



**DÖNER KANAT UÇUŞLARINDA DÜŞÜK GÖRÜŞ ŞARTLARI: ÇOK
ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME YÖNTEMİYLE EN UYGUN GECE GÖRÜŞ
GÖZLÜĞÜ TESPİTİNE YÖNELİK BİR ÇALIŞMA**

İsmail GEVREK

DOKTORA TEZİ
KAZALARIN ÇEVRESEL VE TEKNİK ARAŞTIRMASI ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İsmail GEVREK

15/11/2024

DÖNER KANAT UÇUŞLARINDA DÜŞÜK GÖRÜŞ ŞARTLARI: ÇOK ÖLÇÜTLÜ
KARAR VERME YÖNTEMİYLE EN UYGUN GECE GÖRÜŞ GÖZLÜĞÜ TESPİTİNE
YÖNELİK BİR ÇALIŞMA
(Doktora Tezi)

İsmail GEVREK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2024

ÖZET

Bu tez, düşük yoğunluklu ışık ve sınırlı görüşün pilot performansına etkilerini inceleyen iki çalışmayı kapsamaktadır. İlk çalışma, özellikle helikopter pilotlarının düşük yoğunluklu ışık ve sınırlı görüş koşullarında mesafe tahmininde yaşadıkları zorlukları vurgulamaktadır. Pilotların manevralar sırasında doğru mesafe tahminleri yapması hayati önem taşımaktadır. İkinci araştırma, gece görüş gözlüğü (GGG) kullanımına ilişkin bir karar verme problemine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, doğal afetlerde çalışmış uzman pilotlar, derinlik algısı ve kontrast gibi nitel kriterlere göre GGG'leri değerlendirmek üzere seçilmiş ve bu kriterlerin önem sırası AHP yöntemi ile belirlenmiştir. TOPSIS, ELECTRE, VIKOR ve SMAA-2 yöntemleri kullanılarak yapılan değerlendirmeler, beyaz fosfor ekranlı GGG'ler ve hafif GGG'lerin en uygun alternatifler olduğunu göstermiştir. Her iki çalışma da düşük görüş koşullarının ve GGG kullanımının pilotların mesafe tahmini ve karar alma süreçleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin GGG tasarımlarında sistematik bir rehberlik aracı olarak kullanılabileceğini değerlendirilmektedir. Bu çalışma ile, pilot görevlerinde karar alma süreçlerini optimize ederek ve güvenli uçuş koşullarını sağlamak açısından önemli olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Bilim Kodu : 93118
Anahtar Kelimeler : Gece görüş gözlüğü, çok kriterli karar verme, kısıtlı görüş,
Sayfa Adedi : 75
Danışman : Prof. Dr. Metin GÜRÜ

LOW VISIBILITY CONDITIONS IN ROTARY WING FLIGHTS: A STUDY ON
DETECTION OF OPTIMAL NIGHT VISION GOGGLES USING MULTI-CRITERIA
DECISION MAKING

(Ph. D. Thesis)

İsmail GEVREK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2024

ABSTRACT

The thesis covers two studies; both examine the effects of low-intensity light and limited visibility on piloting performance. The first study particularly emphasizes the difficulties of helicopter pilots in estimating range in low-intensity light and limited visibility conditions. It is vital for pilots to make accurate range estimations during maneuvers. The second paper focuses on a decision-making problem related to the use of night vision goggles (GGG). In this study, expert pilots who have worked in natural disasters were selected to evaluate GGGs according to qualitative criteria such as depth perception and contrast, and the order of importance of these criteria was determined by the AHP method. The evaluations made using TOPSIS, ELECTRE, VIKOR and SMAA-2 methods showed that GGGs with white phosphorus screens and lightweight GGGs were the most suitable alternatives. Both studies examine the effects of low-visibility conditions and GGG usage on pilots' range estimation and decision-making processes, and demonstrate that multi-criteria decision-making methods can be used as a systematic guidance tool in GGG designs. These studies are important in terms of optimizing decision-making processes in piloting tasks and ensuring safe flight conditions.

Science Code : 93118

Key Words : Night vision goggle, multi criterie decision making, restricted vision

Page Number : 75

Supervisor : Prof. Dr. Metin GÜRÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmam esnasında bana deneyim ve tecrübeleriyle yön veren değerli hocalarım Prof. Dr. Metin GÜRÜ, Prof. Dr. Fatih Emre BORAN ve Dr. Murat AKIN’a teşekkür ederim. Görüş ve yönlendirmeleri sebebiyle tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Adnan SÖZEN ve Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ORMAN’a teşekkür ederim. Her konuda olduğu gibi bu çalışmamda da bana sabırla yardım eden, hayatımı anlamlı kılmaya yardım eden, sevgili, güzel eşim Mebrure İtir GEVREK’e ve değerli vakitlerinden kısa da olsa aldığım çocuklarım Ali Tunga GEVREK ve Ahmet Tarkan GEVREK’e sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim. Çalışmada yardımlarını esirgemeyen tüm silah arkadaşlarıma teşekkür ederim. “Bu çalışmada yer alan görüşler, yorumlar ve bulgular yazara aittir. Herhangi bir devlet kurumu ve/veya kuruluşu ile ilişkilendirilemez, yorumlanamaz, görüş olarak sunulamaz”

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	15
3.1. Meteryal	15
3.2. Metot	15
3.2.1. Mesafe tahmin değerlendirmesi	15
3.2.2. Çok kriterli karar verme metotları.....	18
3.2.3. AHP yöntemi.....	19
3.2.4. TOPSIS yöntemi	22
3.2.5. VIKOR yöntemi	25
3.2.6. ELECTRE yöntemi	27
3.2.7. SMAA-2 yöntemi.....	31
4. SONUÇ VE TARTIŞMA	33
4.1. Mesafe Tahmin Analizi Sonuçları ve Tartışma.....	33
4.2. Gece Görüş Gözlüğü Değerlendirme Sonuçları ve Tartışma.....	40
4.2.1. Uzman ekip ve kriter seçimi	40
4.2.2. TOPSIS uygulaması.....	43
4.2.3. ELECTRE uygulaması.....	45

	Sayfa
4.2.4. VIKOR uygulaması.....	48
4.2.5. SMAA-2 uygulaması	51
4.2.6. ÇKKV sonuçlarının değerlendirilmesi.....	53
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	55
5.1. Mesafe Tahmin Analizinin Değerlendirilmesi ve Öneriler.....	55
5.2. ÇKKV Metotların Değerlendirilmesi ve Öneriler.....	56
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	67
EK-1. Anket formları	68
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Çevresel uçuş katsayıları	2
Çizelge 1.2. Amerikan Deniz Havacılık Birliklerinin maksimum uçuş süreleri	3
Çizelge 2.1. Mesafe tahmin literatür özeti	11
Çizelge 2.2. ÇKKV literatür özeti	13
Çizelge 3.1. Pilot bilgileri	18
Çizelge 3.2. AHP 1-9 ölçeği	22
Çizelge 3.3. Rassal indeks değerleri	24
Çizelge 4.1. Örnek pilot mesafe tahmin değerleri	37
Çizelge 4.2. Hata değeri ve normallik testi değerleri	38
Çizelge 4.3. Görüş tipleri ve hata ilişkisi	39
Çizelge 4.4. Görüş koşullarının Friedman testi sonuçları	40
Çizelge 4.5. Spearman testinin korelasyon değerleri	40
Çizelge 4.6. Uzman ekip	45
Çizelge 4.7. Kriterler ve açıklamaları	46
Çizelge 4.8. Kriterlere ilişkin ikili karşılaştırma matrisi	47
Çizelge 4.9. Normalize edilmiş karşılaştırma matrisi	48
Çizelge 4.10. Kriter ağırlıkları	49
Çizelge 4.11. Standart karar matrisi (D)	49
Çizelge 4.12. Normalize edilmiş karar matrisi (R)	50
Çizelge 4.13. Ağırlıklandırılmış normalize edilmiş karar matrisi	50
Çizelge 4.14. Pozitif ve negatif ideal çözüme olan mesafe ve ideal çözüme göreli yakınlık değerleri	51
Çizelge 4.15. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi (Y)	52
Çizelge 4.16. Uyum (C) ve uyumsuzluk (D) setlerinin belirlenmesi	53
Çizelge 4.17. Uyum (concordance) matrisi	53

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.18. Uyum (concordance) üstünlük matrisi.....	54
Çizelge 4.19. Net uyum ve uyumsuzluk indeksleri (uygulama sonucu).....	55
Çizelge 4.20. Toplama üstünlük matrisi	55
Çizelge 4.21. Vikor en iyi en kötü sıralması.....	56
Çizelge 4.22. Ağırlıklandırılmış karar matrisi ve değerleri	57
Çizelge 4.23. Q değerleri	57
Çizelge 4.24. Sıralama listesi.....	58
Çizelge 4.25. Kabul edilebilir avantaj.....	58
Çizelge 2.26. Kabul edilebilir istikrar	59
Çizelge 5.1. ÇKKV sonuçları	65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Pilot Gece görüş gözlüğü modeli	2
Şekil 1.2. GGG çalışma presibi	4
Şekil 1.3. UH-60 kokpitinden normal (gündüz) ve GGG görünümü	5
Şekil 2.1. Helikopter - taşıt boyut karşılaştırması	12
Şekil 3.1. Tahmin yapılan bölge krokisi.....	20
Şekil 3.2. En uygun GGG'nin belirlenmesine yönelik işlem süreci	21
Şekil 3.3. Üç seviyeli analitik hiyerarşi model örneği.....	23
Şekil 4.1. Görüş koşulları - hata oranı grafik gösterimi	39
Şekil 4.2. Mesafe tahmini ve hata değerlerinin grafikleri	41
Şekil 4.3. Ortalama hata – tahmin koşullarının türleri	44
Şekil 4.4. Model seçim sekmesi	60
Şekil 4.5. Alternatif, kriter ve kriter ağırlık seçimi	60
Şekil 4.6. Alternatiflerin sıra kabul edilebilirlik indisleri.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

cm	Santimetre
emg	Electromyography
g	Gram
nm	Nananometre

Açıklamalar

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AHP	Analitik Hiyerarşi Proses
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
DN	Day Normal
DH	Limited Day Helmet Mounted Display
DoD	Department of Defense
ELECTRE	Elimination and Choice Translating Reality
FAA	Federal Aviation Administration
GGG	Gece Görüş Gözlüğü
GSYİH	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
ICAO	International Civil Aviation Organization
I2	Image Intensifier
IR	Infra Red
MCP	Microchannel Plate
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOE	Nap of Earth
NTSB	National Transportation Safety Board
SAR	Search and Rescue
SMAA	Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis
SNR	Signal to Noise Ratio

Kısaltmalar**Açıklamalar****USAARL**

United States Aeromedical Research Laboratory

TH

Alacakaranlık Helmet Mounted Display

TN

Alacakaranlık Normal

TOPSIS

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions

VFR

Visual Flight Rules

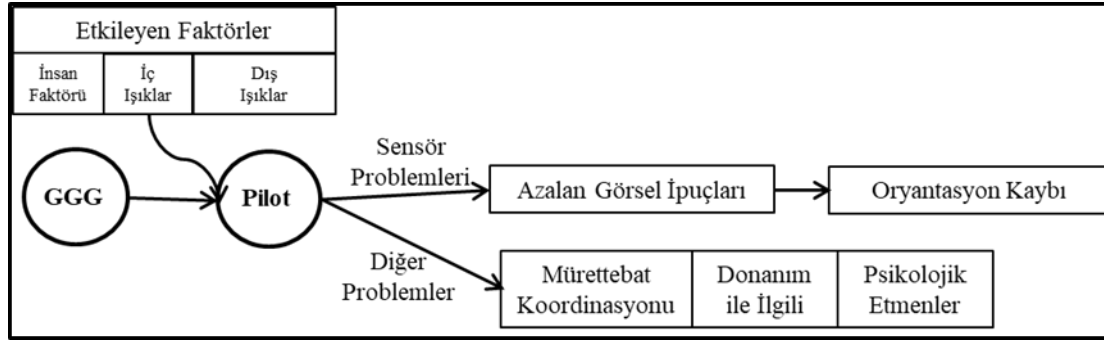
VIKOR

Visekriterijumsko kompromisno rangiranje

1. GİRİŞ

Helikopter pilotları, sabit kanat uçuşlarından farklı olarak, helikopteri istenen yerde ve noktada sabit havır pozisyonunda tutmak için belirli mesafelerde kendisine nirengi seçmek zorundadır. Başka bir deyişle oryantasyonunu ve durumsal farkındalığını sağlamak zorundadır [1-2]. Pilot, bu noktada oryantasyonu sağlamak için ihtiyaç duyduğu en önemli husus görüştür [3]. Basketbol efsanesi Kobe Bryant, 13 yaşındaki kızı ve diğer yedi kişinin ölümüne neden olan helikopter kazasının nedenlerinden biri olarak görsel referansların kaybindan kaynaklanan oryantasyon kaybı olduğu belirtilmiştir [4]. Bu hususta helikopterin içindeki göstergeleri ve dış referansları takip etmek (cross-check), hava aracını el-ayak-göz koordinasyonu ile kontrolünü sağlamak büyük önem taşımaktadır. Bu durumun sağlanamaması durumsal farkındalığın kaybı sebebiyle helikopterin kontrol kaybı ile sonuçlanabilir [5]. Yetersiz durumsal farkındalık, havacılık kazalarının en yaygın nedeni olmaya devam etmektedir [6-9].

Askerî havacılıkta geceyi kullanmak, düşmana karşı baskın, gizlilik gibi birçok avantaj sağlamaktadır [10]. Helikopter uçuşları, görüntü yoğunlaştırıcı sistemler sayesinde gece görerek uçuşa imkân sağlamaktadır. Bu sistemlerin insan-makine etkileşiminden kaynaklı bazı kısıtları bulunmaktadır [11]. Günümüzde çoğu gece görüş gözlükleri (GGG) temel gereklilikleri ve teknik standartları karşılamaktadır. Bu nedenle teknik özellikler açısından herhangi bir GGG diğerlerinden farklı olması pek olası değildir. Bazı koşullarda (nicel ve nitel kriterler) bir arada bulunması, yalnızca üreticiler tarafından sağlanan ana teknik özelliklerin değil, aynı zamanda uyumluluk, manevra kabiliyeti, ergonomi vb. bir uzman sisteminin yargısına ihtiyaç duyulmaktadır [12]. Gece görüş gözlüklerinde, görüntünün göz tarafından görüldüğü ekran, fosfor ekran olarak geçmektedir. Günümüzde, beyaz fosforlu GGG'lerin havacılık için kullanılmasıyla beraber beyaz fosforlu GGG'ler yaygınlaşmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda gözün, GGG'de görüş dalga boylarından en verimli olan yeşil renkli fosforun (555 nm.) uygun olduğu değerlendirilmesine rağmen [13]. Güncel çalışmalar beyaz fosforlu GGG'lerin alacakaranlık vakti görüşüne benzediği, kontrast, şekil ve gölgelerin daha temiz gözüktüğü bildirilmiştir [14]. bazı parametrelere göre göz yorgunluğunu azalttığı belirtilmiştir [15].



Şekil 1.1. Pilot Gece görüş gözlüğü modeli [16]

Pilot gece görüş gözlüğü ara yüzünden kaynaklanan sonuçlar Şekil 1.1’ de incelenmiştir. Şekil 1.1’ de görüldüğü üzere GGG-Pilot etkileşiminden kaynaklı sensör ve diğer problemler oryantasyon kaybına yol açabilmektedir. Çok sayıda saha analiz raporu, GGG kullanımında, yer mesafelerini veya nesnelerin ayrımını değerlendirmede zorluk yaşandığı belirtilerek, uçuş güvenliğini tehlikeye atan yanlış algılamalara neden olduğunu göstermektedir [16]. Bazı çalışmalarda ise gece görüş gözlükleri ile hatalı mesafe tahmini, uçuş ekibi üyeleri tarafından ciddi bir problem olarak tanımlanmıştır [17-20]. Bir araştırmaya göre açık denizdeki petrol ve gaz platformlarına uçan helikopterlerin gece sortilerinde kaza oranları gündüze göre en az beş kat daha fazla olduğu ortaya konmuştur [21]. En basit ifadeyle stresli olan pilotluk [22-23], ilave bir teçhizatın takılması, görüşün kısıtlanması ve monokrom (tek renk) bir görüş ile daha stressli ve zor bir hale gelebilmektedir [11,24-23]. GGG uçuş şartının diğer uçuş şartlarına göre katsayısı bulunmaktadır. Örnek olarak Amerikan Deniz Havacılık Birliklerinin (Çizelge 1.1) Görelî Çevresel Faktör olarak katsayı uygulanmaktadır[25].

Çizelge 1.1. Çevresel uçuş katsayıları

Uçuş Koşulları	Görelî Çevresel Faktör
Gündüz	1
Gündüz Arazi ve Alçak Uçuş	1,3
Alçak Alet	1,3
Gece	1,4
Gündüz Yalama	1,6
Gece Arazi	2,1
Gece Görüş Cihazları	2,3
Kimyasal Koruyucu ile	3,1

Amerikan Deniz Havacılık birliklerinin gün ve hava aracı tipine göre maksimum uçabileceği süreler Çizelge 1.2 verilmiştir.

Çizelge 1.2. Amerikan Deniz Havacılık Birliklerinin maksimum uçuş süreleri

Periyot (Gün)	Tek Pilotlu Havaaracı	Çok Pilotlu Havaaracı (Basınçlı Fırlatma Sistemli)	Çok Pilotlu Havaaracı (Basınçsız)	Çok Pilotlu Havaaracı (Basınçlı)
1	6,5	12	12	12
7	30	50	50	50
30	65	80	100	120
90	165	200	265	320
365	595	720	960	1120

Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2 incelendiğinde bir pilot günde gündüz maksimum 12 saat uçabilmektedir. Eğer uçtuğu uçuş şartı GGG ile ise bu süre 5 saate kadar düşmektedir. Çizelge 1.1’ de belirtilen sıra ile uçuş şartı değiştikçe gün içinde uçabileceği maksimum uçuş süresi değişmektedir.

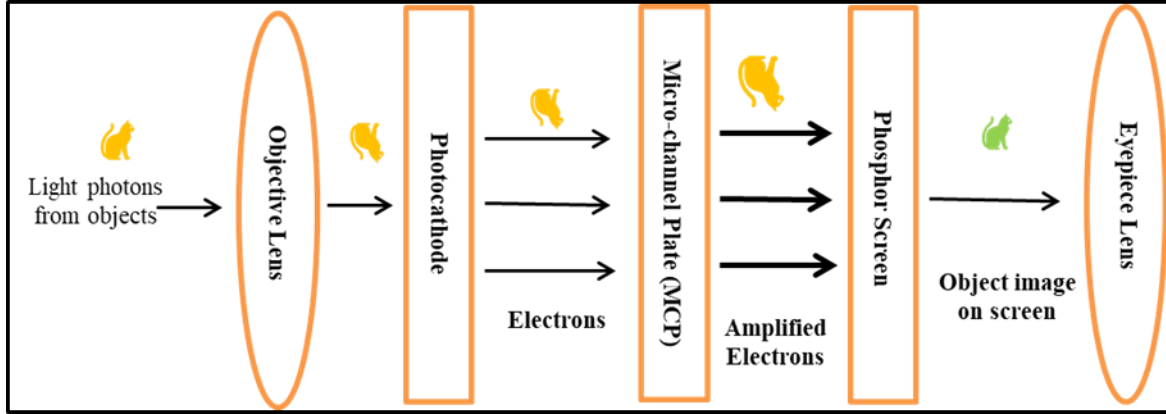
Görüntü yoğunlaştırıcı sistemler ilk olarak askeri tespit, astronomi ve bilimsel araştırmalarda kullanılmaya başlanmıştır. Askeri anlamda ilk olarak 2. Dünya Savaşında kullanılmaya başlanan bu sistemler düşman unsurları tarafından kolayca fark edildiği için yeterli görülmemiştir [26].

1950’lilerin sonlarında ilk sürekli elektron çarpanı George Goodrich, James Ignatowski ve William Wiley tarafından Bendix Araştırma Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. 1960’lılarda ilk nesil tüpler geliştirilmiştir. Bu sistemler havacılık anlamında kask için çok büyük olduğundan o yıllarda uygulama imkânı bulanamamıştır [27].

1970’lerde görüntü yoğunlaştırıcı sistemler kaska takılacak kadar küçük boyutlara ulaşmış ve Amerikan Ordusu tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Gece görüş gözlüklerinde artan performansla paralel olarak havacılıkta kullanımı artmıştır.

Gece görüş gözlüğü çalışma prensibi olarak, objeden çıkan ışık objektif mercekle tarafından fotokatoda odaklandırılmaktadır. Fotokatoda çarpan ışık fotonları, mercekle tarafından

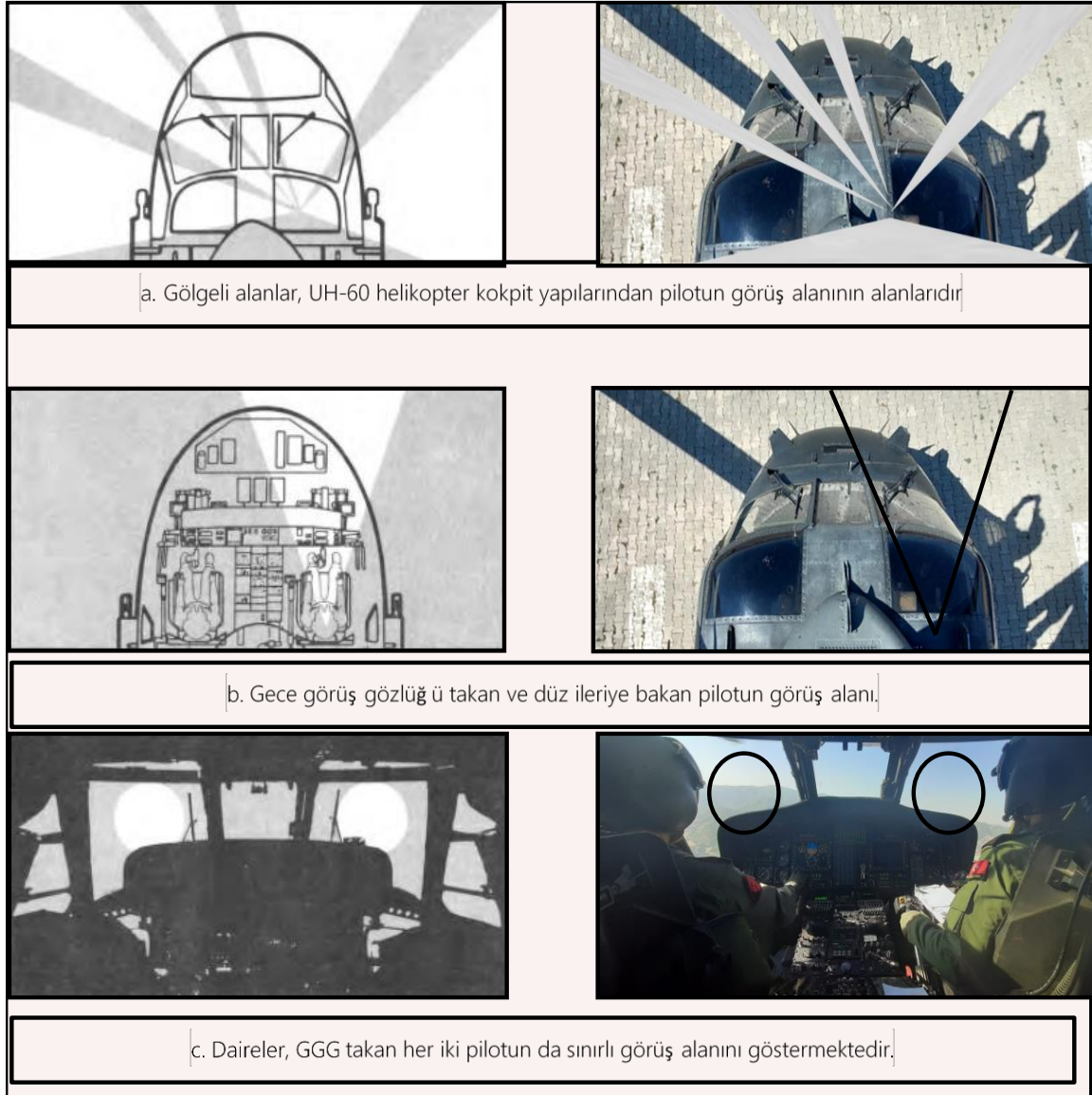
yansıtılan ışığın miktarı ile doğru orantılı olarak elektronların çıkmasına neden olmaktadır. Serbest kalan elektronlar gece görüş gözlüğünün güç kaynağı tarafından üretilen bir elektrik alanı sayesinde fotokatod yüzeyden hızlandırılmaktadır. Fosfor ekrana çarpan elektronların miktarı, ince cam tüplerden oluşan ince bir petek olan mikro kanal plaka vasıtasıyla ile artırılmaktadır.



Şekil 1.2. GGG çalışma prensibi [10].

Şekil 1.2, GGG'lerin çalışma prensiplerini şematik olarak göstermektedir. GGG'lerin bir prensibi olarak, nesneden gelen ışık objektif lens tarafından fotokatoda odaklanır. Fotokatoda çarpan ışık fotonları, lens tarafından yansıtılan ışık miktarıyla doğru orantılı olarak elektronların serbest kalmasına neden olur. Serbest kalan elektronlar, GGG'lerin güç kaynağı aracılığıyla üretilen bir elektrik alanı tarafından fotokatot yüzeyinden hızlandırılır. Fosfor ekrana çarpan elektron miktarı, ince cam tüplerden oluşan ince bir petek olan bir mikro kanal plakası vasıtasıyla artırılır [28].

Pilotların gece uçuşına imkân sağlayan gece görüş gözlüğü aynı zamanda pilotlara bazı kısıtlar getirmiştir. Buna gece görüş gözlüğünün yapısından kaynaklı olarak azalan görsel ipuçları verilebilmektedir. Normalde, gece görüş gözlüğü teknolojisinde, geceleri fotopik görüşe uygun olarak dizayn edilir [29]. Bu ayarlama gece adaptasyonu için (fotopikten skotopiğe göre) daha hızlı bir geçişe izin vermektedir. Görüntü yoğunlaştırıcı sistemlerde insanın yapısından dolayı, gündüz beklenen performansa oranla verim düşmektedir. Gece görüş gözlüğü ile icra edilen tüm faaliyetler, çevredeki çeşitli nesneleri tespit, teşhis, tanıma, mesafe ve boyut tahminine dayanmaktadır. Görüntü performansının artması gece görüş gözlüğünün daha rahat kullanımını sağlamaktadır. Bu hususta görsel keskinlik, görüş açısı ve derinlik algısı önemli rol oynamaktadır [30].



Şekil 1.3. UH-60 kokpitinden normal (gündüz) ve GGG görünümü[31]

Şekil 1.3' de görüldüğü gibi, kokpitte oturan bir pilotun GGG ile/olmadan bakış açısı tasvir edilmiştir. Görüş açısı, sabit bir nesneye veya yere GGG'lerle bakıldığında tüp aracılığıyla retinaya düşen görüşün açısal ifadesidir. Tipik olarak, GGG'lerdeki görüş açısının 30 ila 40 derece arasındadır[32]. Azaltılmış görsellik, yönelim bozukluğu olasılığını artırır [16]. Şekil 1.3' de de görüldüğü gibi GGG takıldığında görüş açısı kısıtlanmaktadır.

Görüş açısı, gece görüş gözlüğü ile sabit bir nesneye veya bir yere bakıldığında, tüpün içinden retinaya düşen görüşün açısal ifadesidir. Tipik olarak gece görüş gözlüklerinde görsel açı 30 ila 45 derece civarındadır[32]. Normal bir görüşe kıyasla 40 derecelik görüş açısı dar bir açıdır. Bu nedenle gece görüş gözlüğünün bu konfigürasyonu pilotun bilişsel

performansı üzerine önemli bir etki yapmaktadır. Görsel bilgilerin azalması oryantasyon bozukluğu ihtimalini artırmaktadır. Pilot, dar açıdaki görsel referansların azlığı sebebiyle, daha fazla görsel tarama yapmak zorunda kalacaktır.

Bu sistemler yapısı gereği kısıtlı görüş alanına (30 dereceye 40 derece) ve tek renk görüntüye sahiptir. Dar bakış açısının, dış görsel ipuçlarının yokluğu veya azalması sebebiyle oryantasyon bozukluğuna artırıcı bir sebeptir. Oryantasyonu sağlamak veya durumsal farkındalığı sağlamak gece görüş gözlüğü ile daha fazla bilişsel zorluk getirmektedir. Normal görüş açısı ile sağlanan durumsal farkındalık (algılama, kavrama, karar verme) gece görüş sistemlerine kıyasla daha zordur.

Doğru mesafe tahmini, pek çok uçak pilotu için önemli bir beceri olmakla birlikte, helikopter pilotları açısından hayati bir rol oynar. Uçaklar genellikle belirli bir irtifada düz ve sabit bir rota izlerken, helikopterler doğaları gereği çok daha fazla esneklik ve manevra kabiliyetine sahiptir. Bu özellik, helikopter pilotlarının ağaçlar, binalar ve diğer engeller gibi çevresel faktörler arasında hassas manevralar yapmalarını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca helikopterler, daha dar ve daha düşük açıklıklı alanlara iniş yapma imkânına sahiptir, bu da iniş alanının etrafındaki her türlü detayı göz önünde bulundurarak son derece dikkatli mesafe tahmini yapılmasını gerektirmektedir. Helikopterler, aynı zamanda düşük irtifalarda uçabilir ve sabit bir yükseklikte uzun süre hover pozisyonunda kalabilir. Bu tür görevlerde, çevredeki her türlü engelin güvenli bir şekilde aşılması ve görevlerin başarıyla tamamlanabilmesi için doğru mesafe tahmini hayati önem taşır. Helikopter pilotları, güvenli uçuşu sürdürebilmek ve operasyonel riskleri minimuma indirmek adına, mesafe algısını en üst düzeyde tutmak zorundadır.

Bu çalışmanın devamında düşük ve kısıtlı görüş koşullarında uçan helikopter pilotlarının en uygun gece görüş gözlüğünü belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmanın ilk bölümünde, farklı uçuş tecrübesine sahip pilotlara düşük aydınlatma koşulları ve kısıtlı görüş şartlarında mesafe tahmini yaptırılmıştır. Bu çalışma ile düşük görüş şartları ve kısıtlı görüş durumlarında mesafe tahmin hassasiyeti incelenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise uzman ekip tarafından, dört farklı çok kriterli karar verme metodu ile altı farklı GGG değerlendirilmiştir.

Uzman ekip ile yapılan görüşmeler ve detaylı literatür taraması sonrasında oluşturulan kriter ve açıklamaları belirlenmiştir. Oluşturulan kriter listesi sayesinde en iyi GGG seçimi ve değerlendirmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmadaki uzmanlar, son yıllarda meydana gelen doğal afetlerde (deprem, sel ve yangın vb), bir helikopter tipinin GGG'ye modifiye edilmesinde ve bazı firmaların GGG prototip üretim aşamasında bulunan deneyimli pilotlardır. Bu çalışma GGG için ÇKKV metodu yaklaşımı yapılan bilenen ilk çalışmadır. İlgili kriterlerin ağırlık değerleri AHP metodu ile bulunmuştur. Yedi farklı GGG sırasıyla TOPSIS, ELECTRE, VIKOR ve SMAA-2 yöntemleri ile ele alınmıştır. Bu çalışma, elde edilecek değerlendirmeler sayesinde yetkili bir karar mekanizması olmayı değil, karar rehberliği sağlamak için bir araç olmayı amaçlamaktadır.

2. GENEL BİLGİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde GGG'lerin havacılıkta kullanımına dair birçok çalışma yapılmıştır. Askeri operasyonlarda sıklıkla kullanılan GGG'ler, pilotların gece uçuşlarında güvenli bir şekilde iniş ve kalkış yapmalarını sağlamaktadır. Ancak, bu cihazların mesafe algısı üzerindeki etkileri tam olarak araştırılmamıştır. Bu çalışma, farklı fosfor ekran tiplerine sahip GGG'lerin pilotlar üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Ayrıca, gece görüş gözlükleriyle yapılan uçuşlarda derinlik algısı ve oryantasyon kaybı sıkça yaşanan problemler arasında yer almaktadır.

Boyut ve mesafeyi yanlış yorumlamak yalnızca iş verimliliğini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda potansiyel olarak ölümcül durumlara da yol açabilmektedir. Buna örnek olarak, 1997'de, Rus Progress tedarik gemisi ile Rus Mir uzay istasyonu arasındaki çarpışma, insanlar tarafından yapılan yanlış mesafe ve boyut tahminleri nedeniyle meydana gelmiştir [33]. Bu nedenle, özellikle aşırı durumlarda, felaketli sonuçları önlemek için, kısıtlı veya yok görsel ipuçlarının insan mekânsal algısı üzerindeki etkisini anlamak çok önemlidir [34].

Literatürde, helikopterin tel ve dağ zirvesi gibi uçuş istikametinde bulunan engellere çarpmaması için doğru mesafe tahminin gerekli olmayabileceği yer almaktadır [35]. Delucia ve Task bir arabayı çarpışma olmadan bir duvarın önünde manevra yapmak için ne zaman bir dönüş başlatacaklarına karar verilmesi ile ilgili çalışma yapmıştır. Buna göre gece görüş gözlüklerinin (yardımsız görüşe kıyasla) olumsuzluklarının sahada meydana gelmediğini bulmuşlardır. Delucia ve Task karada yapılan gece görüş gözlükleri ile havada alınan kararlar arasında önemli farklılıklar olabileceğini belirtmiştir [36].

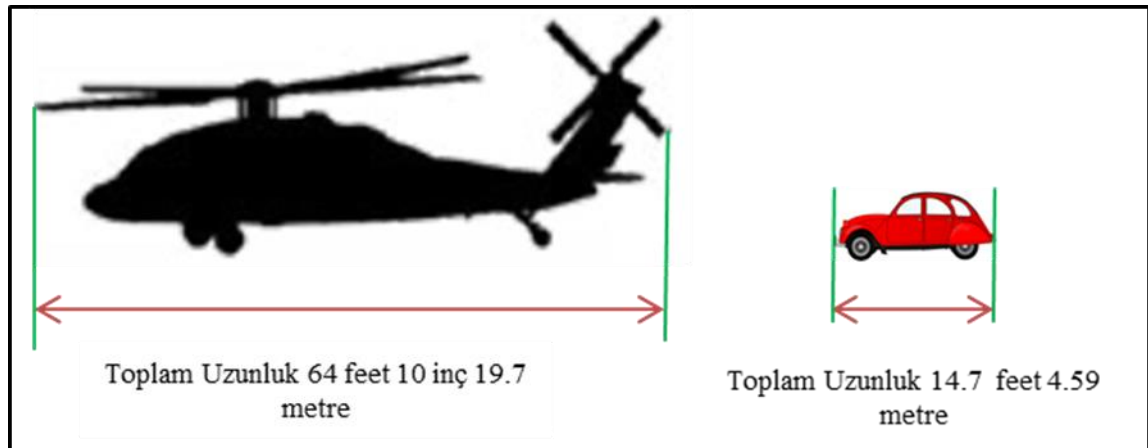
Mesafe tahmini türleri aşağıdaki Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Literatür taramasında, alacakaranlık zamanında (X) hiçbir mesafe tahmini yapılmadığı görülmüştür.

Tüm çalışmalar incelendiğinde, bir çalışma hariç hiçbir tahmin-analiz çalışmasının helikopter pilotları tarafından yapıldığı görülmüştür.

Çizelge 2.1. Mesafe tahmin literatür özeti

Yazar	Pilot	Ortam					Görüş sistemleri			
		Gündüz	Gece	Alacakaranlık	Sanal gerçeklik	Artırılmış gerçeklik	İnsan gözü (kısıtsız)	GGG	Kısıtsız	Kask görüş sistemi
[37]	✓*	✓	✓	X	-	-	✓	✓	✓	-
[30]	-	-	✓	X	-	-	✓	✓	-	-
[38]	-	✓	✓	X	-	-	✓	✓	-	-
[16]	✓	✓	✓	X	-	-	✓	✓	-	-
[39]	-	✓	-	X	-	-	✓	-	✓	✓
[40]	-	✓	-	X	✓	✓	✓	-	-	✓
[33]	-	✓	-	X	-	-	✓	-	✓	✓
[34]	-	✓	-	X	✓	-	-	-	✓	✓
[41]	-	✓	-	X	✓	-	✓	-	✓	✓
[42]	-	✓	-	X	✓	-	✓	-	-	✓
[43]	-	✓	-	X	✓	-	✓	-	-	✓

Bazı çalışmalarda ise gece görüş gözlüleri ile hatalı mesafe tahmini, uçuş ekibi üyeleri tarafından ciddi bir problem olarak tanımlanmıştır[17, 18, 20, 44, 45]. Nascimento ve diğ. yaptıkları araştırmaya göre açık denizdeki petrol ve gaz platformlarına uçan helikopterlerin gece sortilerinde kaza oranları gündüze göre en az beş kat daha fazla olduğu ortaya konmuştur[46].



Şekil 2.1. Helikopter - taşıt boyut karşılaştırması

Şekil 2.1’ de helikopter ve ortalama taşıt boyutu verilmiştir. Görüldüğü üzere 3 eksen de manevra kabiliyeti bulunan helikopter, ortalama bir taşıtın 4 katı uzunluğundadır. Bu uzunlukta bir hava aracının ağaç, tel, direk gibi engellerden uzak, emniyetli bir bölgeye

inişı veya havıra kadar yaklaşması için doğru mesafe tahminin önemli olduğu düşünülmektedir.

Yanlış mesafe tahmini, ABD Ordusu tarafından bazı gece mürettebat hatası kazalarında bir faktör olarak belirlenmiştir. Yaşanan bazı ana rotor pali kazalarında ise gece görüş gözlüğü bir faktör olarak gösterilmiştir. Bu kazalara sebep olarak pilotların, mesafeyi gece görüş gözlükleri ile olduğundan fazla tahmin ettiği rapor edilmiştir [47].

Yaşanan olaylardan hazırlanan saha raporları deney yoluyla da ortaya çıkarılmıştır. Gece görüş gözlükleri ile yaklaşık 6 m ile 61 m (20 ft ve 200 ft) arasındaki mesafeler için, gece görüş destekli mesafe tahmininin gün ışığı şartlarında cihazsız mesafe tahmininden önemli ölçüde daha zayıf olduğu tespiti yapılmıştır [37].

Başka bir çalışmada ise gözlemcilerin, gece görüş gözlüğü ve yardımsız görüşle boyutu değerlendirmede daha doğru olduğunu göstermiştir. Çalışmadaki sonuçlar, gece görüş gözlüklerinin normal görsel alan algısını değiştirdiğini ve bunun, uçuş ekibinin eğitiminde ve gece görüş gözlüğü uçuş performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Başka bir çalışmada ise gece görüş gözlüğü ile yapılan mesafe tahminlerinde, verilen düzeltmelerin (geri bildirim) çok faydalı olduğu yönündedir. Bu geri bildirimlerin gece görüş gözlüğü eğitimlerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir [38].

Gece görüş gözlüğünün yarattığı psikolojik ve fiziksel olumsuzluklar içinde doğru yapılan mesafe tahmini hava aracının pozitif kontrolü için önemli olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci parçası olan ÇKKV metotları ile savunma sanayi kapsamında yapılan literatür taraması Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. ÇKKV literatür özeti

Yazar	Uygulama	Yöntem
[48]	Askeri savunma planlaması	Pareto optimizasyonu
[49]	Savunma sanayinde bir firmanın firma seçme	AHP ve PROMETEE II
[50]	Ana muharebe tankı değerlendirilmesi	DEMATEL
[51]	Savaş uçağı etkinliği değerlendirilmesi	AHP ve TOPSIS
[52]	Askeri malzemelerde eskime değerlendirme	TOPSIS
[53]	Havadan hedef tehdit değerlendirmesi	AHP, WSM, WPM, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE ve CORPAS
[54]	Siber güvenlik sistemlerinin değerlendirilmesi	AHP ve SWOT
[55]	İnsansız hava aracı seçimi	AHP ve TOPSIS
[56]	Savaş uçağının değerlendirilmesini ve seçilmesini	FUCOM, ARAS
[57]	Askeri ve savunma bütçe planlama stratejisi önerme	DAMATEL
[58]	Sivil savunma merkezlerinin değerlendirilme	AHP ve WSM
[59]	Yüksek performanslı askeri uçak değerlendirmesi	AHP, TOPSIS, fuzzy AHP-VIKOR
[60]	En iyi askeri eğitim uçağının seçimini	AHP ve TOPSIS
[61]	Güdümlü tanksavar füze bataryasının (GAMB) en uygun atış pozisyonu	Fuzzy AHP ve MABAC
[62]	Donanma yetenek geliştirme stratejisinin bir analizini	F-MDCM
[12]	Askeri eğitim uçağı değerlendirilmesi	AHP, RIM ve F-RIM
[63]	Gözetleme sisteminin konumlandırılması.	AHP
[64]	Askeri uçaklar için uçuşa elverişlilik kriterlerini değerlendirme	AHP ve ANP
[65]	Askeri arazi aracı seçimi	AHP ve DEA
[66]	Askeri tankların değerlendirilmesi	PROMETHEE ve ELECTRE
[67]	Savaş gemilerinin seçimi	AHP
[68]	Denizaltı eğitim kriterlerinin seçimi	F-MCDM
[69]	Milli Savunma Bakanlığı personelinin performansının değerlendirilmesi	AHP
[70]	Ulaşım yapılarında araçlı bombalı saldırılar için mimari tasarım kararlarının değerlendirilmesi	AHP ve TOPSIS
[71]	AB üyesi ülkelerin güvenlik performanslarını değerlendirme	ARAS ve Fuzzy SMART;
[72]	Eğitim uçağı seçimi yöntemi	AHP; BWM ve F-TOPSIS;
[73]	Kara muharebe aracı seçimi	F-WAM, F-MCDMs
[74]	Subay/Memur terfileri ile ilgili karar verme sürecini destekleme	ELECTRE - MOr
[75]	Havacılık ve savunma sanayi için tedarikçi seçimi	AHP ve F-TOPSIS
[76]	Eğitim uçağını değerlendirilmesi	AHP ve MULTIMOORA
[77]	Askeri eğitim güvenlik risklerinin değerlendirilmesi	ANP

Bu paragrafta, Çizelge 2.2'de belirtilen bazı çalışmalar kısa olarak özetlenecektir. AHP yöntemini kullanarak Ayar vd., en uygun insansız hava araçlarını belirlemişlerdir. Dhara vd., CRITIC ve TOPSIS yöntemini kullanarak en uygun çok hafif iş uçağını seçmişlerdir.

Gazibey vd., ana muharebe tankı seçimini etkileyen kriterler ile DEMATEL yöntemi arasındaki etkileşimi analiz etmişlerdir. Genc, askeri tankların değerlendirilmesinde ELECTRE III ve PROMETHEE II'yi uygulamıştır. Hoan ve Ha, VPAF savaş uçağı seçiminde ARAS-FUCOM yaklaşımını uygulamışlardır. Karamaşa vd., uçuş eğitim organizasyonları için optimum eğitim uçağını değerlendirmek amacıyla genişletilmiş tek değerli nütrofik AHP ve MULTIMOORA yöntemini kullanmışlardır. Sánchez-Lozano vd., askeri eğitim uçaklarının etkinliğinin değerlendirilmesinde AHP ve F-TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Sánchez-Lozano vd., yüksek performanslı uçakların değerlendirilmesinde çift bulanık çok kriterli (AHP, TOPSIS, F-AHP-VIKOR) analiz uygulamıştır. Şenol, uçuş emniyeti için teknik ve operasyonel faktörleri AHP ve ANP yöntemleri ile değerlendirmiştir. Wibowo vd., hibrit çok kriterli karar verme (AHP ve TOPSIS) metodolojisini kullanarak savaş uçağı etkinliğinin değerlendirilmesini uygulayarak literatüre katkıda bulunmuştur. Literatür taramasında ÇKKV metodu ile GGG seçimine rastlanılmamıştır.

3. MATERİYAL VE METOT

Bu bölümde iki farklı çalışmanın malzeme ve metotları anlatılacaktır. Öncelikle mesafe tahmini yapılan materyal ve metot sonrasında ise ÇKKV metodu ile yapılan çalışmanın materyal ve metodu üzerinde durulacaktır.

3.1. Materyal

Mesafe tahmini için kullanılan GGG tek tiptir. Mesafe tahmini için kullanılan GGG yeşil fosforludur. ÇKKV metodu için kullanılan GGG'ler ise yedi farklı GGG'dir. Hepsi üçüncü nesil GGG olup G3, G5 ve G7 beyaz fosforlu, G1, G2, G4 ve G6 yeşil fosforlu GGG'lerdir.

3.2. Metot

Bu bölümün ilk kısmında mesafe tahmini ile ilgili metot kısmı izah edilecektir. Ardından ÇKKV metotları üzerinde durulacaktır.

3.2.1. Mesafe tahmin değerlendirme

Bu çalışmada, mesafe tahmini sekiz helikopter pilotu tarafından farklı koşullarda yapılmıştır. Pilotlar farklı ışık (aydınlatma) koşullarında (gündüz, alacakaranlık ve gece) ve farklı görüş şartlarında (Sınırlı görüş alanı, normal görüş ve GGG) olmadan farklı zamanlarda tahmin yapmışlardır. Tüm detaylar veri setine yerleştirilmiştir, ayrıca veri seti gerçek, tahmini mesafe değerlerini ve bu ikisinin farkına göre hesaplanan tahmin hatasını içermektedir. Veri seti yukarıda belirtilen özelliklerden 240 kayıttan (8 pilot/5 farklı durum/6 farklı mesafe tahmini) oluşmuştur ve genel olarak pilotların bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Pilot bilgileri

Pilot	Yaş	Uçuş tecrübesi (yıl)	Toplam uçuş	Toplam GGG uçuş	Helikopter Tipi
P1	27	4	715	62	Taarruz
P2	29	3	610	62	Genel Maksat
P3	31	3	560	16	Genel Maksat
P4	31	4	697	70	Taarruz
P5	37	10	2374	308	Taarruz
P6	35	9	2297	345	Taarruz
P7	31	5	842	111	Taarruz
P8	28	8	280	23	Taarruz

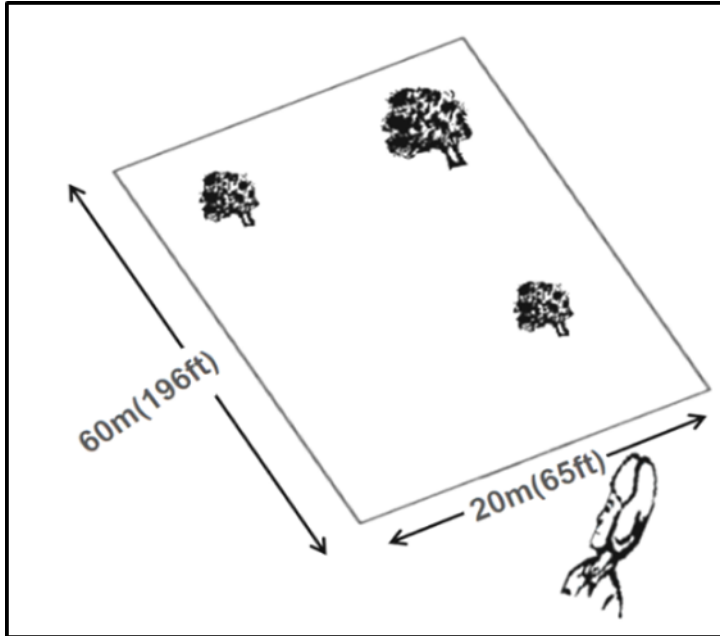
Sekiz pilotun bilgileri Çizelge 3.1’de görülmektedir. Sekiz pilotun yaş ortalaması 31 yıl ve standart sapması (3,39 yıl)’dır. Ortalama uçuş süresi deneyimi 5,75 saattir ve standart sapması (2,81 saat)’dir. Ortalama uçuş saati ve ortalama GGG uçuş saati sırasıyla 1046,87 saat ve 124,62 saattir ve standart sapmaları (811,92 saat) ile (28,35) arasındadır. Tüm pilotlar genel maksat helikopteri derecelendirmesine sahiptir ve altısının T-129 saldırı helikopteri derecelendirmesi vardır, bu nedenle ikisi hariç tutularak farklı uçak tipi altında değerlendirilmiştir. Tüm pilotlar aynı tip GGG’ler (Gen 3) ile tahminlerde bulunmuştur ve GGG’ler kullanılırken zamana bağlı verimlilik azalması ihmal edilmiştir.

Sınırlı Kask Üstü Ekran (HMD), normal görüşü kısıtlamak için temel bir eğitim aracıdır. Aletli uçuş eğitimi esnasında, pilotu, dışarıdaki görsel referanslardan ayırmak için kullanılan bir eğitim yardımcı malzemesidir. T-129 helikopteriyle uçan pilotlar, hedef ile helikopter arasındaki mesafeyi ölçen TSU (Hedefleme Görüş Birimi) sistemini konsept olarak kullanmışlardır. Ayrıca, bu konseptle uçmanın doğru mesafe tahmini üzerinde bir etkisi olup olmadığı da araştırılmıştır. Sekiz pilot, deneyin başlangıç tarihinden en fazla bir yıl önce uzman muayeneleri ve uygunluk değerlendirmesi de dahil olmak üzere uçuş ekibi tıbbi muayenesini tamamlamıştır. Sekiz pilotun herhangi bir göz rahatsızlığı veya kusuru da yoktur.

Çalışma aynı gün içerisinde gündüz, alacakaranlık ve gece vaktinde yapılmıştır. Çalışmanın yapıldığı günün hava raporu; tavan için, bulut kapallılık oranı 4000 feette az bulutlu açık (FEW), 10000 feette tamamen kapalı (BKN) görüş için ise 10 km üzerinde şeklindedir. Bu değerler, görerek uçuş şartlarının üzerinde değerlerdir.

Gündüz mesafe tahmini yukarıda belirtilen tavan ve görüş şartlarında yapılmıştır. Alacakaranlık zamanı için ise denizcilik alacakaranlık zamanı olan (nautical twilight) güneş merkezi hayali ufuk hattının 6° - 12° arasında altında olduğu zaman seçilmiştir [78]. Bu alacakaranlık, ufuk hattının hala bulanık olduğu halde yerde nesnelerin ana hattının görülebildiği, seyrüsefer için yıldızların seçilebildiği fakat cisimlerin detaylarını seçilemediği bir aydınlatma durumu sağlamaktadır. Bu zaman dilimi çalışmanın yapıldığı gün için 32 dakika olup, mesafe tahminleri bu süre zarfında yapılmıştır.

Gece zamanı için tahminler için ise önemli olan o günkü aydınlatma durumudur. Bunun için ayın o günkü aydınlatma düzeyine ve yerden kaç derece yukarıda olduğuna dikkat etmek gerekmektedir. Tahminlerin yapıldığı gün ayın görülebilirlik yüzdesi % 21 olup, açısı 30° altındadır. Şöyleki gece şartlarında gece görüş gözlüğü ile yapılan tahminler ay şartlarının olmadığı zamanda yapılmıştır. Meteorolojik raporda belirtildiği gibi 10000 feette tamamen bulut kapalılığı olması sebebiyle yıldız ışıklarının 0.00022 lüxlük aydınlatmasında faydalanılmadığı değerlendirilmektedir. Yakın mesafede bulunan 1,2 deniz mili (nm) (2,22 km.) mesafede bulunan şehir merkezi yansımalarının gece görüş gözlüğü mesafe tahminine katkısı olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 3.1. Tahmin yapılan bölge krokisi

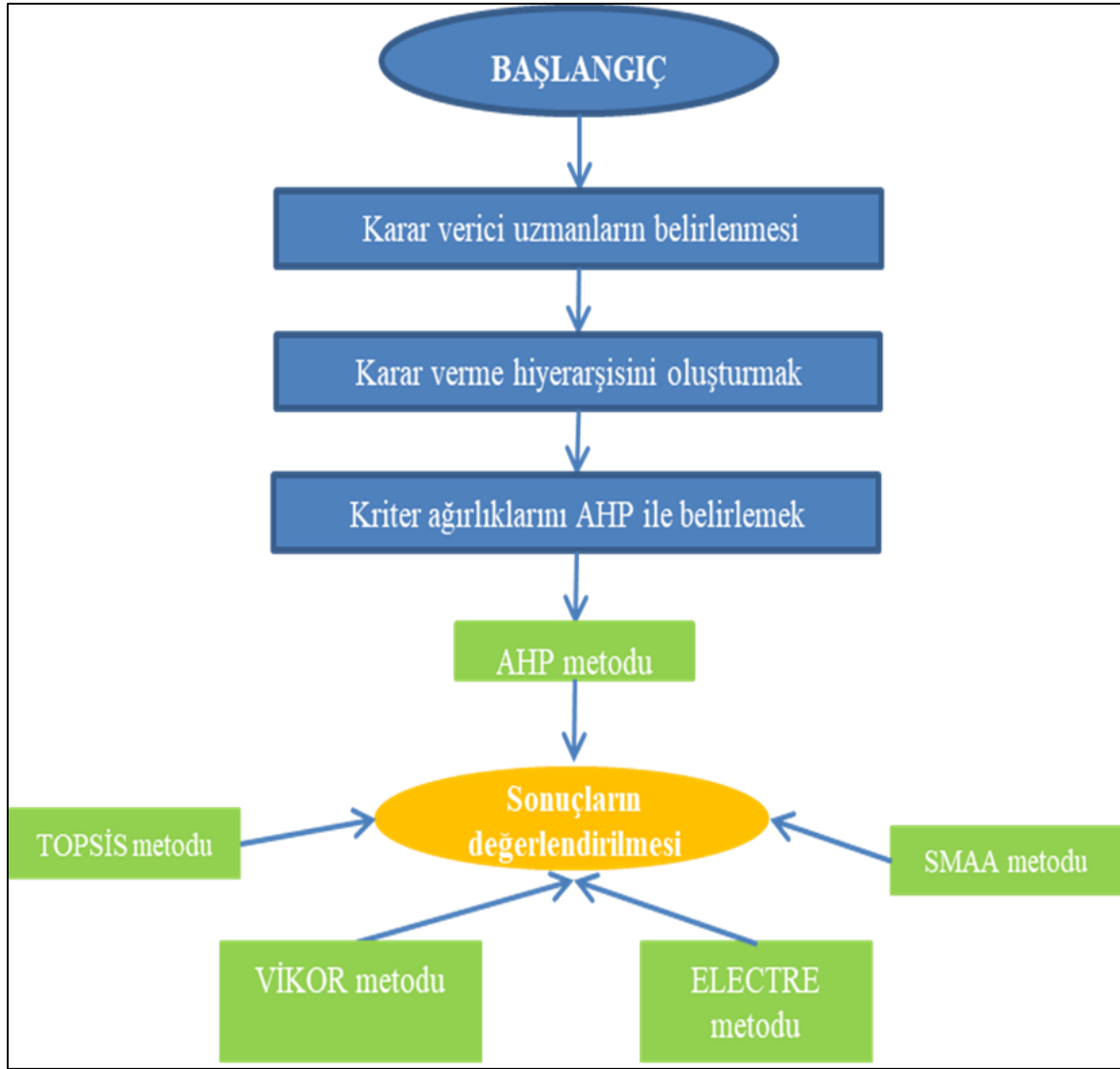
Şekil 3.1’ de tahmin yapılan bölge krokisi belirtilmiştir. Buna mesafe tahmin bölgesi 20 metre genişliğinde 60 metre uzunluğundadır. Mesafe tahmini için 210 x 297 mm boyutlarındaki beyaz karton kullanılmıştır. Karton, yatay şekilde pozisyonlandırılarak, yerden 140 cm. (yaklaşık 4 feet) yüksekliğine konumlandırılmıştır. Her tahmin için, zaman kısıtlaması yapılmamıştır. Bağlı olarak mesafe tahminini etkilememek (yakınlaşıp uzaklaştığını görmemesi) adına tahmin eden pilot farklı tahminlerde arkası döndürülmüştür. Gerçek mesafeler ise hassas lazermetre ile ölçülmüştür.

Gözlemcilerden her koşul için 6 tahmin yapılması istenmiştir. Özellikle alacakaranlık zamanı yapılan tahminlerde, güneşin ufuk hattının altına inmesiyle beraber tahminlerin hassasiyetinin azaldığı farkedilmiştir. Bu zaman dilimini süresinin darlığından (32 dakika) dolayı, bunun için özel bir zaman tespiti yapılarak istatistik oluşturulamamıştır. Güneşin ufuk hattına inmesi ile beraber mesafe tahminin doğruluğu ayrı bir araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir.

Tahmin yapılan yerde aralıklı olarak duran 4-5 ağaç vardır. Bu ağaçların mesafesi, referans noktası oluşturulmaması için, mesafesi söylenmemiştir. Yapılan mesafe tahminleri sonrasında kendilerine herhangi bir geri bildirim yapılmamıştır. Sekiz pilotun yaptığı mesafe tahminini testi nezaret eden personel hariç kimse duymamıştır. Böylelikle sekiz pilotun ayrı ayrı bağımsız tahminleri elde edilmiştir. Pilotlar tahminlerini kendi merkezleri (egocentric) olacak şekilde yapmışlardır. Pilotlar, her tahminden sonra tahmin edilen hedefin yakınlaşıp uzaklaştığını görmemesi için arkası döndürülerek görmemesi sağlanmıştır.

3.2.2. Çok kriterli karar verme metotları

Uzmanlar eşliğinde belirlenen kriterlerin ağırlığı belirlenerek sırasıyla AHP metodu, TOPSIS metodu, VIKOR metodu, ELECTRE metodu ve SMAA metodu uygulanmıştır.



Şekil 3.2. En uygun GGG'nin belirlenmesine yönelik işlem süreci

Şekil 3.2’ de gösterildiği üzere, çalışmanın ilk aşamasında karar verici uzmanlar belirlenmiştir. Sonrasında karar verici hiyerarşi yapı oluşturulmuştur. Uzmanlar eşliğinde belirlenen kriterlerin ağırlıkları belirlenerek sırasıyla TOPSIS metodu, VIKOR metodu, ELECTRE metodu ve SMAA metodu uygulanmıştır.

3.2.3. AHP yöntemi

AHP, Thomas Saaty tarafından önerilen, karmaşık bir karar verme problemini birkaç ayrı yapıya analiz etmeye ve ayırtırmaya izin veren iyi bilinen bir yöntemdir. Ayrıca AHP, karar vericilerin ikili karşılaştırmalara dayalı olarak kriterlerin ve alt kriterlerin göreceli ağırlıklarını hesaplamasını sağlamaktadır [79]. Hem nicel hemde nitel kriterler ele

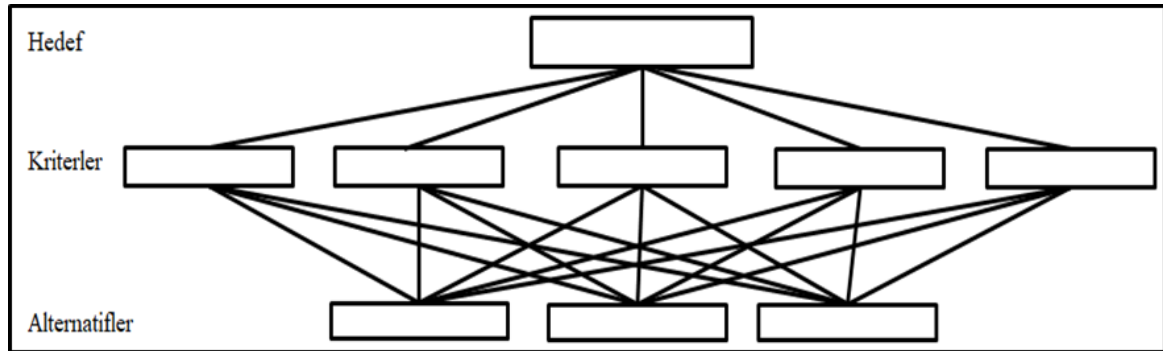
alınabilmektedir [80]. AHP işlemindeki aşamalar şu sıra ile özetlenebilmektedir. Sorunun amacı tanımlanmaktadır. İkinci aşamada ise amaç, kriter ve varsa alt kriterlerin yer aldığı hiyerarşik model oluşturulur. Üçüncü adımda ikili karşılaştırmalar yapılarak kriterlerin ve alternatiflerin her bir kriter altında birbirlerine olan öncelikleri belirlenir. Bu işlemin sayısı $[n(n-1)]/2$ adettir [81].

Uzmanlar “iki kriter arasından hangisinin asıl amaca daha fazla katkısı olduğu sorusuna cevap aramaktadırlar. Değerler 1-9 arasında bir skalada yer almaktadır (Çizelge 3.2) [79]

Çizelge 3.2. AHP 1-9 ölçeği[79]

Dereceler	Tanım
1	Kriterler eşit önemde
3	1. kriter 2.'ye göre biraz daha önemli
5	1. kriter 2.'ye göre fazla önemli
7	1. kriter 2.'ye göre çok fazla önemli
9	1. kriter 2.'ye göre aşırı derecede önemli
2-4-6-8	Ara değerler

Çizelge 3.2’de gösterilen skala ile ikili karşılaştırmalar yapılır.



Şekil 3.3. Üç seviyeli analitik hiyerarşi model örneği

Şekil 3.3’ de hedef, kriterler varsa alt kriterler ve alternatiflerin yer aldığı hiyerarşik model görülebilir.

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu değerler bir matrisi ile oluşturulur. Bu matris $n \times n$ boyutunda Eş. 3.1’deki gibi A matrisi oluşturulur. Bu matrisin köşegen üzerindeki

elemanların değeri 1'e eşit olan kare bir matristir[79] . Her bir kriterin ilgili ağırlıklarının belirlenmesi için bu matris kullanılır.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{23} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{13} & a_{13} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Ardından elde edilen A matrisindeki elemanlar her sütun elemanı sütunlarda tüm elemanlara bölünerek normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Ardından her satırın ortalaması alınarak öncelik değerleri belirlenir. Sonrasında ise ikili karşılaştırmaların tutarlık oranları (CR) Eş. 3.2'deki gibi hesaplanır. $Cr < 0,1$ ise tutarlık sağlanmış kabul edilir. Tutarlılık oranı, kararın doğruluğunu ve güvenilirliğini saptamak için kullanılır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.2)$$

Tutarlılık oranının hesaplanabilmesi için tutarlılık indeksi CI Eş. 3.4 ve rassal değer indekslerine ihtiyaç vardır. CI değerini hesaplamak için öncelikle maksimum öz değer Eş. 3.4 ile hesaplanır. Bunun için ise görelî öncelik değerlerinden oluşan öncelikler vektörü ile başlangıçta yer alan matrisin normalize edilmemiş ilk hali (A) çarpılarak "Tüm Öncelikler Matrisi" oluşturulur. Oluşturulan bu matrisin öncelikler vektörüne bölünmesiyle elde edilen değerlerin toplamının, toplam eleman sayısına bölünmesi sonucu bulunmuş olur.

$$A_w = \lambda_{\max} W \quad (3.3)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (3.4)$$

Rassal değer indeksi (RI) de tutarlılık oranının bulunmasında kullanılmaktadır. Bu değerler karşılaştırılan n tane unsura bağlı olarak oluşturulmuştur. Çizelge 3.3' de gösterilen RI değerleri sabit standart sayılardan meydana gelmiştir [82].

Çizelge 3.3. Rassal indeks değerleri

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R	0,0	0,0	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5
I	0	0	8	0	2	4	2	1	5	9	1	8	1	7	9

Kriterlere ait indekslerin kendi aralarında karşılaştırılması için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. Her ikili kriter kombinasyonunun önemlerinin karşılaştırılması sonucu kriterlerin birbirine olan üstünlüğünü göstermektedir. Uzmanlardan satırdaki her bir kriteri sütundaki her bir kriterle ayrı ayrı ikili karşılaştırması ve puanlaması istenir. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulurken Saaty'nin karşılaştırma ölçütleri kullanılır (Çizelge 3.2).

3.2.4. TOPSIS yöntemi

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions) yöntemi ilk olarak, 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından ÇKKV problemlerini çözmek için geliştirilmiş olan, bilinen klasik ÇKKV yöntemlerindendir [83]. TOPSIS yönteminin temelinde, algoritma sonucu seçilecek olan alternatifin, en iyi çözüme en yakın, en kötü çözüme en uzak olma esasına dayanmaktadır. Bir başka deyişle, TOPSIS yöntemi pozitif ideal çözüme en yakın olan alternatiflerin sıralanması tekniği olarak da tanımlanabilir. TOPSIS yönteminde kriterler iki gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar fayda ve maliyet kriterlerini kapsamaktadır. Pozitif ideal çözüm, fayda kriterlerini maksimize eden ve maliyet kriterlerini minimize eden çözüm olarak tanımlanırken, negatif ideal çözüm ise maliyet kriterlerini maksimize eden ve fayda kriterlerini minimize eden çözüm olarak tanımlanabilmektedir. Bir başka ifadeyle bütün kriterler düşünüldüğünde en iyi seviyede olan alternatif pozitif ideal alternatif, en kötü seviyede olan alternatif ise negatif ideal alternatif olarak adlandırılmaktadır [83, 84].

TOPSIS yönteminin ilk aşaması amaçların belirlenmesi ve değerlendirme kriterlerinin tanımlanmasıdır. Sonrasında Karar Matrisi (D) oluşturulması gelmektedir. Bu matriste alternatifler alt alta sıralanır ve karşılarında her bir kriterin alternatiflerine göre sıralanmaktadır.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Standart Karar Matrisi “D” elemanlarından yararlanılarak ve aşağıdaki denklem Eş. 3.6 kullanılarak, karar matrisindeki alternatifin sütundaki değerinin ilgili sütundaki tüm değerlerin kareleri toplamının kareköküne bölünmesiyle aşağıdaki Eş. 3.7 görülen “R” matrisi elde edilmektedir [85].

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \\ i = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlık değerleri w_i aşağıdaki Eş. 3.8 kullanılarak belirlenmektedir. Aşağıdaki denklemde Eş. 3.9 görülen “V” matrisi, “R” matrisinin her bir sütunundaki elemanların ilgili w_i değeri ile çarpılması sonucu oluşmaktadır. Sütunlardaki her bir değerlendirme kriterlerine ilişkin " $w_1, w_2, w_3 \dots w_n$ " ağırlıklar şeklindedir. Ağırlıkların yani w_i toplamı 1 sayısına eşittir (Eş. 3.8)

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3.8)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Sonraki adımda ideal A^* ve negatif ideal A^- çözümlerin oluşturulması gelmektedir.

İdeal çözüm setinin elde edilmesi, aşağıdaki Eş. 3.10 ile sağlanmaktadır.

$$A^* = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \quad (3.10)$$

“ i ” fayda kriteri ile ilişkilidir; “ j ” maliyet kriteri ile ilişkilidir [86].

Negatif ideal çözüm setinin bulunması, aşağıdaki Eş. 3.11 ile sağlanmaktadır.

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \quad (3.11)$$

“i” fayda kriteri ile ilişkilidir; “j” maliyet kriteri ile ilişkilidir.

TOPSIS yönteminde, her bir karar noktasına ilişkin değerlendirme faktör değerinin “İdeal” ve “Negatif İdeal” çözüm setinden sapmalarının bulunabilmesi için “Öklid Uzaklık Yaklaşımı”ndan yararlanılmaktadır. Buradan elde edilen karar noktalarına ilişkin sapma değerleri ise “İdeal Ayırım (S_i^*) ve Negatif İdeal Ayırım (S_i^-) Ölçüsü” olarak adlandırılmaktadır. İdeal ayırım (S_i^*) ölçüsünün hesaplanması aşağıda sunulan Eş. 3.12, negatif Eş. 3.12 ideal ayırım (S_i^-) ölçüsünün hesaplanması ise aşağıda sunulan Eş. 3.13 ile gerçekleştirilmektedir [87].

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.12)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.13)$$

(A_i)’nin (C_i^*) ‘ye göre yakınlık değerinin hesaplanması, aşağıda sunulan Eş. 3.14 ile sağlanmaktadır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.14)$$

Burada (C_i^*) değeri, $0 \leq C_i^* \leq 1$ aralığında değer almaktadır. $C_i^* = 1$ ise $A_i = A^+$ ve $C_i^* = 0$ ise $A_i = A^-$ eşittir.

3.2.5. VIKOR yöntemi

VIKOR (Visekriterijumsko kompromisno rangiranje) metodu çakışan ve önerilmeyen yani farklı birimler arasındaki kriterlerle ilgili karar sorunlarını çözmek için geliştirilmiştir[88]. Çakışan kriterler olması halinde sıralama yapılır ve bir dizi alternatif arasından seçim yapılır. Yakınlık ölçümüne dayalı çok kriterli sıralama endeksini “ideal” çözüme getirilmektedir. Yöntemin işlem basamakları aşağıdaki gibidir [89, 90].

Adım 1. Öncelikle karar matrisinin oluşturulması Eş. 3.15.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Adım 2. En iyi ve en kötü değerlerin tespiti yapılması. Eş. 3.16.

$$f_i^* = \max_j f_{ij}, f_i^- = \min_j f_{ij} \quad (3.16)$$

Adım 3. Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması Eş. 3.17.

$$r_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (3.17)$$

Adım 4. Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması Eş. 3.18.

$$v_{ij} = r_{ij} * w_i \quad (3.18)$$

Adım 5. Her alternatifin S_j ve R_j değerlerinin hesaplanması.

S_j ve R_j değerleri için $j = 1, 2, \dots, j$ hesaplanır. S_j, R_j değerleri j . Alternatif için ortalama ve en kötü grup skorlarını ifade etmektedir. Burada w_j kriter ağırlıklarını ifade etmektedir. Ağırlıklar toplamı 1'e eşit olmalıdır [90].

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \quad (3.19)$$

$$R_j = \max_i [w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)] \quad (3.20)$$

Adım 6. Her bir alternatif için Q_j değerlerinin hesaplanması.

$$S^- = \min S_j; \quad S^* = \max S_j$$

$$R^- = \min R_j; \quad R^* = \max R_j$$

$$Q_i = \frac{v(S_j - S^*)}{S^- - S^*} + \frac{(1-v)(R_j - R^*)}{R^- - R^*} \quad (3.21)$$

Eş. 3.21 'de yer alan v değeri maksimum grup faydasını sağlayan stratejinin ağırlığını ifade eder. $(1-v)$ değeri ise, karşıt görüşte olanların minimum pişmanlığının ağırlığını göstermektedir. Bu v değeri genel olarak 0,5 olarak kullanılmaktadır.

Adım 7. Alternatiflerin S , R ve Q değerlerinin küçükten büyüğe doğru sıralanması ve bu koşulların denetlenmesi.

Aşağıda ifade edilen iki koşulun sağlanması durumunda en küçük Q değerine sahip olan alternatif (A'') uzlaşık çözüm olarak kabul edilir.

1. Koşul C1: kabul edilebilir avantaj

$$Q(a^*) - Q(a') \geq DQ \quad DQ = \frac{1}{J-1}$$

Burada A^2 değeri, sıralamada en iyi ikinci sıraya alan alternatiftir.

2. Koşul: (C2) karar vermede kabul edilebilir istikrar

En iyi Q değerine sahip alternatif, S ve R değerinin de en az bir tanesinde en iyi sonucu gerçekleştirmiş olmalıdır. Eğer bu iki koşuldan herhangi birisinin gerçek olmaması durumunda uzlaşık çözüm şu şekilde önerilmektedir:

- C2 koşulu gerçekleşmiyorsa; A^1 ve A^2 alternatifleri uzlaşık çözüm kümesi içerisine alınır.
- C1 koşulu gerçekleşmiyorsa; A^1 , A^2 , ... A^m alternatifleri göz önüne alınarak, $Q(A^m) - Q(A^1) < 1/(J-1)$ eşitliğini sağlayan alternatifler uzlaşık çözüm kümesi için önerilirler. (m değeri küme içerisindeki alternatif sayısını ifade etmektedir.)

3.2.6. ELECTRE yöntemi

ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality) yöntemi, 1960'ların sonunda Bernard Roy ve ekibi tarafından ortaya atılmıştır [91]. Nijkamp, Van Delft ve H.Voogd tarafından geliştirilmiştir [92]. ELECTRE yöntemi diğer ÇKKV teknikleri gibi çeşitli alternatifler arasından, belirlenen kriterler değerlendirilerek en uygunu seçme yöntemlerinden biridir. ELECTRE yönteminin diğer ÇKKV yöntemlerine göre bazı önemli üstün olduğu taraflar vardır. Kriter seçimini tamamladıktan ve alternatifleri belirledikten sonra kullanılacak ELECTRE yöntemi ile kullanılacak kriterlerin önem ağırlıkları az ise az olan kriteri çıkartarak işleme devam edilebilmektedir. ELECTRE yönteminin birçok versiyonu bulunmaktadır. Bu makalede en yaygın ve en kolay uygulanabilen ELECTRE I kullanılmıştır.

ELECTRE Yönteminin çözümü sekiz adımda gerçekleştirilir.

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması.

Karar matrisinin satırlarında karar noktaları, sütunlarında ise değerlendirme kriterleri yer alır. matrisinde m karar noktası sayısını, n ise değerlendirme kriteri sayısını ifade etmektedir.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Adım 2. Standart karar matrisinin oluşturulması.

Eğer kriter fayda ise;

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (3.23)$$

İlgili kriter maliyet ise;

$$x_{ij} = \frac{\frac{1}{a_{ij}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{a_{kj}}\right)^2}} \quad (3.24)$$

Formülleri kullanılmaktadır.

Eş. 3.23 ve Eş.3.24 kullanılarak ve D matrisi elemanları yardımıyla x_{ij} matrisi elde edilir. Burada amaç, karar noktaları ile değerlendirme kriterleri ilişkilendirilirken bir ağırlıklandırma yapmaktır.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Adım 3: Ağırlıklı standart karar matrisinin (Y) oluşturulması.

Değerlendirme kriterlerinin karar verici açısından önem dereceleri farklı olabilir. Bu önem farklılıklarını ELECTRE çözümüne yansıtabilmek için Y matrisi hesaplanır. Ancak karar verici kriterlerin önem ağırlıklarının (w) hesaplamış olmalıdır. AHP ile belirlenen bu değerler ile her bir sütundaki elemanlar ilgili w_i değeri ile çarpılarak Y matrisi Eş. 3.26 oluşturulur.

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 X_{11} & w_2 X_{12} & \cdots & w_n X_{1n} \\ w_1 X_{21} & w_2 X_{22} & \cdots & w_n X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 X_{m1} & w_2 X_{m2} & \cdots & w_n X_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Adım 4: Uyum (C_{kl}) ve uyumsuzluk (D_{kl}) kümelerinin belirlenmesi.

Uyum kümelerinin belirlenebilmesi için Y matrisinden yararlanılmaktadır ve karar noktaları birbirleriyle değerlendirme kriterleri açısından kıyaslanır.

$$C_{kl} = \{j, y_{kj} \geq y_{lj}\} \quad (3.27)$$

Burada formül satır elemanlarının birbirine göre büyüklüklerinin kıyaslanmasına dayanmaktadır. Çoklu karar probleminde uyum kümesi ($m.m-m$) tanedir. Çünkü uyum kümeleri oluşturulurken k ve l indisleri için $k \neq l$ olmalıdır. Bu yöntemde her uyum kümesine (C_{kl}) bir uyumsuzluk seti (D_{kl}) karşılık gelmektedir. Şöyleki, uyum kümesi sayısı kadar uyumsuzluk kümesi sayısı vardır. Uyumsuzluk kümesi elemanları, ilgili uyum kümesine ait olmayan j değerlerinden oluşmaktadır.

Adım 5. Uyum (C) ve uyumsuzluk (D) matrislerinin oluşturulması.

Uyum (C) matrisinin oluşturulması için uyum setlerinden yararlanılır. (C) matrisi $m \times m$ boyutludur ve $k=l$ için değer almaz. C matrisinin elemanları aşağıdaki formülde gösterilen Eş. 3.28 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$c_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} w_j \quad (3.28)$$

Uyumsuzluk matrisi ise Eş. 3.29 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$d_{kl} = \frac{\max |y_{kj} - y_{lj}| (J \in D_{ab})}{\max |y_{kj} - y_{lj}|} \quad (3.29)$$

C ve D matrislerinde $k=1$ olursa matris tanımlanamayan matris olarak belirtilmektedir.

6.Adım: Üstün elemanları bulmak için üstünlük karşılaştırılması yapılmalıdır. Oluşturulan üstünlük matrisleri, uyum ve uyumsuzluk eşik değerleri yardımıyla, bu değerlerin uyum ve uyumsuzluk matris elemanlarının karşılaştırılması yapılmaktadır. Uyum eşik değeri Eş. 3.30 yardımıyla elde edilmektedir.

$$c = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m c_{kl} \quad (3.30)$$

$$f_{kl} = 1 \text{ ise } c_{kl} \geq c$$

$$f_{kl} = 0 \text{ ise } c_{kl} < c \text{ değerlerini almaktadır.}$$

Uyumsuzluk eşik değeri Eş. 3.31 formülü yardımıyla hesaplanır.

$$d = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m d_{kl} \quad (3.31)$$

$$g_{kl} = 1 \text{ ise } d_{kl} < d_{-}$$

$$g_{kl} = 0 \text{ ise } d_{kl} \geq d_{-} \text{ değerlerini almaktadır.}$$

7.Adım: Uyum üstünlük matrisi (F) ve uyumsuzlukluk üstünlük matrisi (G) elemanlarının birbirleriyle çarpılması sonucunda toplam üstünlük matrisi (E) elde edilir. Bu sebeple, toplam üstünlük matrisi de mxm boyutlarında ve 1 ya da 0 değerlerinden oluşmaktadır.

Adım 8: Karar noktalarının önem sırasının belirlenmesi

E matrisinin satır ve sütunları karar noktalarını gösterir. Örneğin E matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır ve üstünlük değerlerine göre sıralaması yapılır.

$$E = \begin{bmatrix} - & 0 & 0 \\ 1 & - & 0 \\ 1 & 1 & - \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

3.2.7. SMAA-2 yöntemi

SMAA-2 (Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis) yöntemi alternatiflerin sıralanması vasıtası ile alternatifler arasından en iyisinin seçiminin yapılması üzerine geliştirilmiş bir metottur [93]. SMAA-2 yöntemi, en iyi alternatifin belirlenmesini sağlamanın yanında, diğer alternatifleri de belirlenen kriterlere göre sıralayarak karar vericilere alternatiflerin sıralaması hakkında bilgi vermektedir. SMAA-2 yöntemi, en iyi alternatifin belirlenmesinin sağlaması yanında diğer alternatifleri de belirlenen kriterlere göre sıralayarak karar vericilere alternatiflerin sıralaması hakkında bilgi vermektedir [93].

SMAA-2 metodunda her alternatifin sıralama fonksiyonu Eş. 3.33 gibi tanımlanmaktadır (en iyi=1 , en kötü=m) [94].

$$rank(i; \zeta, w) = 1 + \sum_{k=1} p(u(\zeta_k, w) > u(\zeta_i, w)) \quad (3.33)$$

Sıra kabul edilebilirlik indisi, alternatifin mevcut durumunu farklı tercihlerin sonucu olarak ölçer ve indisi b_i^r olarak belirtilmektedir. Bu, kriter uygun sıra ağırlıkları için çok boyutlu integrallerle aşağıdaki gibi hesaplanmakta olup, Eş. 3.35’de gösterilmiştir [94].

$$b_i^r = \int_{\zeta \in X} f_x \zeta \int_{w \in W_i^r(\zeta)} f(w) dw d\zeta \quad (3.35)$$

Sıra kabul edilebilirlik indisi $[0,1]$ aralığında olup, 1’e ne kadar yakın ise verilen sıralamayı sağlayacağını, 0’a ne kadar yakın ise sıralamayı sağlamayacağını göstermektedir.

Tümleşik kabul edilebilirlik indisi, her alternatif için bulunan sıra kabul edilebilirlik indislerinin meta ağırlıklar ile birleştirilmesi ile elde edilmekte olup, Eş. 3.36’da gösterilmiştir.

$$a_i^h = \sum_r a^r b_i^r \quad (3.36)$$

a^r olarak ifade edilen meta ağırlıkları seçmenin birçok yolu bulunmaktadır [93]. Meta ağırlıklar normalize edilmiş olmalı, negatif olmamalı ve sıra değerinin artışı ile artmamalıdır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ilk etapta farklı görüş ve aydınlatma koşullarında mesafe tahmini yapan pilotların sonuçları değerlendirilecektir. Literatürde benzeri bulunmayan bu çalışma ile düşük görüş ve kısıtlı bakış açısının yarattığı farklılıklar değerlendirilecektir. İkinci bölümde ise ÇKKV metotları ile en uygun GGG seçimi değerlendirilecektir. Çalışmanın ilk kısmı, kısıtlı görüşün ve düşük yoğunluklu ortamlarda yapılan mesafe tahmini değerlerinden dolayı ikinci kısmın ispatı olarak düşünülebilir. Şöyleki özellikle kon ve rod hücrelerinin yetersiz kaldığı alakaranlık ortamındaki mesafe tahmin hata oranları ikinci bölümde ki kısıtlı ve monokrom görüşün etkisini ispatlar nitelikte veriler taşımaktadır. Çalışmanın devamında bu durum daha detaylı ele alınacaktır.

4.1. Mesafe Tahmin Analizi Sonuçları ve Tartışma

Pilot özellikleri ile mesafe tahminini etkileyen faktörler arasındaki ilişkileri araştırmak için mesafe hata değerlerinin normal dağılımı incelenmiştir. Ancak, hata değerlerinin çarpıklık ve basıklık değerleri $\pm 1,96$ aralığının dışında ve bu da normal bir dağılıma uymadıklarını göstermektedir. Bu durum, tahmin hatası değerlerinin normal olmayan bir dağılıma sahip olduğunu gösteren Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk testlerinin sonuçlarıyla da desteklenmiştir.

Tüm istatistiksel analizler SPSS 28.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1’ de örnek bir pilotun mesafe tahmin değerleri verilmiştir. Detaylı analizler çalışmanın devamında anlatılacaktır.

Çizelge 4.1. Örnek pilot mesafe tahmin değerleri

DN		DH		TN		TH		GGG	
Gerçek	Tahmin	Gerçek	Tahmin	Gerçek	Tahmin	Gerçek	Tahmin	Gerçek	Tahmin
13	8	52	48	13	13	20	18	20	13
17	14	46	41	19	19	24	21	17	17
26	23	35	36	25	24	32	36	20	22
35	29	24	33	34	32	49	46	31	27
48	43	21	30	48	46	62	58	34	28
71	59	17	24	46	47	62	58	33	29

Skewness-Kurtosis, Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk değerleri Çizelge 4.2 'de bulunabilir.

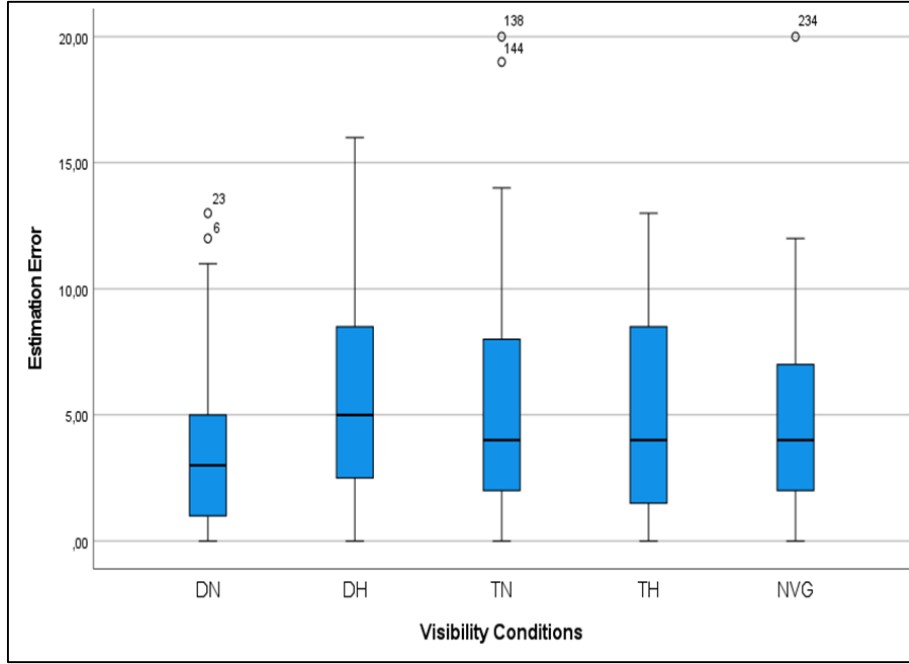
Çizelge 4.2. Hata değeri ve normallik testi değerleri

		Statistic	Std. Error	Sig.
Tahmin Hata	Mean	4,9042	,26620	-
	Median	4,0000	-	-
	Variance	17,008	-	-
	Std. Deviation	4,12402	-	-
	Minimum	,00	-	-
	Maximum	20,00	-	-
	Skewness	,991	,157	-
	Kurtosis	,849	,313	-
Test of Normality	Kolmogorov-Smirnov	-	-	<0.001
	Shapiro-Wilk	-	-	<0.001

Çizelge 4.3' de, gündüz normal görüşünün gündüz-HMD görüşünden daha düşük bir hataya sahip olmasına rağmen, alacakaranlık normal ve alacakaranlık-HMD koşullarındaki hatanın neredeyse aynı olduğunu göstermektedir. Bu, sınırlı görüşün mesafe algısı üzerindeki zararlı etkisinin yalnızca gün ışığı koşullarında meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, alacakaranlık hata değerlerini ($TN = 5.33 - TH = 5.20$) incelediğimizde, yetersiz koni ve çubuk hücrelerinin kullanımından kaynaklanabilecek yüksek bir hata oranı fark edilmektedir.

Çizelge 4.3. Görüş tipleri ve hata ilişkisi

Görüş	Mean $\pm$ SD	Median (Min.-Maks.)	
DN	3,92 $\pm$ 0,50	3,00 (0-13,00)	
DH	5,27 $\pm$ 0,59	5,00 (0-16,00)	
TN	5,33 $\pm$ 0,69	4,00 (0-20,00)	
TH	5,20 $\pm$ 0,61	4,00 (0-13,00)	
GGG	4,79 $\pm$ 0,57	4,00 (0-20,00)	



Şekil 4.1. Görüş koşulları - hata oranı grafik gösterimi

Görünürlük koşullarının kutu grafikleri Şekil 4.1' de tasvir edilmiştir. DN görüşü, beklendiği gibi tüm görünürlük koşulları arasında daha düşük bir hata vermiştir. İlginç bir şekilde, TN hatası TH hatasından biraz daha yüksektir, bu nedenle görüşü kısıtlayan başa takılan bir ekranın kullanımının zayıf görüş koşullarında ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılabilir. Bu veri, koni ve çubuk hücrelerinin yetersiz kullanıldığı alacakaranlık aydınlatma durumu için önemli olsa da, gündüz kısıtlı görüşün her iki alacakaranlık görüşünden daha yüksek hata oranı nedeniyle yorumlanmaya açık bir konu olarak kabul edilmektedir.

Görüş koşullarının arasındaki anlamlı farkı ölçmek için Freidman Testi uygulanmıştır. Bu test uygulanarak, tahmin hatası ilişkileri farklı koşullar altında görülebilmektedir. Freidman Testi sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir ve ortalama sıralama Şekil 4.1' de doğrulasa da, anlamlı değer ($p = .05$)' den büyük olduğundan, görünürlük değiştiğinde anlamlı bir ilişki olmadığı söylenebilir.

Çizelge 4.4. Görüş koşullarının Friedman testi sonuçları

	Mean Ranks of Estimation Error of Distinct Vision Conditions					
	DN	DH	TN	TH	GGG	Asymp. Sig.
Freidman Test	2,57	3,14	3,02	3,20	3,07	0,284

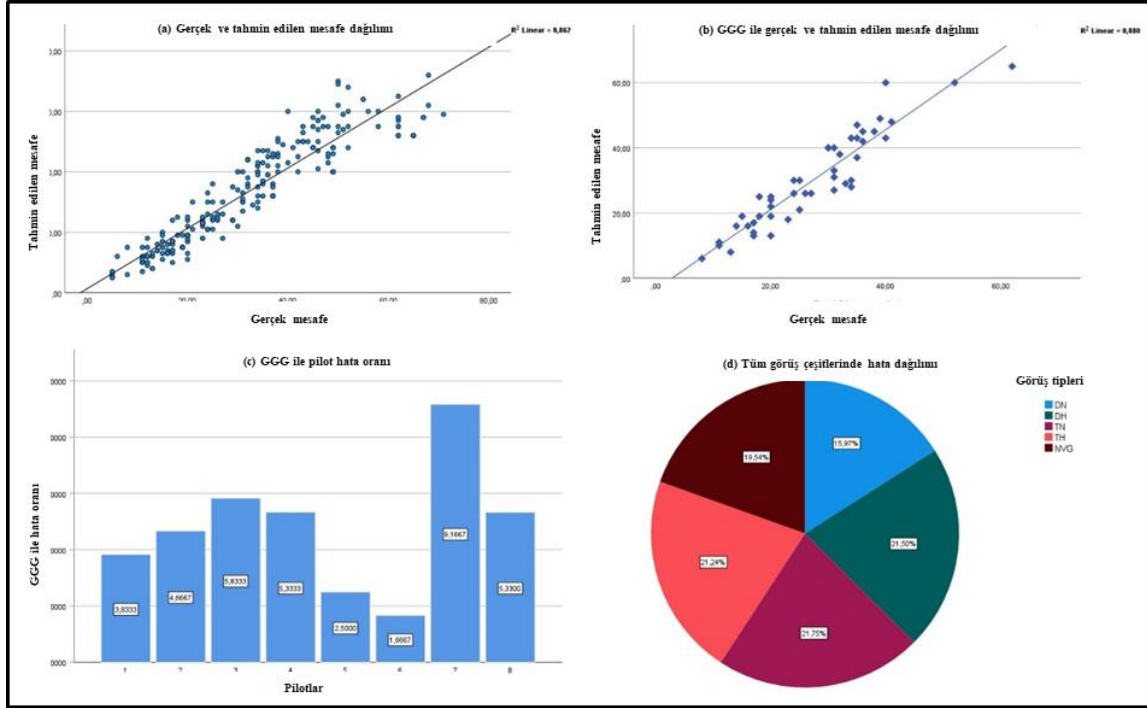
Uçuş yılı, toplam uçuş saati ve GGG uçuş saati artışıyla korelasyon ilişkisi Çizelge 4.5’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde, uçuş yılı deneyimi ile DH arasında negatif yüksek bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Dahası, GGG koşulları ile GGG olmadan toplam uçuş saatleri arasındaki sonuçlar negatif korelasyonlu görünmektedir.

Çizelge 4.5. Spearman testinin korelasyon değerleri

Görüş	Değerler	Uçuş yılı	Toplam uçuş saati	GGG saati
DN	Correlation coefficient	-,237	-,202	-,214
	Sig. (2-tailed)	,105	,168	,145
DH	Correlation coefficient	-,338*	-,171	-,267
	Sig. (2-tailed)	,019	,245	,066
TN	Correlation coefficient	,163	-,012	,041
	Sig. (2-tailed)	,269	,934	,781
TH	Correlation coefficient	,124	,195	,178
	Sig. (2-tailed)	,401	,183	,225
GGG	Correlation coefficient	-,272	-,291*	-,285*
	Sig. (2-tailed)	,062	,045	,050

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

Taarruz helikopterleri kullanan pilotların derecelendirmeleri, Mann-Whitney U testi kullanılarak diğer helikopter tiplerini kullanan pilotların derecelendirmeleriyle karşılaştırmıştır. Analiz, iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark ortaya koymamıştır; taarruz helikopteri derecelendirmesi olan pilotlar için ortalama sıralama 116,40 ve olmayan pilotlar için 132,79 dur.



Şekil 4.2. Mesafe tahmini ve hata değerlerinin grafikleri

Şekil 4.2.a incelendiğinde, tüm pilotların kısa mesafelerdeki gerçek ve tahmini değerlerinin birbirine yakın olduğu, pozitif ve negatif yönlerdeki hataların ise mesafe arttıkça arttığı görülmektedir. Tahmini ve gerçek mesafelerin gece görüşüyle gösterildiği Şekil 4.2.b' de, değerlerin doğrusal çizgiye yakın hizalandığı görülmektedir. Şekil 4.2.c, pilot başına GGG'lerin ortalama hatasını sunmaktadır. Pilot 7'nin 9,1667 değeriyle en yüksek ortalama hataya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 4.2.d, tahmin hatasının normal alacakaranlık koşullarında %21,75 oranında meydana geldiğini göstermektedir.

Çalışma bulguları, görüş koşulları kötüleştikçe mesafe tahmininin doğruluğunun azaldığını göstermektedir. Çizelge 4.3, en düşük hata oranının DN koşulunda ($M = 3.92$, $SD = .50$) gözlemlendiğini, TN koşulunun ise en yüksek hata oranına ($M = 5.33$, $SD = .69$) sahip olduğunu göstermektedir. Bu, aynı gözlem noktasına atfedilebilir ve potansiyel olarak pilotun kendi kendine geri bildirimi ile gerçekleştiği düşünülebilir. Bu sonuçlar literatürdeki önceki çalışmalarla uyumludur. Çizelge 4.3' deki alacakaranlık tahmin değerleri incelendiğinde, diğer görünürlük koşullarına kıyasla hata değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu, bu dönemde koni ve çubuk hücrelerinin yetersiz kullanımına atfedilebilir. GGG koşulu, DH, TN ve TH'ye kıyasla daha düşük bir hata oranı ($M = 4.79$, $SD = .57$) göstermektedir. Tek renkli bir görüş sistemi olmasına rağmen, gündüzleri

alacakaranlık aydınlatma koşullarından daha iyi performans göstermektedir. Bu bulgu, koni ve çubuk hücrelerinin alacakaranlıkta yeterince kullanılmadığını ve bunun da yanlış mesafe tahminine yol açtığını göstermektedir. Bu çalışma, bu yönü ilk kez ele alarak literatüre katkıda bulunulduğu düşünülebilir..

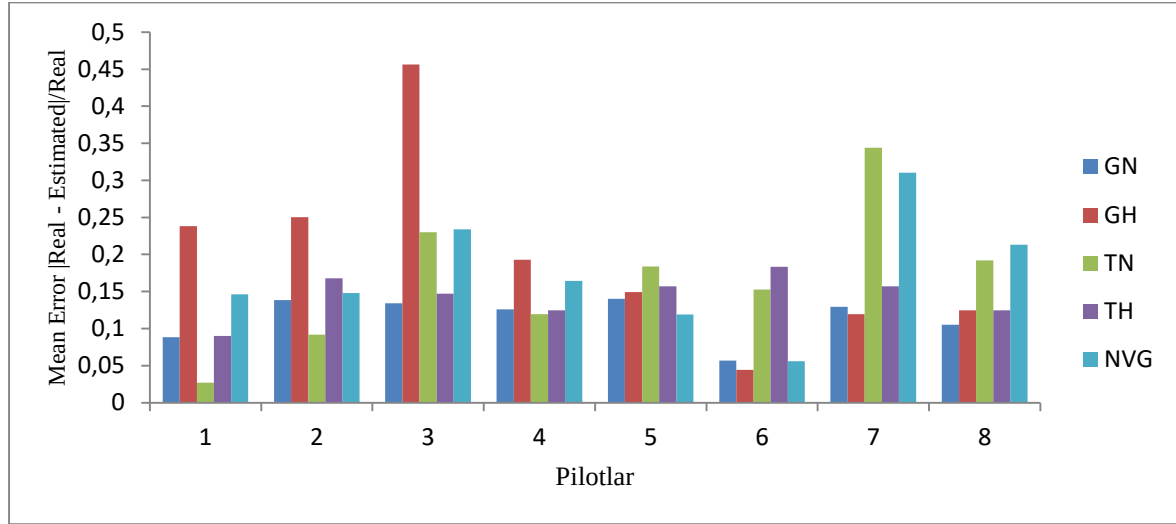
Şekil 4.2.c, Pilot 5 ve Pilot 6'nın diğer pilotlardan daha iyi bir mesafe tahmini hata oranına sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 3.1' deki iki pilotun istatistikleri, uçuş yıllarının 10 ve 9, uçuş saatlerinin 2374:00 ve 2297:00 ve GGG uçuş saatlerinin sırasıyla 308:00 ve 345:00 olduğu şeklinde görülebilir. Diğer altı pilotun verdiği tahminlerle karşılaştırıldığında, bu değerler oldukça yüksektir. Başka bir deyişle, araştırma, mesafe tahmininin doğruluğunun uçuş deneyimi ve uçuş saatleri arttıkça arttığını göstermektedir.

Pilot 5 ve Pilot 6'nın GGG mesafe tahmini hata oranı, diğer pilotlara kıyasla oldukça düşüktür (Şekil 4.2.c). Bu bilginin önemi, uçuş deneyimi ve uçuş saatleri arttıkça mesafe tahmininin doğruluğunun da arttığını göstermesidir. Bu sonuç, Çizelge 4.5' deki çok düşük korelasyonla desteklenmektedir. (Uçuş saatleri, $r = 2,91$, $p >,05$) ve GGG uçuş saatleri ($r = -,285$, $p >,05$).

Bu çalışmadan elde edilen bir diğer bulgu, toplam GGG uçuş saati sayısı ile GGG mesafe tahmininin doğruluğu arasındaki korelasyondur. Değerler incelendiğinde ortalama bir korelasyon görülmüştür. ($r = -,538$, $p <,01$). Bu, GGG uçuş süresinin iyileştirilmiş mesafe tahmini doğruluğu ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bunun ayrıca, daha önce açıklanan GGG uçuş koşulları altında GGG eğitimi ile kazaların nasıl önlenilebileceğini gösteren önemli bir bulgu olduğu düşünülmektedir.

T-129 taarruz helikopteri derecesine sahip pilotlar ve diğer pilotlar Mann-Whitney U testi ile karşılaştırılmıştır. Taarruz helikopteri tip derecesine göre hata değerleri analiz edildiğinde, saldırı helikopteri derecesine sahip olanlar ($M = 116.40$) ile olmayanlar ($M = 132.79$) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmiştir. Bunun bir nedeninin, hedef ile helikopter arasındaki mesafeyi ölçen ve saldırı helikopterlerinden uçan pilotlar tarafından sıklıkla kullanılan TSU (Targeting Sight Unit) sensörü olduğu düşünülmektedir. Bir diğer etken ise bu pilotların standart olarak formasyon(kol uçuşu) halinde uçmaları (en az iki helikopter). Liderin talimatlarına göre farklı şekillerde

birbirlerine yakınlaşmaları ve uzaklaşmaları nedeniyle, bu uçuş rejiminde uçan pilotlar mesafeleri tam olarak tahmin edebildiği düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Ortalama hata – tahmin koşullarının türleri

Pilotların toplam tahminlerinin hata değerlerinin ortalaması ($|Gerçek - Tahmini| / Gerçek$) Şekil 4.3' de incelenmiştir. Tüm pilotların DN sırasındaki olağan hata oranları, GGG taktiklerinde olduğundan daha düşüktür (Pilot 6 hariç). Bu sonuç, sınırlı görüş alanı ve gece görüş sisteminin mesafe tahmini üzerindeki olumsuz etkisini göstermektedir. DH hata oranları, tüm pilotlar için DN hata oranlarından daha yüksektir (Pilot 6 hariç). Bu sonuç, sınırlı görüş alanının mesafe tahmini üzerindeki olumsuz etkisini göstermektedir. Pilot 3, 5, 7 ve 8 hariç, TH, TN'den daha iyi tahmin doğruluğu göstermektedir. Bu bulgulara dayanarak, aynı aydınlatma koşulunda (alacakaranlık) sınırlı görüşün, zayıf görüşe göre mesafe tahmini doğruluğu üzerinde daha az etkiye sahip olduğu söylenebilir. Başka bir deyişle, zayıf aydınlatma koşullarında, sınırlı görüş, doğru mesafe tahmininde önemli bir rol oynamayabilir. Ancak, bu sonuçlar hakkında daha fazla araştırmaya ve deneğe ihtiyaç olduğu düşünülebilir.

Çalışmada pilotlar için referans mesafe noktaları verilmemiştir. Bu durumu, mesafe tahminlerinin hassasiyetini potansiyel olarak artırabileceğini anlamına gelebilmektedir. Şekil 4.2.a ve Şekil 4.2.b'de gösterildiği gibi, doğruluk ve tahmini mesafe arasında ters bir ilişki vardır. Bu durum, tahmini mesafe arttıkça doğruluğun azaldığını gösterir. Hem boyut hem de mesafe tahminleri aynı amaca hizmet etmektedir ve zayıf ışık koşullarında mesafe tahmin edilirken, hedef yaklaşıyor veya uzaklaşıyor gibi görünmektedir. Bu da algılanan

boyutta değişikliklere neden olmaktadır. Bu nedenle, düşük ışık ve kısıtlı görüş alanı altında boyutu tahmin etmede, doğruluk(hassasiyet) gibi benzer sonuçların beklenebileceğini varsaymak mantıklı olabilmektedir.

4.2. Gece Görüş Gözlüğü Değerlendirme Sonuçları ve Tartışma

Başarılı bir analiz için, etkinleştiren teknolojinin bilinçli bir şekilde seçilmesine yol açabilecek temel performans değerleri olan belirli kriterlerin seçimine odaklanılması gerekmektedir. Mevcut durum gerekliliklerini anlamak, başarılı bir analizin anahtarıdır ve aynı zamanda temel performans parametrelerinin seçiminde yardımcı olduğu düşünülmektedir.

4.2.1. Uzman ekip ve kriter seçimi

Çalışmanın bu adımında en yüksek GGG uçuş saatine sahip kontrol pilotları, öğretmen pilotlar, filo komutanları ve proje ve Ar-Ge şube müdürlüğünde görevli tecrübeli bir uzman grubu görev almıştır. Çizelge 4.6’ da uzmanların profili görülebilmektedir.

Çizelge 4.6. Uzman ekip

Uzman	Tecrübe yılı	Uzmanlık Alanları	Akademik Derecesi
1	26	Proje Şb., Ar-Ge Şb. ve Filo K.	Yüksek Lisans
2	25	Kontrol Pilotu, Proje ve Filo K.	Yüksek Lisans
3	25	Kontrol Pilotu, Proje ve Filo K.	Yüksek Lisans
4	11	Öğretmen Pilot, Proje Şb.	Yüksek Lisans

Uzman ekip ile yapılan görüşmeler ve detaylı literatür taraması sonrasında oluşturulan kriter ve açıklamaları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Oluşturulan kriter listesi sayesinde en iyi GGG seçimi ve değerlendirmesi hedeflenmiştir. Günümüzde çoğu GGG temel gereklilikleri ve teknik standartları karşılamaktadır. Bu nedenle teknik özellikler açısından herhangi bir GGG diğerlerinden farklı olması pek olası değildir. Fakat uzmanlar ile yapılan görüşmeler sayesinde GGG’lerin özellik ve farkına ortaya koyacak veriler şu şekilde oluşturulmuştur. Bunlar; derinlik algısı, netlik, hale etkisi, ayar usulleri, kontrast ve ağırlıktır. Kriterlerin listesi ve literatürdeki önem ve yerleri Çizelge 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4.7. Kriterler ve açıklamaları

Kriter	Açıklamalar
C1 - Derinlik algısı	Pilotlar tarafından, GGG ile uçuşlarda derinlik algısının eksikliği sebebiyle yaşanan sorunlar raporlanarak bildirilmiştir [16]. GGG'deki monokrom sebebiyle derinlik algısı güçleşmektedir [95]. Pilotlar icra ettikleri uçuşlarda görsel referanslar sayesinde algıladıkları görüntülerle birlikte hislerine güvenmektedirler. Özellikle ay ışığı olmadığı, kapalı bulutlu ortamlarda (yıldız ışığından faydalanamadığında) gece görüş gözlüğü ile derinlik algılaması güçleşmektedir. Uzmanlar bu nedenlerden bu kriteri uygun GGG değerlendirmesi için seçmişlerdir.
C2 – Netlik	Gece görüş gözlüklerinin netlik kalitesi, görüntü ekranı boyunca noktalı, zayıf parıldaması ile ilişkilidir. Netlik düşük ışık koşullarında, görüntü kalitesini belirleyebilmektedir [96]. Netlik ne kadar yüksekse, düşük ışık koşullarında nesnelerin çözünürlüğü o kadar net belli olmaktadır [97] [98].
C3 – Hale etkisi	Gece görüş gözlüğü ile helikopter uçuşlarında son yaklaşma kısmında (yere yakınlaştıkça) aydınlatma ışıkları ve araba farları gibi ışıklar, pilot gözünde büyük ve parlak hale oluşturmakta, bu da görüşün tamamen kaybına sebep olabilmekte ve helikopterin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu anlamda hale etkisi gece görüş gözlüğü uçuşlarında çok kritik bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır [98].
C4 – Ayar usulleri	GGG kullanan bir pilotun ihtiyaç duyacağı temel becerilerden biri, GGG'ye odaklanma yeteneğidir. Uygun GGG odak ayarının elde edilememesi, zayıf görme keskinliğine ve görsel yorgunluğa neden olabilmektedir [99].
C5- Kontrast	Gece görüş gözlüklerinin yapısı gereği, gözde oluşan tek renk görüntü kontrast hassasiyetinin azalmasına sebep olmaktadır. Özellikle orman, buzul ve karla kaplı dağlık alanlar gibi tek bir renk bitki örtüsü veya arazi kesiminde kontrast ayrımı yapmak güçleşmekte, helikopterin kontrolü için gereken nirengi seçimi güçleşmektedir [14] [100].
C6 - Ağırlık	Kaska ilave olarak takılan cihaz, kaskın ağırlık merkezini de değiştirerek boyun ağrılarına, baş ağrılarına sebep olabilmektedir [101] [102] . Helikopter uçuşlarında titreşimden dolayı pilotlarda ve mürettebatta boyun ağrısı yaygındır [103] [104]. Bu konu ile ilgili Kanada Silahlı Kuvvetlerinde bir çalışma yapılmıştır. Katılımcıların (138 pilot, 58 uçuş mühendisi) %80 sinden fazlasının boyun ağrısı çektiği tespit edilmiştir [102].

Çalışmanın bu bölümünde AHP, TOPSIS, ELECTRE, VIKOR ve SMAA yöntemleri için gerekli olan kriter ağırlıklarının değerlendirilmesi için AHP yöntemi kullanılmıştır.

Uygulamada kullanılacak olan verilerin ağırlıkları AHP yöntemiyle belirlenmiştir. Bu görüşlerin tek bir değer olarak ifade edilmesi için geometrik ortalamaları alınmıştır. Alınan uzman görüşleri ve yapılan literatür taramasına göre uygulamada kullanılan kriterlere Çizelge 4.8'de gösterilmiştir. Yapılan ikili karşılaştırmalar sayesinde karşılaştırma matrisi (Çizelge 4.8) oluşturulmuştur.

Çizelge 4.8 kullanılarak AHP adımlarından ikinci adımı uygulanarak karar matrisinin satır toplamaları normalize edilmiştir (Çizelge 4.9). Kriterlerin ağırlıkları hesaplanmış ve Çizelge 4.10’ da gösterilmiştir.

İkili karşılaştırma matrisinin en büyük özdeğeri olan $\lambda_{\max}$ hesaplanmış ve 6,6149 bulunmuştur. Buna bağlı olarak tutarlılık göstergesi (CI) ve tutarlılık oranı (RI) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad CR = CI / RI$$

$$CI = (6,6149 - 6) / (6 - 1) \quad CR = 0,123 / 1,25$$

$$CI = 0,123 \quad CR = 0,0984$$

Tutarlılık oranı (CR) değeri 0,1’den küçük olduğundan karar vericilerin değerlendirmelerinin tutarlı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.8. Kriterlere ilişkin ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler	Derinlik Algısı	Netlik	Hale etkisi	Ayar Usulleri	Kontrast	Ağırlık
Derinlik algısı	1	2	0,5	3	2	0,5
Netlik	0,5	1	0,5	5	1	0,333
Hale etkisi	2	2	1	5	0,333	0,5
Ayar Usulleri	0,333	0,2	0,2	1	0,2	0,2
Kontrast	0,5	1	3	5	1	0,333
Ağırlık	2	3	2	5	3	1

Her bir değeri kendi sütununa ait toplamına bölerek Çizelge 4.9’ da ki normalize edilmiş karar matrisi bulunur.

Çizelge 4.9. Normalize edilmiş karşılaştırma matrisi

Kriterler	Derinlik algısı	Netlik	Hale etkisi	Ayar Usulleri	Kontrast	Ağırlık
Derinlik algısı	0,158	0,217	0,069	0,125	0,265	0,174
Netlik	0,079	0,109	0,069	0,208	0,133	0,116
Hale etkisi	0,316	0,217	0,139	0,208	0,044	0,174
Ayar Usulleri	0,053	0,022	0,028	0,042	0,027	0,070
Kontrast	0,079	0,109	0,417	0,208	0,133	0,116
Ağırlık	0,316	0,326	0,278	0,208	0,398	0,349

AHP, TOPSIS, ELECTRE, VİKOR ve SMAA için kullanılacak tabloların anlaşılmasını kolaylaştırmak için kriterler kodlanmış ve Tablo 8’de listelenmiştir.

Çizelge 4.10 ‘da görüldüğü gibi kriterler arasında “ağırlık” diğer kriterlere göre en yüksek değeri (0,312) almıştır. Uzmanların uzun süreli (birden fazla dönem) GGG ile uçuş yapmalarından kaynaklanan, geçmiş deneyimlerine bağlı olarak bu sonuca ulaştıkları düşünülebilir. Günlük, yedi günlük ve otuz günlük uçuş üst limitleri olmasına rağmen doğal afetlerde (deprem, sel vb.) üst limit dikkate alınmamaktadır. Uzmanlar en yakın doğal afet olan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminde uzun süreli uçuş yaptıkları için “ağırlık” kriterine yüksek bir ağırlık değeri vermiş olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 4.10. Kriter ağırlıkları

Kriter Kodu	Kriter	Ağırlık değeri
C1	Derinlik algısı	0,168
C2	Netlik	0,119
C3	Hale etkisi	0,183
C4	Ayar Usulleri	0,0400
C5	Kontrast	0,176
C6	Ağırlık	0.312

4.2.2. TOPSIS uygulaması

TOPSIS yönteminin uygulanmasında ilk aşamada standart karar matrisi Çizelge 4.11 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.11. Standart karar matrisi (D)

Alternatif/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6
G1	3	5	4	8	4	592
G2	6	6	6	8	6	506
G3	9	7	9	8	8	424
G4	8	6	8	7	7	525
G5	7	7	7	6	7	650
G6	6	7	7	7	6	560
G7	6	7	7	6	6	600

Karar matrisindeki alternatifin sütundaki değerinin ilgili sütundaki tüm değerlerin kareleri toplamının kareköküne bölünmesiyle Eş. 4.1 aşağıdaki görülen “R” matrisi elde edilmektedir.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2} \quad (4.1)$$

Benzer şekilde diğer rij değerleri de hesaplanarak Çizelge 4.12’ de gösterilen normalize edilmiş karar matrisini oluşturulmuştur.

Çizelge 4.12. Normalize edilmiş karar matrisi (R)

Alternatif/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6
G1	0,170	0,292	0,216	0,420	0,237	0,403
G2	0,340	0,351	0,323	0,420	0,355	0,344
G3	0,510	0,409	0,485	0,420	0,473	0,289
G4	0,454	0,351	0,431	0,368	0,414	0,357
G5	0,397	0,409	0,377	0,315	0,414	0,442
G6	0,340	0,409	0,377	0,368	0,355	0,381
G7	0,340	0,409	0,377	0,315	0,355	0,408

Çizelge 4.12’de yer alan ağırlıklandırılmış normalize edilmiş karar matrisi, Çizelge 4.11’de yer alan normalize edilmiş karar matrisinin (R) sütunlarındaki değerler ile Çizelge 4.8’de yer alan kriterlerin ağırlık değerleri çarpımı ile oluşturulmuştur.

Çizelge 4.13. Ağırlıklandırılmış normalize edilmiş karar matrisi

Etki	Pozitif	Pozitif	Pozitif	Pozitif	Pozitif	Negatif
Ağırlıklar	0,168	0,119	0,183	0,040	0,177	0,313
Alternatif/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6
G1	0,029	0,035	0,040	0,017	0,042	0,126
G2	0,057	0,042	0,059	0,017	0,063	0,108
G3	0,086	0,049	0,089	0,017	0,084	0,090
G4	0,076	0,042	0,079	0,015	0,073	0,112
G5	0,067	0,049	0,069	0,013	0,073	0,138
G6	0,057	0,049	0,069	0,015	0,063	0,119
G7	0,057	0,049	0,069	0,013	0,063	0,128
A*	0,026	0,083	0,045	0,012	0,041	0,053
A-	0,077	0,150	0,102	0,018	0,093	0,035

Çizelge 4.12’de ek olarak ideal (A*) ve negatif ideal (A-) çözüm setleri de yer almaktadır. A* seti için matrisin her bir sütununun en büyük değeri, A- seti için ise matrisin her bir sütununun en küçük değeri alınmıştır.

Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 yardımıyla her bir karar noktasının pozitif-ideal çözümünden olan mesafesi (S+) ve negatif-ideal çözümünden olan (S-) hesaplanmıştır. Eş. 3.14 yardımıyla ideal çözüme göreli yakınlık değerleri hesaplanarak değerler Çizelge 4.13’ de aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Pozitif ve negatif ideal çözüme olan mesafe ve ideal çözüme göreli yakınlık değerleri

Alternatifler	Si+	Si-	Ci*	Ranking
G1	0,088	0,174	0,665	7
G2	0,080	0,142	0,640	6
G3	0,100	0,117	0,540	1
G4	0,099	0,136	0,578	2
G5	0,108	0,150	0,581	3
G6	0,087	0,140	0,617	5
G7	0,094	0,146	0,609	4

TOPSIS yönteminde $G3 > G4 > G5 > G7 > G6 > G2 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

4.2.3. ELECTRE uygulaması

Adım 1. ELECTRE yönteminin uygulamasında ilk aşamada Standart Karar Matrisi (D) oluşturulmuştur. Satırlarda üstünlükleri sıralanmak istenen karar noktaları, sütunlarda ise karar vermede kullanılacak değerlendirme faktörleri yer almaktadır. Standart karar matrisi TOPSIS yönteminin birinci aşamasındaki matris (Çizelge 4.9) ile aynıdır.

Adım 2. Birinci aşamada oluşturulan D karar matrisinin normalize edilmesi için oluşturulacak standart karar matrisi, Eş. 3.8 kullanılarak hesaplanır. Bu matris TOPSIS yönteminin ikinci aşamasındaki matris (Çizelge 4.10) ile aynıdır.

Adım 3. Bu aşamada ağırlıklandırılmış standart karar matrisi (Y) oluşturulmuştur. Değerlendirme faktörlerinin karar verici açısından önem farklılıklarını ELECTRE çözümüne yansıtılabilmek için Y matrisi hesaplanmıştır. Normalize karar matrisindeki her bir değer ilgili sütundaki kriterlere ait ağırlıklar ile çarpılarak aşağıda Çizelge 4.14’de görülen Y matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.15. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi (Y)

Alternatif/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6
G1	0,029	0,035	0,040	0,017	0,042	0,126
G2	0,057	0,042	0,059	0,017	0,063	0,108
G3	0,086	0,049	0,089	0,017	0,084	0,090
G4	0,076	0,042	0,079	0,015	0,073	0,112
G5	0,067	0,049	0,069	0,013	0,073	0,138
G6	0,057	0,049	0,069	0,015	0,063	0,119
G7	0,057	0,049	0,069	0,013	0,063	0,128

Adım 4. Dördüncü aşamada uyum setlerinin belirlenebilmesi için Y matrisinden yararlanılmaktadır. Karar noktaları birbirleriyle değerlendirme faktörleri açısından kıyaslanır ve setler Eş. 3.27 yardımıyla belirlenir. Bu çalışmada 7 adet kriter olduğundan (7x6) 42 satır uyum ve uyumsuzluk seti oluşturulmuştur. Örnek olarak ilk 5 satır aşağıda (Çizelge 4.15) gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. Uyum (C) ve uyumsuzluk (D) setlerinin belirlenmesi

C12	{4,6}	D12	{1,2,3,5}
C13	{4}	D13	{1,2,3,5}
C14	{4}	D14	{1,2,3,5}
C15	{4,6}	D15	{1,2,3,5,6}
C16	{4}	D16	{1,2,3,5}

Burada her bir uyum (C) setine bir uyumsuzluk (D) seti karşılık gelmektedir

Adım 5. Bu aşamada uyum (C) ve uyumsuzluk (D) matrisleri oluşturulmuştur. Uyum matrisinin (C) oluşturulması için uyum setlerinden yararlanılmıştır. C matrisinin elemanları Eş. 3.28 yardımıyla hesaplanmıştır. Uyumluluk setlerinin her bir değeri için ayrı ayrı numaralar ile gösterilen kriterlerin ağırlık değerleri toplanarak uyumluluk setleri için setlerin toplam ağırlıkları hesaplanmıştır ve Çizelge 4.16 'da uyum matrisi örnek olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Uyum (concordance) matrisi

Alternatifler	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	Toplam
G1	0	0,040	0,040	0,353	0,040	0,040	0,353	0,865
G2	0,687	0	0,040	0,472	0,353	0,698	0,698	2,947
G3	1	1	0	1	1	1	1	6
G4	0,960	0,647	0	0	0,881	0,881	0,881	4,250
G5	0,647	0,647	0,119	0,296	0	0,647	0,687	3,045
G6	0,960	0,647	0,119	0,159	0,655	0	1	3,540
G7	0,647	0,647	0,119	0,119	0,655	0,647	0	2,835
Toplam	4,902	3,630	0,437	2,398	3,583	3,914	4,619	23.483

Adım 6. Bu aşamada uyum (C) ve uyumsuzluk (D) matrislerinin üstünlük karşılaştırması yapılmıştır. Üstünlük karşılaştırmasının yapılabilmesi için önce C ve D indislerinin ortalaması ($\bar{c}=0,559$, $\bar{d}=0,626$) hesaplanmıştır. Alternatiflerin her bir değer için bu değerlerin eşik değerinden büyük, eşit veya küçük olma durumuna göre üstünlük matrisi oluşturulmuştur. Çizelge 4.17’ de örnek olarak uyum üstünlük matrisi verilmiştir.

Çizelge 4.18. Uyum (concordance) üstünlük matrisi

Alternatifler	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
G1	0	0	0	0	0	0	0
G2	1	0	0	0	0	1	1
G3	1	1	0	1	1	1	1
G4	1	1	0	0	1	1	1
G5	1	1	0	0	0	1	1
G6	1	1	0	0	1	0	1
G7	1	1	0	0	1	1	0

Adım 7. Net uyum indeks değeri en büyük, net uyumsuzluk indeksi ise en küçük olan alternatif çözüm kümesini oluşturmaktadır. Cp ler büyükten küçüğe, Dp ler küçükten büyüğe doğru sıralanır. Net uyum ve uyumsuzluk indeksleri aşağıdaki gibi (Çizelge 4.18 oluşturulmaktadır:

Çizelge 4.19. Net uyum ve uyumsuzluk indeksleri (uygulama sonucu)

Alternatif	Cp	Dp		SUPERIOR RANK	INFERIOR RANK
G1	-4,037	5,092		7	7
G2	-0,683	-0,533		5	3
G3	5,563	-6		1	1
G4	1,852	-2,301		2	2
G5	-0,538	1,688		4	5
G6	-0,373	-0,443		3	4
G7	-1,783	2,497		6	6

Bu indeksler incelendiğinde uyum G3 ve G4 alternatifinin her iki indiste de bir ve ikinci sırada olduğu görülmektedir.

Son aşama olarak uyum üstünlük matrisi (F) ve uyumsuzlukluk üstünlük matrisi (G) elemanlarının birbirleriyle çarpılması sonucunda toplam üstünlük matrisi (E) elde edilir (Çizelge 4.19).

Çizelge 4.20. Toplam üstünlük matrisi

Alternatifler	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
G1	-	0	0	0	0	0	0
G2	1	-	0	0	0	0	1
G3	1	1	-	1	1	1	1
G4	1	1	0	-	1	1	1
G5	1	0	0	0	-	0	0
G6	1	0	0	0	0	-	1
G7	1	0	0	0	0	0	-

ELECTRE yönteminde **G3>G4>G2=G6>G5=G7>G1** sonucu elde edilmiştir.

4.2.4. VIKOR uygulaması

Bu metotta ilk aşamada Tüm kriter fonksiyonlarının en iyi f_i^+ ve en kötü f_i^- değerlerini belirlenmektedir (Çizelge 4.20). $i = 1; 2; \dots; n$.

Çizelge 4.21. Vikor en iyi en kötü sıralması

Alternatifler/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6
G1	3	5	4	8	4	592
G2	6	6	6	8	6	506
G3	9	9	9	9	9	425
G4	8	6	8	7	7	525
G5	7	7	7	6	7	650
G6	6	7	7	6	6	560
G7	6	7	7	6	6	600
f_i^+	9	9	9	9	9	425
f_i^-	3	5	4	6	4	650

İkinci aşamada normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulur. Eş (38).

$$r_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_{ij}^-} \quad (4.38)$$

Üçüncü aşamada ise ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması Eş (39). gelmektedir.

$$v_{ij} = r_{ij} * w_i \quad (4.39)$$

Sonrasında ise her alternatifin S_j ve R_j değerlerinin hesaplanmaktadır (Çizelge 4.21).

Çizelge 4.22. Ağırlıklandırılmış karar matrisi ve değerleri

Alternat/Kriter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Si	Ri
G1	0,168	0,119	0,183	0,013	0,177	0,232	0,893	0,183
G2	0,084	0,089	0,110	0,013	0,106	0,113	0,515	0,110
G3	0	0	0	0	0	0	0	0
G4	0,028	0,089	0,037	0,027	0,071	0,139	0,390	0,089
G5	0,056	0,060	0,073	0,040	0,071	0,313	0,612	0,073
G6	0,084	0,060	0,073	0,040	0,106	0,188	0,551	0,106
G7	0,084	0,060	0,073	0,040	0,106	0,243	0,606	0,106

Q_i değeri $v=0,5$ için değerlerini hesaplanır (Çizelge 4.22)

Çizelge 4.23. Q_i değerleri

Alternatif	Q_i
G1	1
G2	0,589
G3	0
G4	0,462
G5	0,543
G6	0,598
G7	0,629

S , R ve Q değerlerine göre artan düzende sıralayarak alternatifleri sıralanır. Ardından üç sıralama listesi Çizelge 4.23’de görüldüğü üzere oluşturulur.

Çizelge 4.24. Sıralama listesi

Alternatif	Si		Alternatif	Ri		Alternatif	Qi
G3	0		G3	0		G3	0
G4	0,390		G5	0,073		G4	0,462
G2	0,515		G4	0,089		G5	0,543
G6	0,551		G6	0,106		G2	0,589
G7	0,606		G7	0,106		G6	0,598
G5	0,612		G2	0,110		G7	0,629
G1	0,893		G1	0,183		G1	1

Bir uzlaşma çözümü olarak önerilir.

C1: Kabul Edilebilir Avantaj

a'' , sıralama listesinde Q ile ikinci sıradaki alternatiftir (Çizelge 4.24).

Çizelge 4.25. Kabul edilebilir avantaj

Alternatif	Q_i	$Q(a'') - Q(a')$
G3	0	0,462379
G4	0,462	
G5	0,543	
G2	0,589	
G6	0,598	
G7	0,629	
G1	1	

$$DQ = \frac{1}{7} = 0,142857, Q(a'') - Q(a') = 0,462379$$

$$0,462379 > 0,142857$$

olduğundan kabul edilebilir bir avantaj sağlanır,

C2: Karar vermede kabul edilebilir istikrar (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.26. Kabul edilebilir istikrar

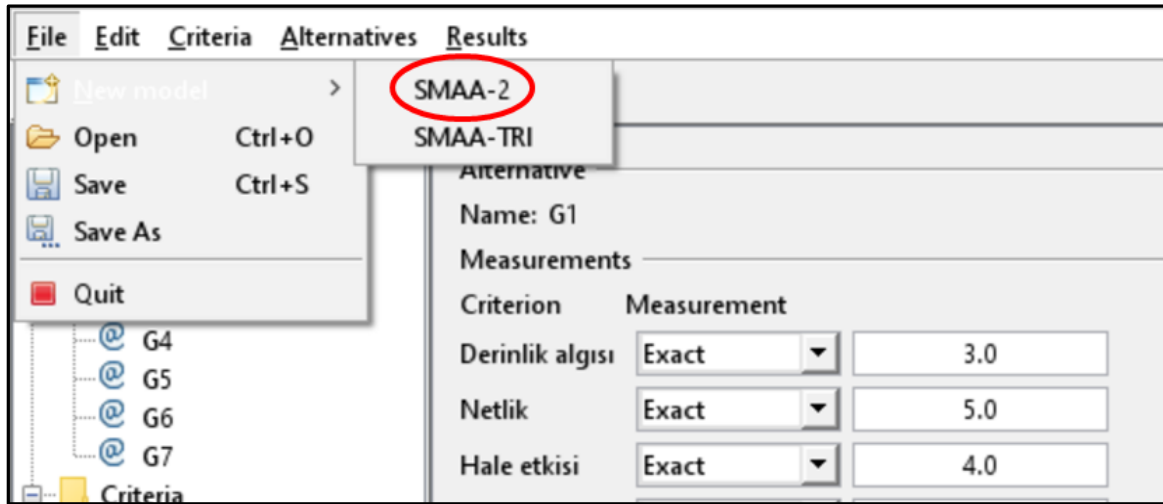
Si	Ri	Qi
G3	G3	G3
G4	G5	G4
G2	G4	G5
G6	G6	G2
G7	G7	G6
G5	G2	G7
G1	G1	G1

Bu nedenle S'' , R'' ve Q'' değerlerinin üçü için de birinci alternatif G3 olduğu için kararlılık kabul edilebilir. VIKOR yöntemi için de G3 en iyi alternatiftir.

VIKOR yönteminde $G3 > G4 > G5 > G2 > G6 > G7 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

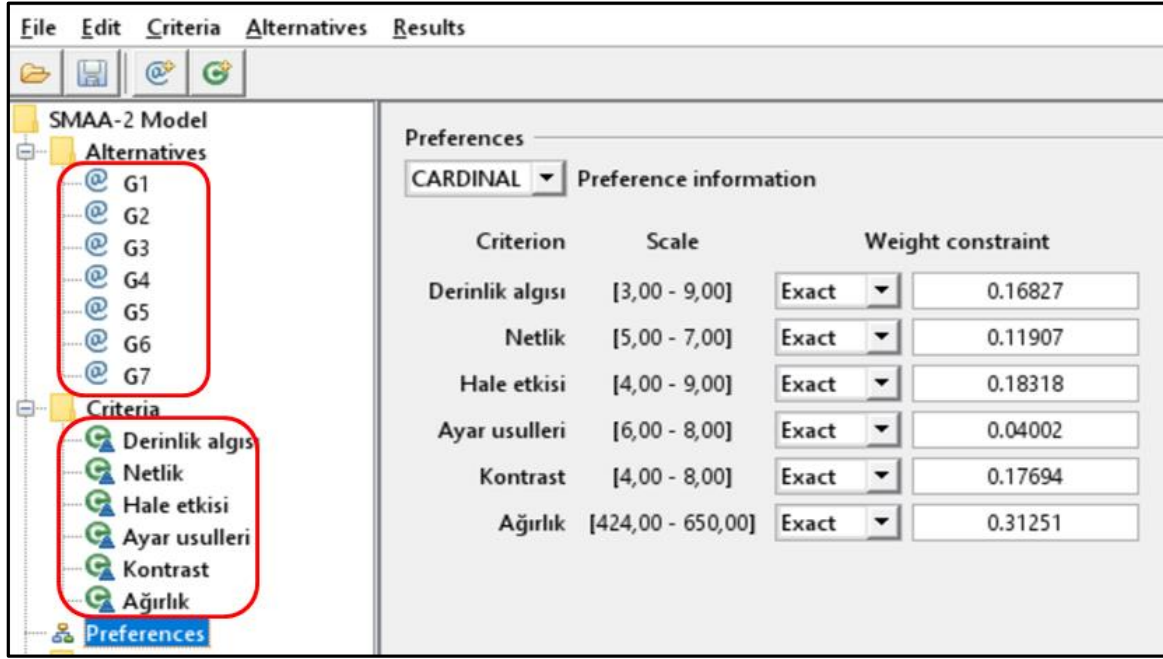
4.2.5. SMAA-2 uygulaması

SMAA yönteminin el ile çözümü oldukça zor olup çözüm için çoğunlukla SMAA yöntemlerinin açık kaynaklı bir uygulaması olan JSMAA yazılımı (www.smaa.fi) kullanılmaktadır. Diğer yöntemlerde olduğu gibi kriter ağırlıkları için AHP metodundan bulunan değerler kullanılmıştır. JSMAA yazılımı kullanım aşaması adım adım anlatılacaktır.



Şekil 4.4. Model seçim sekmesi

Yazılım açıldıktan sonra Şekil 4.4'de görüldüğü üzere "File" sekmesinden SMAA-2 seçilir.



Şekil 4.5. Alternatif, kriter ve kriter ağırlık seçimi

Yazılımda SMAA-2 seçildikten sonra alternatifler, kriterler ve AHP'den elde edilen ağırlık değerleri Şekil 4.5' de gösterilen sekmeler vasıtasıyla giriş yapılmaktadır. JSMAA programında alternatif ve kriterlerin değerleri girildikten sonra tercih (preference) türünün seçilmesi gerekmektedir. Ardından kriterler için artan (ascending) ve azalan (descending) tercih durumlarının belirtilmesi gerekmektedir.

Uygulamada ağırlık bilgisinin olduğu durumlarda kullanılan "cardinal" tercihi seçilerek AHP yöntemi ile belirlenen ağırlıklar girilmiştir. Çalışmadaki tüm kriterler fayda unsuru içerdiğinden hiçbir kriter için "GGG ağırlığı" hariç "ascending" ifadesi kaldırılmamıştır.



Şekil 4.6. Alternatiflerin Sıra Kabul Edilebilirlik İndisleri

Şekil 4.6' da görüldüğü üzere JSMAA-2 yönteminde $G3 > G5 > G4 > G2 > G6 > G7 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

4.2.6. ÇKKV sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı fosfor tiplerine sahip GGG'ler ilk kez karar vericiler tarafından değerlendirilmiştir. Nicel teknik veriler üretici firmanın bilgilerinden, nitel veriler ise uçuş testlerinden ve ön izleme deneyimlerinden elde edilerek farklı alternatifler değerlendirilmiştir. Öncelikle, AHP metodolojisi, pilotlardan oluşan bir uzman grubunun bilgisine dayanarak kriter ağırlıklarını belirlememize olanak tanımıştır. En alakalı kriterin nicel olduğu, en belirgininin ise C6 "Ağırlık" olduğu ortaya çıkmıştır.

Sonraki adım, hem nicel hem de nitel kriterleri içeren bir dizi alternatifin (yedi farklı GGG) ideal bir referans alternatifiyle karşılaştırılmasını sağlayan yeni bir metodolojiyi temsil eden TOPSIS, ELECTRE, VIKOR ve SMAA-2 yaklaşımlarının kullanımını içermektedir. İşlem sonucunda, G3 en iyi alternatif seçeneği olarak belirlendiği görülmektedir.

Sonuç olarak, G3'ün (beyaz fosfor ve en hafif) en iyi alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. Bu noktada, G1'in (yeşil fosfor) ve tüm ÇKKV yönteminde son alternatif olduğu belirtilmelidir. Bu araştırma, GGG değerlendirmesinin birincil faktörlerini ve niteliklerini belirlemeye katkıda bulunulduğu düşünülmektedir. Bu çalışma ile GGG'lere dair bütünsel bir bakış açısı sunulduğu düşünülmektedir. Çıkan veriler sonucunda, GGG ürün kalitesini ve yeni ürün geliştirmeyi yönetmeye dahil olan araştırmacılar ve uygulayıcılar için yararlı olabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Bu bölümün ilk kısmında mesafe tahmini ile ilgili olan sonuçların değerlendirilmesi ve önerilere değinilecek, ikinci bölümde ise çok kriterli karar verme yöntemi ile GGG değerlendirilmesi ile ilgili sonuçlar ve öneriler değerlendirilecektir.

5.1. Mesafe Tahmin Analizinin Değerlendirilmesi ve Öneriler

Mesafe tahmin analizi çalışmamasının birkaç sınırlaması bulunmaktadır. İlk olarak, mevcut alacakaranlık süresi 32 dakikayla sınırlı kalmıştır. Bu durum mesafe tahmini yapan pilot ve görüş koşullarının durumunu kısıtlamaktadır. İkinci olarak, süre kısıtlamaları nedeniyle GGG kullanım süresindeki değişiklikler, GGG'nin görüş kalitesini etkilemiş olabilmektedir. Ek olarak, sınırlı GGG çeşitliliği, yüksek maliyetler ve pilot deneklerin azlığı bu çalışmanın kısıtları olarak görülebilmektedir. Son olarak, bir simülatör ortamının olmaması (sürekli aynı aydınlatma koşulu gibi), karanlık çöktükçe çevresel faktörlerin değişmesi anlamına gelmektedir. Bu durum da bulguların karmaşık operasyonel senaryolara genişletilmesini sınırlamaktadır.

Sonuçlar, gündüz kısıtlı görüş (DH) ($M = 5.27$, $SD = .59$), alacakaranlık normal görüş (TN) ($M = 5.33$, $SD = .69$) ve alacakaranlık kısıtlı görüş (TH) ($M = 5.20$, $SD = .61$) ile karşılaştırıldığında, GGG'nin ($M = 4.79$, $SD = .57$) daha düşük bir hata oranına sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, görüş koşulları kötüleştikçe ve sınırlı hale geldikçe, mesafe tahmininin doğruluğu azalmaktadır.

Bu çalışma, literatürde farklı uçuş deneyimi gruplarını ve alacakaranlık koşullarını dikkate alan ilk çalışmadır. Hava aracını kontrol eden pilotlar için engellerin tespiti ve mesafe tahmini çok önemlidir. Benzer şekilde, özellikle iniş sırasında helikopterin gövdesinin altındaki engelleri tespit etmek kritik öneme sahiptir ve bu alan GGG uçuşları sırasında pilot tarafından gözden kaçırılabilir. İki ayrı aktivite olmasına rağmen, derinlik algısı ve mesafe tahmini sıklıkla birleştirilir çünkü aynı anda ve aynı araçlarla tespiti gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, helikopter mürettebatının(teknisyen) konumlandırma ve rehberlik yardımı, helikopterin uygun bir iniş noktasına güvenli bir şekilde yaklaşmasını sağlayacaktır. Diğer mürettebat üyeleri (gövde teknisyeni ve sürüşefe subatı) tarafından

yükseklik tahmini kullanılarak benzer bir çalışmanın yapılabileceği önerilmektedir. Aynı araştırmayı diğer GGG tipleri, özellikle beyaz fosforlu GGG ile yürüterek, son yıllarda kullanılan bu GGG tipleri arasındaki ayrımlar açıkça ortaya çıkarılabilir. Son olarak, sabah alacakaranlığında düşük sirkadiyen ritim nedeniyle ve yaratabileceği problemler nedeniyle[105], pilotun karar verme veya mesafe tahminindeki rolü üzerine benzer bir çalışma yapılması önerilebilmektedir.

5.2. ÇKKV Metotlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler

Bu çalışmada ÇKKV yöntemleri (TOPSIS, VIKOR, ELECTRE ve SMAA-2) yedi adet GGG'ye uygulanmıştır. Kriterler, son yıllarda Türkiye'de meydana gelen doğal afetlerde (orman yangınları, seller ve depremler) uçan, bir helikopter tipinin GGG tipine göre modifikasyonunda görev alan subaylar/pilotlar tarafından belirlenmiştir. Bu kriterler AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır.

TOPSIS yönteminde $G3 > G4 > G5 > G7 > G6 > G2 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

ELECTRE yönteminde $G3 > G4 > G2 = G6 > G5 = G7 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

VIKOR yönteminde $G3 > G4 > G5 > G2 > G6 > G7 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

JSMAA-2 yönteminde $G3 > G5 > G4 > G2 > G6 > G7 > G1$ sonucu elde edilmiştir.

G3, G5 ve G7 beyaz fosforlu GGG'lerdir. G1, G2, G4 ve G6 yeşil fosforlu GGG'lerdir. Çizelge 5.1 incelendiğinde TOPSIS, ELECTRE, VIKOR ve SMAA-2 yöntemlerinde en iyi alternatifin G3 olduğu söylenebilir. Tüm yöntemlerde G1'in yedi adet GGG arasında son alternatif olduğu dikkat çekmektedir.

Çizelge 5.1. ÇKKV sonuçları

GGG	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
TOPSIS	7	6	1	2	3	5	4
ELECTRE	7	3,4	1	2	5,6	3,4	5,6
VIKOR	7	4	1	2	3	5	6
SMAA-2	7	4	1	3	2	5	6

Kriterler arasında “ağırlık” diğer kriterlere göre en yüksek değeri (0,313) almıştır. Uzmanlar, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminde uzun süreli uçuş yapmaları nedeniyle "ağırlık" kriterine en yüksek değeri (0,313) vermişlerdir. Bu durum, geçmiş deneyimlerine ve doğal afetlerde üst limitlerin dikkate alınmadığının göstergesi olabileceği ihtimalini artırmaktadır.

Literatürde kask üzerine takılan cihazın/eklentinin kaskın ağırlık merkezini değiştirerek ve/veya ek ağırlık nedeniyle boyun ağrısına neden olabileceği belirtilmiştir. Bu anlamda kask üzerine takılan cihazın hafif olmasının uçuş emniyetini olumlu etkileyeceği sonucuna varılabilir.

Beyaz fosforlu G3'ün ilk alternatifler arasında, yeşil fosforlu G1'in ise son alternatifler arasında yer aldığı görülmektedir. Bu sonuç, beyaz fosfor ve yeşil fosfor GGG'lerini karşılaştıran çalışmalara benzer olduğu görülmüştür[14]. Bir çalışmaya göre, beyaz fosfor GGG'leriyle görüntüler, yeşil fosfor GGG'lerine göre daha doğal görünmektedir[106]. Bir çalışmaya göre, beyaz fosfor GGG'lerinin mesafe tahmini ve derinlik algısı açısından yeşil fosfor GGG'lerinden daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Başka bir çalışmaya göre, beyaz fosforun avantajı, siyah beyaz görüntüleri işlemede insan görsel sisteminin verimliliğini harekete geçirmesidir[107]. Bu anlamda, beyaz fosforlu GGG'lerinin nesne tanımlamada daha iyi olabileceği fikri bu çalışma tarafından desteklenmektedir.

TOPSIS, ELECTRE, VIKOR ve SMAA-2 yaklaşımları kullanılarak yedi farklı GGG'nin ideal referansla karşılaştırılması yapılmış ve G3 en iyi alternatif olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, G3 (beyaz fosfor ve en hafif) en iyi alternatif olarak belirlenmiş, G1 (yeşil fosfor) ise son alternatif olarak not edilmiştir. Bu araştırma, GGG değerlendirmesinin temel faktörlerini belirleyerek GGG'lere dair bütünsel bir bakış açısı sunmuş ve ürün kalitesi ile yeni ürün geliştirme süreçlerinde araştırmacılar ve uygulayıcılar için faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın önemli teknik kriterleri dikkate alan ve kontrol pilotu ve eğitmen pilotlardan oluşan bir danışma grubunun deneyiminden yararlanan bir ön çalışma oluşturduğunun altını çizmek önemlidir. Bu çalışmayı daha da genişletmek için, ekonomik yönler ve yerli üretim de dahil olmak üzere ek önemli faktörleri göz önünde bulundurarak

bir araştırma yapılabilir. Bu çalışmayı daha da genişletmek için, şirketler ve kurumlar teorik ve teknik faktörleri göz önünde bulundurarak çalışmalar yürütebilirler. Analizlerden elde edilen bilgilerin, yeni stratejiler geliştirmek için bir karar destek sistemi olarak birçok yönetsel sorunu çözmek için kullanılabileceği düşünülmektedir. Gelecekteki araştırmalar, bulanık karar verme yaklaşımları uygulayabilir ve sonuçları değerlendirebilir. Ekonomik kriterler, bulanık kümelerin ve sayıların daha karmaşık versiyonlarının dahil olup olmadığına bakılmaksızın alternatiflerin sıralamasında daha fazla dikkate alınacaktır.

KAYNAKLAR

1. Johnson, W., (2013). *Rotorcraft aeromechanics*. Vol. 36. London, Cambridge University Press, 43.
2. Walko, C., Schuchardt, B. (2021). Increasing helicopter flight safety in maritime operations with a head-mounted display. *CEAS Aeronautical Journal*, 12, 29-41.
3. Padfield, G. D. (2008). *Helicopter flight dynamics: the theory and application of flying qualities and simulation modelling*. John Wiley & Sons, 45.
4. Moore, J. (2021). *NTSB Faults Pilot's Decisions in Bryant Crash*. 16 March 2023.
5. Angus, H. R. (1995). Visually triggered migraine headaches affect spatial orientation and balance in a helicopter pilot. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 66, 353-358.
6. Kharoufah, H., Murray, J., Baxter, G., Wild, G. (2018). A review of human factors causations in commercial air transport accidents and incidents: From to 2000–2016. *Progress in Aerospace Sciences*, 99, 1-13.
7. Bustamante-Sánchez, Á., Clemente-Suárez, V. J. (2020). Psychophysiological response in night and instrument helicopter flights. *Ergonomics*, 63(4), 399-406.
8. Lyons, T. J., Ercoline, W., O'Toole, K., Grayson, K. (2006). Aircraft and related factors in crashes involving spatial disorientation: 15 years of US Air Force data. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 77(7), 720-723.
9. Parush, A., Gauthier, M. S., Arseneau, L., Tang, D. (2011). The human factors of night vision goggles: perceptual, cognitive, and physical factors. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 7(1), 238-279.
10. Manton, A. (2000). Night Vision Goggles, Human Factors Aspects-A Questionnaire Survey of Helicopter Aircrew. *BMJ Military Health*, 146(1), 22.
11. Sánchez-Lozano, J., Rodríguez, O. N. (2020). Application of Fuzzy Reference Ideal Method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing*, 88, 106061.
12. Brickner, M. S. (1989). Helicopter flights with night-vision goggles: *Human Factors Aspects* (No. NASA-TM-101039).
13. CuQlock-Knopp, V.G., (2000). *Object recognition and contrast sensitivity with image intensifiers employing white phosphor versus green phosphor displays*. in *Image Intensifiers and Applications II*. SPIE.
14. Stasiak, K., Zyskowska, M., Głowinkowska, I., Kowalczyk, K., Lewkowicz, R. (2022). Influence of night vision goggles with white and green phosphor screens on selected parameters of the eye and fatigue. *Ergonomics*, 65(7), 999-1014.

15. Crowley, J. (1991). Human factors of night vision devices: Anecdotes from the field concerning visual illusions and other effect (Tech. Rep. No. USAARL 91-15). Fort Rucker, AL: US Army Aeromedical Research Laboratory.
16. Ruffner, J. W., Piccione, D., Woodward, K. G. (1997). Development of a night-driving simulator concept for night vision image-intensification device training. *Enhanced and Synthetic Vision* 1997.
17. Hess, P. (2002). Army Identifies Soldiers Killed in Crash. *UPI, December*.
18. Renshaw, P. F., Wiggins, M. W. (2007). A self-report critical incident assessment tool for army night vision goggle helicopter operations. *Human Factors*, 49(2), 200-213.
19. Harding, T. H., Rash, C. E., Lang, G. T. (2010). Perceptual and cognitive effects on the use of helmet-mounted displays due to external operational factors. *Head-and Helmet-Mounted Displays XV: Design and Applications*,
20. Nascimento, F. A., Majumdar, A., Jarvis, S. (2012). Nighttime approaches to offshore installations in Brazil: Safety shortcomings experienced by helicopter pilots. *Accident Analysis & Prevention*, 47, 64-74.
21. Robertson, M. F., Ruiz, L. E. (2010). Perceptions of stress among collegiate aviation flight students. *The Collegiate Aviation Review International*, 28(1), 34.
22. Langton, N., Robbins, S. P., Judge, T. A. (2013). *Fundamentals of Organizational behaviour*. Pearson Education Canada.
23. Shender, B., Ostrander, G., White, D. (2009). Self-reported neck pain incidence in US Navy aircrew from 2004-2008. *Aviation, space, and environmental medicine*, 80, 291.
24. Heinecke, J. K. (2006). An Evaluation of the AH-64 night vision Systems for use in 21st Century Urban Combat.
25. McLean, W. E., Rash, C. E., McEntire, B. J., Braithwaite, M. G., Mora, J. C. (1997). Performance history of AN/PVS-5 and ANVIS image intensification systems in US Army aviation. *Head-Mounted Displays II*.
26. Lampton, M. (1981). The microchannel image intensifier. *Scientific American*, 245(5), 62-71.
27. Stone, L., Sanders, M., Glick, D. D., Wiley, R., Kimball, K. (1980). A human performance/workload evaluation of the AN/PVS-5 bifocal night vision goggles. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 51(8), 797-804.
28. Baleja, R., Sokanský, K., Novák, T., Hanusek, T., Bos, P. (2016). *Measurement and evaluation of the road lighting in mesopic and photopic vision*. 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4),
29. Niall, K. K., Reising, J. D., Martin, E. L. (1999). Distance estimation with night vision goggles: A little feedback goes a long way. *Human Factors*, 41(3), 495-506.

30. Gevrek, İ., Akin, M., Guru, M. (2023). Analysis of Pilot Distance Estimation in Different Lighting and Visibility Conditions. *Defence Science Journal*, 73(6).
31. Craig, J. L., Geiselman, E. E. (1998). Further development of the panoramic night vision goggle. Proceedings of the 36th Annual SAFE Symposium. Phoenix, AZ: SAFE Association. Retrieved from <http://safeassociation.com/proceedings.html>.
32. Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A., Thompson, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual indoor environments. *Perception*, 34(2), 191-204.
33. Messing, R., Durgin, F. H. (2005). Distance perception and the visual horizon in head-mounted displays. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2(3), 234-250.
34. Cutting, J. E., Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In *Perception of Space and Motion* (69-117). Elsevier.
35. DeLucia, P. R., Task, H. L. (1995). Depth and collision judgment using night vision goggles. *The International Journal of Aviation Psychology*, 5(4), 371-386.
36. Foyle, D. C., Kaiser, M. K. (1991, May). Pilot distance estimation with unaided vision, night-vision goggles and infrared imagery. In *SID International Symposium Digest of Technical Papers* (22), 314-317.
37. Zalevski, A., Meehan, J. W., Hughes, P. K. (2001). Size estimation with night vision goggles.
38. Knapp, J. M., Loomis, J. M. (2004). Limited field of view of head-mounted displays is not the cause of distance underestimation in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 13(5), 572-577.
39. Swan, J. E., Jones, A., Kolstad, E., Livingston, M. A., Smallman, H. S. (2007). Egocentric depth judgments in optical, see-through augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(3), 429-442.
40. Thompson, W. B., Willemsen, P., Gooch, A. A., Creem-Regehr, S. H., Loomis, J. M., Beall, A. C. (2004). Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments? *Presence*, 13(5), 560-571.
41. Richardson, A. R., Waller, D. (2007). Interaction with an immersive virtual environment corrects users' distance estimates. *Human Factors*, 49(3), 507-517.
42. Sahm, C. S., Creem-Regehr, S. H., Thompson, W. B., Willemsen, P. (2005). Throwing versus walking as indicators of distance perception in similar real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2(1), 35-45.
43. Donohue-Perry, M., Hettinger, L., Riegler, J. (1992). *Night vision goggle (NVG) users' concerns survey site report: Hurlburt Field*.

44. Renshaw, P. F., Wiggins, M. W. (2007). A self-report critical incident assessment tool for army night vision goggle helicopter operations. *Human Factors*, 49(2), 200-213.
45. Nascimento, F. A., Majumdar, A., Jarvis, S. (2012). Nighttime approaches to offshore installations in Brazil: Safety shortcomings experienced by helicopter pilots. *Accid Anal Prev*, 47, 64-74.
46. Hart, S. G., Brickner, M. S. (1989). Helmet-mounted pilot night vision systems: Human factors issues. *Spatial Displays and Spatial Instruments (NASA CP-10032)*. Moffett Field, CA: National Aeronautics and Space Administration.
47. Schubert, J., Hörling, P. (2014). Preference-based Monte Carlo weight assignment for multiple-criteria decision making in defense planning. 17th International Conference on Information Fusion (FUSION).
48. Can, S., Arıkan Öktemer, F. (2014). Multi criteria subcontractor selection problem and its solution for a defence industry firm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 51-63.
49. Gazibey, Y., Kantemir, O., Demirel, A. (2015). Interaction among the Criteria Affecting Main Battle Tank Selection: An Analysis with DEMATEL Method. *Defence Science Journal*, 65(5), 102-110.
50. Wibowo, A. S., Permanasari, A. E., Fauziati, S. (2016). Combat aircraft effectiveness assessment using hybrid multi-criteria decision making methodology. 2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST).
51. Adetunji, O., Bischoff, J., Willy, C. J. (2018). Managing system obsolescence via multicriteria decision making. *Systems Engineering*, 21(4), 307-321.
52. Cheung, C.-H. and R. Jassemi-Zargani. *Target Threat Assessment based on Ensembles of Multi-Criteria Decision Making Methods (Poster)*. in 2019 22th International Conference on Information Fusion (FUSION). 2019. IEEE.
53. Bojanić, D., Vulić, I., Ristić, V., Marček, J. (2019). *Designing cybersecurity management bodies in strategic planning: application of hybrid analysis*. 5th IPMA SENET Project Management Conference.
54. Hamurcu, M., Eren, T. (2020). Selection of unmanned aerial vehicles by using multicriteria decision-making for defence. *Journal of Mathematics*, 1(11), 23-26.
55. Hoan, P., Ha, Y. (2021). ARAS-FUCOM approach for VPAF fighter aircraft selection. *Decision Science Letters*, 10(1), 53-62.
56. Sun, C.-C. (2021). An intuitionistic linguistic DEMATEL-based network model for effective national defense and force innovative project planning. *IEEE Access*, 9, 130141-130153.

57. Bashir, B., Alsalman, A., Othman, A. A., Obaid, A. K., Bashir, H. (2021). New approach to selecting civil defense centers in Al-Riyadh city (KSA) based on multi-criteria decision analysis and GIS. *Land*, 10(11), 1108.
58. Sánchez-Lozano, J., Correa-Rubio, J., Fernández-Martínez, M. (2022). A double fuzzy multi-criteria analysis to evaluate international high-performance aircrafts for defense purposes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115, 105339.
59. Sánchez-Lozano, J., Serna, J., Dolón-Payán, A. (2015). Evaluating military training aircrafts through the combination of multi-criteria decision making processes with fuzzy logic. A case study in the Spanish Air Force Academy. *Aerospace Science and Technology*, 42, 58-65.
60. Bojanic, D., Kovač, M., Bojanic, M., Ristic, V. (2018). Multi-criteria decision-making in a defensive operation of the guided anti-tank missile battery: An example of the hybrid model fuzzy AHP-MABAC. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(1), 51-66.
61. Susilo, A. K. (2019). Navy Development Strategy to Encounter Threat of National Maritime Security Using SWOT-Fuzzy Multi Criteria Decision Making (F-MCDM). *Journal of Maritime Research*, 16(1), 3-16.
62. Çarman, F., Tuncer Şakar, C. (2019). An MCDM-integrated maximum coverage approach for positioning of military surveillance systems. *Journal of the Operational Research Society*, 70(1), 162-176.
63. Şenol, M. B. (2020). Evaluation and prioritization of technical and operational airworthiness factors for flight safety. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(7), 1049-1061.
64. Starčević, S., Bojović, N., Junevičius, R., Skrickij, V. (2019). Analytical hierarchy process method and data envelopment analysis application in terrain vehicle selection. *Transport*, 34(5), 600-616.
65. Genc, T. (2015). Application of ELECTRE III and PROMETHEE II in evaluating the military tanks. *International Journal of Procurement Management*, 8(4), 457-475.
66. Dos Santos, M., de Araújo Costa, I. P., Gomes, C. F. S. (2021). Multicriteria decision-making in the selection of warships: a new approach to the AHP method. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 13(1), 147.
67. Ahmadi, D. H. (2021). The application of fuzzy multi-criteria decision making to determine criteria of Submarine training location [Article]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 99(16), 3959-3969.
68. Sumarno, A. P., Setiawan, M., Aisjah, S. (2021). Employees Performance Evaluation in Defense Ministry of the Republic of Indonesia based on Multicriteria Decision Making (MCDM) and System Dynamic (SD) [Article]. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 27(3), 245-266.

69. İlerisoy, Z. Y., Gökgöz, B. İ. (2022). Safety of transportation buildings against vehicle bomb attacks with multi-criteria decision-making [Article]. *Open House International*.
70. Candan, G., Toklu, M. C. (2022). Evaluating security performances of EU countries in the context of sustainable development using fuzzy SMART and ARAS approaches [Article]. *Environment, Development and Sustainability*.
71. Ma, J. (2022). Training Aircraft Selection of the Vietnam People's Air Force Using a Hybrid BWM-Fuzzy TOPSIS Method [Article]. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, 30(2), 141-157.
72. Beliakov, G., Cao, T., Mak-Hau, V. (2022). Aggregation of Interacting Criteria in Land Combat Vehicle Selection by Using Fuzzy Measures [Article]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30(9), 3979-3989.
73. Costa, I. P. D. A., Terra, A. V., Moreira, M. Â. L., Pereira, M. T., Fávero, L. P. L., Santos, M. D., Gomes, C. F. S. (2022). A Systematic Approach to the Management of Military Human Resources through the ELECTRE-MOr Multicriteria Method [Article]. *Algorithms*, 15(11).
74. Rasmussen, A., Sabic, H., Saha, S., Nielsen, I. E. (2023). Supplier selection for aerospace & defense industry through MCDM methods [Article]. *Cleaner Engineering and Technology*, 12.
75. Karamaşa, Ç., Karabasevic, D., Stanujkic, D., Kookhdan, A., Mishra, A., Erturk, M. (2021). An extended single-valued neutrosophic AHP and MULTIMOORA method to evaluate the optimal training aircraft for flight training organizations. *Facta Universitatis-Series Mechanical Engineering*, 19(3), 202-205
76. Pan, Y., Yi, W., Gao, Y., Wang, Y. (2021). *Analysis of military training security risk assessment method based on F-ANP*. E3S Web of Conferences,
77. Thompson, W. B., Willemsen, P., Gooch, A. A., Creem-Regehr, S. H., Loomis, J. M., Beall, A. C. (2004). Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments? *Presence*, 13(5), 560-571.
78. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
79. Haas, R., Meixner, O. (2005). An illustrated guide to the analytic hierarchy process. *Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences*.
80. Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
81. Saaty, T. L., Tran, L. T. (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7-8), 962-975.

82. Hwang, C.-L., Yoon, K., Hwang, C.-L., Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-art Survey*, 58-191.
83. Olson, D. L. (2004). Comparison of weights in TOPSIS models. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(7-8), 721-727.
84. Chen, S.-J., Hwang, C.-L., Chen, S.-J., Hwang, C.-L. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. Springer.
85. Monjezi, M., Dehghani, H., Singh, T. N., Sayadi, A. R., Gholinejad, A. (2012). Application of TOPSIS method for selecting the most appropriate blast design. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(1), 95.
86. Yoon, K., Hwang, C.-L. (1985). Manufacturing plant location analysis by multiple attribute decision making: Part I—single-plant strategy. *International Journal of Production Research*, 23(2), 345-359.
87. Lee, H.-C., Chang, C.-T. (2018). Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 883-896.
88. Katal, F., Fazelpour, F. (2018). Multi-criteria evaluation and priority analysis of different types of existing power plants in Iran: An optimized energy planning system. *Renewable Energy*, 120, 163-177.
89. Opricovic, S., Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455.
90. Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue Française d'informatique et de Recherche Opérationnelle*, 2(8), 57-75.
91. Figueira, J. R., Mousseau, V., Roy, B. (2016). ELECTRE methods. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the art Surveys*, 155-185.
92. Lahdelma, R., Salminen, P. (2001). SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations Research*, 49(3), 444-454.
93. Okul, D., Gencer, C., Aydogan, E. K. (2014). A method based on SMAA-topsis for stochastic multi-criteria decision making and a real-world application. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 13(05), 957-978.
94. Pokorný, J., Lutze, M., Cao, D., Zele, A. J. (2006). The color of night: Surface color perception under dim illuminations. *Visual Neuroscience*, 23(3-4), 525-530.
95. Borissova, D., Mustakarov, I. (2009). A generalized optimization method for night vision devices design considering stochastic external surveillance conditions. *Applied Mathematical Modelling*, 33(11), 4078-4085.

96. Higginbotham, K. D. (2006). *Effect of using high signal-to-noise image intensifier tubes on night vision goggle (NVG) aided visual acuity.*
97. Zacher, J., Brandwood, T., Thomas, P., Vinnikov, M., Xu, G., Jennings, S., Macuda, T., Palmisano, S., Craig, G., Wilcox, L., Allison, R. (2007). *Effects of Image Intensifier Halo on Perceived Layout* (Vol. 6557). SPIE.
98. Wu, J., Lim, K. Y., Koh, C. W. (2020). Towards the Development of a Low Cost Simulator to Support NVG Training. In *Contemporary Ergonomics 2006* (28-32). Taylor & Francis.
99. Rabin, J.,(1993). *Spatial contrast sensitivity through aviator's night vision imaging system.* , Army aeromedical research lab fort rucker al.
100. Sovellius, R., Oksa, J., Rintala, H., Huhtala, H., Siitonen, S. (2008). Neck muscle strain when wearing helmet and NVG during acceleration on a trampoline. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 79(2), 112-116.
101. Adam, J. (2004). *Results of NVG-induced neck strain questionnaire study in CH-146 Griffon Aircrew.*
102. Forde, K. A., Albert, W. J., Harrison, M. F., Neary, J. P., Croll, J., Callaghan, J. P. (2011). Neck loads and posture exposure of helicopter pilots during simulated day and night flights. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(2), 128-135.
103. Pousette, M. W., Lo Martire, R., Linder, J., Kristoffersson, M., Äng, B. O. (2016). Neck muscle strain in air force pilots wearing night vision goggles. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(11), 928-932.
104. Tait, J. L., Chambers, T. P., Tait, R. S., Main, L. C. (2021). Impact of shift work on sleep and fatigue in Maritime pilots. *Ergonomics*, 64(7), 856-868.
105. Weinand, F. S., Rommel, S. (2019, October). Influence of phosphor screen color on performance with modern night vision goggles. In *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XVI*, (11159), 72-77 SPIE.
106. Hamilton, J. A., Roush, G., Kinney, L. M. J., Suss, J., Biggs, L. A. T. (2020). Comparison of night vision technology for close-quarters combat operations: How field of view impacts live-fire scenarios. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety*, 4, 1(15), 96-101

EKLER

EK-1. Kriter ağırlık değerlendirme anketi

Size göre en uygun GGG için hangi kriter diğerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin Derinlik algısı, Netlik kriterine göre 7 puanında önemli ise Netlik kriteri, Derinlik algısına göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.											
Nu.	Derinlik algısı, Netlik, Hale etkisi, Ayar usulleri, Kontrast, Ağırlık										
1	Derinlik algısı	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Netlik
2	Derinlik algısı	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Hale etkisi
3	Derinlik algısı	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ayar usulleri
4	Derinlik algısı	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Kontrast
5	Derinlik algısı	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ağırlık
6	Netlik	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Hale etkisi
7	Netlik	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ayar usulleri
8	Netlik	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Kontrast
9	Netlik	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ağırlık
10	Hale etkisi	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ayar usulleri
11	Hale etkisi	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Kontrast
12	Hale etkisi	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ağırlık
13	Ayar usulleri	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Kontrast
14	Ayar usulleri	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ağırlık
15	Kontrast	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ağırlık
İlave belirtmek istediğiniz husus varsa lütfen belirtiniz.											

EK-2. DERİNLİK ALGISI değerlendirme anketi

Nu.	Size göre DERİNLİK ALGISI kriterine göre hangi GGG değerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin G1, G2'ye göre 7 puanında önemli ise G1, G2'e göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.										
	DERİNLİK ALGISI										
1	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G2
2	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
3	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
4	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
5	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
6	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
7	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
8	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
9	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
10	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
11	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
12	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
13	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
14	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
15	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
16	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
17	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
18	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
19	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
20	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
21	G6	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7

EK-3. NETLİK değerlendirme anketi

Nu.	Size göre NETLİK kriterine göre hangi GGG değerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin G1, G2'ye göre 7 puanında önemli ise G1, G2'e göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.										
	NETLİK										
1	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G2
2	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
3	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
4	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
5	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
6	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
7	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
8	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
9	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
10	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
11	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
12	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
13	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
14	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
15	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
16	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
17	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
18	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
19	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
20	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
21	G6	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7

EK-4. HALE ETKİSİ değerlendirme anketi

Nu.	Size göre HALE ETKİSİ kriterine göre hangi GGG değerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin G1, G2'ye göre 7 puanında önemli ise G1, G2'e göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.										
	HALE ETKİSİ										
1	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G2
2	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
3	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
4	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
5	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
6	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
7	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
8	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
9	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
10	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
11	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
12	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
13	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
14	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
15	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
16	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
17	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
18	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
19	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
20	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
21	G6	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7

EK-5. AYAR USÜLLERİ değerlendirme anketi

Nu.	Size göre AYAR USÜLLERİ kriterine göre hangi GGG diğerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin G1, G2'ye göre 7 puanında önemli ise G1, G2'e göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.										
	AYAR USÜLLERİ										
1	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G2
2	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
3	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
4	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
5	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
6	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
7	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
8	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
9	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
10	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
11	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
12	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
13	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
14	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
15	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
16	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
17	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
18	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
19	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
20	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
21	G6	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7

EK-6. KONTRAST değerlendirme anketi

Nu.	Size göre KONTRAST kriterine göre hangi GGG diğerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin G1, G2'ye göre 7 puanında önemli ise G1, G2'e göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.										
	KONTRAST										
1	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G2
2	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
3	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
4	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
5	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
6	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
7	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
8	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
9	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
10	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
11	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
12	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
13	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
14	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
15	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
16	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
17	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
18	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
19	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
20	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
21	G6	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7

EK-7. AĞIRLIK değerlendirme anketi

Nu.	Size göre AĞIRLIK kriterine göre hangi GGG diğerine göre ne kadar önemlidir? Yuvarlak içine alınız. Örneğin G1, G2'ye göre 7 puanında önemli ise G1, G2'e göre 1/7 (0,1482) oranında daha önemli olacaktır.										
	AĞIRLIK										
1	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G2
2	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
3	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
4	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
5	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
6	G1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
7	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G3
8	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
9	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
10	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
11	G2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
12	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G4
13	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
14	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
15	G3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
16	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G5
17	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
18	G4	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
19	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G6
20	G5	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7
21	G6	9	7	5	3	1	3	5	7	9	G7



Gazili olmak ayrıcalıktır