (gr/cm <sup>3</sup> )	2.41	-
Marshall Stabilitesi, (kg)	1190	min. 750
Boşluk (Vh), (%)	4.82	4-6
Akma	3.65	2-4
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (Vfa), (%)	65.3	60-75
V.M.A (%)	13.9	13-15

Tablo 7. Asfalt betonu dizayn kriterleri [21]

Özellikler	Binder		Deney Standardı
	min.	maks.	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		TS EN 12697-30 [32]
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	TS EN 12697-34 [33]
Boşluk, %	4	6	TS EN 12697-8 [34]
Asfaltla Dolu Boşluk, %	60	75	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk, %	13	15	TS EN 12697-8
Akma, mm	2	4	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm Oranı	-	1.4	
Bitüm (ağırlıça, 100'e)	3.5	6.5	TS EN 12697-1 [35]
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min.%	80		AASHTO T283 [36]
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C'de), maks. %	-		TS EN 12697-22 [37]
Not: Tabaklar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilecektir.			

#### 4.2. Diatomitin tozunun filler olarak kullanıldığı numunelere ait Marshall stabilite deney sonuçları

Çalışmada filler olarak kireçtaşının kullanıldığı, %3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 oranlarında bitüm oranına sahip numuneler dökülerek optimum miktarı %4.68 olarak belirlenmiştir. Belirlenen %4.68 optimum bitüm içeriğine göre aynı gradasyonda kireçtaşı filler yerine diatomit ikameli numuneler hazırlanmıştır. Kireçtaşı fillere kütlece toplam filler miktarının yüzdesi olarak %0, 25, 50, 75, 100 oranlarında diatomit ikame

edilerek Marshall briketleri hazırlanmıştır. Diatomit ikameli asfalt beton numuneler Marshall stabilite ve akma testine tabi tutularak diatomit filler malzemesinin stabilite, akma, boşluk (Vh), asfaltla dolu boşluk miktarı (Vfa), pratik özgül ağırlık (Dp) ve agregalar arası boşluk miktarı (VMA) üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Diatomit ikame oranına bağlı olarak asfalt betonunun mühendislik özelliklerindeki değişimler diatomit (%) fillere göre stabilite değişim grafiği Şekil 9, akma değişim grafiği Şekil 10, Dp değişim grafiği Şekil 11, VMA değişim grafiği Şekil 12, Vh değişim grafiği Şekil 13 ve Vfa değişim grafiği Şekil 14'te verilmiştir.

Karşılaştırmanın daha iyi yapılabilmesi için optimum bitüm oranının belirlendiği gradasyon ve optimum bitüm miktarı kullanılarak kireçtaşı filler ile diatomit filler belirli oranlarda (Tablo 8) yer değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 8. Mineral filler olarak diatomit yer alan numunelerde diatomit - kireçtaşı oranları

Adet	Kireçtaşı Filler (%)	Numune İçerisindeki Ağırlığı (gr)	Diatomit	Numune İçerisindeki Ağırlığı (gr)
3	0	-	100	52.9
3	25	13.225	75	36.675
3	50	26.45	50	26.45
3	75	39.675	25	13.225
3	100 (Şahit Numune)	52.9	0	-

Numuneler Marshall metoduna göre hazırlanmıştır. İlk numune dökümü olan %100 diatomit filler içeren numuneye ait gradasyon hazırlanarak etüve yerleştirilmiştir. Bir gün sonra optimum bitüm miktarı ve gradasyonu hazır olan agregaya yığını karıştırılmaya başlandığında uygun sıcaklık altında olmasına rağmen diatomitin karışım içerisindeki bitümü tamamen absorbe ettiği, agregaların yüzeyinin bitümlü kaplanmasını engellediği görülmüştür. Karışımın rengi kahverengi olmuştur (Şekil 8). Normal sürelerin çok üstünde (ortalama 25-35 dk) karıştırma işlemi ve kalıba şişlenerek yerleştirilip tokmaklama işlemi yapılmıştır. Numune bir gün kalıpta beklemesi için oda sıcaklığına bırakılmıştır. Bir gün sonra numune kalıptan çıkartılırken yoğun bir şekilde segregasyon görülmüştür.



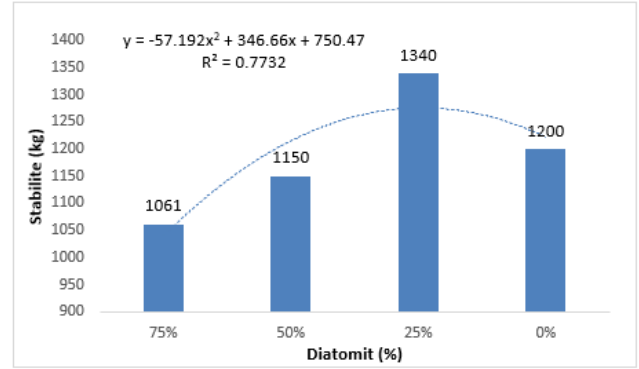
Şekil 8. Diatomit filler oranı %100 olan numunenin sıkıştırma işlemi ve sonrası

%100 diatomit ikameli numunelerde diatomitin agregaların yüzeyini kaplayarak numunede bağlayıcılığı etkilediği tecrübe edildikten sonra hazırlanan numunelerde agregalar ayrı bir kapta, numune oranına göre diatomit başka bir kapta hazırlanmıştır. Deney sonuna kadar bitüm ve agregaların karışımı önce karıştırılmıştır. Bitüm iri agregaların yüzeylerini tamamen kapladıktan sonra karışıma diatomit eklenerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karışım içerisinde diatomitten gelen beyaz renk kalmayana kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.

Diatomit ikameli asfalt beton numunelere ait diatomit (%) fillere göre stabilite, akma, Dp, Vfa yüzdesi, Vh, VMA yüzdesi grafikleri sırasıyla Şekil 9, 10, 11, 12, 13 ve 14'te verilmiştir.

KTŞ'de binder dizaynında stabilite değeri için min.750 kg değeri verilmiştir. Deney sonuçlarına göre numunelerin ihtiva ettikleri diatomit oranlarına karşılık gelen stabilite değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Deney sonucunda tespit edilen verilere göre;

- Numunelerin tamamı KTŞ alt sınırı olan 750 kg'yi sağlamıştır.
- En yüksek stabilite değeri %25 diatomit içeren numunelerde 1340 kg olarak tespit edilmiştir.
- Diatomit oranı %25'i geçtiğinde stabilize değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Yüksek diatomit oranlarında stabilitenin düşmesinin sebebi diatomitin bitümü absorbe etmesi olarak düşünülmektedir.
- %25 diatomite sahip numunelerin stabilite değeri, şahit (kontrol) numunelerinin stabilite değerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir.

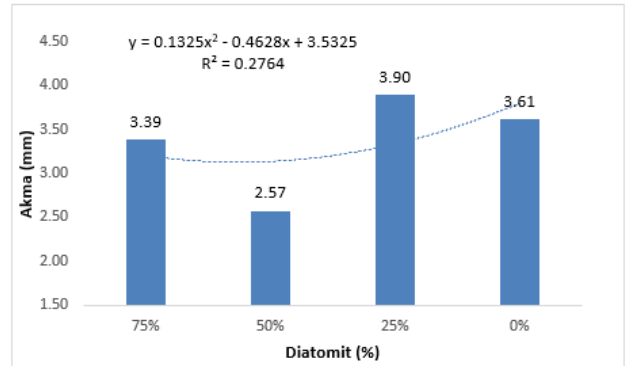


Şekil 9. Diatomit filler oranına göre stabilite değeri değişim grafiği

KTŞ'ye göre binder dizaynında akma değeri 2-4 mm aralığında olmalıdır. Diatomit oranlarına göre karşılık gelen ortalama akma değerleri Şekil 10'da verilmiştir.

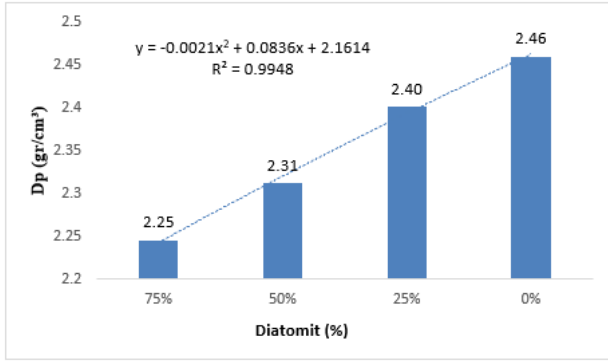
Deney sonuçlarına göre hazırlanan grafiğe göre;

- Numune içerisinde kullanılan diatomit oranlarını arttıkça akma değerinde düşüş tespit edilmiştir.
- %25 diatomit oranına sahip numunelerde en yüksek değeri olan 3.90 mm akma değeri elde edilmiştir. Şartnamenin üst sınırı olan 4 değerini aşmamıştır.
- %25 diatomit filler oranına sahip numunelerde, kireçtaşı filler kullanılan numunelere göre daha yüksek akma değeri tespit edilmiştir.

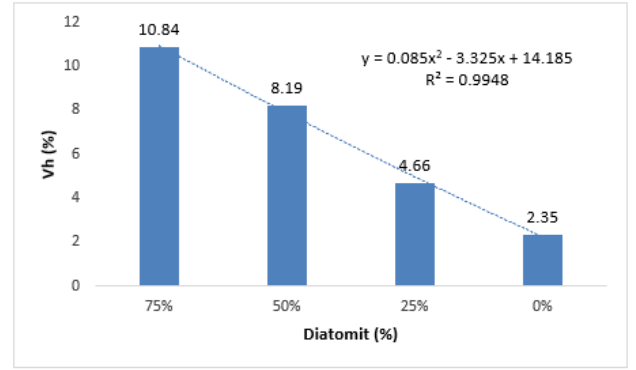


Şekil 10. Diatomit filler oranına göre akma değeri değişim grafiği

Karışımında bulunan diatomit miktarı arttıkça Dp'nin kararlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Deneyde %25, %50 ve %75 oranlarında diatomit içeren numuneler hazırlanmış ve sırasıyla pratik özgül ağırlık değerleri 2.40, 2.31, 2.25 gr/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Diatomit ikameli karışımlar içerisinde en yüksek pratik özgül ağırlık değeri %25 diatomit içeren numunelerde tespit edilmiştir. Diatomit oranına göre pratik özgül ağırlık değişimi Şekil 11'de verilmiştir.



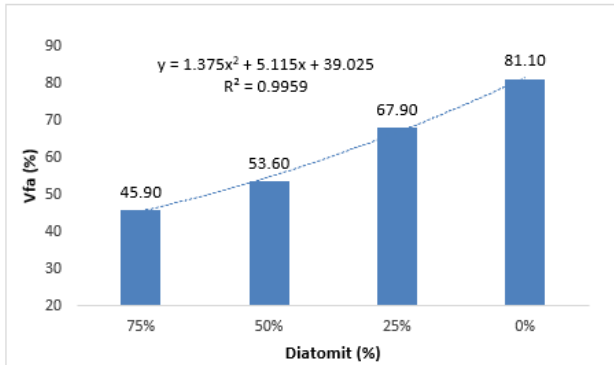
Şekil 11. Diatomit filler oranına göre DP değeri değişim grafiği



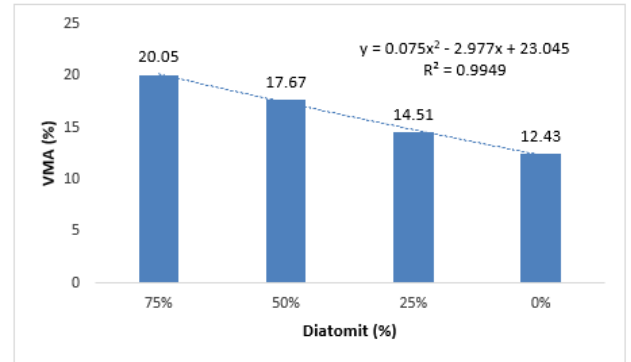
Şekil 13. Diatomit filler oranına göre Vh değeri değişim grafiği

İçerdiği diatomit oranlarına göre asfaltla dolu boşluk oranı grafiği Şekil 12’de verilmiştir. Boşluk ve diatomit oranına ait değerler Şekil 13’te verilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre hazırlanan asfaltla dolu boşluk oranı grafiğine göre;

- Numunelerin sahip oldukları diatomit oranı arttıkça asfaltla dolu boşluk oranı azalmaktadır.
- Diatomitin karışım içerisindeki bitümü absorbe ettiği tespit edilmiştir.
- Diatomit oranları yüksek olan %50 ve %75 numuneler ise sırasıyla şartnamenin alt sınırının %10 ila %20 altında kalmıştır.
- KTŞ’de verilen Vh sınırlarını (2-4mm) sadece %25 diatomit ikameli numuneler sağlamıştır.



Şekil 12. Diatomit filler oranına göre Vfa değeri değişim grafiği



Şekil 14. Diatomit filler oranına göre VMA değeri değişim grafiği

KTŞ’de binder dizaynı VMA değerleri için sınırlar 13-15’dir. Diatomit oranı ve agregalar arasında ki boşluk arasında ki ilişki Şekil 14’te verilmiştir.

Deney sonucunda tespit edilen verilere göre;

- Numune içerisinde bulunan diatomit miktarı arttıkça, VMA artmaktadır.
- Diatomit arttıkça boşluk oranının artmasının sebebi olarak diatomitin bitüm üzerindeki absorpsiyon etkisi olduğu düşünülmektedir.
- Şartname sınırları içerisinde sadece %25 diatomit oranına sahip numuneler kalmıştır.
- Diatomit içeren numunelerin boşluk miktarı şahit (kontrol) numunelerinin boşluk miktarlarından fazla olduğu tespit edilmiştir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada diatomitin bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) filler malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla Marshall metodu ile kireçtaşı agrega ve kireçtaşı filler kullanılarak %3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 bitüm oranına sahip numunelere ait stabilite, akma, pratik özgül ağırlık (Dp), asfaltla dolu boşluk miktarı (Vfa), boşluk (Vh) ve agregalar arası boşluk miktarı (VMA) değerleri tespit edilmiş ve grafikleri çizilmiştir.

Çizilen bu grafiklerden optimum bitüm miktarı %4.68 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen optimum bitüm içeriği ve optimum bitüm oranının belirlendiği gradasyon kullanılarak %0, 25, 50, 75 oranlarında diatomit filler ikameli asfalt beton numuneler hazırlanmıştır. Diatomit ikameli numuneler Marshall BSK tasarım testine tabi tutularak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- %4.68 olarak bulunan optimum bitüm yüzdesinin KTŞ'ye uygun olduğu görülmüştür.
- Asfalt beton numunelerin üretiminde kullanılan agrega, filler ve bitümün şartnameye uygun olduğu belirlenmiştir.
- Belirlenen Filler/Bitüm oranının şartname sınırları içinde kaldığı görülmüştür.
- Stabilite, sadece %25 diatomit ikameli numunelerde artış göstermiştir. Sadece kireçtaşı filler ile hazırlanan şahit numuneye (0% diatomit filler) ait stabilite değerinin 1200 kg, %25 diatomit ikameli numunenin stabilite değerinin 1340 kg, %50 diatomit ikameli numunenin stabilite değerinin 1150 kg, %75 diatomit ikameli numunenin stabilite değerinin 1061 kg olduğu görülmektedir. Fillerin tamamının diatomit filler olduğu brikete ait stabilite değeri hazırlanan briketlerde yoğun segregasyon olması nedeniyle deney yapılamadığından değerler belirlenememiştir. Stabilite, kireçtaşı filler ile üretilen şahit numuneye (%0 diatomit) göre %25, %50 ve %75 diatomit ikame oranlarında %25 diatomit ikameli numunelerde %11.67 artış, %50 ve %75 diatomit ikameli numunelerde sırasıyla %4.17 ve %11.58 oranlarında düşüş görülmüştür. Bu sonuçlar diatomit filler ikameli asfalt betonlarda Marshall stabilitesinin sadece %25 diatomit ikameli numunelerde arttığını göstermiştir.
- Çalışmada şahit numune (%0 diatomit) ve %25, 50, 75 oranlarında diatomit ikameli BSK numunelerde akma değerlerinin KTŞ'nin standartlarına (2-4mm) uygun olduğu görülmüştür.
- Pratik özgül ağırlık değeri diatomit filler miktarının artmasıyla diatomit ikameli tüm numunelerde düşmüştür. Diatomit ikameli numuneler arasında en yüksek pratik özgül

ağırlık değerine stabilitenin en yüksek değeri aldığı %25 diatomit ikameli numunede ulaşılmıştır.

- VMA ve bitüm oranı grafiği incelendiğinde %25, 50, 75 diatomit ikameli briketlerde VMA değerinin şahit numuneye göre arttığı görülmektedir. Grafiğe bakıldığında diatomit ikameli numunelerin %14 değerinin üstünde kaldığı görülmektedir. Numunelere ait VMA sırasıyla %14.51, 17.67, 20.05 değerlerini almıştır. KTŞ'ye göre VMA değerinin %14'ten büyük olması istenmektedir. Özellikle sıcaklığın etkisiyle diatomit ikameli asfalt beton numunelerde agregalar arasında yeterli boşluk olmaması nedeniyle asfalt beton kaplamada kusma meydana gelebileceği düşünülmektedir.
- KTŞ'ye göre binder tabakası Marshall tasarım kriterlerinde izin verilen boşluk sınır değerleri %4-6'dır. Boşluk ve diatomit ilişkisini gösteren grafiğe bakıldığında %25, %50 ve %75 diatomit ikameli briketlerde boşluk oranları sırasıyla %4.66, 8.19, 10.84 değerlerini almıştır. Değerler incelendiğinde diatomit ikameli tüm briketler içerisinde sadece %25 diatomit ikameli numunelerin şartname değerlerini sağladığı görülmektedir.
- Organik kökenli mineral olan diatomitin en önemli özelliği gözenekli yapısıdır. Bu yapı yüksek oranlarda porozite sağlar. Sıvı emme kapasitesi fazladır. İşlenmiş haldeki diatomit kendi ağırlığının 3-4 katı, kalsinasyondan sonra kendi ağırlığının 5-10 katı kadar sıvı emebilir. Diatomit kendine has özellikleri sebebiyle yüksek oranda (%50, 75, 100) diatomit içeren numunelerde diatomit eklendiği anda bitüm ile yoğun bir tepkimeye girerek agregaların yüzeyinin bitüm ile kaplanmasına engel olduğu tespit edilmiştir.
- Karışımların tamamında bitüm ve kireç taşı agregalar tam olarak üniform bir görüntüye sahip olduktan sonra (agregaların yüzeyi asfaltla kaplandıktan sonra) diatomit ilave edilmiştir. Karışımın siyah olan renginin (bitümden kaynaklı), diatomit karışıma eklendikten kısa bir süre sonra kahverengiye döndüğü gözlemlenmiştir.
- Yüksek diatomit oranlarına sahip (%50, 75, 100) numuneler hazırlanırken karıştırma işlemine diatomit ilave edildikten sonra bağlayıcılık gözlemlenmemiştir. Karışım halihazırda içerisinde bitüm yokmuş gibi bir

hale gelmiştir. Bu duruma rağmen sıkıştırma işlemi ile birlikte %100 diatomit oranına sahip numuneler haricinde diğer numuneler düzgün bir görüntüye ve deneye tabi tutulabilecek hale gelmişlerdir.

- Yüksek diatomit oranına sahip numunelerde (%50, 75, 100) agrega ve bitüm arasında yeterli aderans sağlanmadığı gözlemlenmiştir.
- %25 diatomit oranına sahip numunelerde karıştırma işlemi esnasında yüksek diatomit oranlarına sahip numunelerle benzer durumlar daha düşük oranda seyretmiştir ve sıkıştırma işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Deney neticesinde bir tane %25 olmak üzere, %75 ve %50 diatomit oranına sahip numunelerde parçalanma görülmüştür. %100 diatomit oranına sahip numunelerin tamamı yoğun segregasyon nedeniyle deneye tabi tutulamamıştır.
- KTŞ akma sınırları (2-4mm) göz önüne alındığında en yüksek stabilite değerine (1340 kg) sahip olan %25 diatomit ikameli numunelerde 3.9 mm akma değeri tespit edilmiştir.
- %25 diatomit oranına sahip numunelerin KTŞ sınırlarını sağlaması, en yüksek stabilite değerini vermesi ve yüksek diatomit oranlarına sahip numunelerde (%50 ve %75) değerlerin düşmesi nedeni ile daha sonra yapılacak çalışmalarda %0 ve %25 aralığında diatomit ikame edilerek araştırma yapılabileceği düşünülmektedir.
- Diatomitin bitümü absorbe etmesi sebebiyle daha fazla bitüme ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. İlerde yapılacak çalışmalarda farklı bitüm oranlarına sahip diatomit ikameli numuneler hazırlanarak diatomitin karışıma etkilerinin araştırılabileceği düşünülmektedir.
- Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen değerlere göre hazırlanan grafikler incelendiğinde %25 diatomit ikameli filler malzemesinin KTŞ binder dizayn kriterlerinin tamamını sağladığı belirlenmiştir. Bu sebeple esnek kaplamalarda kireçtaşı filler ile birlikte diatomitin esnek üst yapı performansını artırmak için kullanılabileceği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Morova N, Terzi S. Kolemanit atıkların sıcak karışım asfalt betonda agrega olarak değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(2), 8-15, 2015.
- [2] Ahmedzade P, Yılmaz M. Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures. *Construction and building materials*, 22(4), 481-486, 2008.
- [3] Saltan M, Öksüz B, Uz VE. Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(3), 271-277. 10.1515/secm-2013-0135, 2015.
- [4] Özbey G, Atamer N. Kizelgur (Diatomit) Hakkında Bazı Bilgiler. [https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/aeae10ea1c6433c\\_ek.pdf](https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/aeae10ea1c6433c_ek.pdf) (Erişim tarihi: 05.07.2022)
- [5] Sargın Ş, Saltan M, Morova N, Serin S, Terzi S. Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390-397, 2013.
- [6] Ahmedzade P, Alataş T, Geçkil T. Asfalt betonunda siyah karbonun filler olarak kullanımı. *Teknik Dergi*, 19(94), 4493-4507, 2008.
- [7] Canpolat M, Beycioğlu A, Morova N, Çetin S, Çetin HM, Gündoğan H. Atık Olivin Mineralinin Asfalt Betonunda Filler Olarak Kullanımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 555-566, 2022.
- [8] Selman GŞ. *Bor atıklarının asfalt kaplamalarda mineral filler olarak kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2015.
- [9] Terzi S, Büyükdoğaç EM. Evaluation Of Zeolite And Pumice Waste As Mineral Aggregate And Filler For Producing Lightweight Asphalt Concrete Mixtures. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 118-123, 2018.
- [10] Üstümkol FN, Turabi A. (2010). Endüstriyel atık filler malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(1), 3-18, 2010.
- [11] Beycioğlu A, Kaya O, Yıldırım ZB, Bağrıaçık B, Dobiszewska M, Morova N, Çetin S. Use of GRP pipe waste powder as a filler replacement in hot-mix asphalt. *Materials*, 13(20), 4630, 2020.
- [12] Morova N, Terzi S. Laboratory investigation of usability of slate waste powder as filler in hot mix Asphalt concrete. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 1-18, 2016.
- [13] Tığdemir M, Tımorı MI. Asfalt beton kaplamalarında Tunçbilek uçucu külünün filler olarak kullanılmasının araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 126-141, 2022.

- [14] Terzi S, Kardeşahin, M. Mermer toz atıklarının asfalt betonu karışımında filler malzemesi olarak kullanımı. *Teknik Dergi*, 14(2), 2903-2922, 2003.
- [15] Elmacı A. *Asfalt Betonunda Granit Arıtma Çamurunun Filler Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2011.
- [16] Çubuk MK. *Katkı Maddesi Olarak Diatomitin, Bitümlü Sıcak Karışımlarda Davranışları Üzerindeki Etkileri*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1998.
- [17] ASTM International. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM C127-15 West Conshohocken, PA, 2015. www.astm.org
- [18] ASTM International. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM C 128. West Conshohocken, PA, 2001 www.astm.org
- [19] British Standard Institution. BS 812: Part 2: Methods for determination of physical properties, 1975.
- [20] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü maddelerde özgül ağırlık tayini (hidrometre, piknometre ve su içinde tartma metotları ile), TS 1087. Ankara, Türkiye, 1972.
- [21] Karayolları Genel Müdürlüğü. Karayolu Teknik Şartnamesi. Ankara, Türkiye, 2013
- [22] Türk Standartları Enstitüsü. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, TS EN 1426. Ankara, Türkiye, 2015.
- [23] Türk Standartları Enstitüsü. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilye Yöntemi, TS EN 1427. Ankara, Türkiye, 2015.
- [24] ASTM International. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, ASTM D 2041. Annual Book of ASTM Standards USA, 2004.
- [25] Türk Standartları Enstitüsü. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 8: Taş parlatma değerinin tayini, TS EN 1097-8. Ankara, Türkiye, 2004.
- [26] Türk Standartları Enstitüsü. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, TS EN 1367-2. Ankara, Türkiye, 1999.
- [27] Türk Standartları Enstitüsü. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro-Deval), TS EN 1097-1. Ankara, Türkiye, 2002.
- [28] Türk Standartları Enstitüsü. Tests for geometrical properties of aggregates-Part 10: Assessment of fines; Grading of fillers (air jet sieving), TS EN 933-10. Ankara, Türkiye, 2015.
- [29] Yıldız K. *Marshall Dizayn Metodu ile Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [30] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. İsfalt, Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, ISBN: 975-8183-02-8, İstanbul, Türkiye, 2004
- [31] Gürer C. *Atık Mermer Parçalarının Yol Kaplamasında Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2005.
- [32] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü karışımlar, sıcak asfalt karışımları için deney yöntemleri, bölüm 30: darbeli sıkıştırıcı ile numune hazırlanması, TS EN 12697-30. Ankara, Türkiye, 2012.
- [33] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü karışımlar sıcak asfalt karışımları için deney yöntemleri, bölüm 34: Marshall deneyi, TS EN 12697-34. Ankara, Türkiye, 2012.
- [34] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü karışımlar, sıcak asfalt karışımları için deney yöntemleri, bölüm 8: bitümlü numunelerin boşluk özelliklerinin tayini, TS EN 12697-8. Ankara, Türkiye, 2005.
- [35] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü karışımlar sıcak asfalt karışımları için deney yöntemleri bölüm 1: Çözünür bağlayıcı muhtevası tayini, TS EN 12697-1. Ankara, Türkiye, 2003.
- [36] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, AASHTO T283. ABD 2022
- [37] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü karışımlar, deney metotları, sıcak karışımli asfalt için, bölüm 22: Tekerleğin iz bırakması, TS EN 12697-22. Ankara, Türkiye, 2004.
- [38] ASTM International. Standard Test Method for Resistance to External Loads on Metal Reflective Pipe Insulation, ASTM C854. 1990
- [39] Öksüz B. *Asfalt Betonuna Kaplamalarda Volkanik Cüruf ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2011.
- [40] Türk Standartları Enstitüsü. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 2: Parçalanma Direnci Tayini İçin Yöntemler, TS EN 1097-2. Ankara, Türkiye, 2010.
- [41] Türk Standartları Enstitüsü. Bitümlü karışımlar-Deney metotları-Sıcak karışımli asfalt içi-Bölüm 11: Agregası ve bitüm arasındaki bağlanmanın tayini, TS EN 12697-11. Ankara, Türkiye, s. 28, 2012.
- [42] Türk Standartları Enstitüsü. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yoğunluk ve Özgül Kütle Tayini-Kapiler Kapaklı Piknometre Deneyi, TS EN 15326 + A1. Ankara, Türkiye, 2010.

- [43] Türk Standartları Enstitüsü. Petrol ve İlgili Ürünler – Parlama Yanma Noktasının Tayini, Cleveland Açık Kap Yöntemi, TS EN ISO 2592. Ankara, Türkiye, 2017.
- [44] Alman Standartlar Enstitüsü. Bituminous mixtures, test methods, Part 48: Interlayer Bonding, DIN EN 12697-48. Almanya, 2022.



Araştırma Makalesi/Research Article

## Mozaiklemede geometrik bozulma düzeltme ve göz verilerinde uygulanması

Ömer Can Eskicioğlu<sup>1</sup>, Ali Hakan Işık<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 15030, Burdur, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Görüntü mozaikleme  
Görüntü sarmalama  
Harris köşe algılama  
SIFT  
Perspektif Projeksiyonu

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 12.09.2022  
Kabul Tarihi: 29.11.2022

**Öz:** Görüntü işleme, gelişen yazılım ve donanım teknolojilerine paralel olarak birçok sektörde kullanılmaktadır. Sektörlerin ihtiyaçlarına göre kullanılan görüntü tekniklerinde farklılık gözlemlenmektedir. Bu bağlamda sağlık alanında kullanılması çok hassas ölçümler ile güçlü algoritmalar gerekmektedir. Bu makalede, D-EYE ve FIRE gibi veri kümelerini kullanarak retina görüntüleri üzerinde görüntü mozaik yapılmıştır. Görüntüler üzerinde özellik algılama, özellik eşleştirme, görüntü eşleştirme, görüntü sarmalama ve görüntü mozaikleme işlemleri uygulanmıştır. Görüntüdeki köşeleri bulmak için Harris köşe dedektörü kullanılmıştır. Köşe dedektörü ile karşılık gelen 2 görüntüdeki noktaların konumları bulunmuştur. Koordinatlar arasında öznitelik tanıma algoritması olarak Ölçek Değişmez Unsur Dönüşümü (SIFT) kullanılmıştır. Belirlenen öznitelikler arasında öznitelik ve görüntü eşleştirme işlemleri yapılmıştır. Rastgele Örnek Konsensüsü (RANSAC) yardımıyla zayıf noktalar ortadan kaldırılmıştır. Homografi, kalan noktalarla projektif dönüşüm için tanımlanmıştır. Son aşamada homografi matrisi ile geometrik bir dönüşüm yapılmıştır. Çalışmamızdaki görüntü mozaikleme uygulaması; retina görüntüleri, insansız hava aracı görüntüleri, bakteri veya tomografi görüntüleri başta olmak üzere geniş bir alana uygulanabilmektedir. Farklı veri setleri ile test edilmiş başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

### Atıf için/To Cite:

Eskicioğlu Ö.C., Işık A.H. Mozaiklemede geometrik bozulma düzeltme ve göz verilerinde uygulanması. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(3), 116-123, 2022.

## Correction of geometric distortion for mosaicing and applied in eye data

### Keywords

Image mosaicing  
Image wrapping  
Harris corner detection  
SIFT  
Perspective projection

### Article history:

Received: 12.09.2022  
Accepted: 29.11.2022

**Abstract:** Image processing is used in many sectors in parallel with the developing software and hardware technology. Differences are observed in the image techniques used according to the needs of the sectors. In this context, very precise measurements and powerful algorithms are required to be used in the field of health. In this article, an image mosaic was made on retinal images using datasets such as D-EYE and FIRE. Feature detection, feature matching, image matching, image wrapping and image mosaicing processes are applied on the images. Harris corner detector was used to find the corners in the image. The positions of the points in the 2 corresponding images were found with the corner detector. Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) was used as the feature recognition algorithm between the coordinates. Feature and image matching processes were performed between the determined features. Weak spots are eliminated with the help of Random Sample Consensus (RANSAC). The homography is defined for the projective transformation with the remaining points. In the last step, a geometric transformation was made with the homography matrix. The image mosaic application in our study; It can be applied to a wide area, especially retinal images, unmanned aerial vehicle images, bacteria or tomography images. It has been tested with different data sets and a successful result has been obtained.

## 1. Giriş

Çağımızda dijital teknolojilerin popülerleşmesiyle görüntü verileri dikkat çekici bir şekilde önem kazanmıştır. Sunum veya bir öğreti sırasında görüntülerden faydalanabilmek kolay, anlaşılabilir ve hızlı bir eğitim sunmaktadır. Bu nedenle sıklıkla kullanılmakta olup hayatımızda önemli bir yere sahiptir. Görüntüler piksellerden meydana gelmektedir. Her piksel aslında birer veridir. Bu piksel verileri bir araya gelerek görüntü verisini oluşturmaktadır. Görüntüler zamana ve mekâna bağlı olarak açısı, ışığı veya kalitesi değişiklik gösterebilmektedir. Sadece bu değişiklik kamera donanımının kalitesine bağlı bir durum değildir. Yazılımsal iyileştirmelerde en az donanım kadar etkilidir. Yazılımsal olarak filtreler, derin öğrenme tabanlı görüntü iyileştirme yöntemleri, uygun kontrast tespiti gibi görüntü özelliklerinden faydalanarak görüntü iyileştirmeleri yapılabilmektedir. Yalnızca görüntünün kalitesini ve anlaşılabilirliğini arttırmanın yanında görüntü açıları da düzeltilebilmektedir. Ortalamadan veya eğik çekim yapılmış görüntü argümanları perspektif düzenlemesi ile görüntü bozulmasından arındırılabilir. Perspektif düzenlemesi görüntü işleme algoritmalarının bir arada çalıştırılması sonucunda meydana gelen bozukluk giderilmektedir.

Görüntü bozulmaları, sadece perspektif görüntü bozulmalarından kaynaklanmamaktadır. Bazı durumlarda görüş açısı nedeniyle bozulmalar meydana gelebilmektedir. Kaynağı bilinmeyen bozuk görüntüleri düzeltmek için kamera parametrelerinin veya görüntünün eğimlerinin tahmin edilmesi gerekebilecek durumlar olabilmektedir. Bu eğimleri ve kamera parametrelerini tahmin etmeye çalışmak, yapılacak bir sisteme ekstra bir hesaplama yükü getirmektedir.

Görüntü perspektifi sadece görüntüdeki bozukluklar dışında görüntü mozaiklemede de yaygın olarak kullanılmaktadır. Mozaikleenecek olan her görüntünün aynı açı ve doğrultuda görüntü öznelik noktalarını hizalamak için perspektif düzeltmesi uygulanmaktadır.

Görüntü mozaikleme küçük ve bölgesel olan görüntülerin birleştirilerek daha büyük ve detaylı bir görüntü elde edilmesini amaçlamaktadır. Görüntü mozaiklemede özellik çıkarma, özellik eşleştirme, aykırı noktaların tespit edilmesi, homografi hesaplanması, görüntü çarpıtma, görüntü harmanlama ve görüntü mozaikleme adımlarından oluşmaktadır.

Perspektif görüntülerindeki bozuklukların düzeltilmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda Hough dönüşümü, izdüşüm profil

histogramı, homografi matrisi, derin öğrenme ve uzak ufuk noktası kullanılarak perspektif düzeltmelerinin yapıldığı görülmektedir. Literatürdeki sıkça kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir.

Pavić vd. [1], 3B yapı hakkındaki bilgileri kullanarak parça tabanlı görüntü tamamlama için etkileşimli bir sistem önermiştir. Sistem, etkileşimli görüntü tamamlama için parçaları kopyalarken perspektif düzeltmeleri uygulamaktadır. Parça bazlı görüntü tamamlama teknikleri ile düzlemsel varsayımlar yapılarak 2 boyutlu olarak uygulanmaktadır. Kaynak parçaları aranırken, Uzaklık Karesi Toplamı (SSD) yöntemi kullanılmıştır. 3B düzlem belirtilmezse, sistem perspektif düzeltmeleri olmadan önceki görüntü tamamlama teknikleri gibi davranmaktadır. Gerum vd. [2] sensörlerden gelen verilerle kamera kayıtlarını ve görüntüleri optimize eden bir yöntem geliştirmiştir. Uydu görüntülerine ve çoklu görüş açılarından yapılan hesaplamalara dayalı olarak harici kamera parametrelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Perspektif düzeltmeleri ve görüntü haritalama yöntemleri kullanılarak açık kaynaklı olarak hazırlanmıştır. Li vd. [3] giriş görüntüsündeki geometrik bozulma türlerini otomatik olarak düzeltmek için genel bir mimari önerilmiştir. Yöntem, bozulmuş ve düzeltilmiş görüntülerdeki yer değiştirmeyi tahmin etmek için büyük bir sentetik bozulma veri seti kullanılarak eğitilmiş Evrişimli Sinerji Ağlarını (CNN) kullanmaktadır. Algoritmanın geleneksel düzeltme yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği çalışmada kanıtlanmıştır. Güvenoğlu [4] tarafından önerilen yöntemde, perspektifi bozulmuş görüntüdeki nesnelerin dikdörtgen veya kare olması gerekmeden perspektif düzenlemesi yapılabilmektedir. Farklı boyutlardaki dikdörtgen bölgeler, görüntüdeki herhangi bir perspektif bozulma kolaylıkla düzeltilmektedir. Perspektif çarpık görüntülerin düzenli metinlerle düzeltilmesini sağlayan bir çalışma Clark vd. [5] tarafından yapılmıştır. Yöntemde dikey ve yatay izdüşüm profil histogramı yardımıyla ilk aşamada metinlerin bulunduğu bölgeler belirlenmektedir. Metin düzleminin yatay kaybolma noktası 2B projeksiyon yöntemi ile bulunmaktadır. Böylelikle metin satırlarının bölümlenmesini sağlamaktadır. Çizgilerin analizi düzlemin dikey kaybolma noktasının ve paragrafın yaslama stiline tahminini sağlayacaktır. Yapılan işlemler neticesinde metin, Optik karakter tanıma (OCR) veya diğer tanıma yöntemleri için uygun bir çıktı elde edilmiştir.

Günümüzde perspektif görüntülerin düzeltilmesi mobil teknolojiler ile de mümkündür. Bu çalışmalardan biri Li vd. tarafından yapılmıştır. [6] Bu çalışma iki varsayıma dayanmaktadır. Bunlardan biri bozuk görüntünün dikdörtgen bir yapıya sahip olduğu

varsayımı, diğeri ise kameranın iç parametrelerinin bilindiği varsayımdır. Bu nedenle varsayımlara dayalı olarak bozulan görüntüde bir homografi matrisi oluşturulmaktadır. Oluşturulan homografi matrisi ile düzeltilmiş görüntü düzeltilmesi sağlanmaktadır. Mohan vd. [7] kamera parametrelerini, bilinen gerçek ölçekli bir görüntüdeki perspektif bozulmasını düzeltmek için homografi matrisini kullanmaktadır. Önerilen yöntemde düzeltilecek perspektif görüntüsünün sınırları öncelikle belirlenmektedir. Belirlenen bu perspektif görüntünün köşe noktalarına işaretlenme yapılmaktadır. Kamera parametreleri ve önceden tanımlanmış homografi matrisi yardımıyla perspektif görüntü 2 boyutlu alana taşınmaktadır. Homografi matrisi, birçok perspektif düzeltmesinin temelini oluşturmaktadır. Spitschan vd. [8] çalışmada, perspektif nedeniyle bozulmaya uğramış görüntüleri düzelter ve daha doğru sonuçlar veren yeni bir yöntem önerilmektedir. Akif ve Aykut [9] tarafından yapılan çalışmada İnsanız Hava Aracından alınan görüntü verileri ile mozaikleme yapılmıştır. Çalışmada Speeded up Robust Features (SURF), Scale-Invariant Feature Transform (SIFT), Binary Robust Invariant Scalable Keypoints (BRISK), Features From Accelerated Segment Test (FAST) ve Harris köşe bulma algoritmaları ile çalışılmıştır. Yapılan mozaikleme çalışmasında her bir uygulanan algoritmanın performans değerleri karşılaştırılmıştır. Müezzinoğlu vd. [10] tarafından yapılan çalışmada SIFT algoritması temelli bir görüntü mozaikleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen model Raspberry Pi üzerinde çalıştırılmaktadır. Mozaikleme uygulanması için zor bir örnek olan fotovoltaiik dizi görüntülerinde denenmiş ve başarıml sağlamıştır. Karaköse vd. [11] tarafından yapılan çalışmada kameradan elde edilen görüntüler ile MATLAB ortamında görüntü mozaikleme uygulaması yapılmıştır. Görüntülerden özellik çıkarımı için SIFT algoritması kullanılmıştır. Hatalı eşleşmelerin elenmesi ve özellik noktalarının eşleştirilmesi için homografi tahmini uygulanmıştır. Görüntü mozaikleme işleminin kalitesinin artırılması için genetik algoritmalarından yararlanılmıştır.

İnsanız Hava Araçları (İHA) tarafından video çekimi, afet durumları, tarım alanlarının tespiti yaygın olarak kullanılmaktadır. Yang vd. [12] tarafından yapılan çalışmada GPS bilgileri yardımıyla İHA'dan alınan görüntüler ile hızlı bir görüntü birleştirme algoritması kullanılması amaçlanmaktadır. Yazarlar önerdikleri yöntemin, piyasadaki ticari yazılımlardan (Pix4D) daha performanslı olduğunu kanıtlamıştır.

Literatürdeki araştırmalar ışığında SIFT algoritmasındaki en önemli dezavantajı çıkarılan anahtar noktalarının fazlalığıdır. Düşük mozaikleme kalitesine neden olmaktadır. Görüntüde algoritmanın bulunduğu gereksiz özellikleri kaldırmak ve görüntü

kalitesini artırmak için Redundant Keypoint Elimination (RKEM) adında yeni bir yöntem sunulmuştur. Hossein-Nejad ve Nasri [13] tarafından yapılan çalışmada RKEM yöntemini iyileştirmek için Kümelenmiş RKEM (CRKEM) adı verilen yeni bir yöntem önerilmiştir. Deneysel sonuçlarda klasik mozaikleme yöntemlerinden daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Nie vd. [14] tarafından yapılan çalışmada derin öğrenme tabanlı bir görüntü birleştirme yöntemi önerilmiştir. Önerilen amaç fonksiyonunda görüntü birleştirme dikdörtgenleme veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setinde insanlar, hayvanlar, araçlar ve çok sayıda yapı örneği bulunmaktadır. Yazarlar bu yaklaşım ile geleneksel yöntemlerden daha üstün performans elde etmiştir.

Chen vd. [15] tarafından yapılan çalışmada Yarı Yansıtımlı Çözüme ve Optimal Birleştirme algoritmasına dayalı bir İHA görüntü birleştirme yöntemi önerilmektedir. Deneysel sonuçlarda önerilen yöntemin görüntüler üzerinde yüksek doğrulukta birleştirdiği gözlemlenmektedir.

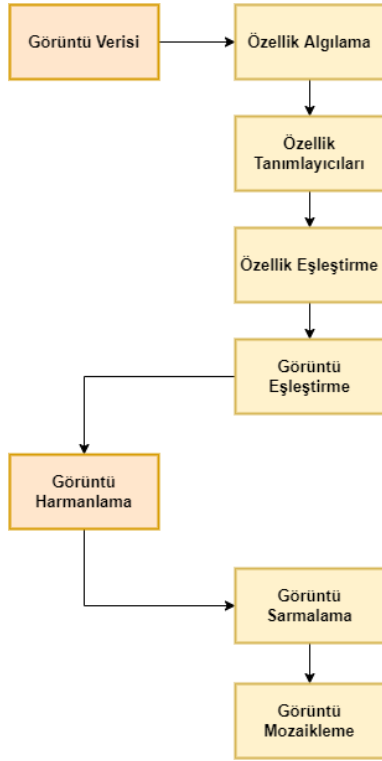
Çalışmamızda medikal alanlarda kullanılan veriler üzerinde görüntü mozaikleme yaparak genel bir görüntü oluşturmak amaçlanmaktadır. Sağlık alanındaki bu tür görüntülerin öznelikleri son derece zor anlaşılabilir. Göz kusurlarının tespiti ve teşhisinde medikal cihazlarda kullanılabilir. Hastalık teşhisi ve tespitinde daha kapsamlı bir veri seti oluşturulmasında yöntemimiz önerilmektedir. Ayrıca uydu görüntüleri, video kayıtlar, İHA'dan alınan görüntülerde de yöntemimiz kullanılabilir. Çalışma, birçok alanda yüksek performans elde etmeyi amaçlamaktadır.

Çalışmamızda Harris köşe algılama, SIFT, RANSAC, FLANN (Fast Library for Approximate Neighbors) ve Hough Dönüşümü yöntemleri bir arada kullanılarak görüntü mozaikleme yüksek hızda ve maksimum doğrulukta oluşturmayı hedeflemektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmamızda, D-EYE [16] cihazından göz görüntüleri kullanıcı tarafından çekilerek veri seti oluşturulmuştur. D-EYE cihazı ile oluşturulan veri setindeki ve FIRE [17] veri setindeki retina görüntüleri üzerinde görüntü mozaikleme uygulanmıştır. Çerçevelediği köşeleri bulmak için Harris köşe algılama algoritması kullanılmıştır. Köşe algılama algoritmasına karşılık gelen 2 görüntüdeki noktaların konumları bulunmuştur. Koordinatlar arasında öznelik tanıma algoritması olarak SIFT kullanılmıştır. Belirlenen öznelikler arasında öznelik ve görüntü eşleştirme işlemleri

yapılmıştır. RANSAC yardımıyla zayıf noktalar ortadan kaldırılmaktadır. Homografi, kalan noktaları eşleştirip, projektif dönüşüm için tanımlanmıştır. Son aşamada homografi matrisi ile geometrik bir dönüşüm yapılmıştır. Her iki veri seti ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemin mimarisi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmanın Yapısı

Görüntü birleştirme, bölümlere ayrılmış yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturmak için birden çok görüntüyü örtüşen görüş alanlarıyla birleştirme işlemine denir. Sahnenin farklı bölümlerini yatay olarak tarayan farklı görüntüler elde edilebilmektedir.

Görüntü mozaikleme yapılabilmesi için aynı sahnenin farklı görüntüleriyle örtüşen diğer öğelerle otomatik olarak birleştirmektir. Karşılık gelen noktaları belirleyerek ve ardından görüntüleri bir araya getirmek için homograf noktalarını hesaplayarak yapılmaktadır. Giriş görüntülerinin aslında aynı sahnenin örtüşen fotoğrafları olduğu varsayılmaktadır.

### 2.1. Özellik Tanımlayıcıları ve Özellik Algılama

Görüntü işleme algılama, görüntü verileri üzerinde hesaplama yapma ve belirli bir görüntü türünün özelliğinden bağımsız olarak her görüntü noktasında yerel kararlar alabilmek için çeşitli yöntemler içermektedir [18].

Özellik tespiti hesaplama açısından karmaşık, zor ve zaman kassı olduğunda, özellik tespiti için yüksek seviyeli algoritmalar kullanılabilir. Bu nedenle görüntünün sadece belirli bölümlerinde özellikler aranmaktadır [19].

Özellik algılamayı kullanan birçok bilgisayarlı görü algoritması literatürde bulunmaktadır. Bunlar, hesaplama karmaşıklığı, tespit edilen özellik türleri ve tekrarlanabilirlik açısından farklılık göstermektedir [20]. Özellikler tespit edilip algılandıktan sonra, özelliğin çevresinden yerel bir görüntü parçası çıkarımı yapılmaktadır. Bu çıkarım, büyük miktarda görüntüyü işleyebilecek kapasitededir. Literatürde özellik vektörü veya özellik tanımlayıcısı olarak geçmektedir. Özellik algılama algoritmaları özellik vektörü çıkarmayı amaçlamaktadır. Çalışmamızda BRIEF tanımlayıcısı kullanılmaktadır.

Görüntü işleme algoritmaları, dijital bir video veya görüntüdeki şekil, kenarlar veya hareket gibi nitelikleri algılamak için kullanılmaktadır [21]. Nitelik temelli yaklaşımlar ikiye ayrılmaktadır. Bunlar:

Düşük seviyeli yöntemler; köşe bulma, blob bulma ve kenar bulma gibi alt yöntemlerdir [21].

Bağımsız Yöntemler; Şekil Tabanlı, Gradyan Tabanlı ve Şekil Eşleştirme Tabanlı Yöntemler (SIFT vb.)

*Harris Köşe Bulma Algoritması:* Harris köşe bulma algoritması, bir görüntünün özelliklerini ve görüntü köşelerini çıkarmak için sıklıkla tercih edilen bir köşe algılama operatörüdür. 1988 yılında Mike Stephens ve Chris Harris tarafından Moravec'in köşe tanıma algoritmasının geliştirilmesi üzerine tanıtılmıştır. Algoritma basit bir şekilde bir köşe ve iki kenarın birleşimi olarak açıklanabilmektedir. Kenar olarak nitelendirilen kısım, görüntü parlaklığında ani bir değişiklikten meydana gelmektedir. Köşeler görüntüdeki en önemli özelliklerdir. Ayrıca değişmeyen öteleme, döndürme ve aydınlatma olarak adlandırılmaktadır. Köşeler bir görüntünün sadece küçük bir dilimi oluşturmaktadır [22]. Ancak görüntünün bilgisi hakkında önemli özellikler içerirler. Görüntü birleştirme, 2B mozaik oluşturma, hareket izleme gibi görüntü işlemlerinde kullanılabilir. Temel amaçları işlenen veri miktarını en aza indirmektir [23].

*Ölçek Değişmez Unsur Dönüşümü (SIFT):* SIFT, 2004 yılında British Columbia Üniversitesi D.Lowe tarafından tanıtılmıştır. Görüntü tabanlı tanıma ve eşleştirme uygulamayı amaçlayan bir tanımlayıcıdır [24]. SIFT algoritması 4 adımdan oluşmaktadır.

- Ölçek uzayı tepe seçimi
- Anahtar noktaları yerelleştirme
- Oryantasyon atama

- Anahtar nokta tanımlayıcı

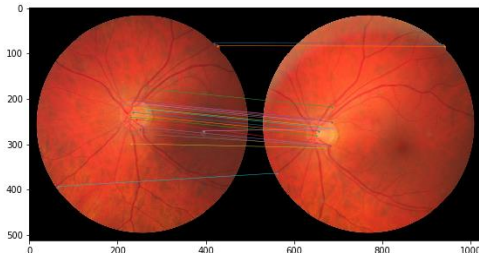
SIFT tanımlayıcısı, perspektif değişikliklerine, görüntü boyutuna, görüntü bulanıklığına, görüntüdeki gürültüye ve kontrast değişikliklerine karşı dayanıklı olması ile tanınmaktadır [21]. SIFT operatörü, görüntüde bulunan parazite veya gürültüye rağmen güçlü bir filtreleme işlemi yapmaktadır [25].

Çalışmamızda görüntüdeki özellikleri çıkarmak için Harris köşe bulma algoritması ile SIFT algoritması kullanılmıştır. Böylelikle daha hızlı ve dayanıklı bir yapı oluşturulmuştur.

## 2.2. Özellik Eşleştirme

Görüntü, kamera kalibrasyonu ve nesne tanıma gibi birçok bilgisayarlı görü uygulamasının parçası olan görüntü eşleştirme özellikleri, aynı sahne veya nesneye ait iki görüntü arasında bağlantı oluşturulmasını amaçlamaktadır. Genellikle ilgi noktaları eşleştirme yöntemlerinin performansı, ilgi noktalarının özelliklerine ve ilişkili görüntü tanımlayıcılarının seçimine bağlıdır. Bu nedenle uygulamalarda görüntü içeriğine uygun tanımlayıcılar ve dedektörler kullanılmıştır.

Çalışmamızda FLANN eşleştiricisi kullanılmıştır. Genellikle arama algoritmalarının performansını ve kalitesini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. FLANN, David Lowe ve Marius Muja tarafından oluşturulmuştur [26]. Şekil 2'de FIRE veri setinde bulunan sol ve sağdan çekilmiş olan bir görüntüyü özellik eşleştirilmesi ile çizgiler oluşturulmuştur.



Şekil 2. Özellik Eşleştirme

## 2.3. Görüntü Eşleştirme

Perspektif görüntülerinin düzeltilmesi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Hough dönüşümü, izdüşüm profil histogramı, homografi matrisi, uzak ufuk noktası ve derin öğrenme kullanılarak perspektif düzeltmelerinin yapıldığı literatür çalışmalarında görülmektedir [4].

**Hough Dönüşümü:** Bilgisayarda görü ve görüntü işlemede sıklıkla kullanılan bir algoritmadır. Görüntülerde bulunan daire ve çizgileri tanımlamayı

kolaylaştıran oylama mantığına sahip bir dizi algoritmadan oluşmaktadır. 1981 yılında Dana H. Ballard Hough dönüşümü için daha genel bir daire denklemi önermiştir [27]. Denklem (1)'de gösterilmektedir.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (1)$$

Merkez noktası M(a,b) ve yarıçapı r olan çember denklemi belirtilmiştir. Hough dönüşümünde dairenin kutupsal koordinatlarından yararlanılarak Denklem (2) kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} a &= x - r * \cos(t) \\ b &= y - r * \sin(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Kutupsal koordinat denklemi Denklem (2)'de verilmiştir. Çalışmamızda perspektif görüntülerinin düzeltilmesi için Hough dönüşümü kullanılmaktadır.

**Rastgele Örnek Konsensüs (RANSAC):** Rastgele örnek konsensüs, aykırı bulunan değerlerin tahmin değerleri tarafından etki sahibi olmadığı durumda, aykırı değerlerden oluşan veriden matematiksel bir modelin parametrelerini bulmak ve tahmin etmek için kullanılmaktadır [21]. Yinelemeli bir yöntemdir. Aykırı değerlerin tespitinde kullanılmaktadır. 1981 yılında Bolles ve Fischler tarafından SRI International' da yayınlanmıştır. Bolles ve Fischler Konum Belirleme Problemini (LDP) çözebilmek için RANSAC algoritmasını kullanmışlardır [28]. RANSAC temel olarak var olan en küçük kümeyi kullanmaktadır. Tutarlı veri noktalarından meydana gelen kümeyi genişletmeye devam etmektedir [29].

Temelinde RANSAC olan yöntemlerde öncelikle rastgele parametrelerden oluşan bir küme elde edilir. Elde edilen kümeden veriyi en çok yakınlık gösteren parametre seçilip bir veri kümesi ile modellenmektedir. Böylece aykırı veriden ve gürültüden etkilenmeyen bir model elde edilmektedir.

## 2.4. Görüntü Sarmalama

Görüntü mozaikleme için sarmalama yöntemleri iki kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar; yumuşak geçiş teknikleri ve optimal dikiş bulma teknikleridir [30].

Yumuşak geçiş teknikleri, geçiş yumuşatma veya alfa sarmalama gibi basit tekniklerden piramit harmanlama gibi farklı frekans bantlarında farklı alfa maskeleri uygulayan tekniklere kadar kullanılmaktadır. Ayrıca gradyan alan teknikleri gibi ancak gradyan alanında yumuşak geçiş olarak kabul edilen karmaşık tekniklere kadar kullanımı alanı geniştir [31].

## 2.5. Görüntü Birleştirme

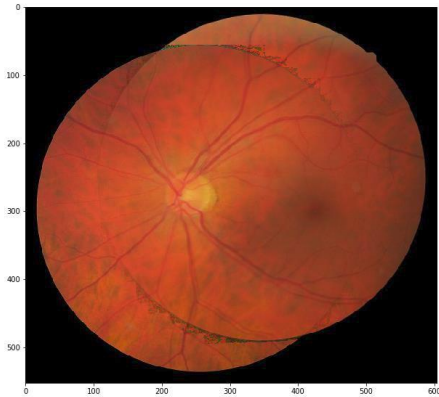
Görüntü birleştirme, birçok görüntünün önemli bilgileri toplayarak ve bunları tek bir görüntüden daha az sayıda görüntüye dahil etmek olarak tanımlanmaktadır. Tek olarak verilen görüntü, bir tek kaynak görüntüden daha doğrudur ve bilgilendiricidir. Gerekli tüm bilgilere sahiptir [32]. Görüntü birleştirmenin temel amacı sadece veri miktarını azaltmak değildir. Ayrıca makine ve insan algısı için anlaşılır ve uygun görüntüler oluşturmaktır. Bilgisayarlı görüde ve görüntü işlemede görüntü birleştirme, iki veya daha fazla görüntüden benzer bilgilerin çıkarımını yaparak tek bir görüntüde birleştirme işlemine denir [33]. Genellikle literatürde kullanılan görüntü birleştirme yöntemleri şunlardır:

- IHS dönüşümü tabanlı görüntü füzyonu
- Çift yönlü uzamsal frekans eşleştirme
- PCA tabanlı görüntü füzyonu
- Yüksek geçiş filtreleme tekniği
- Dalgacık dönüşümü görüntü füzyonu

## 3. Bulgular ve Tartışma

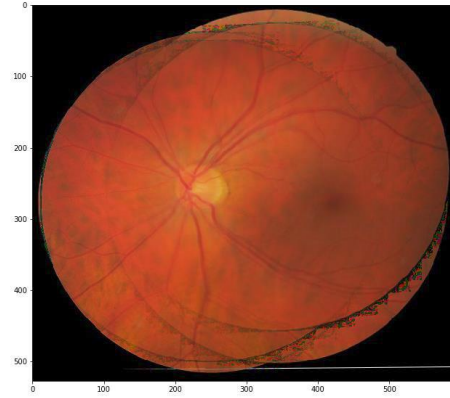
Çalışmamızda görüntü işleme tekniklerinden yararlanılarak retina görüntüleri üzerinde görüntü mozaikleme uygulanmıştır. Çalışmada BRIEF tanımlayıcısı, Harris köşe algoritması ve SIFT kullanarak görüntü algılama ve özellik tanıması yapılmıştır. Özellik eşleştirme için FLANN algoritması kullanılmıştır. Hough dönüşümü ile perspektif düzenlemesi yapılarak görüntüler mozaikleme aşamasından önce hazır hale getirilmiştir. RANSAC yardımıyla zayıf bulunan özellik noktaları ortadan kaldırılmıştır. Daha sonra görüntüler hizalanarak birleştirilmektedir.

Mozaikleme modelimiz öncelikle FIRE veri setinde test edilmiştir. Şekil 3'te görüntü birleştirme sonucunda ortaya çıkan 2 görüntünün mozaïği görülmektedir.



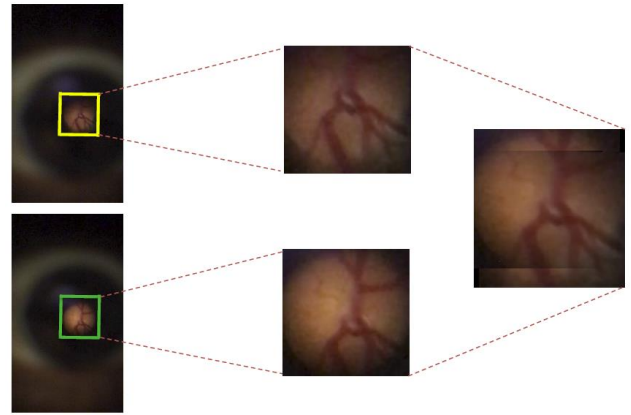
Şekil 3. FIRE Veri setindeki 2 Retina Görüntüsünün Mozaïği

Şekil 4'te ise 4 görüntünün meydana getirdiği görüntü mozaïği görülmektedir.



Şekil 4. FIRE Veri setindeki 4 Retina Görüntüsünün Mozaïği

Çalışmamızda ayrıca D - EYE aparatı ile toplanan gerçek zamanlı retina görüntülerine üzerinde de görüntü mozaikleme uygulanmıştır. Şekil 5'te iki adet retina fotoğrafının mozaikleme gösterilmektedir.



Şekil 5. D-EYE Aparatından Alınan 2 Retina Görüntüsünün Mozaïği

## 4. Sonuçlar

Çalışmamız bilgisayarda görü ve görüntü işleme konu alanlarında sıklıkla kullanılan algoritmalar yardımıyla küçük görüntü boyutlarını birleştirerek parçadan bütüne olacak şekilde bir görüntü mozaikleme uygulaması yapılmıştır. Yapılan uygulama açık kaynaklı bir veri seti olan FIRE veri setinde test edilmiş ve kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir. D-EYE aparatı yardımıyla çekilen gerçek zamanlı göz görüntüleri ile de çalıştırılmış ve önerilen modelimizin her iki veri setinde yüksek performans ile görüntü mozaïği oluşturduğu gözlemlenmiştir.

D-EYE aparatından toplanan veriler ile FIRE retina veri setini kullanarak önerilen mozaikleme çözümümüz uygulanmıştır. Çalışmada retina görüntülerini iyi derecede hizalayıp yapay zekâ modeli eğitime girmeden önceki ön hazırlık aşamasında maksimum performans sağlanması amaçlanmaktadır. Düşük alana sahip ve büyük görüntünün bir parçası olan tüm verilere uygulanabilmektedir. Doğru ve kesin sonuç verecek hızlı bir model oluşturulmuştur.

Önerilen çözümümüz birçok iş sahasında aktif olarak kullanılabilir. İnsansız Hava Aracı veya uydu fotoğraflarının birleştirilmesinde, tarım arazisi veya ormanlık alan görüntülerinin mozaiklenmesinde, çiftliklerde çiftlik hayvanlarının geniş açı ile tespit edilip izlenmesinde, kamera ile plaka tanıma uygulamalarında, sağlık alanında yüksek kalitedeki görüntülerin mozaiklenmesinde kullanılabilir. Ayrıca dar açılı birden fazla kameranın senkron bir şekilde çalışması sonucunda geniş açılı kamera performansı elde edilebilmektedir. Yapay zekâ çalışmalarında veri seti üzerinde çalıştırılabilir ve başarımın yükselmesine sebep olacağı düşünülmektedir.

#### Kaynaklar

- [1] Pavić D, Schönefeld V, Kobbelt L. Interactive Image Completion with Perspective Correction. *The Visual Computer*, 22 (9-11), 671-681, 2006.
- [2] Gerum R. C, Richter S, Winterl A, Mark C, Fabry B, Le Bohec, C, Zitterbart DP. CameraTransform: A Python Package for Perspective Corrections and Image Mapping. *SoftwareX*, 10, 100333, 2019.
- [3] Li X, Zhang B, Sander PV, Liao J. Blind Geometric Distortion Correction on Images Through Deep Learning. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Kaliforniya, 16-20 June 2019.
- [4] Güvenoğlu E. Perspektiften Kaynaklanan Bozulmaların Geometrik Olarak Düzeltilmesi İçin Bir Yöntem. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 263-276, 2018.
- [5] Clark P, Mirmehdi M. Estimating the Orientation and Recovery of Text Planes in a Single Image. In *BMVC*, Manchester, 10-13 September, 2001.
- [6] Li X, Liu W, Fan W, Sun J, Satoshi N. (2016, November). Perspective correction using camera intrinsic parameters. In *2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, Chengdu, 6-10 November, 2016.
- [7] Mohan, S, Avinash N, Murali S. Rectification of Perspective distortion using camera parameters -A Perspective Geometry Based Approach. *ICGST International Journal on Graphics, Vision and Image Processing*, 8(1), 1-7, 2013.
- [8] Spitschan B, Ostermann J. Estimation of radial distortion using local spectra of planar textures. In *2017 Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, Nagoya, 8-12 May, 2017.
- [9] Tahtırvancı A. İnsansız hava araçları ile iç ve dış ortam görüntülerinin mozaiklenmesi, Yüksek Lisans, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2019.
- [10] Müezzinoğlu T, Çolak F, Karaköse M. Görüntü Mozaikleme Algoritması İçin Deneysel Bir Çalışma. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 17-25, 2014.
- [11] Karaköse M, Yetiş H, Müezzinoğlu T. Optimizasyon Tabanlı Adaptif Görüntü Mozaikleme Algoritması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(4), 389-400, 2017.
- [12] Yang H, Fu Y, Chen D, Peng Y. (2022, January). A Fast and Effective Panorama Stitching Algorithm on UAV Aerial Images. In *2022 14th International Conference on Computer Research and Development (ICCRD)*, Shenzhen, 7-9 January, 2022.
- [13] Hossein-Nejad Z, Nasri M. Clustered redundant keypoint elimination method for image mosaicing using a new Gaussian-weighted blending algorithm. *The Visual Computer*, 38(6), 1991-2007, 2022.
- [14] Nie L, Lin C, Liao K, Liu S, Zhao Y. (2022, June). Deep Rectangling for Image Stitching: A Learning Baseline. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, New Orleans, 18-24 June, 2022.
- [15] Chen J, Li Z, Peng C, Wang Y, Gong W. UAV Image Stitching Based on Optimal Seam and Half-Projective Warp. *Remote Sensing*, 14(5), 1068, 2022.
- [16] D-EYE Care, <https://www.d-eyecare.com>, (Erişim Tarihi: 18.11.2022).
- [17] Hernandez-Matas C, Zabulis X, Triantafyllou A, Anyfanti P, Douma S, Argyros A.A. *Journal for Modeling in Ophthalmology*, 1(4), 16-28, 2017.
- [18] Salvi M, Acharya UR, Molinari F, Meiburger KM. The impact of pre-and post-image processing techniques on deep learning frameworks: A comprehensive review for digital pathology image analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 128, 104129, 2021.
- [19] Chen H, Wang Y, Guo T, Xu C, Deng Y, Liu Z, Ma S, Xu C, Gao W. Pre-trained image processing transformer. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Nashville, 20-25 June, 2021.
- [20] Høye TT, Årje J, Bjerger K, Hansen OL, Iosifidis A, Leese F, Mann HMR, Meissner K, Melvad C, Raitoharju, J. Deep learning and computer vision will transform entomology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), 2021.

- [21] Çelik G. Yüksek Çözünürlüklü Görüntülerde Mozaikleme, Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2015.
- [22] Derpanis KG. The harris corner detector. York University, 2004.
- [23] Sikka P, Asati AR, Shekhar C. Real time FPGA implementation of a high speed and area optimized Harris corner detection algorithm. *Microprocessors and Microsystems*, 80, 103514, 2021.
- [24] Tareen SAK, Saleem Z. A comparative analysis of sift, surf, kaze, akaze, orb, and brisk. In 2018 International conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET), Sukkur, 3-4 March, 2018.
- [25] Bellavia F. SIFT matching by context exposed. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022.
- [26] Muja M, Lowe D. Flann-fast library for approximate nearest neighbors user manual. Computer Science Department, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 5, 2009.
- [27] Ballard DH. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern recognition*, 13(2), 111-122, 1981.
- [28] Cantzler H. Random sample consensus (ransac). Institute for Perception, Action and Behaviour, Division of Informatics, University of Edinburgh, 1981.
- [29] Derpanis KG. Overview of the RANSAC Algorithm. *Image Rochester NY*, 4(1), 2-3, 2010.
- [30] El-Saban M, Izz M, Kaheel A, Refaat M. Improved Optimal Seam Selection Blending for Fast Video Stitching of Videos Captured from Freely Moving Devices, *Image Processing (ICIP), 2011 18th IEEE International Conference, Brussels, 11-14 September. 2011.*
- [31] Michahial US, Latha M, Akshatha S, Juslin F, Manasa B, Shivani U. Automatic Image Mosaicing Using Sift, Ransac and Homography, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJETT)*, 3(10), 247-251, 2014.
- [32] Capel D. Image mosaicing. In *Image Mosaicing and super-resolution*, Springer, London, 47-79, 2004.
- [33] Ghosh D, Kaabouch N. A survey on image mosaicing techniques. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 34, 1-11, 2016.



Araştırma Makalesi/Research Article

## Monocular depth estimation and detection of near objects

Ali Tezcan Sarızeybek <sup>\*1</sup>, Ali Hakan Işık <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 15030, Burdur, Türkiye

<sup>2</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Computer Engineering, 15030, Burdur, Türkiye

### Keywords

Monocular Depth Estimation  
Object Detection  
Obstacle Avoidance  
Image Processing

### Article history:

Received: 20.09.2022

Accepted: 06.12.2022

**Abstract:** The image obtained from the cameras is 2D, so we cannot know how far the object is on the image. In order to detect objects only at a certain distance in a camera system, we need to convert the 2D image into 3D. Depth estimation is used to estimate distances to objects. It is the perception of the 2D image as 3D. Although different methods are used to implement this, the method to be applied in this experiment is to detect depth perception with a single camera. After obtaining the depth map, the obtained image will be filtered by objects in the near distance, the distant image will be closed, a new image will be run with the object detection model and object detection will be performed. The desired result in this experiment is, for projects with a low budget, instead of using dual camera or LIDAR methods, it is to ensure that a robot can detect obstacles that will come in front of it with only one camera. As a result, 8 FPS was obtained by running two models on the embedded device, and the loss value was obtained as 0.342 in the inference test performed on the new image, where only close objects were taken after the depth estimation.

### Atıf için/To Cite:

Sarızeybek A.T. Işık A.H. Monocular Depth Estimation and Detection of Near Objects. Ulusalrarası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(3), 124-131, 2022.

## Monoküler derinlik tahmini ve yakın nesnelere tespiti

### Anahtar Kelimeler

Monoküler Derinlik Tahmini  
Nesne Tespiti  
Engelden Kaçınma  
Görüntü İşleme

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 20.09.2022

Kabul Tarihi: 06.12.2022

**Öz:** Kameralardan elde edilen görüntü 2 boyutlu olduğu için cismin görüntü üzerinde ne kadar uzakta olduğunu bilemeyiz. Bir kamera sisteminde sadece belirli bir mesafedeki nesnelere algılamak için 2 boyutlu görüntüyü 3 boyutluya dönüştürmemiz gerekir. Derinlik tahmini, nesnelere olan mesafeleri tahmin etmek için kullanılır. 2 boyutlu görüntünün 3 boyutlu olarak algılanmasıdır. Bunu uygulamak için farklı yöntemler kullanılsa da, bu deneyde uygulanacak yöntem, tek bir kamera ile derinlik algısını tespit etmektir. Derinlik haritası elde edildikten sonra elde edilen görüntü yakın mesafedeki nesnelere tarafından filtrelenecek, uzaktaki görüntü kapatılacak, nesne algılama modeli ile yeni bir görüntü çalıştırılacak ve nesne algılama gerçekleştirilecektir. Bu deneyde istenilen sonuç, düşük bütçeli projeler için çift kamera veya LIDAR yöntemlerini kullanmak yerine, bir robotun önüne gelecek engelleri tek kamera ile tespit edilmesini sağlamaktır. Sonuç olarak, gömülü cihaz üzerinde iki model çalıştırılarak 8 FPS elde edilmiş ve derinlik tahmini sonrası sadece yakın nesnelere alındığı yeni görüntü üzerinde yapılan çıkarım testinde kayıp değeri 0.342 olarak elde edilmiştir.

## 1. Introduction

Depth perception is a big problem for most technologies in the world. Depth perception is used from robotic applications to mobile devices, generally two cameras that can measure depth by combining the images taken from the right and left camera are used for depth detection [1]. Depth estimation, for example, in smart

cleaning robots produced in the robotic field, is programmed to determine where the robot is and where the robot cannot enter, and to decide where the robot should clean according to the distance of the objects [2]. In mobile devices, depth perception is used to detect the close object and add a blur effect on other objects so that the Bokeh Effect, called portrait mode, can be applied on the image [3, 4, 5]. In this section,

\* İlgili yazar/Corresponding author: atsarızeybek@mehmetakif.edu.tr

depth perception, various usage methods and the developed application will be discussed.

Dual cameras are a problem in terms of portability in mobile devices and cost and size in robotic applications. In SLAM applications where a single camera is used, cameras that can detect infrared rays and measure distances according to the return time of the rays are also used [6, 7], but this method is also very costly and looks bad in terms of aesthetics. The LIDAR method can instantly obtain the distances of the surrounding objects. 360 degree rotating LIDAR technology is able to obtain depth values of the entire environment [8]. LIDAR, which is generally used in robots, can calculate the depth of surfaces that are equivalent to their height. The linear SLAM used in mobile phones calculates the depth in the direction of the camera [9]. Since LIDAR technology is high in terms of cost, it cannot be used in works that are planned to be low-cost.

A system that can perform monocular depth estimation is recommended so that depth perception can be used in projects with low cost or designed to have a single camera in the design, where only one camera is needed. In the proposed system, depth perception will be realized with a single camera and it will be fast in terms of speed performance. In the robotic application developed to test the system, the robot will stop when it sees a living object in front of it, and give a warning

when it sees a non-living object. The reason for the development of this application is that in the feed pushing robot used in animal husbandry, a camera is placed on the robot in order to stop or pass by an object in case of forward movement, but since the camera is kept facing the opposite direction, it will detect objects at a distance, so it will only detect the most distant objects with depth estimation. Detection of nearby objects is desired. In the robotic application developed using depth perception, the depth will be estimated using the monocular depth estimation model, and after a certain depth on the image, it will be removed from the image.

### 1.1. Stereo Depth Estimation

With the dual camera, depth perception is applied based on the optimal fit pixels of the epipolar lines in the right and left images [10]. Depth estimation is performed by comparing the common pixels of the right camera and the left camera [11]. For point matching, features are extracted on the image and a feature map of their behavior at different inequality levels is drawn. Using the inequality calculation formula, the volume is calculated from the feature map, and if the performance is unsatisfactory, the inequality is refined [12, 13]. Figure 1 shows the basic logic of stereo depth estimation.

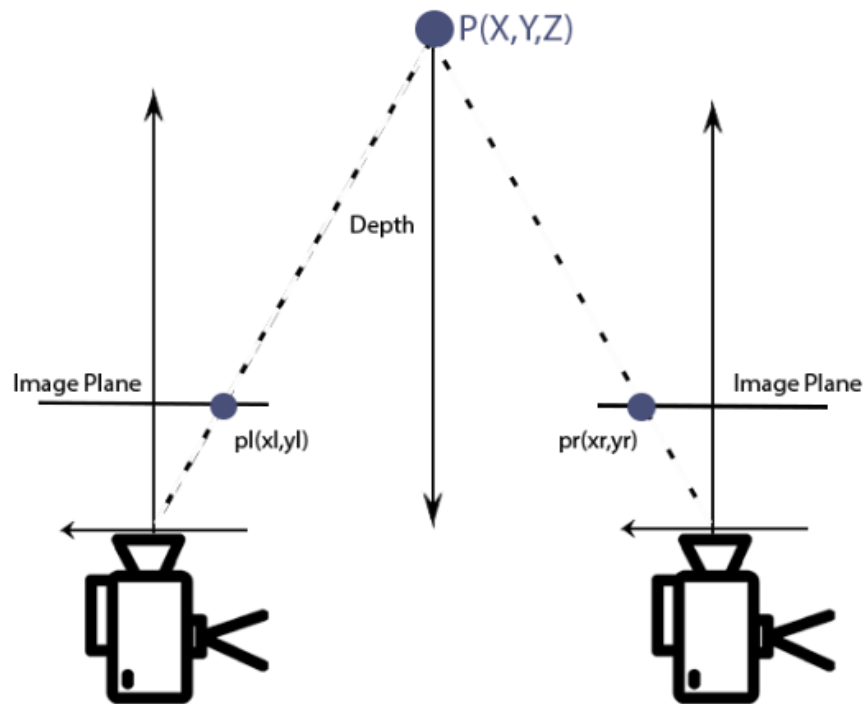


Fig. 1. Logic of stereo depth estimation, depth perception is made by calculating the intersection of the image plane of the two cameras. [14]

## 1.2. Monocular Depth Estimation

Monocular depth estimation is a single-shot depth estimation method [15]. After the model is trained with a data set prepared on various images, depth map of images and masking data, the depth estimation model is obtained. KITTI and NYUV2 datasets are the most used depth estimation datasets [16]. It is used for autonomous driving [17], 3D modeling [18] and augmented reality [19]. In depth estimation models, performance comparison is measured by loss values [20]. Loss values are calculated on different data sets and models are compared accordingly. Usually, loss values are calculated by combining two data sets [21]. Depth estimation can be used to measure the surface of an object, calculate the distance between two objects, and map the desired location. MiDas, Binsformer, GCNDepth, LeReS, RPSF, DepthFormer monocular depth estimation methods are used for depth sensing.

## 2. Related Works

Miangoleh et al. (2021), it was aimed to eliminate the inadequacy of the monocular depth estimation model in the proposed method. The shortcomings of the model are depth maps at sub megapixel resolution, and lack of fine detail in inferences. In the proposed method, the binary estimation method is presented, and as a result, a method that can obtain high quality depth maps has been developed. [22]

Li et al. (2021), a new metric was proposed for monocular depth estimation. As a result of the tests conducted with the NYU Depth v2 data set, it was determined that the depth estimation process over video, together with the suggested metrics, was more performant in terms of intensity. [23]

Jung et al. (2021), it was aimed to make depth estimation easier on images with moving objects. A learning based method called DnD has been developed to estimate density depth maps, and monocular depth estimation is performed after the image is processed with depth, RGB encoder and decoder by combining SfM and MVS algorithms. [24]

Kopf et al. (2021), aims to obtain consistent density depth maps over images. An optimization algorithm has been proposed for this purpose, the DeepV2D method has been compared by using methods such as depth filter, flexible pose and depth fine tuning, and it has been concluded that it is more efficient in terms of performance. [25]

In the study by Chang and Werzstein (2019), a deep optics paradigm was proposed for 3D object detection

and depth estimation. Optimization schemes and coding strategies were created using NYUv2, KITTI and Rectangles datasets. As a result, it was stated that chromatic aberrations affect the depth estimation results well. Object detection model is trained in KITTI dataset, improved 3D object detection is provided for depth estimation. [26]

As understood from the literature summary, new monocular depth estimation models were created by combining Monocular Depth Estimation and monocular depth estimation data sets and adding various filters on the image data, or performance tests of the models created by adding new performance metrics were performed and comparisons were made between the methods. In the study, the performance of running the MiDas monocular depth estimation model simultaneously with the object detection model in an embedded system was measured.

## 3. Method and Material

### 3.1. MiDas Monocular Depth Estimation

MiDas, one of the monocular depth estimation models was used in the study. Monocular depth estimation is used to make depth estimation with a single camera. MiDas datasets contain original image, depth values and masked images [27]. The architecture of the MiDas model is based on the ResNet architecture. For model training, 10 data sets, including HRWSI, TartanAir, IRS, ReDWeb, DIML, Movies, MegaDepth, WSVD, ApolloScape and BlendedMVS, were used. For higher performance values, images of 23 3D movies are included in the dataset. The model trained on datasets was developed with multi-objective optimization. MiDas v2.1 Small model, which has the highest performance among small MiDas models, was used. [28]

The performance values of the models are given in Table 1.

As seen in the table, the best model in terms of performance with the lower the better approach is the MiDas v2 small model. Although the performance is higher in v2, v2.1 is much better in terms of FPS. Therefore, MiDas v2.1 small model was preferred as the model.

Table 1. Performances of MiDaS models (The lower is better) [28]

Model	DIW,WHDR	Eth3d, AbsRel	Sintel, AbsRel	TUM	Kitti	NyuDepth	FPS
MiDaS v2 Small	<b>0.1248</b>	0.1550	<b>0.33</b>	17	<b>21.81</b>	15.73	0.6
<b>MiDaS v2.1 Small</b>	0.1344	<b>0.1344</b>	0.337	<b>14.53</b>	29.27	<b>13.43</b>	<b>30</b>

### 3.2. Object Detection

Object detection is an image processing technology based on Convolutional neural networks [29]. Labeling the images and then training the features for that class within the tags in the image is essential for model training. For example, there are studies such as following the ball or players in sports competitions [30] and lane tracking in unmanned vehicles [31]. In this study, SSD ResNet50 model, which is one of the mobile object detection models, was used. The COCO mAP value of the model was 35 and the speed was 76ms, so it was used. TFLite which can easily work on mobile and embedded devices was used as a toolkit [32].

### 3.3. Feed Pushing Robot

The feed pushing robot is produced to push the feed towards the cows at the desired time and route. In the project, there is a camera on the feed pushing robot. The reason for the existence of this camera is the safety precautions that must be taken in case of living or inanimate objects in the direction of the robot while pushing the feeds with the helix.

### 3.4. Nvidia Jetson Nano

Nvidia Jetson Nano has been added to the robot for the image processing stages, and the image processing steps are completely handled by Jetson Nano. Although it is difficult for two models to run, performance around

8 FPS is achieved. This is a sufficient value for safety controls according to the slow speed of the robot.

## 4. Discussion and Results

In this study, The application aims at object detection with monocular depth estimation. The camera on the robot is looking in the direction the robot will go, so since the camera can detect the object even 50 meters away, it is aimed to detect only objects at a certain distance with the depth estimation and the robot to stand accordingly. In this way, if an object comes across while moving, the robot will be able to stop automatically. In Table 2, the frame per-second values obtained as a result of the tests performed on Nvidia Jetson Nano, as a result of running the Object Detection and Depth Estimation models separately and together are given.

Table 2. FPS results of two models,

Model	FPS
Object Detection	25
Depth Estimation	28
Object Detection + Depth Estimation	8

After the depth estimation and object detection models were combined, they were tested on the validation data set in the object detection model, and 0.342 loss was obtained in the categorical cross entropy function.

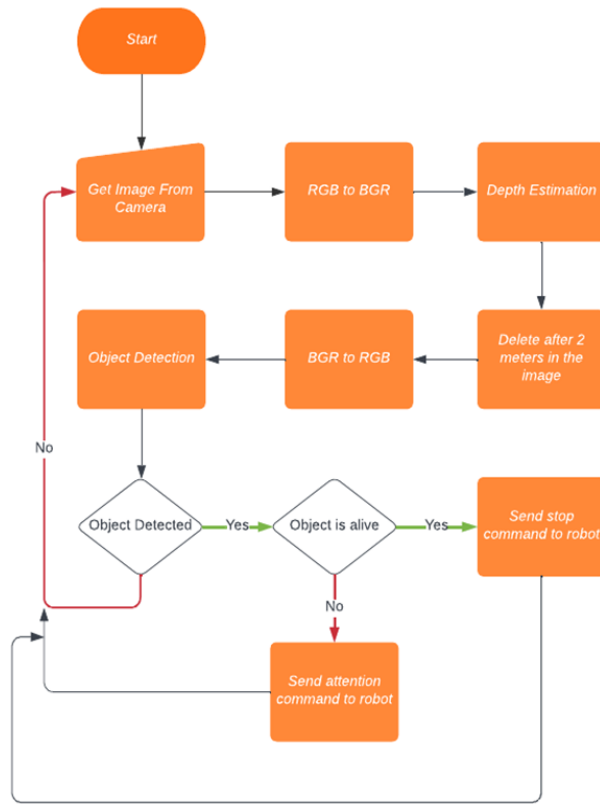


Figure 2. Explaining the logic of the application as a diagram

As seen in the diagram, an instant image is taken from the camera, the RGB image is converted to BGR because the depth estimation model requests a BGR image. After the depth mapping, the area corresponding to approximately 2 meters on the image is subtracted from the image. The resulting new image is then

converted back from BGR to RGB and given to the object detection model. If an object is recognized as output, it is checked whether the object is alive. If the object is not detected or the processes are finished, it returns to the image acquisition process from the camera.



Figure 3. Images with depth estimation, in which only close objects are obtained, with object detection on it. On the left are the original images, on the right are the images with depth perception and object detection applied in the application.

As can be seen in Figure 3, there are original versions of the images on the left. After the image is given to the depth perception model, only the image obtained after the acquisition of close objects is given to the object detection model. The Object detection model also detects objects on the new image.

## 5. Conclusion and Future Work

The aim of this study is to detect nearby objects and to use this study in the feed pushing robot used in the robotic field. After the depth detection is done, after deleting the image after a certain interval on the image,

the image is given as input to the object detection model, and the objects recognized on the image and their coordinates as pixels are obtained as output. Although the subject of using two different models has been mentioned a lot in the literature, this subject has not been mentioned in the field of animal husbandry robotics. Although the use of this work in the feed pushing robot is very important for safety, operations such as lane tracking, cow detection and adjusting the feed pushing according to the position of the cow can be performed in future studies.

## References

- [1] Kusupati, U., Cheng, S., Chen, R., & Su, H. (2020). Normal assisted stereo depth estimation. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 2189-2199).
- [2] Hess, J., Beinhofer, M., & Burgard, W. (2014, May). A probabilistic approach to high-confidence cleaning guarantees for low-cost cleaning robots. In 2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 5600-5605). IEEE.
- [3] Wang, Y., Lai, Z., Huang, G., Wang, B. H., Van Der Maaten, L., Campbell, M., & Weinberger, K. Q. (2019, May). Anytime stereo image depth estimation on mobile devices. In 2019 international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 5893-5900). IEEE.
- [4] Dutta, S., Das, S. D., Shah, N. A., & Tiwari, A. K. (2021). Stacked Deep Multi-Scale Hierarchical Network for Fast Bokeh Effect Rendering from a Single Image. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 2398-2407).
- [5] Ignatov, A., Malivenko, G., Plowman, D., Shukla, S., & Timofte, R. (2021). Fast and accurate single-image depth estimation on mobile devices, mobile ai 2021 challenge: Report. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 2545-2557).
- [6] Collis, R. T. H. (1969). Lidar. In *Advances in Geophysics* (Vol. 13, pp. 113-139). Elsevier.
- [7] Hecht, J. (2018). Lidar for self-driving cars. *Optics and Photonics News*, 29(1), 26-33.
- [8] Wróżyński, R., Pyszny, K., & Sojka, M. (2020). Quantitative landscape assessment using LiDAR and rendered 360 panoramic images. *Remote Sensing*, 12(3), 386.
- [9] Ullrich, A., & Pfennigbauer, M. (2016, May). Linear LIDAR versus Geiger-mode LIDAR: impact on data properties and data quality. In *Laser Radar Technology and Applications XXI* (Vol. 9832, pp. 29-45). SPIE.
- [10] Long, X., Liu, L., Li, W., Theobalt, C., & Wang, W. (2021). Multi-view depth estimation using epipolar spatio-temporal networks. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 8258-8267).
- [11] Kusupati, U., Cheng, S., Chen, R., & Su, H. (2020). Normal assisted stereo depth estimation. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 2189-2199).
- [12] Ding, X., Xu, L., Wang, H., Wang, X., & Lv, G. (2011). Stereo depth estimation under different camera calibration and alignment errors. *Applied Optics*, 50(10), 1289-1301.
- [13] Wang, Y., Lai, Z., Huang, G., Wang, B. H., Van Der Maaten, L., Campbell, M., & Weinberger, K. Q. (2019, May). Anytime stereo image depth estimation on mobile devices. In 2019 international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 5893-5900). IEEE.
- [14] Fahmy, A. A., Ismail, O., & Al-Janabi, A. K. (2013). Stereo vision based depth estimation algorithm in uncalibrated rectification. *Int J Video Image Process Netw Secur*, 13(2), 1-8.
- [15] Zhao, C., Sun, Q., Zhang, C., Tang, Y., & Qian, F. (2020). Monocular depth estimation based on deep learning: An overview. *Science China Technological Sciences*, 63(9), 1612-1627.
- [16] Yuan, W., Gu, X., Dai, Z., Zhu, S., & Tan, P. (2022). NeW CRFs: Neural Window Fully-connected CRFs for Monocular Depth Estimation. *arXiv preprint arXiv:2203.01502*.
- [17] Xue, F., Zhuo, G., Huang, Z., Fu, W., Wu, Z., & Ang, M. H. (2020). Toward hierarchical self-supervised monocular absolute depth estimation for autonomous driving applications. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 2330-2337). IEEE.
- [18] Huynh, L., Nguyen-Ha, P., Matas, J., Rahtu, E., & Heikkilä, J. (2020, August). Guiding monocular depth estimation using depth-attention volume. In *European Conference on Computer Vision* (pp. 581-597). Springer, Cham.
- [19] Ramamonjisoa, M., & Lepetit, V. (2019). Sharpnet: Fast and accurate recovery of occluding contours in monocular depth estimation. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (pp. 0-0).
- [20] Lee, J. H., & Kim, C. S. (2020, August). Multi-loss rebalancing algorithm for monocular depth estimation. In *European Conference on Computer Vision* (pp. 785-801). Springer, Cham.
- [21] Ranftl, R., Lasinger, K., Hafner, D., Schindler, K., & Koltun, V. (2020). Towards robust monocular depth estimation: Mixing datasets for zero-shot cross-dataset transfer. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*.
- [22] Miangoleh, S. M. H., Dille, S., Mai, L., Paris, S., & Aksoy, Y. (2021). Boosting monocular depth

- estimation models to high-resolution via content-adaptive multi-resolution merging. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 9685-9694).
- [23] Li, S., Luo, Y., Zhu, Y., Zhao, X., Li, Y., & Shan, Y. (2021). Enforcing Temporal Consistency in Video Depth Estimation. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 1145-1154).
- [24] Jung, D., Choi, J., Lee, Y., Kim, D., Kim, C., Manocha, D., & Lee, D. (2021). DnD: Dense Depth Estimation in Crowded Dynamic Indoor Scenes. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 12797-12807).
- [25] Kopf, J., Rong, X., & Huang, J. B. (2021). Robust consistent video depth estimation. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 1611-1621).
- [26] Chang, J., & Wetzstein, G. (2019). Deep optics for monocular depth estimation and 3d object detection. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 10193-10202).
- [27] Gkikas, A., Proestakis, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Di Tomaso, E., Marinou, E., ... & García-Pando, C. P. (2022). Quantification of the dust optical depth across spatiotemporal scales with the MIDAS global dataset (2003–2017). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(5), 3553-3578.
- [28] Ranftl, R., Lasinger, K., Hafner, D., Schindler, K., & Koltun, V. (2020). Towards robust monocular depth estimation: Mixing datasets for zero-shot cross-dataset transfer. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*.
- [29] Zhiqiang, W., & Jun, L. (2017, July). A review of object detection based on convolutional neural network. In 2017 36th Chinese control conference (CCC) (pp. 11104-11109). IEEE.
- [30] Zhou, X., Gong, W., Fu, W., & Du, F. (2017, May). Application of deep learning in object detection. In 2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS) (pp. 631-634). IEEE.
- [31] Kemsaram, N., Das, A., & Dubbelman, G. (2019, July). An integrated framework for autonomous driving: object detection, lane detection, and free space detection. In 2019 Third World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability (WorldS4) (pp. 260-265). IEEE.
- [32] Black, A. W., & Lenzo, K. A. (2001). Flite: a small fast run-time synthesis engine. In 4th ISCA Tutorial and Research Workshop (ITRW) on Speech Synthesis.

*Bu çalışma 20-22 Mayıs 2022 tarihinde, Bakü, Azerbaycan'da ICAIAME 2022 (International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering) konferansında sunulmuştur.*



Research Article/Araştırma Makalesi

## Investigation of the usability of apple tree pruning chips as an alternative raw material to produce cement-bonded particleboard

Hasan Hüseyin Taş<sup>1</sup>, Kaan Acar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 32260 Isparta Turkey.

<sup>2</sup> Süleyman Demirel University, Faculty of Technical Education, Department of Building Education, 32260 Isparta Turkey.

### Keywords

Apple pruning  
Cement-bonded particleboard  
Physical and mechanical  
properties

### Article history:

Received: 04.11.2022

Accepted: 21.12.2022

**Abstract:** The utilization of apple tree pruning as an alternative raw material to produce cement-bonded particleboard was investigated. Experimental cement-bonded particleboards measuring 500×500×12 mm with a nominal density of 1400 kg/m<sup>3</sup> were prepared in laboratory conditions using different ratios (100/0,75/25,50/50,25/75,0/100) of apple tree pruning chips mixed Red Pine wood chips. The following basic properties required by the TS EN 312 standards were evaluated; water absorption, thickness swelling, bending properties, and screw withdrawal strength. Results of the study indicate that the addition of apple pruning in the mix of cement-bonded particleboard significantly influences the properties tested. Mechanical properties of the tested boards decreased while absorption and thickness swelling values of the cement-bonded particleboard were increased as the portion of apple pruning in the mixture was increased. Experimental boards which include apple tree pruning up to 25 % still meet properties required by the standards for general purpose-use cement-bonded particleboards. Apple tree pruning chips may be an alternative raw material for the manufacturing of cement-bonded particleboard.

### Atıf için/To Cite:

Investigation of the usability of apple tree pruning chips as an alternative raw material to produce cement-bonded particleboard. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(3), 132-137, 2022.

## Elma ağacı budama yongalarının çimentolu yonga levha üretimi için alternatif ham malzeme olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi

### Anahtar Kelimeler

Elma budaması  
Çimentolu yonga levhalar  
Fiziksel ve mekaniksel  
özellikler

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 04.11.2022

Kabul Tarihi: 21.12.2022

**Öz:** Elma ağacı budamasının, çimentolu yonga levha üretiminde alternatif ham malzeme olarak kullanımı araştırılmıştır. Nominal yoğunluğu 1400 kg/m<sup>3</sup> ve ölçüleri 500×500×12 mm olan deneysel çimentolu yonga levhalar, Kızılçam ahşabı ile elma ağacı budama yongalarının farklı karışım oranlarını (100/0,75/25,50/50,25/75,0/100) kullanılarak laboratuvar şartlarında hazırlanmıştır. Temel özellikler; su emme, kalınlığa şişme, eğilme özellikleri ve vida çekme direnci TS-EN-312 standardının gerekliliklerine göre incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, çimentolu yonga levha karışımına elma budama yongası eklenmesinin test edilen özellikleri önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Karışım içindeki elma budama oranının artışı, çimentolu yonga levhaların kalınlığa şişme ve emme değerlerini arttırırken mekanik özelliklerini azaltmıştır. %25 elma budaması içeren deney levhaları ise genel kullanım amaçlı çimentolu yonga levhalar için standartların gerektirdiği özellikleri sağlamaktadır. Elma ağacı budama yongaları çimentolu yonga levha üretimi için alternatif bir hammadde olabilir.

## 1. Introduction

Cement-bonded particleboard (CBP) is a composite that combines wood and cement in order to achieve the advantageous properties of both constituents. While inorganic bonded wood-based panels have been used since the 1900s, CBP was first produced by Switzerland-based Durisol in 1970 under the trade name Duripanel. CBP is fire, moisture, impact, and decay-resistant. It is also cheaper but heavier than particleboard which is produced using organic resins [1]-[5]. The compatibility of wood and cement is the main issue for the physical and mechanical performance of CBP [6]. Chemical composition of wood, particularly, water-soluble compounds may cause inhibition of cement hydration [7]. Pretreatments such as cold and/or hot water applied to the wood particles, the addition of some chemicals such as  $\text{CaCl}_2$ , the use of  $\text{CO}_2$ , and the addition of superplasticizers may accelerate setting or lowers inhibition. Studies have shown that mechanical interlocking and hydrogen bridges mostly control the bonding, thus the properties of the cement-bonded wood products [7].

The decline of wood resources forces researchers to investigate alternative raw materials which may be utilized in the wood composite industry. A wide variety of materials such as agricultural residues, plantation of fast-growing and annual plants, and recycled wood products were subjected to investigations in order to find technically and economically feasible, ecologically friendly alternative raw materials which can be used in the manufacturing of wood-based composites. During the last few decades, properties of composites manufactured from a wide variety of plant-based raw materials have been technically found sufficient [8]. Although the availability and low density of agricultural residues seem to be advantageous, composites manufactured from these materials inherit inferior properties [9]. The collection and transport of these materials are major obstacles to the utilization of these raw materials in the composite industry [10].

Literature concerning the utilization of woody materials in the production of cement-bonded particleboard is scarce. Grapevine stalks [11] pruning of *Acacia salicina*, *Ficus altissimo*, *Pithecellobium dulce*, and *Tamarix aphylla* [12] date palm fronds and pruning of buttonwood [13], oil palm veins [14], sunflower stalks [15] have been investigated for their suitability for the production of cement bonded particleboard and found technically appropriate. Most of the references given above-used pretreatments such as cold or hot water to the particles in order to overcome inhibition. Titanium oxide nanoparticles

[16] and nano  $\text{SiO}_2$  [17] were also found promising in order to improve the physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard produced from agricultural waste.

According to [18] apple pruning is one of the most abundant biomass available in Turkey and is usually less efficiently utilized by burning. Utilization of apple pruning in the production of organic bonded particleboard was the subject of several investigations [19], [13], [16], [20] and found technically suitable in the manufacture of particleboard, but their use in the cement bonded particleboard has been never investigated. In this study, the use of particles produced from apple pruning with or without wood particles was investigated in the production of cement-bonded particleboard.

## 2. Materials and Methods

The study consisted of two consecutive stages. In the first stage, experimental cement-bonded particleboards measuring 12 mm x 500 mm x 500 mm were produced in laboratory conditions using coarse particles, commercial cement (CEM I 42.5), tap water, and an accelerator. The ratio of apple pruning particles mixed with the wood particles was 0, 25, 50, 75, and 100 % based on the wood particle weight. The following parameters were used for the board production; wood particles/cement ratio was 1:2 and 1:3; water/cement ratio was 1:2.5 and target density was  $1.4 \text{ g/cm}^3$ . 5% of calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) additive based on cement mass was dissolved in the tap water before mixing.

Coarse particles of Red pine (*Pinus brutia*) wood which were utilized as core layers of particleboard were supplied from a local particleboard factory. Apple pruning which was gathered from a close field was dried and passed through a hammer mill and screened. Pruning particles remaining between 3-5 mm sieves were used in the experiments.

In order to prepare experimental cement bonded boards; First, wood and pruning particles were mixed and sprayed with tap water which include a previously dissolved accelerator. Then, cement was added to the mixture until a homogeneous distribution was obtained. After 10 minutes of mixing, the fresh paste was spread in a steel frame by hand. The mixture placed between steel plates was allowed for curing for 24 hours under the pressure of 1.8-2.0 N/mm<sup>2</sup>. The hardened boards were conditioned in the laboratory climate at approximately +20 °C, RH 65%. Samples were cut after conditioning to the required size in order to determine some physical and mechanical properties.

In the second stage, some physical and mechanical properties of the experimental boards were obtained. Apparent density, water absorption (WA) after 24 hours of immersion in water [21], thickness swelling (TS) after 24 hours of immersion in water [21], modulus of elasticity [22], and modulus of rupture [22] in bending (MOE and MOR) and screw withdraw strength (WS) were determined according to conforming standards.

Five replicates were tested for each property and obtained data were subjected to statistical analysis. Experimental results were analyzed using ANOVA tests to identify their statistical significance. DUNCAN'S multiple range tests were performed in order to find the least significant difference between all the variables. The obtained results were also confronted with standard values of TS EN 634-2[23].

### 3. Results and Discussions

Table 1. shows some physical properties of the laboratory manufactured cement bonded particleboard samples as changing with different wood/cement ratios and wood/pruning ratios. The density of the experimental boards ranges from 1258 kg/m<sup>3</sup> to 1407 kg/m<sup>3</sup> and is not significantly different among the tested group.

Test results indicate that the addition of apple pruning to the wood cement mixture significantly influences the water absorption capacity of the cement-bonded particleboards ( $P < 0.001$ ; R Squared = 0.92). WA values (%) of the manufactured boards after 24 hours of immersion in water were significantly increased as the amount of apple pruning particles used in the mixture is increased ( $P < 0.001$ ; R Squared = 0.92). Experimental boards without apple pruning had the lowest WA values than other groups. The addition of apple pruning increases WA (%) properties almost linearly (Figure 1). TS values (%) of the manufactured boards were significantly affected by the proportion of apple pruning used in the study ( $P < 0.001$ ; R Squared = 0.93). Experimental boards made of 100% apple pruning had the highest TS values after 24 hours of water immersion. Higher WA and TS values may be attributed to the chemical composition of the apple pruning. According to Sahin and Arslan [19] apple pruning has similar chemical properties as softwood/hardwood, but they contain higher percentages of short-chain carbohydrates and higher solubility values compared with softwood/hardwood. Higher solubility may interfere with the cement-water interaction, and thus may cause inhibition.

Table 1. Some physical properties of the cement-bonded particle boards manufactured

Cement/particle ratio	Wood/pruning ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	WA (%)	TS (%)
1/2	100/0	1258 (18.3)	10.9 D (0.29)	6.78 D (0.54)
	75/25	1291 (37)	16.99 C (1.01)	7.67 D (0.9)
	50/50	1307 (52.16)	19.79 C (2.34)	11.13 C (1.05)
	25/75	1325 (25.65)	23.29 B (4.02)	13.03 B (1.53)
	0/100	1349 (36.87)	31.03 A (2.53)	17.55 A (1.15)
1/3	100/0	1407 (7.46)	9.02 D (0.99)	4.53 D (0.43)
	75/25	1399 (27.82)	14.1 C (0.77)	4.68 D (0.54)
	50/50	1388 (34.26)	14.25 C (1.19)	6.39 C (0.72)
	25/75	1384 (48.88)	15.21 B (1.55)	7.22 B (1.4)
	0/100	1375 (69.43)	20.55 A (2.09)	9.51 A (2.08)

Values in parenthesis are standard deviations and capital letters are representing Duncan's Groups

In general, higher WA and TS values are the result of higher particle content [24], [25], [26]. Some chemical additives besides the type of wood particle and wood-cement ratio may also influence WA capacity [26] and higher cement content in the mixture diminishes TS of cement-bonded particleboard [24]. A high swelling rate may also be due to the higher density [27] because of the higher compression exposed during production. A higher TS ratio may be also attributed to the high amount of CaCl<sub>2</sub> used which is highly hygroscopic [28]. It seems that none of the tested boards fulfills the TS requirement of the standard [23]. It should be mentioned that the tested boards were manufactured with coarse particles which had not been subjected to any type of pre-treatments. Industrial scale production of the boards or application of any pre-treatments may result in boards with standard properties for TS.

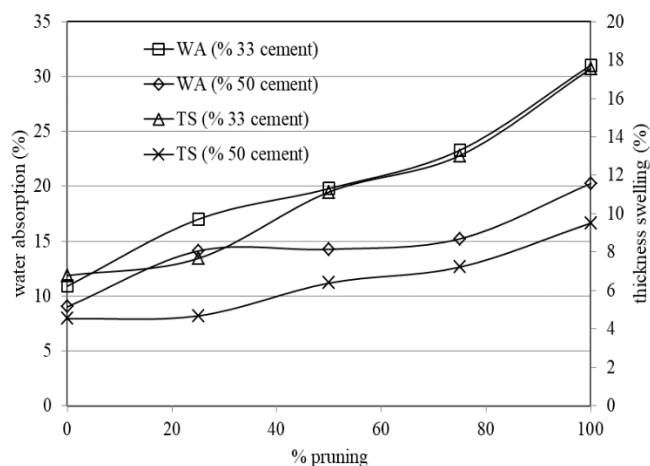


Figure 1. WA and TS values of the experimental boards with respect to the apple pruning ratio

The bending properties and screw withdrawal strength of cement-bonded particleboard are presented in Table 2. A higher cement ratio seemed to yield better mechanical properties for the boards tested. In general, the MOE of the cement-bonded particleboards was significantly reduced by the addition of apple pruning ( $P < 0.001$ ; R Squared = 0.83). The addition of apple pruning also significantly drops the MOR of the cement-bonded particleboards ( $P < 0.001$ ; R Squared = 0.913). The decrease in both properties with the addition of apple pruning is almost linear (Figure 2). The addition of apple pruning to the mixture lowers both stiffness and strength, but boards still carry the minimum bending properties required by the standards [23] when they are used in a higher cement ratio. Mechanical properties of the cement-bonded particleboards manufactured with 100% apple pruning particles were inferior to other groups tested.

Table 2. Some mechanical properties of the cement-bonded particle boards manufactured

Cement/particle ratio	Wood / running ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	WS (N)
1/3	100/0	1258 (18.3)	4205 A (291)	11.21 A (0.56)	1395 A (85)
	75/25	1291 (37)	3962 AB (283)	10.82 AB (0.35)	1366 AB (62)
	50/50	1307 (52.16)	3664 BC (187)	9.64 BC (0.85)	1225 BC (59)
	25/75	1325 (25.65)	2733 C (180)	8.11 CD (0.66)	1149 CD (123)
	0/100	1349 (36.87)	1669 D (175)	6 D (0.46)	732 D (90)
1/2	100/0	1407 (7.46)	5152 A (1001)	11.18 A (2.02)	1376 A (256)
	75/25	1399 (27.82)	4857 AB (628)	10.41 AB (1.21)	1300 AB (200)
	50/50	1388 (34.26)	4296 BC (255)	10.24 BC (1.21)	1122 BC (128)
	25/75	1384 (48.88)	4234 C (538)	8.48 CD (1.67)	823 CD (241)
	0/100	1375 (69.43)	3529 D (523)	7.12 D (0.67)	760 D (340)

Values in parenthesis are standard deviations and capital letters are representing Duncan's Groups

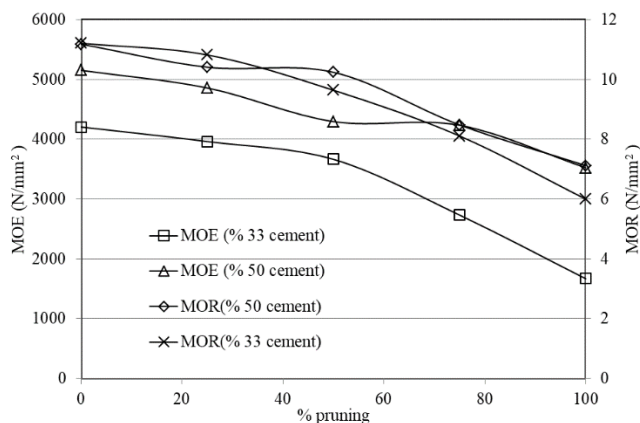


Figure 2. Effects of apple pruning on the bending properties of cement-bonded particleboard

In general, stiffer cement-bonded boards may be obtained with decreasing particle content [29] or density increase, and higher MOR may be achieved using lower cement content [24],[30]. According to Bejo et al. [31], improved bonding between cement matrix and wood, thus better mechanical properties may be attained when the densification of the board increases. A possible contributory factor to the relatively low bending properties of the boards could be higher percentages of short-chain carbohydrates and higher solubility values [19]. Kochova et al. [32] also hold carbohydrates, especially the amount of sucrose, glucose, and fructose responsible for the lower mechanical properties. Liu and Moslemi [33] also mentioned that decreasing strength is a result of sugars. Olorunnisola [34] and Ashori et al. [35] claims that water-soluble extractives play an important role in the inhibition of cement thus, low strength. Reduction in mechanical properties with the addition of apple pruning particles may be prevented by the application of pre-treatments which were found adequate for many lingo-cellulosic materials [36], [1],[37], [38].

In the study, the WS of the cement-bonded particleboards was significantly reduced by the addition of apple pruning ( $P < 0.001$ ; R Squared = 0.899) as seen in Figure 3. WS is an index of internal bond strength and can be influenced by density, water/cement ratio, type of cement, use and ratio of accelerators, and type and dimensions of the wood particles [35], [28]. The decrease in WS could be an indication of poor bonding between apple pruning particles and cement. As shown in Table 2, the strength and stiffness values of all-wood boards meet the minimum requirements set by the standard [23]. and experimental boards containing 25% of apple pruning also fulfill the standard requirements. Dimensional stability and bending properties of adhesively bonded particleboard which contains apple pruning showed similar tendencies [19].

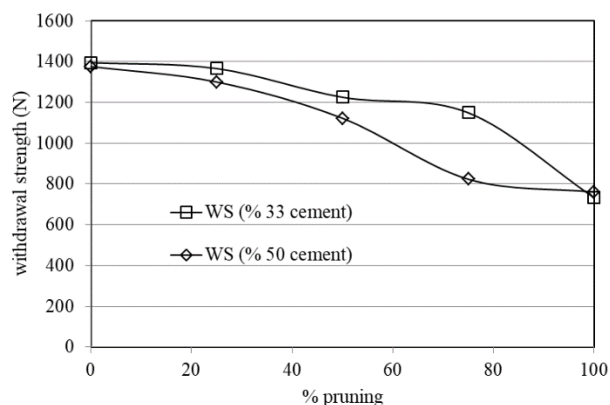


Figure 3. Effects of apple pruning on the withdrawal strength of the cement-bonded particleboards

#### 4. Conclusions

This study explored the possible utilization of apple pruning in cement-bonded particleboard production, under laboratory conditions. Based on the results of the study, the addition of apple pruning to wood cement mixture significantly increases WA and TS properties and reduces the mechanical properties of cement bonded particleboard tested. Short-chain carbohydrates or extractives may be responsible for

higher water uptake and lower mechanical properties. Undesirable board properties may be improved by some pretreatments such as hot or cold water applied to the pruning particles. The utilization of fine particles in the production may also improve the board's properties. Utilization of pruning in the manufacturing of value-added products such as cement-bonded particleboard may reduce pressure on deforestation, increase the value of pruning by utilization instead of burning and reduce the amount of waste deposited in the environment or reduce pollution.

#### References

- [1] Lee AWC. Physical and mechanical properties of cement bonded southern pine excelsior. *Forest Products Journal*, 34(4), 30-34, 1984.
- [2] Ramirez-Coretti A, Eckelman CA, Wolfe RW, Inorganic-bonded composite wood panel systems for low-cost housing a Central American perspective. *Forest Products Journal*, 48, 62-68, 1998.
- [3] Savastano H, Warden PG, Coutts RSP, Potential of alternative fiber cement as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, 25, 585-592, 2003.
- [4] Okino EYA, Souza MR, Santana MAE, Alves VMS, Sousa ME, Teixeira DE, Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. cement-bonded particleboards. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 333-338, 2005.
- [5] Del Menezzi CHS, De Castro GH, De Souza MR, Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. *Maderas. Ciencia tecnología*, 9(2), 105-115, 2007.
- [6] Jorge FC, Pereira C, Ferreira JMF, Wood-cement composites: a review. *Holz Roh Werkst*, 62, 370-377, 2004.
- [7] Frybort S, Mauritz R, Teischinger A, Müller U, Cement bonded composites-a mechanical review, *BioResources*, (3): 602-626, 2008.
- [8] Klimek P, Wimmer R, Alternative raw materials for bio-based composites. *Pro Ligno*, 13(4), 27-41, 2017.
- [9] Sun S, Mathias JD, Toussaint E, Grediac M, Hygromechanical characterization of sunflower stems. *Industrial Crops and Products*, 46, 50-59, 2013.
- [10] Guntekin E, Karakus B, Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 354-358, 2008.
- [11] Wang C, Zhang S, Wu H, Performance of cement-bonded particleboards made from the grapevine. *Advanced Materials Research*, 765-770, 2013.
- [12] Abdel-Aal MA, Mechanical properties and dimensional stability of wood-cement particleboard from tree pruning residues of some wood species as affected by the panel density. *Alexandria Science Exchange Journal*, 35(3), 215-224, 2014.
- [13] Nasser RA, Influence of board density and wood/cement ratio on the properties of wood-cement composite panels made from date palm fronds and tree prunings of buttonwood. *Alexandria Science Exchange Journal*, 35(2), 133-145, 2014.
- [14] Ayrılmış N, Hosseinihashemi SK, Karim M, Kargarfard A, Kaymakçı A, Ashtiani S, Technological properties of cement bonded composite board produced with the main veins of oil palm (*Elaeis guineensis*) particles. *BioResources*, 12(2), 3583-3600, 2017.
- [15] Tas H.H, Kul FM, Sunflower (*Helianthus Annuus*) Stalks as Alternative Raw Material for Cement Bonded Particleboard. *Drvna Industrija*, 71(1), 41-46. 2020.
- [16] Ghofrani M, Haghdan S, NicKhah V, Ahmadi K, Improvement of physical and mechanical properties of particleboard made of apple tree pruning and sunflower stalk using titanium oxide nanoparticles. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73 (5), 661-666, 2015.
- [17] Nazerian M, Nanai HA, Gargari RM, Influence of Nano-Silica (SiO<sub>2</sub>) Content on Mechanical Properties of Cement-Bonded Particleboard Manufactured from Lignocellulosic Materials. *Drvna Industrija*, 69(4), 317-328, 2018.
- [18] Ekinci K, Utilization of apple pruning residues as a source of biomass energy: A case study in Isparta province. *Energy Exploration & Exploitation*, 29(1), 87-107, 2011.
- [19] Sahin HT, Aslan MB, Properties of orchard pruning and suitability for composite production. *Sci Eng Compos Mater*, 20(4), 337-342, 2013.
- [20] Kowaluk G, Szymanowski K, Kozłowski P, Kukula W, Sala C, Robles E, Czarniak., Functional Assessment of Particleboards Made of Apple and Plum Orchard Pruning. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2877-2886, 2020.

- [21] TSE, Particleboards, and fiber boards- Determination of swelling in thickness after immersion in water. *TS EN 317*, Ankara, 1999.
- [22] TSE, Wood-Based panels- Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. *TS EN 310*, Ankara, 1999.
- [23] TSE. Cement-bonded particleboards- Specifications- Part 2: Requirements for Portland cement-bonded particleboards for use in dry, humid, and exterior conditions. *TS EN 634-2*, Ankara, 2009.
- [24] Moslemi AA, Pfister SC, The influence of cement wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood cement composite panels. *Wood Fiber Science*, (19),165-175, 1987.
- [25] Savastano H, Warden PG, Coutts RSP, Potential of alternative fiber cement as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, 25, 585-592, 2003.
- [26] Olorunnisola AO, Effects of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. *Industrial Crop Production*, 29, 495-501, 2009.
- [27] Huang C, Cooper PA, Cement-bonded particleboard using CCA-treated wood removed from service. *Forest Products Journal*, 50(6), 49-56, 2000.
- [28] Davies IOE, Davies OOA, Agro-waste-cement particleboards: A review. *MAYFEB Journal of Environmental Science*, (2), 10-26, 2017.
- [29] Al Rim K, Ledhem A, Douzane O, Dheilily RM, Queneudec M, Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performance of clay-cement-wood composites. *Cement Concrete Composites*, 21, 269-276, 1999.
- [30] Oyagade AO, Effect of cement/wood ratio on the relationship between cement bonded particleboard density and bending properties. *Journal of Tropical Forest Science*, 2(2), 211-219, 1990.
- [31] Bejo L, Takats P, Vass N, Development of cement-bonded composite beams. *Acta Silva Lignaria Hungary*, (1), 111-119, 2005.
- [32] Kosova K, Schollbach K, Brouwers HJH, Use of alternative fibers in wood wool cement boards and their influence on cement hydration. In 19th International Conference on Building Materials (Ibausil 2015), *Bauhaus-Universität Weimar*. 1375-1382, 2015.
- [33] Liu Z, Moslem, AA, Effect of western Larch extractives on cement-wood setting. *Forest Product Journal*, 35(7/8), 37-43, 1986.
- [34] Olorunnisola AO, Effects of particle geometry and chemical accelerator on strength properties of rattan-cement composites. *African Journal of Science and Technology (AJST)*, *Science and Engineering Series*, 8(1), 22-27, 2007.
- [35] Ashori A, Tabarsa T, Sepahv S, Cement-bonded composite boards made from poplar strands. *Construction and Building Materials*, 26, 131-134, 2012.
- [36] Moslemi AA, Garcia JF, Hofstrand AD, Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber Science*, 15(2), 164-176, 1983.
- [37] Zhengtian L, Moslemi AA, Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement- water mixtures. *Forest Products Journal*, 35(7), 37-43, 1985.
- [38] Lee AWC, Short P. H., Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board. *Forest Products Journal*, 39(10), 68-70, 1989.



Araştırma Makalesi/Research Article

## CAN haberleşmesinde gürültü filtreleme yöntemleri

Buğra Er<sup>1</sup>, Okan Bingöl<sup>2</sup>

<sup>1</sup> KORMAS, TOSB, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

CAN veri yolu  
CAN sinyalleri  
SAE J1939 Standartı  
CAN donanımı

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 14.11.2022  
Kabul Tarihi: 30.12.2022

**Öz:** Günümüzün otomotiv sektöründe çalışılan en önemli alanlarının başında haberleşme, veri toplama ve kontrol işlemleri gelmektedir. Veri toplama işlemi elektronik alt yapısı sistemler için oldukça önemlidir. Güvenirliği yüksek bir yapı kurularak verilerin doğru bir şekilde kontrol sistemine iletilmesi oldukça önemlidir. Verilerin hat boyunca doğru ve güvenli iletilmesi amacıyla sıklıkla tercih edilen haberleşme protokollerinden biri CAN protokolüdür. Bu çalışmada iklimlendirme kumandalarında kullanılan CAN protokolünün SAE J1939 standartına uygun şekilde parametrelerinin yazılım ile ayarlanmasına yer verilmiştir. Haberleşmede kullanılan mesaj adresi ve bilgisinin doğru şekilde iletildiği analizör ekranında gösterilmiştir. Haberleşme esnasında birçok elektrik motoru ve sistemi kontrol eden iklimlendirme kumandalarının otomotivde karşılaşılabileceği elektriksel gürültülü ortam oluşturulmaya çalışılmıştır. Oluşturulan ortamda CAN donanımına dair komponent ve topolojiler test edilmiştir. Farklı devre topolojilerinin gürültülü ortamlardaki çıkış grafikleri yorumlanmıştır. Dört farklı topoloji verilmiştir. İki topoloji elektriksel gürültülü ortamda çalıştırılarak osiloskop görüntüleri paylaşılmıştır. TVS koruma devresinde 1.8 V tepeden tepeye değeri ölçülmüştür. Çoklu TVS cihaz devresinde ise 1.6 V tepeden tepeye değeri elde edilmiştir. Filtreleme yaparak tepeden tepeye değeri %12 azaltılmıştır.

### Atıf için/To Cite:

Er B. Bingöl O. CAN haberleşmesinde gürültü filtreleme yöntemleri. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(3), 138-143, 2022.

## Noise filtering methods in CAN communications

### Keywords

CAN bus  
CAN signals  
SAE J1939 Standard  
CAN hardware

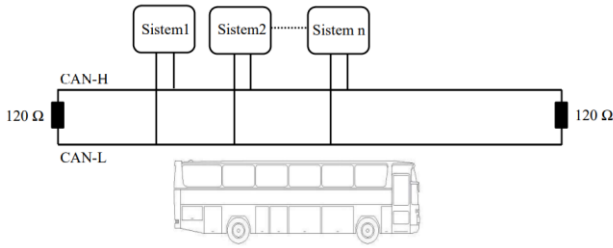
### Article history:

Received: 14.11.2022  
Accepted: 30.12.2022

**Abstract:** Communication, data collection and control processes are at the forefront of the most important areas of work in today's automotive industry. Data collection is very important for electronic infrastructure systems. It is very important to establish a highly reliable structure and to transmit the data correctly to the control system. CAN protocol is one of the frequently preferred communication protocols in order to transmit data accurately and securely along the line. In this study, the parameters of the CAN protocol used in air-conditioning controls in accordance with the SAE J1939 standard are set with software. It is shown on the analyzer screen that the message address and information used in communication are transmitted correctly. It has been tried to create an electrical noisy environment that the air conditioning controls that control many electric motors and systems may encounter in the automotive during communication. Components and topologies of CAN hardware have been tested in the created environment. Output graphs of different circuit topologies in noisy environments are interpreted. Four different topologies are given. The oscilloscope images were shared by running the two topologies in an electrically noisy environment. 1.8 V peak-to-peak value was measured in the TVS protection circuit. In the multi-TVS device circuit, 1.6 V peak-to-peak value was obtained. By filtering, the peak-to-peak value was reduced by 12%.

## 1. Giriş

Günümüzde otomobil sektöründe erişilmesi düşünülen hedeflerden biri araca dâhil olan bütün sistemlerin bir protokol aracılığıyla haberleşmesidir. Bu nedenle haberleşme insanlığın geçmişten günümüze en temel ihtiyaçlarından biridir. Haberleşme sistemlerine başlıca otomotiv sektörü, savunma sanayi ve endüstri olmak üzere her alanda ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Elektronik tabanlı sistemlerin CAN (Controller Area Network) veri yolu kullanılmadan tek merkezden kontrol edilebilmesi için araç içerisinde birçok sinyal kablosu kullanılması gerekmektedir [2]. Eski nesil araçlarda kullanılan her sensör ve ara birim için fiziksel olarak ayrı bir kablo üretimi yerine, günümüz araçlarında tüm sensörler ve arabirimler bağlantılı oldukları ağ üzerinden adres tabanlı olarak bir veya iki kablo ile beraber haberleşmektedirler. Bu yüzden otomobil haberleşmeleri için araç içi ağ kavramı kullanılmaya başlanmıştır. Ara birim olarak ifade edilen ve elektrik motoru alanını ilgilendiren komponentler genel olarak havalandırma sistemi, araç kumandası, elektrik motorları olarak ifade edilebilir. Şekil 1’de yer alan CAN Protokolünün temsili görseline yer verilmiştir. Alıcı ve vericilerin aynı hat üzerinde iki kablo üzerinden haberleştiği gösterilmektedir.



Şekil 1. CAN protokolü gösterimi

CAN veri yolu haberleşmesi Bosch tarafından geliştirilmiş olan, günümüz araçlarında sıklıkla kullanılan yöntemdir. CAN sistemini ayarlanabilir haberleşme hızına sahip bir seri veriyolu. CAN sistemi, aracın güç ve aktarım organları için yüksek hızlı, gövde ve eğlence sistemleri için ise düşük hızlı standardı kullanılmaktadır [3].

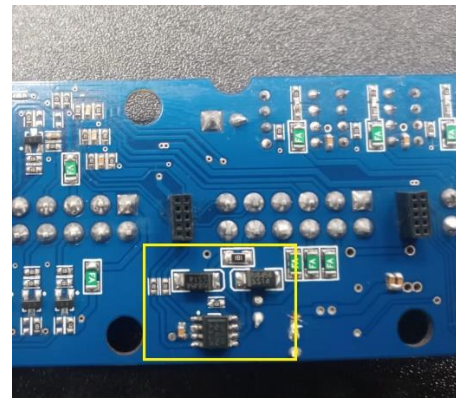
CAN, otomotiv sektöründe ve üst düzey teknoloji gerektiren sektörlerde kullanılması amacıyla tasarlanmış, güvenli ve yüksek verimli bir senkron seri iletişim protokolüdür [4]. Haberleşmedeki güvenilirliği açısından otomotiv de sıklıkla kullanılmıştır [5]. “Kontrol Alan Ağı Veri yolu” veya “Controller Area Network Bus” olan günümüzde en çok kullanılan

haberleşme sistemlerinden biridir. CAN veri yolu standart protokolü, Açık sistem ara bağlaşımı (Open System Interconnect) olarak ifade edilen referans modelinin birinci ve ikinci katmanlarına karşılık gelmektedir. Başlangıçta Bosh tarafından otomotiv uygulamaları için tasarlanmıştır. İlerleyen teknoloji ile beraber düşük maliyet, küçük boyut, yüksek güvenilirlik ve yüksek hız gibi avantajları ile beraber birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Veri güvenliğinin önemli olduğu gerçek zamanlı uygulamalarda da sıklıkla kullanılır. Günümüzde otomotiv genelinde kullanılan haberleşme standartları olarak CAN Veri yolu, LIN Veri Yolu ve FlexRay sayılabilir. Günümüzde otomotivde kullanılan elektrik motorlarında ağırlıklı olarak CAN veri yolu kullanılmaktadır [7].



Şekil 2. HVAC Kumanda Paneli

CAN protokolü otomotivde birçok alanda kullanıldığı gibi araç iklimlendirme kumandalarında da kullanılmaktadır. CAN yapısına sahip kumanda devresi Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu kumandalar sıcaklık ölçerek ortamların otomatik şekilde iklimlendirmesini sağlarken aynı zamanda hata kodlarını, sıcaklık verilerini ve fan bilgilerini sistem ile paylaşır. Sistemden ise araç hızı, kapı açık bilgisi veya klima bilgilerini ilgili adreslerden okuyarak ilgili senaryoları gerçekleştirir. Şekil 3’de HVAC (Isıtma, havalandırma ve klima) kumanda panelinde kullanılan CAN donanımına ait alan işaretlenmiştir.



Şekil 3. HVAC Kumanda Panelinde Can Donanımı



HVAC Kumandalarının kullanım alanları gereği EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) belgesi önem taşımaktadır. Bu alanda benzer çalışmalarda belirli frekanslar uygulanarak CAN hattındaki sinyallerin formu incelenmektedir [8]. Bu çalışmalar haberleşmenin güvenliğini arttırmaktadır.

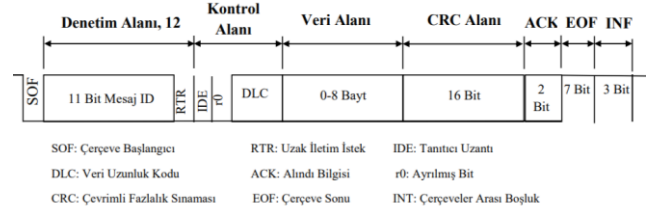
Bu kumandalarda genellikle SAE J1939 protokolü kullanılmaktadır. SAE J1939 protokolü 500kbit/s ve 250kbit/s hızlarında genişletilmiş mesaj yapısı olacağını ifade etmektedir [9]. Sinyal burgulu kablo üzerinden iletilir. Bu sayede yüksek hızlarda CAN haberleşmesi gürültü bağıışıklığını sağlamış olur [10].

Bu çalışmada otomotivde kullanılan iklimlendirme kumandalarında yer alan CAN protokolüne ait donanım ve yazılım yapısı ele alınmıştır. CAN protokolünde donanım ve yazılım birlikte çalışmaktadır. Yazılım için mikroişlemci tarafında adresleme, kuantalama ve filtreleme işlevleri bulunmaktadır. İlgili işlevler ikinci bölümde genel CAN yapısı ve yazılımı paylaşılmıştır. Oluşturulan CAN yapısı Microchip firmasının analizör ekranında gösterilmiştir. Donanım tarafında ise tampon, sonlandırma direnci, çeşitli aktif ve pasif komponentler ile sistem kurulması amaçlanmıştır. HVAC kumandalarının araç içerisinde kontrol ettiği birden fazla motor, sensör ve çıkışlar bulunmaktadır. Dolayısıyla sistem elektriksel gürültüye içerisinde çalışmaktadır. Haberleşmenin gürültüden etkilenmemesi gerekmektedir. Üçüncü bölümde ise iklimlendirme kumandasının araç içerisinde karşılaşılabileceği elektriksel gürültülü ortam oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu gürültülü ortamda yapılan donanım ve testlere ait çalışmalara yer verilmiş ve topolojiler yorumlanmıştır.

## 2. Materyal ve metod

CAN Protokolü sistem içerisindeki karmaşıklığı ve kablo sayısını azaltma amacıyla ortaya konulmuştur [11]. CAN haberleşmesi tercihen burgulu ve ekranlı olacak şekilde iki adet kablo ile iletilmektedir. CAN veri yolu protokolünün mesaj tabanlı olması diğer protokollerden temel farkıdır. Sistemdeki her bir mesaj birbirinden farklı tanımlayıcıya yani adrese sahiptir. Hatta yer alan bütün kontrolcüler sistemden veri alabilecek ve aynı şekilde sisteme veri verebilecek yapıya sahiptir. CAN veri yolunda her bir mesaj ile düğüm üzerinde hata kontrolü yapılır. Yüksek hızlı CAN veri yolu iletişimi için karayolu araçlarında kullanılan ve kabul gören uluslararası standart ISO11898 olarak belirlenmiştir. CAN protokolünde dört adet veri alanı bulunmaktadır. CAN veri alanları; hata çerçevesi, veri çerçevesi, istek çerçevesi ve aşırı yük çerçevesidir [12].

Çalışma kapsamında CAN 2.0B ile beraber SAE J1939 standartları kullanılacaktır. CAN 2.0B'de yer alan mesaj yapısı Şekil 4'de verilmiştir [13].



Şekil 4. CAN 2.0B yapısı

SAE J1939 spesifikasyonunun önemli bir özelliği yalnızca genişletilmiş CAN çerçevelerinin kullanılmasıdır. J1939 mesaj tanımlayıcısı öncelik, genişletilmiş veri sayfası, veri sayfası, protokol veri birimi formatı, protokol veri birimine özel ve kaynak adresi olarak altı alana bölünmüştür [14].

STM32F072 Mikroişlemcisi: ARM Cortex M0 işlemcisine sahip STMicroelectronics firması tarafından üretilen STM32F serisi mikroişlemcilerden biridir. CAN, 1 Mbit/s'ye kadar bit hızıyla 2.0A ve 2.0B spesifikasyonlarıyla uyumludur [15].

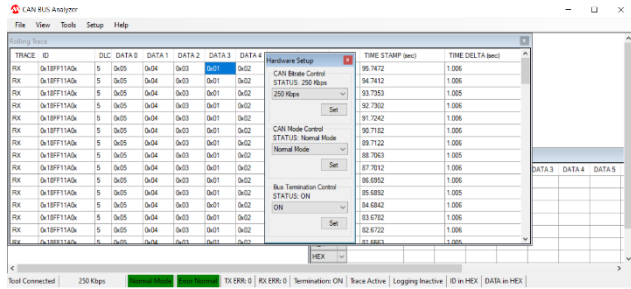
Gönderilen verilerde ilgili hedef adresler yerine protokol üzerinde tanımlayıcı adres(ID) bulunmaktadır. Tanımlayıcılar veri içeriğiyle birlikte öncelikleri de iletir. Mesajın yapısı; Başlangıç Verisi, Kimlik Verisi, Veri Uzunluk Kodu, Veri Alanı, İstek Çerçevesi ve Hata Çerçevesinden oluşur. 500kbit/s kullanan SAE J1939 protokolü yer almaktadır. Bu protokol için 72MHz işlem hızına sahip işlemci de Ön ölçekleyici 8 olmalıdır. Sayısal haberleşme üzerinde kuantalama bulunmaktadır. Aşağıda yer alan yazılım satırlarında Ön ölçekleyiciye ve TimeSeg1 ve TimeSeg2 kaydedicilerinde yer alan kuantalama değerleri verilmiştir.

```
hcan.Instance = CAN; //CAN Haberleşmesi
hcan.Init.Prescaler = 12; //Data Hızı Belirlenmesi
hcan.Init.Mode = CAN_MODE_NORMAL; //Mod Seçimi
hcan.Init.SyncJumpWidth=CAN_SJW_1TQ; //Kuantalama Seçimi
hcan.Init.TimeSeg1 = CAN_BS1_13TQ;
hcan.Init.TimeSeg2 = CAN_BS2_2TQ;
```

CAN protokolü üzerinde adres filtreleme bulunmaktadır. Bu adres dışındaki bilgiler FIFO olarak adlandırılan alana kaydedilmeyerek filtreleme sağlanır. FilterIdHigh ve FilterIdLow arasındaki tanımlama değerleri alınarak diğer tanımlayıcılar filtrelenir. CAN veri yolunda mesaj almak ve göndermek için tüm işlevler mikroişlemcide yer alan CAN modülü tarafında otomatik olarak yönetir. İlgili ayarların yer aldığı alan aşağıda verilmiştir.

```
sFilterConfig.FilterActivation=ENABLE; //Mesaj Filtre Ayarları
sFilterConfig.FilterBank=0;
sFilterConfig.FilterFIFOAssignment=CAN_FILTER_FIFO0;
sFilterConfig.FilterIdHigh=0x18FF9000>>13; //Adres Filtreleme
sFilterConfig.FilterIdLow=0x18FF9AA0<<3;
sFilterConfig.FilterMaskIdHigh=0xFFFFF000>>13;
sFilterConfig.FilterMaskIdLow=0x18FF9000<<3;
sFilterConfig.FilterMode=CAN_FILTERMODE_IDMASK;
sFilterConfig.FilterScale=CAN_FILTERSCALE_32BIT;
```

CAN 2.0B ayarlarının ve uygulama üzerinden veri örneği Şekil 5'de verilmiştir. CAN 2.0A standardında tanımlayıcı on bir bit uzunluğundadır. CAN 2.0B standardı ise yirmi dokuz bit uzunluğuna sahiptir.

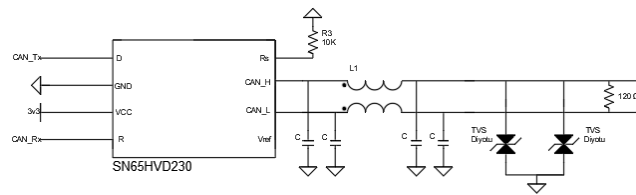


Şekil 5. Can Analizör Ekranı

Genişletilmiş tanımlayıcı ve Standart tanımlayıcı olarak iki tipte tanımlama bulunmaktadır. Tasarımın uygulama alanı CAN 2.0B alt yapısına sahip olduğu için genişletilmiş tanımlayıcı seçilmiştir. Adresleme yöntemleri ise genişletilmiş tanımlayıcı ve standart tanımlayıcı olarak CAN protokolü içerisinde ikiye ayrılmaktadır. Sektöre, araç türüne ve araca göre adresleme farklılık gösterebilir. Genişletilmiş tanımlayıcı seçimi, veri uzunluğu ve adres bilgisi aşağıda verilmiştir.

```
pTxHeader.IDE = CAN_ID_EXT; //Genişletilmiş ID Seçimi
pTxHeader.RTR = CAN_RTR_DATA; //Data Türü Seçimi
pTxHeader.DLC = 8; //Data uzunluğu belirlenmesi
pTxHeader.ExtId = 0x18FF11A0; //Data Gönderilecek Adres
```

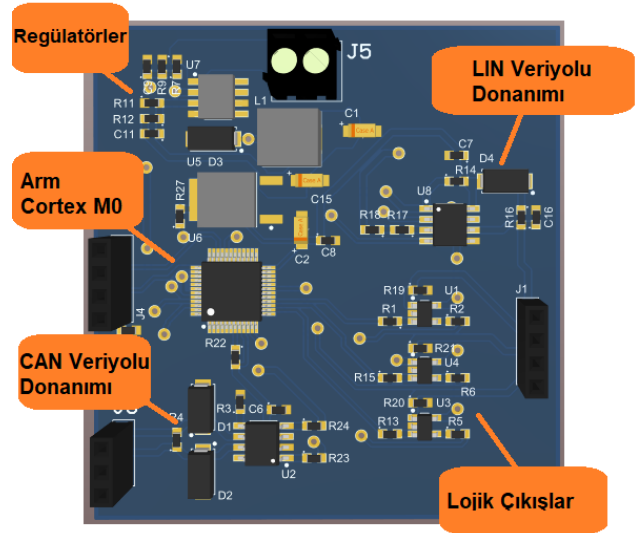
CAN veri yolu kullanılan uygulamaların sıklıkla ISO11898 standartını karşılayabilmesi beklenmektedir. Transceiver ile CAN kontrolcüsüne saniyede 1 megabit'e kadar iletim yeteneği sağlar. Bu çalışmada transceiver olarak SN65HVD230 tercih edilmiştir. Kullanılan CAN Protokolüne ait devre şeması Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. CAN transceiver veriyolu bağlantısı

Çalışma kapsamında Altium Designer kullanarak tasarlanan kartın bölümleri Şekil 7' de isimlendirilerek verilmiştir. Kart üzerinde CAN ve LIN donanımıyla birlikte çeşitli giriş ve çıkışlarda bulunmaktadır.

Birçok haberleşme protokolünde ESD (Elektrostatik Deşarj) koruması amaçlı TVS (Geçici Gerilim Bastırma) kullanılmaktadır. Haberleşme hızına bağlı olarak kapasite değeri değişmektedir. USB 2.0 hattı için 5pF'a kadar olan kapasiteler tavsiye edilmektedir [16]. CAN alıcı-vericisini ESD' den korumak için ESDCAN24 geçici voltaj bastırıcı önerilmiştir [17]. ST firmasının ESDCAN24 kodlu TVS ürünü kullanılmıştır. Sonlandırma direnci olarak 120 Ω veya kapasitör kullanımına bağlı olarak 60 Ω-60 Ω tercih edilmiştir. Filtre amaçlı kullanılan kapasitörler ise 10nF olarak kullanılmıştır. Kapasitör ve sonlandırma direnci değerleri kullanılan SN65HVD230 entegresinin kitabından seçilmiştir. Testlerde CAN haberleşme hızı referans alınarak seçilen Würth firmasına ait 51 µH endüktans ve 0.32Ω iç dirence sahip bobin kullanılmıştır. Donanımda CAN Bus Transceivers entegresi olarak ISO 11898-2 Standardı ile uyumlu, yüksek giriş empedansı, düşük bekleme akımına sahip Ti firmasının olan SN65HVD230 tercih edilmiştir.

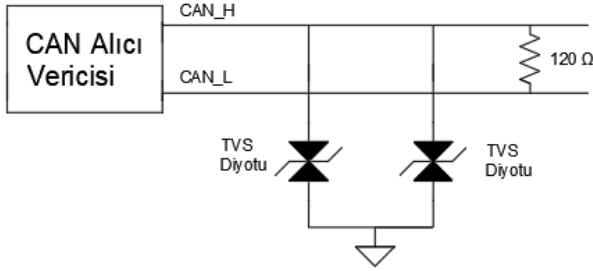


Şekil 7. Uygulamanın yapıldığı Kartın Altium tasarımı

### 3. Bulgular

Filtreler gürültü şiddetini azaltarak kullanılabilir bir sinyal elde edilmesini sağlar. Direnç-Kapasitör (RC), indüktör-kapasitör (LC), bobinler ve ferritler filtre seçenekleridir. Filtreler gürültüye karşı kesim frekansına bağlı avantaj sunarlar fakat tamamıyla engelleyemezler. Bu uygulamalarda TVS diyotu kullanılabilir. TVS geçici gerilim bastırma diyotu adı

altında giriş kaynağına koruma amaçlı bağlanan diyottur. Çalışma geriliminin üzerinde giriş voltajı geldiğinde kısa devre olarak çalışarak akımı kendi üzerinden geçirmeyi amaçlar. Şekil 8’ de yer verilen düşük kapasiteye sahip TVS diyotları sinyal bozulmasını en aza indirir [18].



Şekil 8. TVS koruma devresi

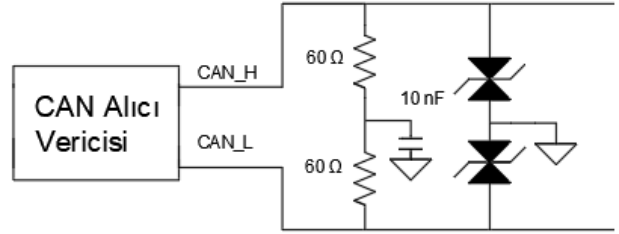
Şekil 8’ de verilen sistem uyarlanarak analizör ekranında verilen veriler kontrol edilmiştir. Elektriksel gürültülü ortam yaratma amacıyla güç kaynağına 17kHz anahtarlama frekansı ile anahtarlanan bir Fırçasız Doğru Akım motoru eklenmiştir. CANH ve CANL sinyallerinin osiloskop görüntüleri Şekil 9’ da verilmiştir. CANH sinyali tepeden tepeye 1,8 V değerini vermiştir. Osiloskop ekran çıktısı 2 V/div olacak şekilde çıktılar alınmıştır. Dikey eksen voltajı, yatay eksen ise zamanı belirtmektedir. Sarı grafik CANL, yeşil grafik ise CANH olarak osiloskop görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 9. TVS koruma devresi osiloskop çıktısı

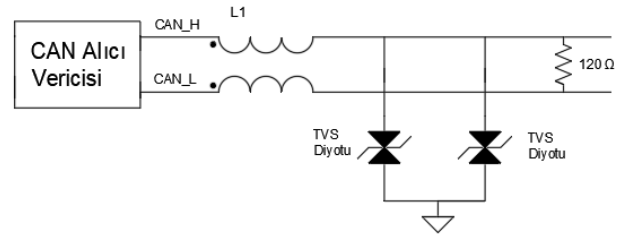
Şekil 10’ da bölünen sonlandırma devresi alçak geçiren filtre olarak çalışır ve iki eşit parçadan oluşur. Yapısında Direnci kapasitör ve TVS diyot barındırır. Yüksek frekansı kapasitör toprağa gürültü olarak aktarır. TVS diyotlar ise devrenin korunmasını sağlar. EMI

sorunlarında da sıklıkla çözüm amaçlı kullanılan yöntemdir [18]. Bölünmüş sonlandırma devresi EMI yöntemi olması nedeniyle osiloskop çıktularına yer verilmemiştir.



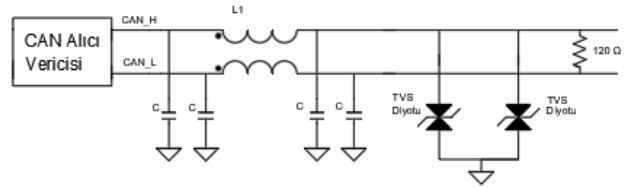
Şekil 10. Bölünmüş sonlandırma devresi

Şekil 9’ da verilen devre düşük maliyet ile aşırı gerilim koruması sağlar ancak TVS diyot ile minimum gürültü filtreleme elde edilir. Direnç ve kapasitör ile filtre devresi veya ortak mod şok bobin kullanılarak gürültü filtreleme her iki hat içinde sağlanır. Ortak şok bobinler gürültüyü azaltır. TVS diyot da eklenirse Şekil 11’deki devre topolojisi oluşturulmuş olur [18]. Bobin kullanımı ile beraber kapasitör kullanımı yaygındır. Şekil 11’ de yer alan şekle kapasitör eklenerek Şekil 12’ de yer alan devre elde edilir.



Şekil 11. Ortak mod şok devresi

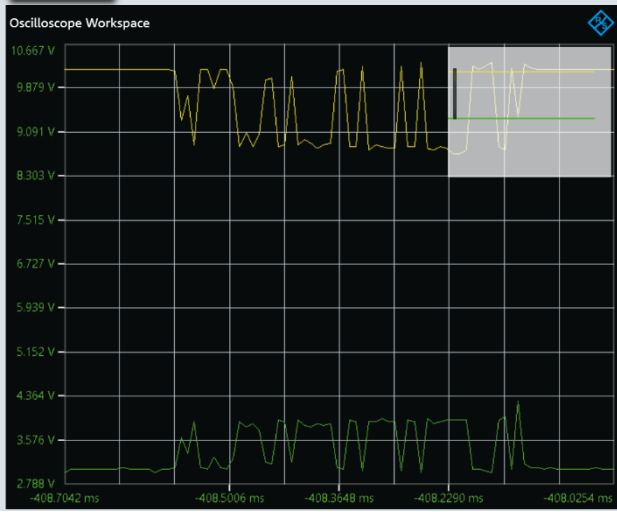
Şekil 12’ de yer alan CAN düğümünde gürültü tarafından oluşturulan sinyaller filtreler tarafından şok bobin ve 10nF değerinde kapasitörler yardımıyla zayıflatılır. Ortaya çıkan emisyonu ve gürültüyü azaltmak için iki hatta da TVS diyotları kullanılarak dalgalanma minimum değere yaklaştırılmaya çalışılır [18].



Şekil 12. Çoklu TVS cihaz devresi

Şekil 12’ de yer alan devre test elektriksel gürültülü ortamda test edildiğinde CANH sinyalinde tepeden

tepeye değeri 1,6 V gelmektedir. Osiloskop çıktıları Şekil 13' de elde edilen CANH ve CANL sinyali verilmiştir. Şekil 12' de yer alan devrenin testlerde elektriksel gürültü kaynaklı olarak 1,6 V tepeden tepeye değeri gözlemlenirken Şekil 8' de yer alan topolojinin 1,8 V değeri görülmüştür. Dikey eksen voltajı, yatay eksen ise zamanı belirtmektedir. Osiloskop ekran çıktısı 2 V/div olacak şekilde çıktılar alınmıştır.



Şekil 13. Çoklu TVS cihaz devresi osiloskop çıktısı

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada CAN veri yolu sistemi donanım testleriyle beraber başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Arm Cortex M0 Mimarisine sahip Stm32F072 Mikroişlemcisi ile beraber CAN Protokolünün yazılımı ve donanımı incelenmiştir. Yazılım alanlarında StmCubeMX ile beraber Keil u5 kullanılmıştır. CAN protokolü içerisinde yer alan CAN 2.0B kullanılarak SAE J1939 standartlarına uygun şekilde programlanarak mesaj filtreleme ve mesaj türü seçimleri yazılım alanlarında detaylı şekilde açıklanmıştır. CAN protokolünde kullanılan çeşitli devre topolojileri Altium Designer programında tasarlanan devre kartı üzerinde test edilmiştir. Benzer çalışmalarda benzer frekanslar uygulanarak sinyallerin formları incelenmiştir. Bu çalışmada fırçasız doğru akım motoru ile HVAC kumandasının kullanım yerine benzer bir sistem elde edilmiştir. Sürekli veri akışının olduğu elektriksel gürültülü çalışma ortamı oluşturulmuştur. Çıkış grafikleri ile beraber ilgili topolojilerin anlatımı sağlanmıştır. Kullanılması planlanan standartlara uygun topolojiler ile beraber yazılım satırlarına bu çalışma içerisinde yer verilmiştir. Böylelikle veri akışı sağlanırken verilerin doğru bir şekilde okuma işlemi ve grafikleri incelenmiştir. TVS koruma devresinde tepeden tepeye değeri 1,8 V ve çoklu TVS cihaz

devresinde ise tepeden tepeye değeri 1,6 V olarak ölçülmüştür. Filtreleme işlemi sonucunda tepeden tepeye değeri %12 azaltılmıştır. Elektriksel gürültülü ortamlarda filtreleme amaçlı çoklu TVS cihaz devresinin iyi sonuç verdiği görülmüştür.

**Teşekkür:** Bu çalışma Hamle programı kapsamında 1219040 numaralı proje ile TÜBİTAK TEYDEB tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Natale M D. Understanding and using the Controller Area Network. 2008.
- [2] Turgut M, Bayir R, Duran F. CAN Communication Based Modular Type Battery Management System for Electric Vehicles, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 24(3), 1392-1215,2018.
- [3] Zhang Y, Liu T, Chong T, Jia X, & Wu Z. Analysis of CAN bus encryption and decryption performance of different chips. In *Journal of Physics: Conference Series*, (Vol. 2006, No. 1, p. 012071). IOP Publishing. 2021.
- [4] Chen Y, Li Q, & Luo Q. Research on Fault Diagnosis of Vehicle-mounted Network Communication Based on CAN Bus. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 677, No. 4, p. 042049). IOP Publishing. 2019.
- [5] Elzbieta G. Communication in Automotive Networks Illustrated with an Example of Vehicle Stability Program: Part I- Control Area Network. *GSTF International Journal of Engineering Technology (JET)* 2(4), 2014.
- [6] Türker GF, & Kutlu A. Kontrol Alan Ağı (CAN) ve Tıbbi Cihaz Uygulamaları. *Akademik Bilişim 2013*, ID:18, Akdeniz Üniversitesi Hukuk Fakültesi, Antalya, 2013.
- [7] Yahui L. Servo control system based on optical fiber CAN communication. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 310, No. 3, p. 032021). IOP Publishing. 2019.
- [8] Huan LI. & Qinzhu W. EMC improvement of CAN bus in automotive bus. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1607, No. 1, p. 012035). IOP Publishing. 2020.
- [9] Murvay PS, ve Groza B. SAE J1939 ticari araç veri yolu protokolü için güvenlik eksiklikleri ve karşı önlemler. *Araç Teknolojisinde IEEE İşlemleri*, 67 (5), 4325-4339. 2018.
- [10] Durgun YE. Elektromobil araç kontrol sistemi tasarımı ve entegrasyonu (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi). 2019.
- [11] Alkan B, Akkan ÖÜLÖ, & Gören ÖÜA. Kapalı Döngü Aktüatörlerin Mobil Hidrolikte Can

- Protokolü İle Kontrolü. Proceedings Book, 96. 2021.
- [12] Richards P. A CAN Physical Layer Discussion. Microchip Technology Inc., U.S. 2002.
- [13] Yardım F. Bir tren eğitim simülatörünün CAN protokolü kullanarak gerçekleşmesi (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). 2010.
- [14] Jichici C, Groza B, Ragobete R, Murvay PS, & Andreica T. Effective Intrusion Detection and Prevention for the Commercial Vehicle SAE J1939 CAN Bus. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022.
- [15] Kından AB. ARM Cortex M0 serisi mikrodenetleyicilerden oluşan ayrık gömülü sistemler için can bus tabanlı yazılım güncelleme sistemi tasarımı (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). 2019.
- [16] Baier J. The Protection of USB 2.0 Applications. ANP002c, 2016-08-19, JB. 2016.
- [17] Ülle E. Design of CAN-node. 2018.
- [18] Lepkowski, J, Wolfe B. EMI/ESD protection solutions for the CAN bus. ICC2005, 02-16/02-24, 2004.

Research Article/Araştırma Makalesi

## Mathematical modeling of a photovoltaic/thermal (PV/T) collector

Gamze Soytürk<sup>1</sup>, Onder Kızıllkan<sup>1</sup>, Mehmet Akif Ezan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Mechanical Engineering, 32200, Isparta, Turkey

<sup>2</sup>Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, 35040, İzmir, Turkey

### Keywords

Photovoltaic/Thermal  
collector  
Solar energy  
Thermal efficiency  
Electrical efficiency

### Article history:

Received: 30.08.2022

Accepted: 30.12.2022

**Abstract:** Even though the performance of photovoltaic/thermal (PV/T) panels had been examined both computationally and experimentally for some time, the thermal models created in earlier research were mostly steady-state models for estimating the annual yields. In this study, the solar thermal collector and photovoltaic (PV) cells are combined to create the PV/T collector, and water-ethylene glycol is utilized as a coolant to lower the temperature of the PV panels. The goal of this study is to analyze a water-ethylene glycol-based PV/T collector numerically. Time-dependent dynamic analyzes were performed using the MATLAB software program. Investigations were also done into how the electrical power produced and the temperatures of the fluid outlet and PV/T surface changed over time. As a result of the annual analysis, the maximum power of PV/T is calculated as 155 W. Also, the maximum surface temperature of PV/T panel's is 56.62°C.

### Atıf için/To Cite:

Soytürk G. Kızıllkan Ö. Ezan MA. Mathematical modeling of a photovoltaic/thermal (PV/T) Collector. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(3), 144-152, 2022.

## Bir fotovoltaiik termal (PV/T) kolektörün matematiksel modellemesi

### Anahtar Kelimeler

Güneş enerjisi  
Fotovoltaiik termal kolektör  
Termal performans  
Elektriksel performans

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 30.08.2022

Kabul Tarihi: 30.12.2022

**Öz:** Fotovoltaiik-termal (PV/T) kolektörlerin performansı bir süredir hem hesaplamalı hem de deneysel olarak araştırılmış olsa da, daha önceki araştırmalarda oluşturulan termal modeller çoğunlukla yıllık verimleri tahmin etmek için kararlı hal modelleriydi. Bu çalışmada fotovoltaiik (PV) hücreler ve termal toplayıcı, PV/T toplayıcıyı oluşturmak için bir sisteme entegre edilmiştir ve su-etilen glikol, PV hücrelerinin sıcaklığını düşürmek için bir soğutucu olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, su-etilen glikol bazlı bir PV/T toplayıcıyı sayısal olarak analiz etmektir. Zamana bağlı dinamik analizler MATLAB yazılım programı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca PV/T yüzey sıcaklığının, akışkan çıkış sıcaklığının ve elde edilen elektriksel gücün zamanla değişimleri incelenmiştir.

## 1. Introduction

Renewable, also known as alternative energy resources, are resources that are inexhaustible and have the potential to be renewed. Since renewable energy resources are clean and environmentally friendly, energy production from these sources is increasing rapidly in our country and in the world. In addition to widely used energy sources like wind and solar energy, there are renewable energy resources such as hydrogen, biomass, and hydroelectricity used in different applications. Solar energy, which is widely used among renewable energy sources, has gained importance in

recent years to meet increasing energy needs. Solar energy is an inexhaustible, clean, environmentally friendly, free energy source that does not emit sulfur, carbon, and gas. The sun is the main energy source for all fuels used on earth, except nuclear fuels. Reactions occur in which hydrogen gas is constantly transformed into helium, the resulting mass difference is transformed into thermal energy and spreads, and a small part of this energy reaches the earth. Since gases such as carbon dioxide, ozone, and water vapor in the atmosphere absorb solar radiation, the sunlight reaching the earth is at low values. As can be seen in Fig. 1, our country has a very rich solar energy potential.

\*Corresponding author: gamzeyildirim@isparta.edu.tr

New technologies are developing to evaluate this energy, and studies in this field are increasing day by day.

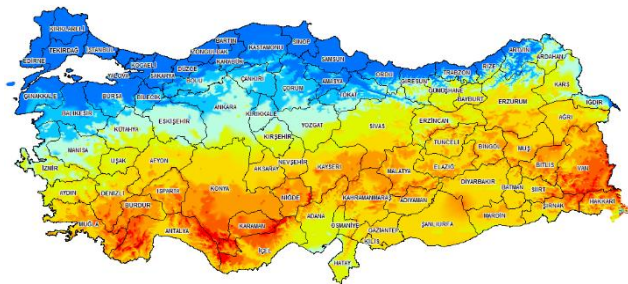


Figure 1. Sunbathing map of Türkiye [1]

Solar energy is mainly used for two different purposes: thermal energy and electrical energy. While various technologies are used for these aims, the efficiency of these technologies is increasing daily. Solar energy conversion to thermal energy takes place with solar collectors [2]. Photovoltaic technologies are widely used to obtain direct electrical power from solar energy [3].

Only 15% to 20% of solar energy can be converted into electricity when PV systems are utilized to generate electricity from it; the remainder is converted to thermal energy. This thermal energy can be easily absorbed by the PV device and causes the operating temperature to rise to 80°C [4]. The temperature of the PV solar panel reduces by about 0.2 – 0.5% for each degree Celsius as the solar radiation increases [5]. Large-scale heat extraction using a fluid circulation system that is induced or natural could solve this issue.

By simultaneously producing thermal and electrical energy, PV/T energy systems that feature combined PV cells and heat evacuation devices have developed an effective replacement for PV systems [6]. The PV/T systems seen in Figure 2, which are the result of innovative technologies in solar energy systems, allow the production of thermal and electrical energy at low temperatures by combining thermal collectors and photovoltaic cells. In these systems, PV cells in contact with the absorber surface co-convert some solar irradiation into electrical power, and the surplus heat energy produced in the PV cells is taken as the input of the thermal system. A heat carrier takes this heat from the surface and absorber cells when the system is in use. Thus, both the cells are cooled, thermal energy is obtained, and the panel's efficiency is increased [7]. PV/T panels could be categorized according to the various types of coolant used: water, air, and refrigerant. In addition, according to the physical design of the panels, they could be distinguished as concentrated, building integrated type, or flat plate type [8].

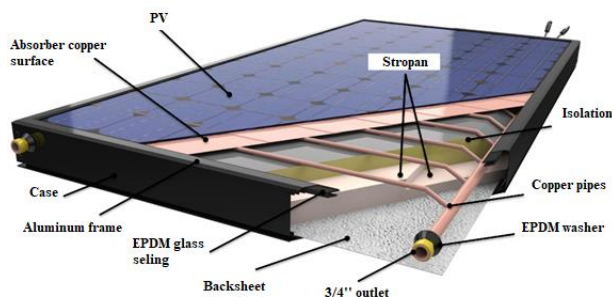


Figure 2. PV/T collector system elements [9]

Recently, study on PV/T systems has been increasing rapidly. Wolf [10], one of the first research articles on PV/T panels, evaluated the performances of a system in this study. His results showed that solar cogeneration systems are practically applicable. Rejeb et al. [11] focused on developing a PV/T and applied their designed model to optimize the operation of the PV/T panel in a semi-arid climate. Based on the energy balance of the collector's six major parts— PV cells, transparent cover, plate absorber, pipe, water in the pipe, and insulation—a model was created to predict the dynamic behavior of the collector. By comparing the experimental results that are available in the literature, they were able to demonstrate that there is a good agreement with the simulation results that were achieved. The electrical and heat energy of the tube collector and sheet were examined using the constructed model for four typical yearly days using the meteorological data for Tunisia. The effects of inlet water temperature, the number of glass covers, solar irradiation, and the conductive heat transfer coefficient between plate absorber and PV cells on thermal and electrical efficiency were also investigated using parametric analyses. A model for the simulation of a photovoltaic thermal collector in a transient regime was created and validated by Simonetti et al. [12]. On two hybrid PV/T solar tiles connected in series, they ran a two-week test in actual ambient weather conditions to validate the model. The average electrical efficiency was calculated by Joy et al. [13] to be 9.56% without cooling and 10.69% and 11.23% with water and water-ethylene glycol cooling, respectively. They carried out an experimental investigation of a PV panel using a mixture of water and water-ethylene glycol as the coolant. They also came to the conclusion that using water or water-ethylene glycol, respectively, resulted in the average thermal efficiency of the panel of 46.18% and 17.94%. Using nanofluids, Jia et al. [14] looked into the examination of a PV/T panel. Mathematical models of the PV/T panels were suggested in order to draw additional conclusions regarding how operating parameters affect the performance of the collector. They looked at the impact of nanofluid type and volume concentration on PV conversion efficiency, PV cell temperature, and thermal and electrical power in their

study. The results of a study on the effects of PV collector characteristics on performance were also discussed. They came to the conclusion that  $TiO_2$ /water nanofluid performed worse in the PV/T collector than  $Al_2O_3$ /water nanofluid did.

There are two various analyzes of PVT modeling in the literature. Firstly, it is based on numerical analysis by separately writing differential equations for all layers of the PV/T system. The second approach for the PV/T is making analyzes based on a single differential equation by considering it as a single layer. In this work, PV/T is considered as a single layer, and dynamic modeling is performed, in which both the PV/T surface temperature and the temperature changes of the heat transfer fluid over time.

## 2. Mathematical Modeling

In photovoltaic thermal systems, some solar irradiation is transformed into electrical energy, while a large part of it creates a thermal load on the material. This thermal load can reduce the collector's efficiency and damage the material's structure. PV/T systems have been designed to minimize this thermal load created by solar irradiation that cannot be converted into electrical energy in the collector. These hybrid systems can simultaneously provide hot air or domestic water and electrical power. The most widely used PV/T type is the system where hot water is provided. While these systems generate electrical energy with the modules on their upper surfaces, they store the domestic water with the copper plates on the back of the collector. Thanks to the working fluid in the collector, the temperature of the cell is diminished, and the electrical energy efficiency is raised [15]. The schematic representation of the PV/T panel is shown in Figure 3. As seen from the figure, the PV/T collector comprises a set of PV panel, a glass cover, pipes, an absorber surface, and insulation [13]. In Figure 3, the thermal resistance network of the PV/T panel is shown.

The following assumptions were considered in the PV/T mathematical modeling [16]:

- 1) PV/T panels are connected in series.
- 2) Air gaps between the glass cover and the PV cells are neglected.
- 3) PV/T is considered as a single layer, and heat transfer between layers is neglected.
- 4) PV/T mass and specific heat capacity are neglected.
- 5) Heat transfer by natural convection is neglected, and heat losses by wind are only considered for the upper surface of the collector.
- 6) The heat losses from the edge surfaces of the the PV/T panel are neglected.

- 7) The thermal capacities of the PV/T components are neglected. Only the thermal capacities of the heat transfer fluid are considered.

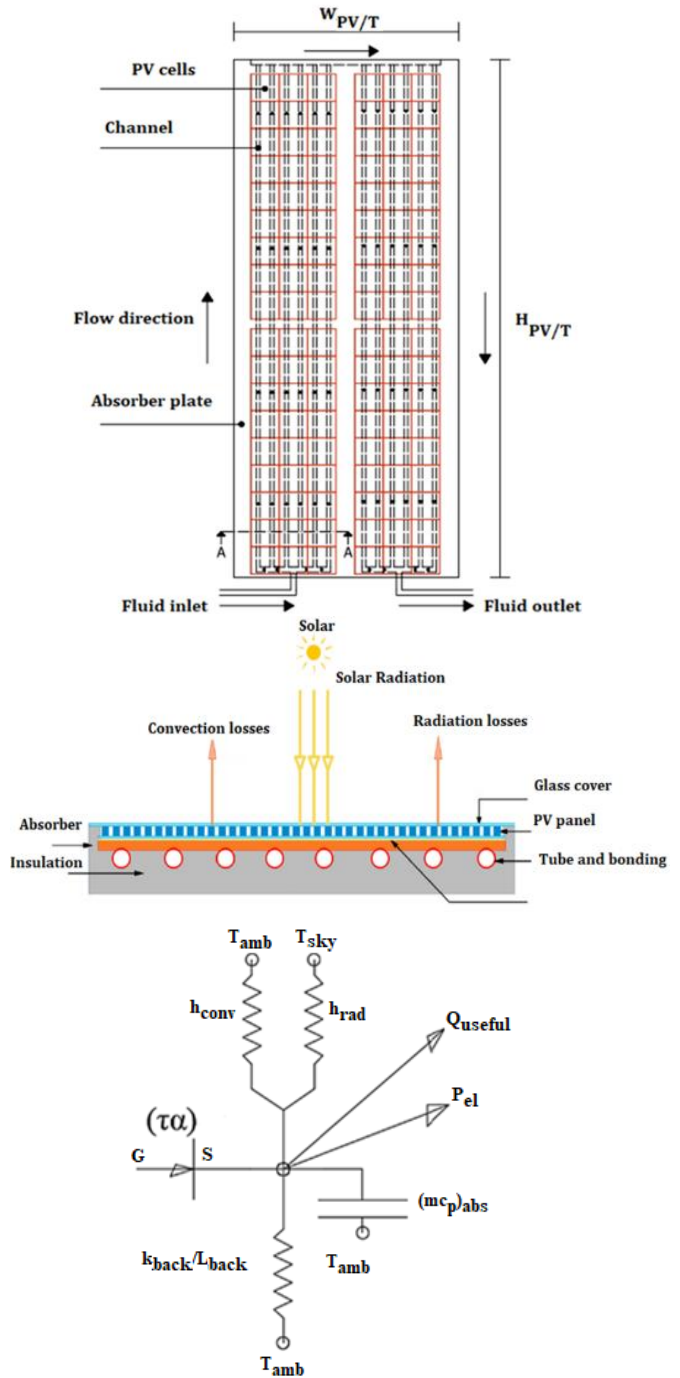


Figure 3. PV/T collector schematic and thermal resistance network (adapted from Ref. [15])



The properties of PV/T panel used in the mathematical modeling are given in Table 1.

Table 1. Properties of PV/T panel working with ethylene glycol –water mixture

<b>Basic data</b>		<b>Value</b>
PV/T length	L(m)	1.649 [9]
PV/T width	W (m)	0.992 [9]
PV/T total area	$A_{PV/T}$ (m <sup>2</sup> )	1.635
PV/T cell area	$A_{cell}$ (m <sup>2</sup> )	1.417
PV/T mass	$m_{PV/T}$ (kg)	3.75
PV/T specific heat	$C_{pPV/T}$ (J/kgK)	8081
PV/T conductivity	$k_{PV/T}$ (W/mK)	187.1
PV/T thickness	$\lambda_{PV/T}$ (m)	0.0065
Absorptivity coefficient	$\alpha$	0.85
Emissivity coefficient	$\epsilon$	0.88
Transmissivity coefficient	$\tau$	0.9
Packing factor	PF	0.9
<b>Electrical data</b>		
Cell type		p-Si
Reference efficiency	electrical $\eta_{ref}$ (%)	0.143
Temperature coefficient	power $\beta$ (1/K)	0.0046
<b>Thermal data</b>		
Mass flow rate	$\dot{m}_{HTF}$ (kg/s)	0.002
Number of tube	$n_{tube}$	10
External tube diameter	D (m)	0.008
Internal tube diameter	$D_i$ (m)	0.006
Distance between tubes	w (m)	0.099
Insulation thickness	$\lambda_{back}$ (m)	0.03
Insulation conductivity	$k_{back}$ (W/mK)	0.04
Boundary conductivity	$k_{bond}$ (W/mK)	250
Boundary width	$b_{bond}$ (m)	0.01
Boundary thickness	$\lambda_{bond}$ (m)	0.05
Boundary heat transfer coefficient	$h_{ca}$ (W/m <sup>2</sup> K)	30.3214

In this work, heat that had accumulated in various parts of the hybrid solar system was removed using ethylene glycol-water as a heat transfer fluid. 50% by weight ethylene glycol-water mixture has been shown to have a higher energy and exergy efficiency than pure ethylene glycol and a lower freezing point than pure ethylene glycol when used as the working fluid for PV/T. As a result, ethylene glycol-water mixture (50 percent by weight) was utilized as a working fluid that was appropriate for cold climates. Temperature-dependent thermophysical properties for ethylene glycol (50%) were formulated using curve-fit curves from the Engineering Equation Solver (EES) [17] database. Required property values in the following equation:

$$y = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + gT^6 \quad (1)$$

In the above equation, y is the thermophysical property (Cp, k, ρ, μ, Pr), and the coefficients a, b, c, d, e, f, and g are obtained for the temperature of T = 25°C and

pressure of P = 101.325 kPa. Various thermophysical property coefficients can be defined for different temperature and pressure values. These coefficients are obtained from the real table value with the help of curve-fitting methods. In determining the size of the linear regression error in curve fittings, the correlation coefficient 'R<sup>2</sup>' is determined. An R<sup>2</sup> value close to 1 means that the fitted curve best expresses the data. Table 2 shows the equation coefficients of the thermophysical properties of the water-ethylene glycol mixture (50% by weight).

Table 2. Coefficients of the thermophysical properties in Equation (1)

	<b>Cp</b> (kJ/kgK)	<b>k</b> (W/m <sup>2</sup> K)	<b>ρ</b> (m <sup>3</sup> /kg)	<b>μ</b> (kg/ms)	<b>Pr</b>
<b>a</b>	3202.88	0.37	1074.62	0	67.19
<b>b</b>	5.64	0.0006	-0.43	-0.0002	-2.48
<b>c</b>	-0.008	$3.17 \times 10^{-7}$	-0.002	0.000009	0.081
<b>d</b>	-0.0003	-50	0.000006	-42	-0.0029
<b>e</b>	0	0	0	$7.3 \times 10^{-9}$	0.00006
<b>f</b>	0	0	0	-80.3	-64.7
<b>g</b>	0	0	0	$2.39 \times 10^{-13}$	$1.98 \times 10^{-9}$

The heat transfer coefficient of the working fluid in the pipe by convection is calculated as follows:

$$h_f = \frac{Nuk}{D_i} \quad (2)$$

Here,  $h_f$  (W/m<sup>2</sup>K) is the heat transfer coefficient of the fluid, and k (W/mK) is the thermal conductivity of the fluid. To calculate the  $h_f$  value of the working fluid, the Reynolds (Re) number must first be determined.

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} \quad (3)$$

where ρ (kg/m<sup>3</sup>) is the density of the fluid, V (m/s) is the velocity of the fluid,  $D_i$  (m) is the inner diameter of the pipe, and μ (kg/ms) is the absolute viscosity. If  $Re < 2500$ , laminar flow occurs, if  $Re \geq 2500$ , turbulent flow occurs in the pipe [18].

L (m), the hydrodynamic inlet length, is expressed as the length from the pipe inlet where the shear stress (and, therefore, the friction factor) approaches the fully developed value by 2% [18]. The hydrodynamic inlet lengths in laminar and turbulent flow are calculated as follows:

$$L_{laminar} = 0.05ReD \quad (4)$$

$$L_{turbulent} = 10D \quad (5)$$

$$x^* = \frac{L}{RePrD} \quad (6)$$

Here,  $Pr$  is the Prandtl number, and  $D$  (m) is the hydraulic diameter.

The Nusselt number for thermally developing laminar flow is determined by Equation (7) and Equation (8):

$$Nu = 1.953(x^*)^{-\frac{1}{3}} \quad x^* \leq 0.03 \quad (7)$$

$$Nu = 4.364 + \frac{0.0722}{(x^*)^{-\frac{1}{3}}} \quad x^* > 0.03 \quad (8)$$

In the case of turbulent flow, the Nusselt number can be determined by Equation (9) as [18]:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{2}{3}Pr - 1\right)} \quad (9)$$

Here  $f$  is the friction factor, and it is determined by Equation (10) [15]:

$$f = \frac{1}{(0.79 \ln(Re) - 1.64)^2} \quad (10)$$

The total heat loss coefficient  $U_L$  (W/m<sup>2</sup>K) in the collectors is calculated by Equation (11). Here,  $U_e$  (W/m<sup>2</sup>K) heat losses from the side surfaces are disregarded, while the total heat loss from the collector is calculated with the sum of the heat losses from the upper and lower surfaces [18]:

$$U_L = U_t + U_b \quad (11)$$

where  $U_t$  (W/m<sup>2</sup>K) denotes the heat loss coefficient from the collector top surface, and  $U_b$  (W/m<sup>2</sup>K) represents the loss coefficient from the collector back surface [15]:

$$U_t = h_{conv} + h_{rad} \quad (12)$$

Here,  $h_{conv}$  (W/m<sup>2</sup>K) denotes the heat transfer coefficient with forced convection, and  $h_{rad}$  (W/m<sup>2</sup>K) denotes the heat transfer coefficient with radiation [15]:

$$h_{conv} = 2.2V_{wind} + 8.3 \quad (13)$$

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{PV/T}^2 + T_{sky}^2)(T_{PV/T} + T_{sky}) \quad (14)$$

$$T_{sky} = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad (15)$$

Here,  $V_{wind}$  (m/s) represents the average wind speed,  $T_{PV/T}$  (K) means the average PV /T surface temperature,  $T_{sky}$  (K) represents the sky temperature, and  $T_{amb}$  (K) the ambient temperature [19]:

$$U_b = \frac{k_{back}}{\lambda_{back}} \quad (16)$$

Here,  $k_{back}$  (W/mK) represents the thermal conductivity of the back surface insulation material, and  $\lambda_{back}$  (m) refers to the thickness of the back surface insulation material.

A one-dimensional steady-state model was developed to study the thermal and electrical efficiency of PV/T systems, and Hottel-Whillier equations were employed in these calculations. The overall energy balance of the PV/T collector is calculated by Equation (17) [16]:

$$\dot{Q}_u = F_R \left( I(\alpha\tau)(A_{PV/T} - A_{cell}\eta_{el}) - (A_{PV/T}U_L(T_{in} - T_{out})) \right) \quad (17)$$

Here,  $\dot{Q}_u$  (W) represents the useful heat supplied from the collector,  $I$  (W/m<sup>2</sup>) solar radiation,  $(\alpha\tau)$  absorbance-permeability coefficient,  $\eta_{el}$  collector electrical efficiency,  $A_{PV/T}$  (m<sup>2</sup>) collector surface area,  $A_{cell}$  (m<sup>2</sup>) PV/T cell area,  $T_{in}$  (K) fluid inlet temperature.

The collector heat gains factor ( $F_R$ ) is calculated by Equation (18) as follows [19]:

$$F_R = \frac{\dot{m}_{HTF}c_p}{A_{PV/T}U_L} \left( 1 - \exp\left(\frac{-A_{PV/T}U_L F'}{\dot{m}_{HTF}c_p}\right) \right) \quad (18)$$

Here,  $\dot{m}_{HTF}$  (kg/s) is the mass flow rate of the fluid,  $c_p$  (J/kgK) is the specific heat capacity of the fluid, and  $F'$  is the collector efficiency factor.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{w \left( \frac{1}{U_L(D + (W - D)F)} + \frac{1}{h_{ca}} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right)} \quad (19)$$

Here,  $w$  (m) is the space between the pipes through which the PV/T fluid passes,  $D$  (m) is the outer diameter of the tube,  $h_{ca}$  (W/m<sup>2</sup>K) is the boundary heat transfer coefficient,  $D_i$  (m) is the inner diameter of the tube,  $h_f$  (W/m<sup>2</sup>K) represents the heat transfer coefficient of the fluid.

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(w - D)}{2}\right)}{\frac{m(w - D)}{2}} \quad (20)$$

The value of  $m$  here is calculated by Equation (21):

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{(k\lambda)_{PV/T}}} \quad (21)$$

$P_{el}$ , which is the electrical power gained from PV/T, is calculated by Equation (22) [16]:

$$P_{el} = \eta_{el} I A_{cell} (\alpha \tau) \quad (22)$$

Average PV/T temperature  $T_{PV/T}$  is calculated by Equation (23) [15]:

$$T_{PV/T} = T_{in} + \left( \frac{\dot{Q}_u}{A_{PV/T} F_R U_L} \right) (1 - F_R) \quad (23)$$

Also, the fluid mean outlet temperature  $T_{HTF}$  (K) can be found by Equation (24):

$$T_{HTF} = \dot{Q}_u + \frac{\dot{m}_{HTF} c_p (T_{in} - T_{out})}{m_{HTF} c_p} + T_{out} \quad (24)$$

Electrical and thermal efficiencies of PV/T could be calculated using Equation (25) and Equation (26) [20]:

$$\eta_{el} = \eta_{ref} \left( 1 - \beta \left( T_{PV} - T_{amb} \right) \right) \quad (25)$$

Here,  $\eta_{ref}$  denotes the electrical efficiency at the reference point, and  $\beta$  denotes the temperature power coefficient.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{HTF} c_p (T_{HTF} - T_{in})}{I (\alpha \tau) A_{PV/T}} \quad (26)$$

The total efficiency of the PV/T system is determined by Equation (27):

$$\eta_{PV/T} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (27)$$

### 3. Results and Discussion

This study develops and validates a model for the simulation of a hybrid PV/T panel in the transient regime. Generally speaking, the model was created using MATLAB simulation software. For the time-dependent dynamic models to be made in this study, it is necessary to determine the annual solar radiation, environmental temperature, and wind speed changes of İzmir province. For this purpose, yearly meteorological data of İzmir province were taken from the Meteonorm [21] library in TRNSYS software and shown in Figure 4.

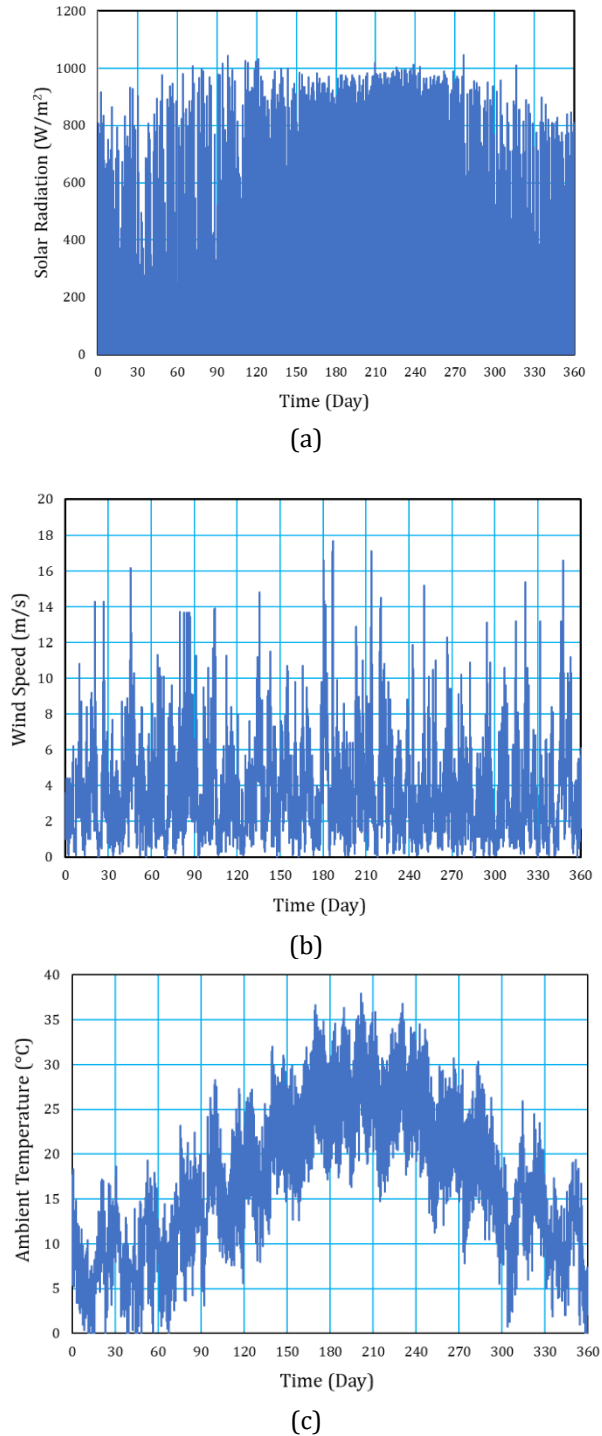


Figure 4. Annual meteorological data for İzmir (a) Solar irradiation intensity (b) Wind speed (c) Ambient temperature

In Figure 5, the graph of variation of the collector flow factor ( $F''$ ) and the dimensionless number  $(\dot{m} c_p) / (A U_L F')$  in the reference study by Duffie and Beckman [22] was shown to validate the current mathematical model. As can be seen from the figure, the trend in the PV/T mathematical modeling and the trend in the reference study are compatible with each other.

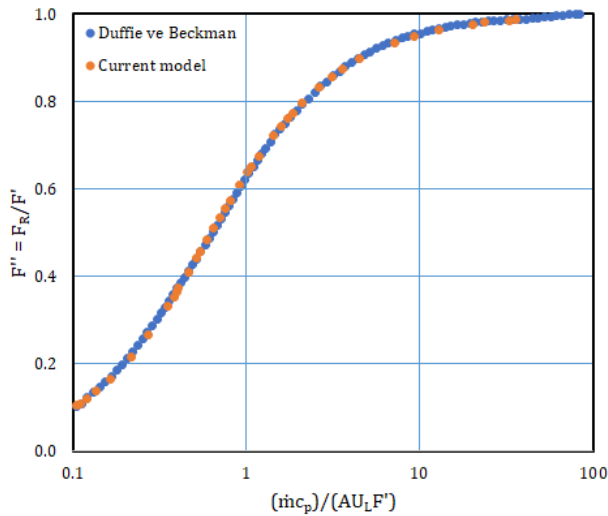


Figure 5. PV/T collector flow factor  $F''$  as a function of  $(\dot{m}_{HTF} C_p)/(A_{PV/T} U_L F')$

Figure 6 depicts the PV/T surface temperature's fluctuation over the first three days of January. The PV/T surface temperature rises as solar irradiation rises, as shown in the figure. The three-day analysis produced a maximum panel temperature estimate of about 40°C.

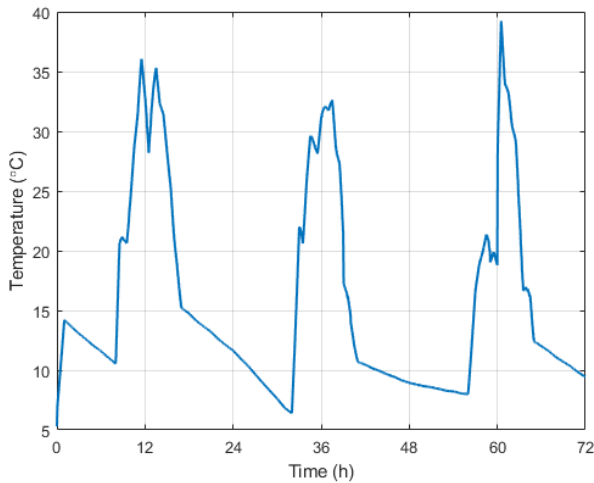


Figure 6. Variation of the PV/T surface temperature with time

Figure 7 shows the change in the heat transfer fluid's output temperature over time. The output temperature of the heat transfer fluid rises with an increase in solar radiation, as seen in the image. The maximum exit temperature of the heat transfer fluid was determined

to be almost 14°C as a result of the three-day analysis.

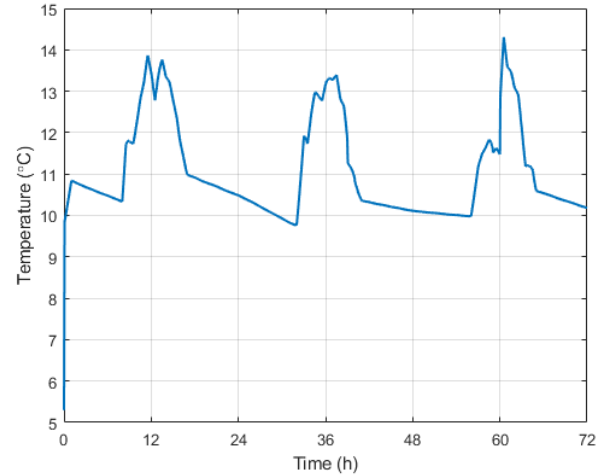


Figure 7. Variation of the outlet temperature of the heat transfer fluid with time

The electrical power's change over time is depicted in Figure 8. Throughout the analysis time, the solar radiation value changed simultaneously with the electrical power produced by the PV collector and the PV/T panel, and the highest electrical efficiency was attained at noon when the radiation was at its highest.

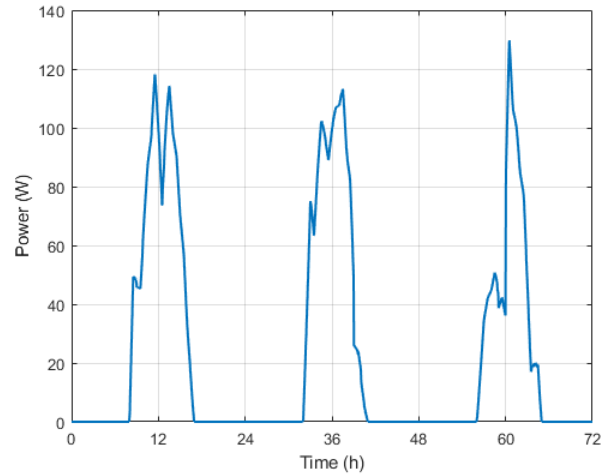


Figure 8. Variation of the electrical power with time

Figure 9 depicts the fluctuation in the working fluid outlet temperature and PV/T surface temperature for the chosen three days. The change of the PV/T surface temperature and the working fluid outlet temperature follow the same trend, as shown in the figure. In rare circumstances, the working fluid's output temperature climbs above the PV/T surface temperature. This is due to the fact that just the mass and specific heat of the working fluid are taken into account in the PV/T mathematical modeling, but the PV/T has no resistance and heats up and cools down quickly.

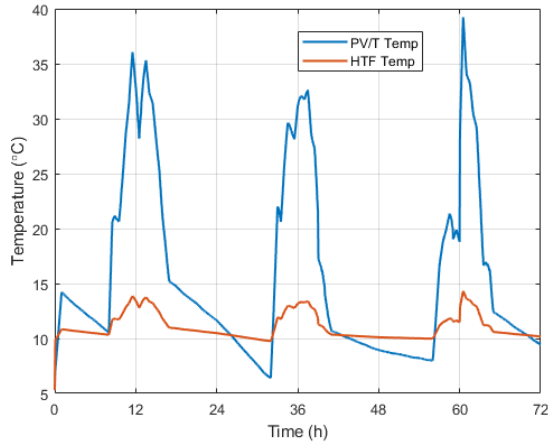


Figure 9. Variation of the outlet temperature of the heat transfer fluid and PV/T surface temperature with time

Figure 10 shows the thermal efficiency based on the  $(T_{in} - T_{amb}) / I_{solar}$  ratio, which is an indicator for evaluating the performance of PV/T. As can be observed in the figure, for flow rates of 0.03, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.36 kg/s, there was a tendency for thermal efficiency to decrease as the  $(T_{in} - T_{amb}) / I_{solar}$  increased due to the rise in heat losses due to the temperature difference between the working fluid and the ambient air. In addition, verification studies were carried out considering the reference study of Kim and Kim [23], and the average efficiency at a flow rate of 0.36 kg/s reached the highest value of 40% when the difference between the inlet temperature and the ambient temperature was zero. As seen in the figure, in the current study, thermal efficiency reaches 40% from 26% by raising the mass flow rate from 0.03 kg/s to 0.36 kg/s under 800 W/m<sup>2</sup> radiation conditions.

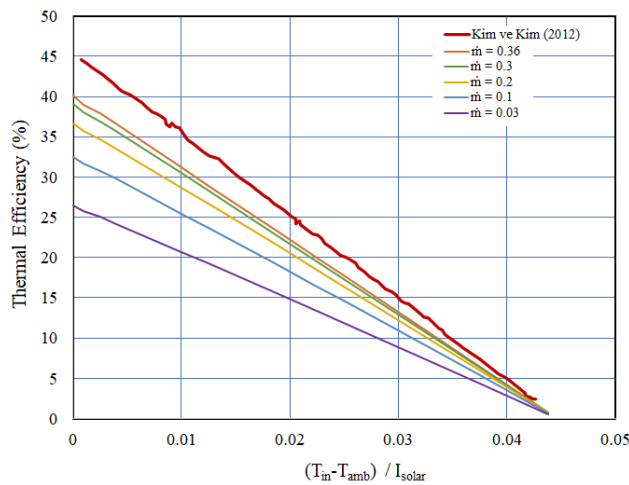


Figure 10. PV/T thermal efficiency curve according to  $\Delta T / I_{solar}$

The variation of the electrical efficiency of PV/T according to the temperature difference is shown in

Figure 11. As in thermal efficiency verification studies, electrical efficiency variation was observed for flow rates of 0.03, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.36 kg/s depending on the  $(T_{in} - T_{amb}) / I_{solar}$  ratio. As can be seen in the figure, verification studies were carried out with the reference study of Kim and Kim [23], and it was observed that the  $\Delta T / I_{solar}$  ratio and the electrical efficiency tended to decrease.

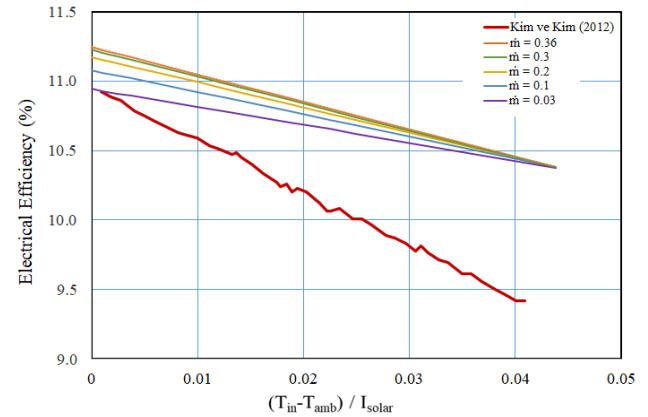


Figure 11. PV/T electrical efficiency curve according to  $\Delta T / I_{solar}$

#### 4. Conclusions

In this study, a mathematical model was conducted with the purpose of validating the water-ethylene glycol-based PV/T panel. Based on the energy balance of the PV/T panel, which is made up of several parts, including PV cells, insulation, transparent cover, pipes, plate absorber, and fluid inside the pipe, a model has been created to predict the dynamic behavior of the PV/T panel. Comparing the data found in the literature allowed us to confirm that the obtained theoretical results were in good agreement. During the analyses, the mass flow rate was taken as 0.02 kg/s, and the change of PV/T surface temperature, fluid outlet temperature, and electrical power over time was calculated for three days selected in İzmir conditions. As a result of analysis, the maximum surface temperature of PV/T panel's is 56.62°C. Also, the maximum power of PV/T is calculated as 155 W.

#### Acknowledgment

This research was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with project number 220N405.

#### References

- [1] GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası) <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (Date of Access: 26.08.2022).
- [2] Soytürk Yıldırım G. Investigation of the use of solar energy in the storage and heating applications with phase changing material. MSc Thesis, Süleyman Demirel University, Isparta, Turkey, 2018 (In Turkish).
- [3] Kazemian A, Taheri A, Sardarabadi S, Ma T, Fard MP, Peng J. Energy, Exergy and Environmental Analysis of Glazed and Unglazed PVT System Integrated with Phase Change Material: An Experimental Approach. *Solar Energy*, 201, 178-189, 2020.
- [4] Ma T, Yang H, Zhang Y, Lu L, Wang X. Using Phase Change Materials in Photovoltaic Systems for Thermal Regulation and Electrical Efficiency Improvement: A Review and Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1273-1284, 2015
- [5] Babayan M, Mazraeh AE, Yari M, Niazi NA, Saha SC. Hydrogen Production with a Photovoltaic Thermal System Enhanced by Phase Change Materials, Shiraz, Iran Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1262-1278, 2015
- [6] Gül M, Akyüz E. Hydrogen Generation from a Small-Scale Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Electrolyzer System: Numerical Model and Experimental Verification, *Energies*, 13, 2997, 2020.
- [7] Sachit FA, Rosli MAM, Tamaldin N, Misha S, Abdullah AL. Nanofluids Used in Photovoltaic Thermal (PV/T) Systems: A Review. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 599-611, 2018.
- [8] Zulkepli A, Ibrahim H, Alias A, Azran Z, Basrawi F. Review on the recent developments of photovoltaic thermal (PV/T) and proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) based hybrid system. *MATEC Web of Conferences*, 2016.
- [9] Solimpeks. <https://www.solimpeks.com.tr/> (Date of Access: 25.03.2022)
- [10] Wolf M. Performance Analyses of Combined Heating and Photovoltaic Power Systems for Residences, *Energy Conversion*, 16 (1), 79-90, 1976.
- [11] Rejeb Q, Dhaou H, Jemni A. A Numerical Investigation of a Photovoltaic Thermal (PV/T) Collector. *Renewable Energy*, 77, 43-50, 2015
- [12] Simonetti R, Molinaroli L, Manzolini G. Development and Validation of a Comprehensive Dynamic Mathematical Model for Hybrid PV/T Solar Collectors. *Applied Thermal Engineering*, 133, 543-554, 2018.
- [13] Joy B, Zachariah R. Experimental Investigation and Comparative Study of PV Thermal Water- Ethylene Glycol Collector and PV System. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*, 2(9) ,2394-0697, 2015.
- [14] Jia Y, Ran F, Zhu C, Fang G. Numerical Analysis of Photovoltaic-Thermal Collector Using Nanofluid as a Coolant. *Solar Energy*, 196, 625-636, 2020.
- [15] Benli F. Experimental comparison of photovoltaic (PV) and photovoltaic-thermal (PV-T) collectors. MSc Thesis, Osmaniye Korkut University, 2018 (In Turkish).
- [16] Sakellariou E, Axaopoulos P. An Experimentally Validated, Transient Model for Sheet and Tube PVT Collector. *Solar Energy*, 174, 709-718, 2018.
- [17] Engineering Equation Solver (EES). <https://fchartsoftware.com/ees/> (Date of Access: 25.03.2022)
- [18] Çengel YA, Ghajar A. Heat and Mass Transfer, McGraw Hill Education, 5e, 2014.
- [19] Kalogirou SA. Solar Energy Engineering Processes and System, Elsevier, 2015.
- [20] Yazdanifard F, Ebrahimnia-Bajestan E, Ameri Mehran. Investigating the Performance of a Water-Based Photovoltaic/Thermal (PV/T) Collector in Laminar and Turbulent Flow Regime. *Renewable Energy*, 99, 295-306, 2016.
- [21] Energy Economics, Energy Charting Tool. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy/economics/energy-charting-tooldesktop.html> (Date of Access: 20.03.2022).
- [22] Duffie JA, Beckman WA. Solar Engineering of Thermal Processes (4th ed.). New York: Wiley, 2013.
- [23] Kim JH, Kim JT. Comparison of Electrical and Thermal Performances of Glazed and Unglazed PVT Collectors. *International Journal of Photoenergy*, 2012.



Research Article/Orijinal Makale

## Trajectory tracking performance comparison of kinematic bicycle model with LQR and Lyapunov-based controllers on a circular trajectory

Halit Ege Ceyhun<sup>ID</sup>\*1, Aytaç Gören<sup>ID</sup>1

<sup>1</sup>Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechatronics Engineering, Izmir, Turkey

### Keywords

Wheeled mobile robot  
LQR  
Lyapunov  
Kinematic bicycle model  
Trajectory tracking

### Article history:

Received: 13.06.2022  
Accepted: 31.12.2022

**Abstract:** This paper focuses on comparative results of two different controllers applied to kinematic bicycle model with rear wheel contact point to the ground as the reference point. The wide range of representation of different types of robots and vehicles of kinematic bicycle model is the main reason for this model selection. This paper has three main sections. The first section of the paper is mathematical modeling of the model. The second section is describing the utilized control techniques. The last section shares results of the simulations. The simulations have been carried out with pure feedback signals in absence of noise. The compared two controllers are an (Linear Quadratic Regulator)LQR controller and a Lyapunov based controller. The objective in the simulations is to track and complete a given constant radius trajectory. Last section includes comparison of results by analyzing statistical values of a defined error signal.

### To Cite/Atıf için:

Ceyhun HE. Gören A. Trajectory tracking performance comparison of kinematic bicycle model with LQR and Lyapunov-based controllers on a circular trajectory. International Journal of Technological Sciences, 14(3), 153-162, 2022.

## LQR ve Lyapunov temelli iki kontrolcünün kinematik bisiklet tipi model için güzergah izleme performansının dairesel bir güzergahta karşılaştırması

### Anahtar Kelimeler

Mobil robot  
LQR  
Lyapunov  
Kinematik bisiklet modeli  
Güzergah takibi

### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 13.06.2022  
Kabul Tarihi: 31.12.2022

**Öz:** Bu makale farklı kontrol tekniklerinin arka tekerleğinin yere temas noktasını referans alan kinematik bisiklet tipi robot üzerine uygulamasının karşılaştırmalı sonuçlarına odaklanmıştır. Kinematik bisiklet tipi modelin seçilmesinin ardında yatan asıl sebep, bu modelin günümüzde kullanılan birçok robot modelini ve aracı temsil edebilmesidir. Çalışma üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm robotun modellenmesini içermekte. İkinci bölüm uygulanan kontrol teknikleri ile ilgili çalışmaları barındırmakta. Son bölüm ise simülasyon sonuçlarını paylaşmaktadır. Kullanılan sinyaller gürültüsüz ortamda bir geribesleme sinyali için oluşturulmuştur. Karşılaştırılan kontrolcüler (Linear Quadratic Regulator)LQR ve bir Lyapunov temelli kontrolcülerdir. Simülasyonların ana amacı modelin verilen sabit yarıçaplı güzergahı takip ederek tamamlamasıdır. Son bölüm içerisinde tanımlanan hata sinyalinin istatistiksel olarak değerlendirilmesini içerir.

## 1. Introduction

Nowadays, the achievements in mobile robotics allow advanced applications in real life. One of the popular tasks for autonomous and mobile robots is trajectory tracking. This task requires mathematical model of the mobile robot and a proper control approach to minimize the total deviation from a desired trajectory.

In this research, the main aspect is to investigate the control performances of two different controllers which have been designed for a kinematic bicycle type wheeled mobile robot (WMR). The rear tire contact point assumed as a reference to accomplish trajectory tracking task. Linear Quadratic Regulator (LQR) and Lyapunov based controllers are the applied control

\* İlgili yazar/Corresponding author: halitege.ceyhun@ogr.deu.edu.tr

approaches in this paper. MATLAB/Simulink environment has been used to simulate the trajectory tracking performances of the WMR.

Robotic motion, kinematic models and well-known control techniques are presented in many references. While [1-3], [6] and [16] are covering most of these topics, other references such as [5] is concentrated on nonlinear control techniques and [4] is scoping Lyapunov stability and regulation problem.

We can see that, using a linear controller is a practical approach to the problem as stated in [7]. This paper uses a differential drive type robot. Then subjects it to a coordinate transformation by using reference frames and input transformation. PI tuning with LQR is realized in 3-dimensional state space system. In [8] a dynamic model of bicycle type robot is used together with its kinematic model. By this manner, a Lyapunov function is used for control. Stability through Barbalat condition is studied.

The kinematic model and linearization through input transformation is validated and a control scheme shown in [9]. This paper also uses a differential drive robot in 3-dimensional error system linearized around origin. Linear feedback control is proposed with pole placement approach to regulate the desired polynomials.

In [10] a 3-dimensional state space system is considered under Lyapunov conditions. Dynamic model is utilized for the related study. [11] follows a similar approach for a welding application combined with a wheeled mobile robot control.

In [12] a differential drive model is the subject of feedback linearizing control to accomplish "Follow the Carrot" algorithm by replacing system nonlinearities with desired dynamics. Position and orientation error form the error system. [17] and [18] are detailed and explanatory sources for optimal control theory.

An inclusive reference for path tracking methods of autonomously steering vehicles is [13]. Dynamic and kinematic models are shown together with geometric tracking algorithms such as Pure Pursuit and Stanley Control. Kinematic and optimal control including LQR form are also investigated deeply.

[14] considers center of wheelbase as the reference point of the kinematic model. Therefore, another 3-dimensional approach is made by LQR-LMI tuning for a Lyapunov based controller.

[15] Both forward and backward motions are considered for tractor trailer wheeled robot. Lyapunov

based approach is stated for different types of trajectories. Slip condition is also considered.

Instead of taking statically balanced models [19] takes an e-scooter model and investigates a higher dimensional state space system. This new system also takes self-stabilization as an additional task other than motion control.

[20] takes even larger state space system with 12 degrees of freedom. Tracking problem simulations are done for PD and  $H_\infty$  controllers then tested for PD controller.

A time-varying LQR control is applied in [22] for tracking task. This paper uses a 4-dimensional state space system as in our study.

Contributions to WMR studies in "Automatic Control and Robotics Laboratory" of Dokuz Eylül University focus on linear and non-linear controller design, navigation, sensor fusion and implementations on experimental models. [23] realizes a path following task for autonomous vehicles by GPS measurement. [24] considers relative positioning of a robot together with trajectory tracking and obstacle avoidance task. Sensory measurement and indoor mapping by a LIDAR are researched deeply in order to ensure autonomous navigation in [25]. Alongside traditional approaches, a neural network-based control approach is applied to a non-holonomic model using multiple sensors in [26].

As another perspective, [27] takes the standard form of a PI controller and combine it with a nonlinear gain and control a second order system. Stability analysis is done for different criteria. Then all these considerations are subjected to a higher order system which is the active suspension system. Reference tracking performances are evaluated for different system parameter settings. On the other hand [28] suggests a hybrid control approach by including a neural network to the tuning part. Then tracking performances are evaluated and compared for regular PD, Anfis and a hybrid controller constructed by both.

### 1.1. Problem Definition

Our work, unlike many applications, takes a four-dimensional state space for kinematic bicycle model. Considered model uses reference as rear wheel center. Reference inputs are longitudinal velocity and rate of change in steering angle. This consideration allows us to model many of the real-life robots and vehicles. Therefore, this paper can be considered as a case study for a wide range autonomous wheeled mobile robots and a large class of vehicle family. Cars, busses,



motorcycles, scooters can be given as examples of this model.

Moreover, the problem of tracking for this type of model is taken as the studied topic to test the tracking controller performances. As stated above, the model is a representative of frequently encountered vehicle families and therefore tracking control for these types of vehicles becomes vital for the futuristic autonomous driving scenarios. This paper searches the less deviating tracking control for that matter.

## 2. Mathematical Modeling

The rear wheel reference kinematic bicycle model is a very common model for a family of wheeled mobile robots. Equation 1 show the states for this type of model. First two states  $x$  and  $y$  are taken as planar position information. Next states are orientation angle of the robot/vehicle and steering angle. They are shown with  $\theta$  and  $\varphi$  respectively. As a result, a 4-dimensional state vector is created.

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \\ \varphi \end{pmatrix} \quad (1)$$

The main principle is to apply a non-holonomic constraint for two wheels. The wheels are assumed not sliding sideways and motion is obtained only by rolling. This assumption results two constraints for two wheels.

In Figure 1, coordinates of the robot can be seen as a vector of rear wheel cartesian coordinates, front wheel cartesian coordinates, orientation angle of whole body and steering angle. This is a redundant representation of this robot. Because with a constant wheelbase “ $L$ ” it is possible to rewrite one wheel’s coordinates by using the other one as in Equation 2 and 3.

$$x_{front} = x_{rear} + L \cos(\theta) \quad (2)$$

$$y_{front} = y_{rear} + L \sin(\theta) \quad (3)$$

As can be seen in Equation 4 and 5, by derivation of these equations with respect to time, evolutions of states in time are obtained.

$$\dot{x}_{front} = \dot{x}_{rear} - \dot{\theta}L \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\dot{y}_{front} = \dot{y}_{rear} + \dot{\theta}L \cos(\theta) \quad (5)$$

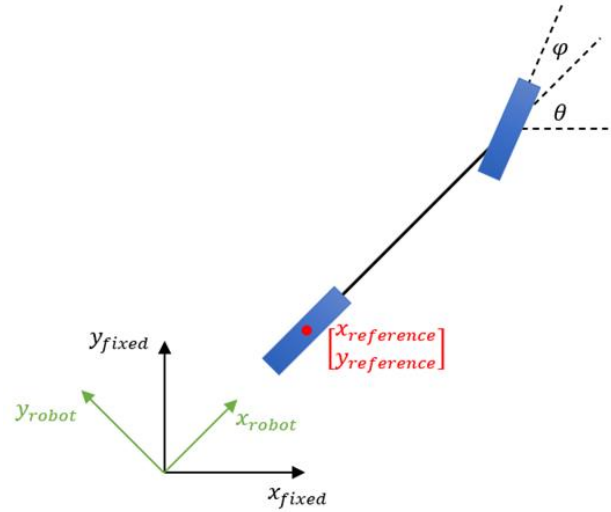


Figure 1. Kinematic Rear Wheel Reference Bicycle Model

If this new representation is used for writing the wheel constraints equation, the input vector fields can be obtained by Equation 6 and 7.

$$\dot{x}_{rear} \sin(\theta) - \dot{y}_{rear} \cos(\theta) = 0 \quad (6)$$

$$\dot{x}_{front} \sin(\theta + \varphi) - \dot{y}_{front} \cos(\theta + \varphi) = 0 \quad (7)$$

It is possible to rewrite this in matrix form. Integrability of the input vector fields will be guaranteed by this way. For simplicity of notation, rear subindices are dropped. Hence, coordinates are changed to a vector containing only one pair of cartesian coordinates of rear wheel and two angular coordinates with orientation angle of the body and steering angle. Matrix form of the constraints on the wheels can be seen in Equation 8.

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta + \varphi) & -\cos(\theta + \varphi) & -L \cos(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = 0 \quad (8)$$

The vector fields which satisfy these constraints are found and can be used for determination of input vector fields. Non-holonomy condition is satisfied for this model by a null space solution.

Obtained vectors can be seen below in mathematically defined rear wheel kinematic bicycle model. By this knowledge it is possible to write the rear wheel reference kinematic bicycle model in state space form as in Equation 9.

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \tan(\varphi)/L \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u_2 \quad (9)$$

Inputs are chosen to be linear velocity of body and angular velocity (10) as rate of change of steering angle (11) and can be written as:

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (10)$$

$$w = \dot{\varphi} \quad (11)$$

However, the resulting model is highly nonlinear and a direct linearization by derivation gives a set of equations which do not represent the robot motion. Therefore, a feedback linearization through coordinate transformation is done. Then control approaches are applied for this new system representation. To get this new system, a reference state vector must be defined as in Equation 12. Ref subindices represent reference.

$$p_{ref} = \begin{pmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \\ \theta_{ref} \\ \varphi_{ref} \end{pmatrix} \quad (12)$$

By the measured states, the error vector is obtained and represented in a rotated coordinate system attached to the rear wheel of the kinematic bicycle type model. Full state measurement is assumed to be available. Error system can be defined as in Equation 13.

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{ref} - x \\ y_{ref} - y \\ \theta_{ref} - \theta \\ \varphi_{ref} - \varphi \end{pmatrix} \quad (13)$$

The transformation matrix in Equation 13 has the form of a planar rotation by the orientation angle of the model. This rotation is applied to x and y coordinates of model. However, angular states are expressed in their natural form. Followed procedure is allowing a definition of an error system which is described on longitudinal and lateral dynamics of the model. By rewriting the reference states like the model's kinematic equations, the error system is rewritten clearly. Equations 14, 15, 16 and 17 show time derivatives of the reference states.

$$\dot{x}_{ref} = v_{ref} \cos(\theta_{ref}) \quad (14)$$

$$\dot{y}_{ref} = v_{ref} \sin(\theta_{ref}) \quad (15)$$

$$\dot{\theta}_{ref} = \frac{v_{ref} \tan(\varphi_{ref})}{L} \quad (16)$$

$$\dot{\varphi}_{ref} = w_{ref} \quad (17)$$

Thanks to the differential flatness and constant parameters of the model, it is possible to obtain these reference states of the system. However, an additional calculation is necessary to express the curvature of desired trajectory. By this way it is possible to represent

reference steering angle change rate and therefore rate of change of steering angle.

Reference orientation of the trajectory is calculated in Equation 18.

$$\theta_{ref} = \tan^{-1} \left( \frac{\dot{y}_{ref}}{\dot{x}_{ref}} \right) \quad (18)$$

Reference linear velocity of the trajectory is calculated in Equation 18.

$$v_{ref} = \sqrt{\dot{x}_{ref}^2 + \dot{y}_{ref}^2} \quad (19)$$

Reference curvature and instantaneous center of rotation of the trajectory are calculated in Equation 20 and 21.

$$\kappa_{ref} = \frac{\dot{y}_{ref} \dot{x}_{ref} - \ddot{x}_{ref} \dot{y}_{ref}}{(\dot{x}_{ref}^2 + \dot{y}_{ref}^2)^{3/2}} \quad (20)$$

$$R_{ref} = \frac{1}{\kappa_{ref}} \quad (21)$$

Reference steering angle and its rate of change can be directly found by derivation of Equation 22.

$$\varphi_{ref} = \tan^{-1} \left( \frac{L}{R_{ref}} \right) \quad (22)$$

Where,  $R_{ref}$  is the distance between instantaneous center of rotation and rear wheel. L is the wheelbase of the robot. By this way, the rotated error equations are derived for cartesian coordinates. Then, reference expressions are used. Note that angular states are kept the same for error system generation.

Evolution of error states with respect to time can be seen in Equation 23, 24, 25 and 26. This procedure is done by calculating Equation 13 with the terms calculated in Equations 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 and 22.

$$\dot{e}_1 = v_{ref} \cos(e_3) - v + \frac{v \tan(\varphi)}{L} e_2 \quad (23)$$

$$\dot{e}_2 = v_{ref} \sin(e_3) - \frac{v \tan(\varphi)}{L} e_1 \quad (24)$$

$$\dot{e}_3 = \frac{v_{ref} \tan(\varphi_{ref})}{L} - \frac{v \tan(\varphi)}{L} \quad (25)$$

$$\dot{e}_4 = \dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi} \quad (26)$$

This form still has a highly nonlinear relation. Small angle assumption is made and artificial inputs are introduced by redefining original inputs. Redefined inputs are given in Equation 27, 28 and 29.

$$u_1 = v_{ref} \cos(e_3) - v \quad (27)$$

$$u_2 = \dot{e}_3 \quad (28)$$

$$u_3 = \dot{e}_4 \quad (29)$$

New error system can be represented in linear time-invariant form if and only if reference linear speed and reference steering angle are constants. This is shown in Equation 30.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \\ \dot{e}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{v_{ref} \tan(\varphi_{ref})}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{v_{ref} \tan(\varphi_{ref})}{L} & 0 & v_{ref} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

To avoid dynamic effects which can occur on tires and therefore on lateral motion, motion of the model has been investigated using relatively smaller velocities. In this work a constant radius circular path is considered and details are presented in next sections.

### 3. Control Methods

In this study two control approaches are applied and simulation results are compared. These are Linear Quadratic Regulator and a Lyapunov based controller.

#### 3.1. Linear Quadratic Regulator (LQR)

In LQR design, linear quadratic cost function is used and shown in Equation 31.

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (31)$$

Where Q and R matrices are diagonal weights matrices for the states and inputs. In this case, states correspond to errors and inputs are the artificial ones shown in Equations 27, 28 and 29. The feedback is obtained in a static manner. Thus, standard form can be rewritten as in Equation 32.

$$J = \int (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (32)$$

In this research, the inputs are not penalized but states are weighted differently. State and input weights are expressed in Equation 33 and 34. The selection of weights are done by inspecting the Equations 27, 28, 29 and 30. Since  $e_3$  and  $e_4$  represent the error on angular states in the original system and the rotation is done by the orientation angle itself, more weights are given to those states. Another supporting observation can be pointed out by the fact that  $e_1$  and  $e_2$  are highly dependent on both angular error states. Input weighting is not done and all virtual inputs are taken with the same weights. Therefore, Equations 32 and 33 would be a viable selection for weights matrices.

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Free system has two eigenvalues at origin and two complex eigenvalues at  $0 \pm 0.6283i$ . LQR strategy places the eigenvalues to -31.6228, -31.6212, -2.9531, -0.7670. Corresponding gain matrix can be seen in Equation 35.

$$K = \begin{bmatrix} 3.5604 & -2.1689 & -0.2213 & 0 \\ -0.2213 & 1.6032 & 31.7809 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 31.6228 \end{bmatrix} \quad (35)$$

#### 3.2. Lyapunov Based Controller

Lyapunov functions are widely used in many fields of nonlinear control application. This paper follows a control approach with a storage function which is semi-positive definite for any time while its derivative is negative semi-definite for any time instant. At the origin the storage function is equal to zero. Considered storage function is constructed by quadratic terms and a trigonometric term. Main reason behind this selection of structure is to stress out the property of boundaries of each function type. While quadratic functions have a lower bound at zero, trigonometric functions are defined in the range of  $\pm 1$ . Storage function and its derivative can be found in Equation 36 and 37.

$$V = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2 + e_4^2) + \frac{1 - \cos(e_3)}{k_2} \quad (36)$$

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_4 \dot{e}_4 + \frac{\sin(e_3)}{k_2} \dot{e}_3 \quad (37)$$

For this approach, error system can be rewritten by releasing the small angle approximation and keeping the input transformation the same. A non-linear system is defined in Equation 38, 39, 40 and 41.

$$\dot{e}_1 = u_1 + \left( \frac{v_{ref} \tan(\varphi_d)}{l} - u_2 \right) e_2 \quad (38)$$

$$\dot{e}_2 = v_{ref} \sin(e_3) - \left( \frac{v_{ref} \tan(\varphi_d)}{l} - u_2 \right) e_1 \quad (39)$$

$$\dot{e}_3 = u_2 \quad (40)$$

$$\dot{e}_4 = u_3 \quad (41)$$

Finally, the Lyapunov criteria are checked and the controller performance is simulated. In order to have a negative semi-definite derivative for storage function, following feedback terms in Equation 42, 43 and 44 are used.

$$u_1 = -k_1 e_1 \quad (42)$$

$$u_2 = -k_2 v_{ref} e_2 \quad (43)$$

$$u_3 = -k_3 e_4 \quad (44)$$

After adding the error system and feedback terms together, the resultant derivative function became negative semi-definite for all values of states. This operation is shown in Equation 45 and its simplified version in 46.

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 + e_2 v_{ref} \sin(e_3) + \frac{\sin(e_3)}{k_2} (-k_2 v_{ref} e_2) - k_3 e_4^2 \quad (45)$$

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - k_3 e_4^2 \quad (46)$$

Controller gains are selected as follows in Equation 47, 48 and 49.

$$k_1 = 40 \quad (47)$$

$$k_2 = 40 \quad (48)$$

$$k_3 = 50 \quad (49)$$

Note that any positive value of Lyapunov gains will result a satisfactory result for Lyapunov Stability Theorem. Controller gains are selected by trial and error. Starting from a small positive value and slowly increasing each value resulted these gains. Greater values would result more aggressive results.

#### 4. Simulation Results and Discussion

MATLAB/Simulink environment is utilized to simulate the trajectory and the motion of the WMR. The selected task is to follow a circular reference trajectory with a diameter of 10 meters in 10 seconds. Therefore, the reference linear and angular speed inputs are constant  $\pi$  m/s and  $0.2\pi$  rad/s. Necessary references can be obtained directly. These references are expressed in Equation 50 and 51.

$$x(t) = 5 \cos\left(\frac{\pi}{5}t\right) \quad (50)$$

$$y(t) = 5 \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right) \quad (51)$$

The single important parameter of bicycle is its wheelbase of 1.5 meters. This parameter selected by considering an average bicycle/scooter. Steering angle is saturated in  $\pm 1.07$  radians.

Initial conditions are picked the same for both cases as shown in Equation 52. Which is the starting point on the trajectory. The goal is to follow the exact trajectory.

$$p_{initial} = \left[5 \quad 0 \quad \frac{\pi}{2} \quad 0\right]^T \quad (52)$$

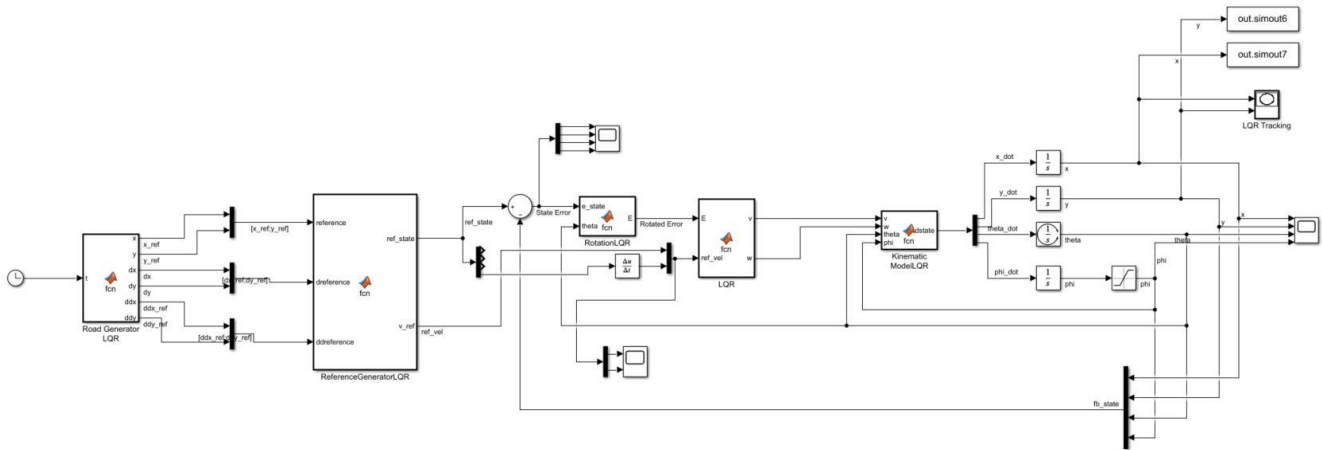


Figure 2. LQR Control Scheme

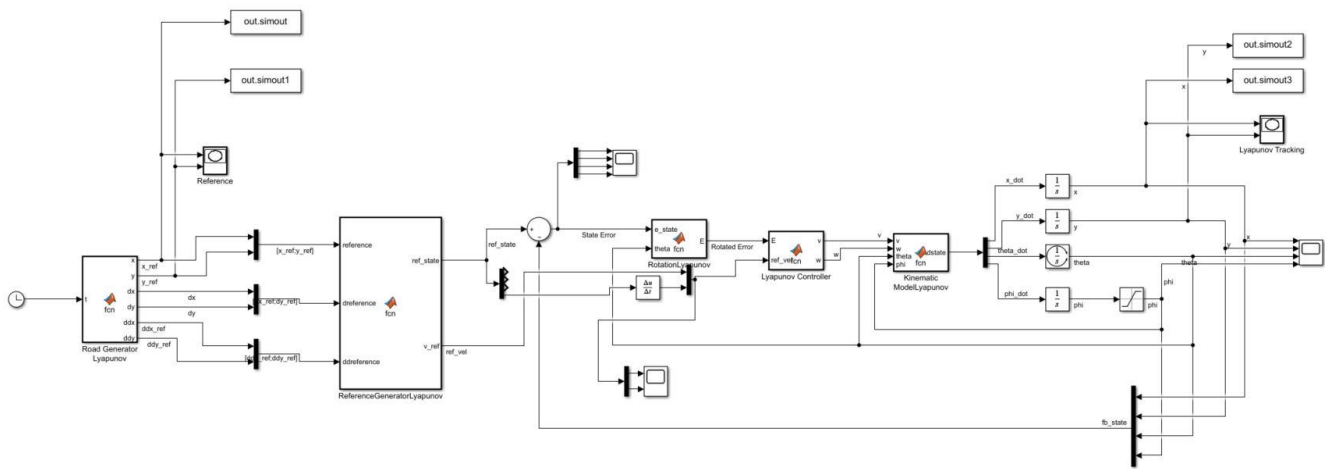


Figure 3. Lyapunov Control Scheme

Figure 2 shows the Simulink scheme of kinematic bicycle model controlled via LQR technique. A similar block scheme is created for Lyapunov based control technique in Simulink environment and can be seen in Figure 3.

Simulations are done for 10 seconds with fixed step of 0.001 seconds. Solver selection is ODE4(Runge-Kutta). Results are plotted together with the reference trajectory and can be seen in Figure 4.

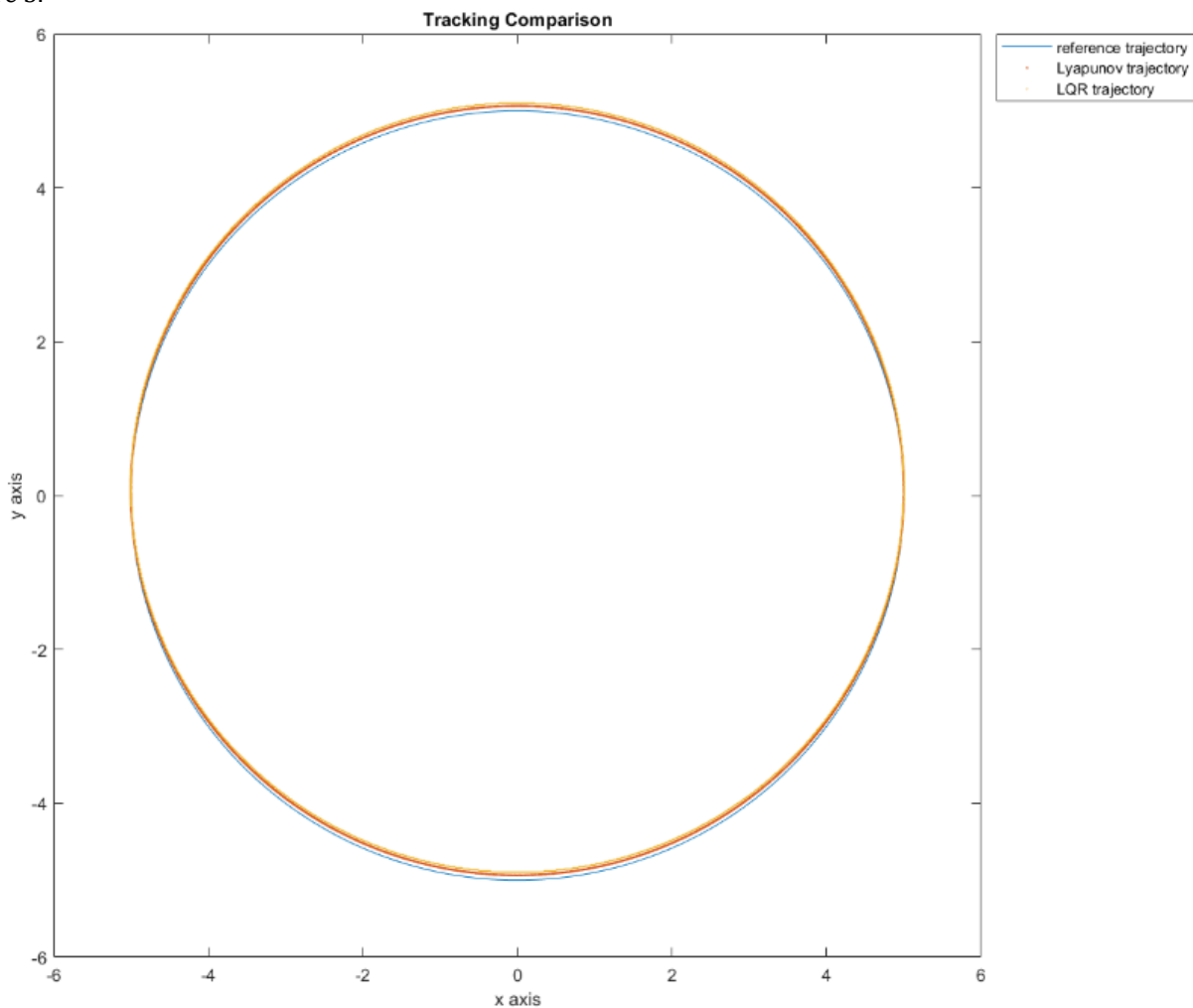


Figure 4. Tracking Comparison of Two Controllers

Table 1. Performance Comparison Through Indicators

Indicator	Lyapunov Based Controller	Linear Quadratic Regulator (LQR)
Cumulative Deviation	4.5506 m	9.0552 m
Mean Deviation on x-axis	-3.0346×10 <sup>-4</sup> m	-0.0378 m
Mean Deviation on y-axis	-0.0322 m	-0.0570 m
Variance of Deviation on x-axis	5.1747×10 <sup>-4</sup> m	0.0017 m
Variance of Deviation on y-axis	5.1758×10 <sup>-4</sup> m	0.0018 m

From first inspection of Figure 4 it is hard to evaluate performance of both control approaches. Therefore, a deviation metric is defined and considered as performance indicator. This deviation metric is measuring distance between reference trajectory point and kinematic bicycle model's rear wheel contact point to the ground and the performances of both controllers can be seen in Table 1. Deviation metric is expressed in Equation 53.

$$d = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2} \tag{53}$$

For evaluation of performance, deviation from trajectory on each time step is collected. Then, cumulative deviation from reference trajectory is calculated together with mean and variance on x and y axes. These values are shared to the reader in previous table. Evolution of deviations in both axes for each control strategy can be seen in Figure 5.

Table 1 and Figure 5 give the meaningful performance differences. Importance of every single indicator can be

clarified. First indicator is the cumulative deviation. Since Equation 53 collects the deviation value from reference trajectory for every time step, summed deviation is the most important indicator of the tracking performance. As this indicator goes to zero, performance is to be said get better. However, this indicator is not the single performance indicator because of time dependency of this deviation. As shown in Figure 5, the deviation from reference trajectory changes over time along both axes of the cartesian coordinate system. Minimized variation around zero deviation from reference trajectory is the best expression of the performance analysis. Therefore, minimum deviation from reference trajectory can be defined statistically.

Both control techniques have very small mean deviations on both cartesian coordinate axes. However, variances around this mean value separates two scenarios. In Figure 5 this consideration becomes more visible. While oscillations around zero are similar in terms of frequency, their amplitude show how cumulative error gets greater for LQR control approach.

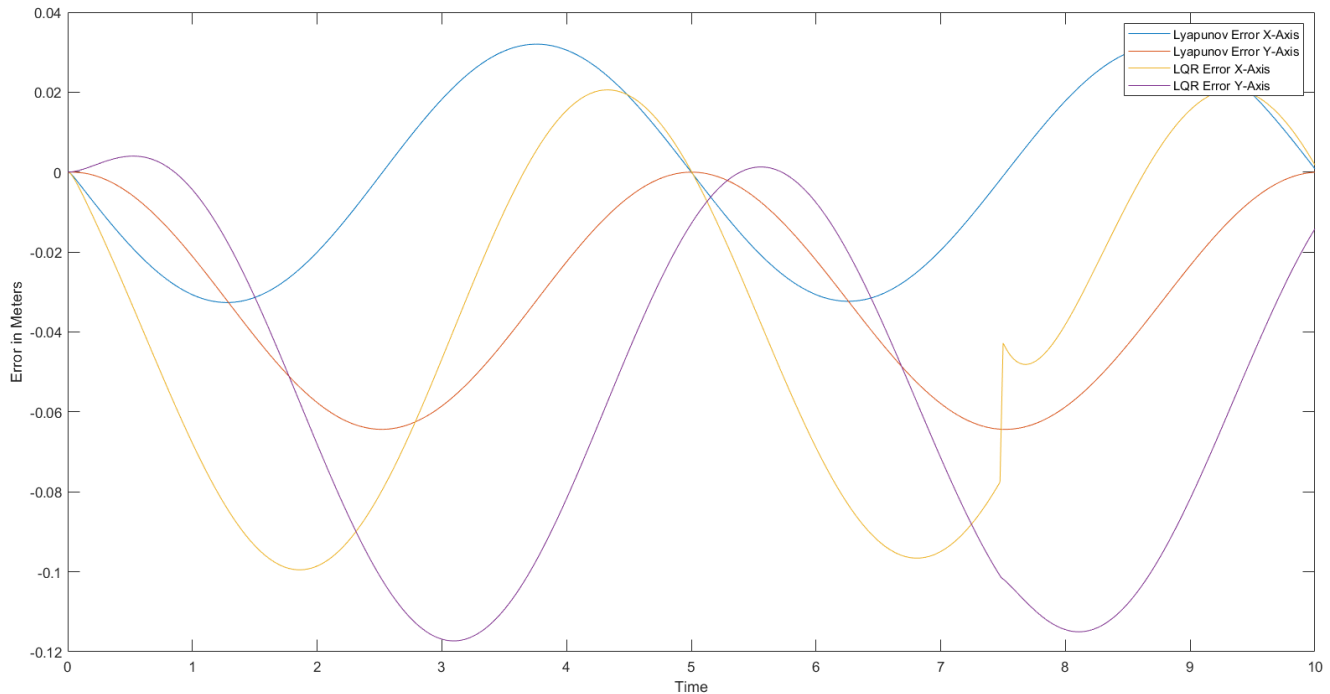


Figure 5. Tracking Deviations on Each Axis for Both Controllers

Another perspective which is compared in this paper is the performance difference of a linear and a nonlinear controller approach on kinematic bicycle model. Both techniques are well known and widely used approaches. Lyapunov based controller action needs an additional term other than the states of the system which is the reference speed input. However, LQR only utilizes a predefined gain matrix for a simpler feedback action. This situation gives another conclusion for the compared control approaches. Since Lyapunov based control action utilizes reference linear velocity in its feedback calculation, it is possible to define a time-varying positive term and apply this controller for time dependent cases. To be more clear, this controller would be able to track varying radius trajectories. On the other hand, LQR control strategy would not be able to calculate such a feedback matrix because of variable system matrix entities.

#### 4. Conclusion

In this research two different types of control strategies are derived and applied to kinematic bicycle model. Control strategies rely on Linear Quadratic Regulator and Lyapunov Stability Theorem. For both control strategies, stability is searched and guaranteed by designed feedback actions. Reference trajectory was a circle with radius of 5 meters, which had to be completed in 10 seconds. Reference speed inputs were decided to be constants. Kinematic bicycle model was able to follow the reference trajectory with small deviations for suggested control settings. Performance comparison is made and seen that Lyapunov based control strategy performed a better tracking result. Future work can be done for obstacle avoidance and globally asymptotically controllers. As a future work, for testing the performance of the developed controller in real environment, an experimental study on a wheeled robot model is planned. Noise cancellation, sensor measurement and data filtering would be another challenging task for realization.

It is evident that Lyapunov based control strategy performed better than LQR approach. Both techniques have at least a mean deviation of order  $10^{-2}$  from reference trajectory. Hence, both strategies are resulting reliably good performance. Moreover, LQR strategy should have a better performance under noisy measurement application or uncertainties due to its lower dependency on variables. Future studies can be constructed under this idea.

However, both techniques need to be applied around reference trajectory and a preliminary system matrix analysis and design is necessary. Moreover, an obstacle avoidance strategy and a global planner must be added

before deploying such controller. By this way it would be possible to get a global control approach.

#### References

- [1] Siegwart RI, Nourbakhsh R, Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots, Second Edition. vol. 23, 2011.
- [2] Choset H, Lynch KM, Hutchinson S, Kantor GA, Burgard W. Principles of Robot Motion, 2005.
- [3] Siciliano B, Sciavicco L, Villani L, Oriolo G. Robotics: Modelling, planning and control. no. 9781846286414. doi: 10.5860/choice.46-6226, 2009.
- [4] Dixon W, Dawson DM, Zergeroglu E, Behal A. Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots. Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 262, 2020.
- [5] Isidori A. Nonlinear Control Systems: An Introduction. 3rd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1995.
- [6] Siciliano B, Khatib O. Springer handbook of robotics. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1, 2016.
- [7] Forte MDN, Correia WB, Nogueira FG, Torrico BC. Reference Tracking of a Nonholonomic Mobile Robot using Sensor Fusion Techniques and Linear Control. IFAC-Papers OnLine, vol. 51, no. 4. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.092, 2018.
- [8] Fareh R, Saad M, Khadraoui S, Rabie T. Lyapunov-Based Tracking Control for Nonholonomic Wheeled Mobile Robot. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, vol. 10, no. 8, pp. 1042-1047, 2018.
- [9] Nurmaini S, Dewi K, Tutuko B. Differential-drive mobile robot control design based-on linear feedback control law. International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), vol. 3. doi: 10.1088/1757-899X/190/1/012001, 2016.
- [10] Zidani G, Drid S Larbi, CA, Arar D, Bussy P. Robust nonlinear control of a mobile robot. Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 11, no. 4, doi: 10.5370/JEET.2016.11.4.1014, 2016.
- [11] Bui TH, Nguyen TT, Chung TL, Kim SB. A simple nonlinear control of a two-wheeled welding mobile robot. Int J Control Autom Syst, vol. 1, no. 1, 2003.
- [12] Serralheiro W, Maruyama N, Tannuri EA. Motion Control of an Underactuated Wheeled Mobile Robot: A Kinematic Input-Output Linearization Approach. Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. doi: 10.20906/cps/cob-2015-1291, 2015.
- [13] Snider JM. Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking. Work, no. February, 2009.

- [14] Alcalá E, Puig V, Quevedo J, Escobet T, Comasolivas R. Autonomous vehicle control using a kinematic Lyapunov-based technique with LQR-LMI tuning. *Control Eng Pract*, vol. 73, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.12.004, 2018.
- [15] Khalaji AK, Jalalnejhad M. Robust forward\backward control of wheeled mobile robots. *ISA Trans*, vol. 115, doi: 10.1016/j.isatra.2021.01.016, 2021.
- [16] Muir PF, Neuman CP. Kinematic modeling of wheeled mobile robots. *J Robot Syst*, vol. 4, no. 2, doi: 10.1002/rob.4620040209, 1987.
- [17] Kirk DE. Optimal control theory: An introduction. *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 1, 2004.
- [18] Gamkrelidze RV. Principles of Optimal Control Theory. doi: 10.1007/978-1-4684-7398-8, 1978.
- [19] Soloperto R, Wenzelburger P, Meister D, Scheuble D, Breidohr VSM, Allgöwer F. A control framework for autonomous e-scooters. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 2. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.06.030, 2021.
- [20] Jiang J, Evangelou SA, Torquil MR, Astolfi A. Robust H Control for Autonomous Scooters. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.049, 2017.
- [21] Corke P. Robotics, Vision and Control - Fundamental Algorithms. MATLAB® Second, Completely Revised, Extended And Updated Edition, vol. 75, no. 1–2, 2017.
- [22] Divelbiss AW, Wen JT. Trajectory tracking control of a car-trailer system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 5, no. 3, doi: 10.1109/87.572125, 1997.
- [23] Uyar E, Çetin L, Gören A. Navigation and GPS based path control of an autonomous vehicle. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 3949 LNAI. doi: 10.1007/11803089\_3, 2006.
- [24] Uyar E, Çetin L, Gören A, Ensoner S. Vision based tracking control and obstacle avoidance of a mobile vehicle. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 37, no. 8, 2004.
- [25] Yıldız B. Object detection and mapping using LIDAR for a mobile robot. M.S. thesis, Dokuz Eylül University, 2016.
- [26] Gören A. Controlling a non-holonomic vehicle via artificial neural networks. Ph.D. dissertation, Dokuz Eylül University, 2007.
- [27] Ergenc AF, Nak H, Akkaya Ş. Design, Analysis and Experimental Verification of a Novel Nonlinear Pi Controller. *Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 4, doi: 10.18038/aubtda.340651, 2017.
- [28] Ortatepe Z, Parlaktuna O. Two Dof Robot Control With Fuzzy Based Neural Networks. *Anadolu University Journal Of Science And Technology A -*

*Applied Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 4, doi: 10.18038/aubtda.340002, 2017.