

**HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK
OPTİMAL TEMEL EĞİTİM UÇAĞININ SEÇİLMESİ**

Serkan ŞEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2013

ANKARA

**HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK
OPTİMAL TEMEL EĞİTİM UÇAĞININ SEÇİLMESİ**

Serkan ŞEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2013

ANKARA

Serkan ŞEN tarafından hazırlanan “HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK OPTİMAL TEMEL EĞİTİM UŐAĐININ SEÇİLMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY

Tez DanıŐmanı, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu alıŐma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. A. Samet ARSLAN

İnŐaat Mühendisliği Anabilim Dalı, GÜ.

Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih : 25/10/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıŐtır.

Prof. Dr. Őeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm. Bu tezdeki görüş ve öneriler, Hava Kuvvetleri Komutanlığının resmi görüş ve önerilerini kesinlikle içermemektedir.

Serkan ŞEN

**HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK
OPTİMAL TEMEL EĞİTİM UÇAĞININ SEÇİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Serkan ŞEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2013**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; çok kriterli, belirsizliğin olduğu bir ortamda alternatif 3 temel eğitim uçağını (KAI KTX-1, T-6A TEXAN II, EMB 314 Super Tucano) değerlendirerek alternatifler arasından optimal seçim yapmaktır. Silah sistemlerinin performanslarını değerlendirmek çok aşamalı bir süreç olup çok faktörlü özelliklere sahiptir. Bu kapsamda; ilk olarak konusunda uzmanlarla yapılan görüşmelerde 5 adet performans kriteri ve bu kriterlere bağlı 22 adet alt performans kriteri (indeks) elde edilmiştir. Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi ile hiyerarşik yapı oluşturularak kriterlere ve indekslere ait önem ağırlıkları belirlenmiştir. Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi ise, her bir kriter ve indeksin tercih edilebilirlik sırasını belirlemek için kullanılmıştır. Sonuç olarak, AHP ve GİA yöntemleri birbirine entegre edilerek problem Hiyerarşik Gri İlişkisel Analiz (HGİA) yöntemi ile çözülmüştür.

Bilim Kodu : 906.1.071

Anahtar Kelimeler : Hiyerarşik gri ilişkisel analiz, temel eğitim uçağı

Sayfa Adedi : 68

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY

**SELECTION OF AN OPTIMAL BASIC TRAINING AIRCRAFT USING
HIERARCHY GREY RELATIONAL ANALYSIS**

(M. Sc. Thesis)

Serkan ŞEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2013

ABSTRACT

The purpose of this study is to make the optimum selection among the alternatives considering three basic training aircraft (KAI KTX-1, T-6A TEXAN II, EMB 314 Super Tucano) in an environment of multiple criteria and uncertainty. The performance assessment of the weapon systems is a multi-level process and has multiple attributes. In this respect; firstly, five performance criteria and 22 dependent sub-performance criteria (index) were obtained during the interviews with the field experts. Hierarchies were defined by using Analytic Hierarchy Process (AHP) and weights were assigned for the criteria and the index. Grey Relational Analysis (GRA) was used to determine the priority for each criterion and indice. Consequently, AHP and GRA methodologies were integrated and the problem was solved using Hierarchy Grey Relational Analysis (HGRA).

Science Code : 906.1.071

Key Words : Hierarchy grey relational analysis, training aircraft

Page Number : 68

Supervisor : Prof. Dr. Orhan TÜRKBİY

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY'e ve maddi, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan eőim Fatma ŞEN'e teőekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ YÖNTEMİ.....	3
2.1. Literatür Taraması	4
2.2. AHP Yönteminin Teorik Temelleri.....	6
2.3. AHP Yönteminin Adımları.....	7
2.3.1. Problemin ve problemin amacının belirlenmesi	7
2.3.2. Hiyerarşik yapının oluşturulması	7
2.3.3. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması	8
2.3.4. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi	9
2.3.5. Tutarlılık oranının hesaplanması	10
2.3.6. Karar matrisinin oluşturulması	11
3. HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ.....	12
3.1. Literatür Taraması	12
3.2. Gri İlişkisel Analiz (GİA).....	15
3.3. GİA Yönteminin Adımları	16

Sayfa

3.3.1. Referans seri ve karşılaştırılabilir serilerin belirlenmesi.....	16
3.3.2. Gri ilişkisel oluşum (Verilerin normalize edilmesi).....	17
3.3.3. Gri ilişkisel katsayının hesaplanması.....	19
3.3.4. Gri ilişkisel derecenin hesaplanması	20
3.4. Hiyerarşik Gri İlişkisel Analiz Yöntemi	21
3.4.1. Hiyerarşik gri ilişkisel analiz yönteminin adımları.....	21
4. HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK OPTİMAL TEMEL EĞİTİM UÇAĞININ SEÇİLMESİ.....	25
4.1. Problemin Tanımlanması.....	25
4.1.1. Alternatiflerin tanıtılması	26
4.1.2. Kriterlerin ve indekslerin tanımlanması.....	30
4.2. AHP ile Hiyerarşik Yapının Oluşturulması	37
4.3. AHP ile Ağırlıkların Belirlenmesi.....	39
4.3.1. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması	40
4.3.2. Kriterlerin ve indekslerin ağırlıklarının bulunması	42
4.3.3. Matrislerin tutarlılık oranlarının hesaplanması	46
4.4. Gri İlişkisel Analiz Yönteminin Uygulanması.....	50
4.4.1. Referans seri ve alternatif serilerin belirlenmesi	50
4.4.2. Verilerin normalize edilmesi.....	52
4.5. Hiyerarşik Gri İlişkisel Analizin Uygulanması.....	54
4.5.1. Birincil gri ilişkisel katsayıların hesaplanması	54
4.5.2. İkincil gri ilişkisel katsayıların hesaplanması.....	57
4.5.3. Gri ilişkisel derecenin hesaplanması	60

	Sayfa
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Saaty'nin karşılaştırma ölçütleri.....	8
Çizelge 2.2. Rassallık indeksleri	11
Çizelge 4.1. Kriter – indeks listesi	39
Çizelge 4.2. Kriterlerin karşılaştırma matrisi.....	40
Çizelge 4.3. C1 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi	41
Çizelge 4.4. C2 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi.....	41
Çizelge 4.5. C3 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi	41
Çizelge 4.6. C4 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi.....	41
Çizelge 4.7. C5 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi	42
Çizelge 4.8. C1 kriterine ait indekslerin ağırlıkları	44
Çizelge 4.9. C2 kriterine ait indekslerin ağırlıkları	44
Çizelge 4.10. C3 kriterine ait indekslerin ağırlıkları	45
Çizelge 4.11. C4 kriterine ait indekslerin ağırlıkları	45
Çizelge 4.12. C5 kriterine ait indekslerin ağırlıkları	45
Çizelge 4.13. Sözel değerlerin sayısal karşılıkları.....	51
Çizelge 4.14. Alternatiflere ait indeks değerleri	51
Çizelge 4.15. İndekslerin normalize değerleri	53
Çizelge 4.16. Referans seri – alternatif seriler arasındaki uzaklık.....	55
Çizelge 4.17. İndeks seviyesi birincil gri ilişkisel katsayılar (G matrisi)	56
Çizelge 4.18. İkincil gri ilişkisel katsayılar için normalize değerler.....	59
Çizelge 4.19. Referans seri – alternatif seriler arasındaki uzaklık.....	60

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.20. İkincil gri ilişkisel katsayı değerleri.....	60
Çizelge 4.21. Alternatifler için gri ilişkisel derece ve sıralama	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Analitik hiyerarşi sistem yapısı	7
Şekil 3.1. Gri ilişkisel katsayı ve ayırt edici katsayı arasındaki ilişki.....	20
Şekil 4.1. KTX-1 askeri temel eğitim uçağı.....	27
Şekil 4.2. T-6A TEXAN II askeri temel eğitim uçağı	28
Şekil 4.3. EMB-314 Super Tucano askeri temel eğitim uçağı	29
Şekil 4.4. Problemin hiyerarşik yapısı	38
Şekil 4.5. C matrisi için özdeğer hesaplaması.....	46
Şekil 4.6. C1 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması	47
Şekil 4.7. C2 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması	48
Şekil 4.8. C3 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması	48
Şekil 4.9. C4 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması	49
Şekil 4.10. C5 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
λ_{\max}	Matrise ait en büyük özdeğer (eigenvalue)
Σ	Toplam
ρ	Ayırıcı katsayı
ζ	Gri ilişkisel katsayı
ε	Gri ilişkisel derece

Kısaltmalar	Açıklama
AHP	Analitik hiyerarşi prosesi
CI	Tutarlılık indeksi
CR	Tutarlılık oranı
FSA	Finansal durum analizi
GİA	Gri ilişkisel analiz
HGİA	Hiyerarşik gri ilişkisel analiz
HOTAS	Hands on throttle and stick
HUD	Head up display
IFF	Identification friend or foe
MAWS	Füze ikaz sistemi
MFD	Multi functional display

Kısaltmalar	Açıklama
PCA	Temel bileşenler analizi
RI	Rassallık indeksleri
RWR	Radar ikaz alıcısı
SAW	Simple additive weights
TOPSIS	Technique for order preference by similarity to an ideal solution

1. GİRİŞ

Günümüz savaşlarında hava hâkimiyetinin önemi gittikçe artmaktadır. Bu da en modern uçaklarla teçhiz edilmiş kuvvetli bir hava gücü ve bunu kullanacak nitelikli personelle mümkün olabilir. Nitelikli personel olmadan silah sistemlerinin etkinlikle kullanılması mümkün değildir.

Hava Kuvvetlerinin en önemli yatırımı, kullanılan silah sistemlerinin özelliklerinden dolayı iyi yetişmiş ve alanında uzmanlaşmış personeldir. Bu kapsamda; savaş pilotları, güçlü bir yeteneğe, ani karar verme ve değişen şartlara uyum sağlayabilecek deneyime sahip olmalıdır. Deneyim, günlük ve rutin eğitimlerle elde edilir. Pilotlar, ya uçuş simülatörleri ya da fiziki uçuş eğitimleri ile eğitilirler.

Yeni nesil savaş uçakları üretildiğinde, eş zamanlı olarak özel amaçlı temel eğitim uçakları geliştirilmekte olup temel eğitim uçakları daha büyük, daha hızlı, daha pahalı jet uçaklarına geçmeden önceki ilk adımdır. Temel eğitim süreci, pilot adaylarının ileri seviye uçuş için gerekli olan tüm deneyimleri elde etmesi için gerekli temel uçuş eğitim programlarını kapsamaktadır.

Dünyada pilot eğitimlerinin yeni ve iyi donanımlı eğitim uçakları ile yapılması yönünde bir eğilim vardır. Pilot eğitiminde asıl amaç, sadece pilotaj eğitiminin etkinliğini maksimize etmek değil aynı zamanda maliyetleri de minimize etmektir. Bu nedenle, eğitim için en etkili hareket tarzının optimal maliyetle temin edilmesi çok önemlidir.

Teknolojik gelişmeler neticesinde harp uçaklarının performanslarında ortaya çıkan artışlar, bir pilotun yetiştirilmesi için gerekli olan eğitim, uçak ve sistemlerinin de geliştirilmesi gerekliliğini gündeme getirmiştir. Bugün birçok ülkede kullanılan eğitim uçakları ya ömürlerini doldurmak üzeredir ya da günün ihtiyaçlarına cevap verememektedir.

Bazı ülkeler 1950'li yıllara ait eğitim uçaklarını kullanmaktadır. Çeşitli modernizasyon işlemlerine rağmen bu uçaklar, ana platformunun eski olmasından dolayı günümüz ihtiyaçlarına cevap veremeyerek demode olmuştur.

Savunma sektöründe eğitim uçağı üreten birçok firma bulunmakta olup KAI, Raytheon Aircraft ve Embraer firmaları sektörün en güçlü rakipleri arasında gösterilmektedir.

Tez çalışmasının öncelikli amacı, sırasıyla yukarıda adı geçen firmalar tarafından üretilen KAI KTX-1, T-6A TEXAN II ve EMB-314 Super Tucano temel eğitim uçaklarını 5 adet performans kriteri ve bu kriterlere ait 22 alt kriteri (indeks) dikkate olarak HGİA yöntemiyle karşılaştırmak ve alternatifler arasından optimal seçimi yapmaktır.

Çalışmada ilgilenilen problem, karar verme problemi olduğundan, çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Proses (AHP), Gri İlişkisel Analiz (GİA) ve bu iki yöntemin birbirine entegrasyonundan oluşan Hiyerarşik Gri İlişkisel Analiz (HGİA) yöntemi problemin çözümünde kullanılmıştır.

Bu kapsamda; ikinci bölümde, AHP yöntemi anlatılmış ve farklı alanlarda yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde; GİA ve HGİA yöntemi anlatılmış ve farklı alanlarda yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; temel eğitim uçağı seçim problemi tanımlanarak alternatifler ve bu alternatiflere ait kriterler ve indeksler tanıtılmış, HGİA yöntemi kullanılarak problemin çözümü gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde; sonuç ve öneriler bölümünde, yapılan çalışmanın katkıları, uygulama sonuçlarının değerlendirmesi ve ileriye dönük öneriler sunulmuştur.

2. ANALİTİK HİYERARŞİ PROSESİ YÖNTEMİ

Analitik Hiyerarşi Prosesi, ilk olarak 1968 yılında Myers ve Alpert ikilisi tarafından ortaya atılan, 1977’de ise Saaty tarafından geliştirilen ve çok kriterli karar problemlerinin çözümünde etkin kullanım sağlayan bir karar analiz tekniğidir [1].

1970’lerin başında Saaty, Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı’nda beklenmedik problemlerin planlanması, toplumun refahını artırmaya katkıda bulunmak amacıyla elektrik endüstrisinde hisse senetlerinin dağılımlarının incelenmesi, Orta Doğu Sorunu, Sudan için ulaştırma sisteminin geliştirilmesi gibi karmaşık problemler üzerinde çalışmıştır [2].

Yöneylem araştırması ve matematik alanına birçok teorik katkıda bulunan Saaty, giderek karmaşıklaşan soyut modelleme yaklaşımlarının karar problemlerinin çözümünde beklenen etkiyi yapmadığını görmüş ve karmaşık karar problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere matematiksel sadeliği sebebiyle kolay anlaşılabilir ve uygulanan bir yöntem geliştirme uğraşına girmiştir. Çalışmalarının sonucunda son yıllarda önemi gittikçe artan ve her alanda kullanımı hızla yaygınlaşan, modern karar destek yöntemlerinden biri olan AHP yöntemini geliştirmiştir [2].

AHP, karar analizi yöntemlerinden gerçek hayata (endüstriden politik kararlara kadar birçok alanda) en çok uyarlanıp başarılı sonuçlar vermiş olanıdır. AHP yöntemi, eğitim, sağlık, çevre problemleri, veri tabanı seçimi, mimari tasarım, finans, makro ekonomik tahminler, pazarlama, planlama, portföy seçimi, kaynak atama, taşımacılık, teknoloji transferi, silahlanmanın kontrolü, politikada adayların seçimi, harp oyunları gibi karar alma alanlarında kullanılmaktadır [3].

2.1. Literatür Taraması

AHP yöntemi ile farklı alanlarda yapılan literatür çalışmaları aşağıda sunulmuştur.

Harbi, 2001 yılında yapmış olduğu çalışmada proje yönetimi konusunda en iyi yüklenici firmayı seçmek için AHP' yi kullanmıştır. Deneyim, mali durum, kalite performansı, araç - gereç envanteri, insan gücü kaynağı ve firmanın mevcut iş yükü gibi kriterleri dikkate alarak alternatif firmalar arasında seçim yapmıştır [4].

Kuo ve diğerleri, 2002 yılında tesis yer seçimi problemlerinin çözümü için bulanık AHP ve yapay sinir ağlarında çözüm aramıştır. Bulanık AHP ile kriterlere dayalı çözümler geliştirirken, yapay sinir ağlarını, fabrikalar ile mağazalar arasında olası hata ve sorunların geri dönüş bilgilerinin türetilmesinde kullanarak bütünleşik bir çalışma ortaya koymuşlardır [5].

2003 yılında Greiner ve diğerleri, silah sistem geliştirme projelerinin seçiminde karar vericileri destekleyecek, AHP ve 0-1 tamsayılı portfolyo optimizasyon modelinin entegre edildiği karma bir metot sunmuş ve seçilen projenin portfolyo değerini bütçe kısıtı altında maksimize edecek bir model kurmuştur [6].

Kulak ve Kahraman 2004 yılında, taşıma şirketi seçim problemi için maliyet, hata oranı, gecikme oranı, esneklik ve dokümantasyon kabiliyeti kriterlerini belirlemiştir. Bu kapsamda; bulanık aksiyomatik tasarım geliştirmiş ve geliştirdiği modeli literatürde yer alan bulanık AHP metotları ile karşılaştırmıştır [7].

Wei ve diğerleri, 2005 yılında bir firmaya en uygun ERP yazılımını seçmek için AHP yöntemini kullanmış ve önerdiği modelin geçerliliğini Tayvan'daki bir elektronik firmasında göstermiştir [8].

Cheng ve diğerleri, 1999 yılında yaptıkları bir çalışmada, dilsel değişken ağırlıklarına dayalı bulanık AHP yöntemini optimal saldırı helikopterini seçmek kullanmışlar ve yeni bir metot önermişlerdir. Alternatif üç silah sistemi, 5 ana kriter açısından değerlendirilmiştir [9].

Kang ve Lee, 2007 yılında yarı iletken piyasasında ürün, donanım etkinliği ve finans bakımından üretim etkinliği dikkate alındığında sipariş kabul etme stratejilerinin belirlenmesinde bulanık AHP tekniği ve entropi ağırlık yöntemini kullanmışlardır [10].

Wang ve diğerleri, 2008 yılında savaş uçaklarının hava-hava hareket etkinliğini değerlendirmek için bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Belirledikleri kriterler ışığında 6 farklı savaş uçağı arasından F-15 savaş uçağının en iyi performansla sahip olduğunu öne sürmüşlerdir [11].

Chen ve diğerleri, 2009 yılında Tayvan'da sivil havacılık alanında yaptığı çalışmada uçuş güvenliğini tehdit eden faktörleri belirlemek için AHP metodunu kullanmıştır. Uçuş mürettebatı, uçak bakım personeli, hava trafik kontrol unsuru ve diğer faktör hataları olmak üzere 4 kriter ve bu kriterlere bağlı 23 alt kriter belirlemiştir. Önem ağırlıklarını belirlemek için konusunda uzman personele 2 aşamalı anket düzenlemişler ve uçuş güvenliğini tehdit eden en büyük faktörün uçuş mürettebatı hatası olduğunu öne sürmüşlerdir [12].

2010 yılında Lee ve Kang, kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için AHP ve PCA (Temel Bileşenler Analizi) yöntemlerini birleştiren hibrid bir yaklaşım önermişlerdir. Belirledikleri kriter ağırlıklarını ağırlıklandırılmış tamsayılı amaç programlama modelinde kullanarak silah sistemleri arasındaki en iyi alternatifi seçmişlerdir [13].

Yin ve diğeri, 2011 yılında, savaş gemileri için temel bileşenler analizi ve AHP yöntemine dayalı tehdit sıralama algoritması geliştirmiştir. Yaptıkları çalışmada, 6 hedef ve hedeflere ait 5 parametreyi dikkate almışlar ve çalışmalarını simülasyon ile doğrulamışlardır [14].

2012 yılında Zheng ve diğeri, yaptıkları bir çalışmada sıcak ve nemli ortamlardaki iş güvenliğini değerlendirmek için trapezoidal bulanık sayılara bağlı olarak bulanık AHP yöntemi geliştirmiştir. Çalışmalarında, 3 kriter ve 10 indeksten oluşan hiyerarşik bir yapı oluşturmuşlar, trapezoidal bulanık sayıları ise, indekslerin ağırlıklarını belirlemek ve indekslerin iş güvenliği performansını değerlendirmek için kullanmışlardır [15].

2.2. AHP Yönteminin Teorik Temelleri

AHP'nin teorik altyapısı dört aksiyoma dayanır [16].

Aksiyom 1: Karşılıklı Olma (Reciprocal Condition): Eğer bir a kriteri b kriterine göre x kez daha önemli ise, b kriteri de a'ya göre 1/x kez daha önemlidir. $a_{ij} = x$ ise $a_{ji} = 1/x$ 'tir.

Aksiyom 2: Homojenlik (Homogeneity): İkili karşılaştırmalarda a ve b kriterleri için birinin diğeri göre ∞ kez üstün kabul edilemez. Yani $a_{ij} \neq \infty$ 'dur. Kullanılan ölçek 1-9 aralığında olduğu için a_{ij} değerleri de 1/9, 1/8, ..., 1, ..., 7, 8, 9 aralığında bir değer alacaktır.

Aksiyom 3: Bağımsızlık (Independence): Kriterler kendi aralarında ve alternatiflerden bağımsızdırlar.

Aksiyom 4: Beklenti (Expectations): Karar verme problemi hiyerarşik yapıda sunulabilir.

2.3. AHP Yönteminin Adımları

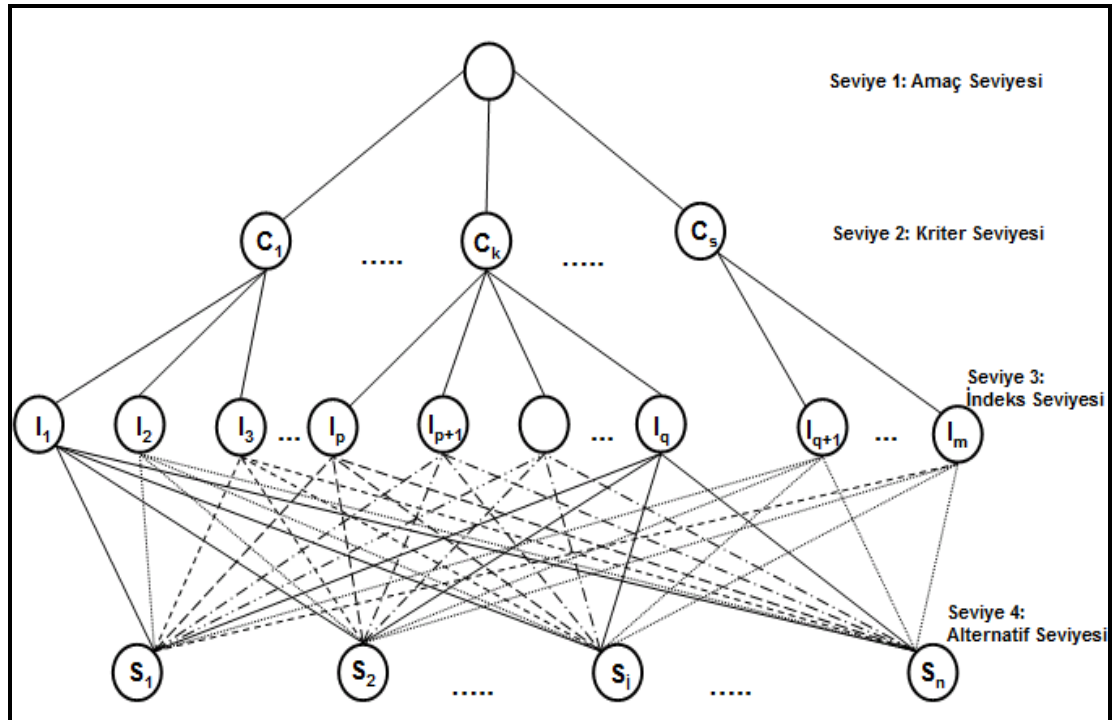
Saaty tarafından AHP yönteminin uygulanması için aşağıdaki adımlar geliştirilmiştir.

2.3.1. Problemin ve problemin amacının belirlenmesi

Problemin tanımlanması sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, problemin AHP yöntemine uygun olup olmadığı, diğer bir deyişle, elemanların kantitatif göstergeleri bulunup bulunmadığıdır [17].

2.3.2. Hiyerarşik yapının oluşturulması

Problemin irdelenerek daha kolay anlaşılmasını sağlamak için hiyerarşik yapıyı oluşturacak amaç, kriter, indeks ve alternatifler ortaya konulur [1]. Şekil 2.1'de AHP yönteminin hiyerarşik yönü gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Analitik hiyerarşi sistem yapısı [18]

Hiyerarşinin en üstünde problemin ana hedefi bulunur. Ana hedefin bir altında hedefi etkileyen kriterler, onların altında kriterleri etkileyen indeksler bulunmaktadır. Kriterlerin ve indekslerin miktarı problemin karmaşıklığına göre değişebilir. Kriterlerin ve indekslerin belirlenmesinde anket çalışması yapılabilir ve uzman kişilerin görüşlerine başvurulabilir. Alternatifler ise en altta yer alır [19].

2.3.3. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Amaç, kriter ve indeksler belirlendikten sonra, kriter ve indekslerin kendi aralarındaki önem derecelerinin belirlenmesi için ikili karşılaştırma karar matrisleri oluşturulur. Bu matrislerin oluşturulmasında Saaty tarafından önerilen 1-9 önem skalası kullanılır. Farklı kriterler, dokuz ölçekli skala yardımıyla değerlendirilerek önem dereceleri belirlenir. İkili karşılaştırmalar karar probleminin karmaşıklığının azaltılmasına yardımcı olur [17].

Çizelge 2.1. Saaty'nin karşılaştırma ölçütleri [17]

1	İki kriter eşit öneme sahip
3	Kriterlerden biri diğerine göre <i>biraz</i> önemli
5	Kriterlerden biri diğerine göre <i>oldukça</i> önemli
7	Kriterlerden biri diğerine göre <i>çok</i> önemli
9	Kriterlerden biri diğerine göre <i>kat kat</i> önemli
2, 4, 6, 8	Önem derecelerinin <i>ara</i> değerleri

Bu aşamada; hiyerarşinin tüm seviyelerinde yer alan ve kararı etkileyebilecek öğelerle ilgili verilecek yargıların matrise dönüştürülmesi sağlanır. AHP'de her kriterin ikili karşılaştırmaları yapılarak hiyerarşideki elamanların birbirlerine göre göreceli önemleri belirlenmektedir [1].

Örneğin, bir hiyerarşide n adet kriterle ilgileniliyorsa; karar vericinin farklı kriterlerin göreceli önemini yorumlamasını yansıtan ve A ile tanımlanan nxn ikili karşılaştırma matrisi Eş. 2.1' deki gibi oluşturulmaktadır [1].

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

İkili karşılaştırma, i satırındaki ($i=1,2,\dots,n$) kriterlerin n sütunla temsil edilen her bir kritere bağlı olarak derecelenmesiyle yapılmaktadır. a_{ij} , A matrisinin (i,j) elemanını tanımladığında AHP, Çizelge 2.1'de gösterilen önem skalasına göre 1 ile 9 arasında bir ölçek önerir. Burada $a_{ij} = 1$, i ve j ' nin *eşit önemde* olduğunu, $a_{ij} = 5$, i ' nin j ' den *oldukça önemli* olduğunu, $a_{ij} = 9$ ise i ' nin j ' den *kat kat önemli* olduğunu göstermektedir. 2, 4, 6, 8 değerleri ise kesin yargıya sahip olmamakla birlikte derecelendirmede uzlaşma gerektiğinde verilecek ara değerlerdir. A matrisinin tüm diyagonal a_{ii} elemanları, kendilerine bağlı kriteri derecelendirdikleri için 1 olmalıdır [1].

2.3.4. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi

İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulmasından sonra, her bir kriterin ağırlığının belirlenmesi gerekir.

Eş. 2.1'de A ile tanımlanan ikili karşılaştırma matrisi, Eş. 2.2 kullanılarak normalize edilir ve Eş. 2.3'deki ^{Norm}A matrisi elde edilir.

$$^{Norm}a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.2)$$

^{Norm}A matrisi, her bir sütun elemanının ayrı ayrı ilgili sütun toplamına bölünmesi ile elde edilir.

$${}^{Norm}A = ({}^{Norm}a_{ij})_{n \times n} \quad (2.3)$$

Eş. 2.4'e göre, ${}^{Norm}A$ matrisinden hareketle matrisin satır toplamları alınır.

$${}^{Norm}w_i = \sum_{j=1}^n {}^{Norm}a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.4)$$

Eş. 2.5'e göre, $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ağırlık vektörü, ilgili satır toplamlarının tüm satırların toplamına bölünmesiyle elde edilir [20].

$$w_i = \frac{{}^{Norm}w_i}{\sum_{k=1}^n {}^{Norm}w_k}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.5)$$

2.3.5. Tutarlılık oranının hesaplanması

Son kararın kalitesi, karar vericinin ikili karşılaştırmalarda verdiği yargıların tutarlılığına bağlıdır. Tutarlılıktan kastedilen, A karar seçeneğinin B karar seçeneğinden 2 kat önemli ve B karar seçeneğinin de C karar seçeneğinden 2 kat önemli olması durumunda, A karar seçeneğinin C karar seçeneğinden 4 kat önemli olacaktır [19].

Tutarlılık oranı Eş. 2.6 kullanılarak hesaplanır [20].

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \quad (2.6)$$

Eş. 2.6'ya göre, ikili karşılaştırmalar matrisi ile bu matrise karşılık gelen öncelik vektörü çarpılır. Elde edilen vektör ağırlıklı toplam vektördür. Elde edilen ağırlıklı toplam vektörünün her bir elemanı buna karşılık gelen öncelik

vektörüne bölünür ve elde edilen değerlerin ortalaması alınır. Bulunan bu değer maksimum özdeğerdir ve λ_{\max} simgesi ile gösterilir. λ_{\max} kullanılarak tutarlılık indeksi (CI) hesaplanır [19].

$$CI = \left(\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \right) \quad (n = \text{karşılaştırılan alternatif sayısı}) \quad (2.7)$$

Tutarlılık Oranı (CR) ise Eş. 2.8 kullanılarak hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.8)$$

Rassallık indeksinin (RI) bulunması için Saaty tarafından geliştirilen ve Çizelge 2.2'de gösterilen indeks kullanılır.

Çizelge 2.2. Rassallık indeksleri [19]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,5	1,49	1,51	1,56	1,57	1,59

Tutarlılık Oranının kabul edilebilir düzeyde olması için Saaty ve Vargas'ın önerdiği en üst limit 0,10'dur.

2.3.6. Karar matrisinin oluşturulması

AHP'nin son adımı ise, kriterlerin önem ağırlıkları ile alternatiflerin önem ağırlıklarının çarpımı ve her bir alternatife ait öncelik değerinin bulunmasıdır. Bu değerlerin toplamı 1'e eşittir. En yüksek değeri alan alternatif, karar problemi için en iyi alternatiftir [19].

3. HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ

GİA yöntemi, karmaşık sistemlerin değerlendirilmesinde sağladığı avantajlardan dolayı farklı bilimsel alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup belirli performans indekslerine göre karşılaştırılan alternatiflerin tercih edilme sırasını kolaylıkla yansıtmaktadır. Fakat GİA yöntemiyle farklı türdeki indeksler arasındaki göreceli önem ağırlıklarını ayırt etmek zordur. AHP ise, indeksler arasındaki göreceli önem ağırlığını belirlemek için kullanılan klasik bir yöntemdir. Bu nedenle; iki yöntemi bütünleştirmek her iki yöntemin avantajlarını maksimize etmeyi sağlamaktadır. Bu bütünleştirme, karmaşık bir sistemin çok amaçlı performansının değerlendirilmesini kolaylaştırır. Bu yüzden; çok hiyerarşili ve çok kriterli değerlendirme probleminin çözümü için GİA ve AHP'yi kombine eden kapsamlı yeni bir değerlendirme metodu önerilmektedir. HGİA yöntemi, GİA yöntemini her bir indeksin tercih edilebilirlik sırasını belirlemek için kullanırken, AHP yöntemini ise değerlendirilen indekslerin ağırlığını belirlemek için kullanmaktadır. Bu yöntem literatürde Hiyerarşik Gri İlişkisel Analiz olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde, öncelikle GİA yöntemi ve ardından HGİA yönteminin uygulama adımları anlatılacaktır [21].

3.1. Literatür Taraması

GİA ve HGİA yöntemleri ile farklı alanlarda yapılan literatür çalışmaları aşağıda sunulmuştur.

Kuo ve arkadaşları, 2007 yılında yaptıkları çalışmada, tesis yerleşim ve çizelgeleme yöntemi seçim problemini, VZA (Veri Zarflama Analizi) ve GİA ile değerlendirmiştir. Yerleşim probleminin çözümünde 18 alternatif yerleşim ve 6 performans ölçütünü dikkate alırken, çizelgeleme probleminde 9 alternatif çizelgeleme yöntemini ve 7 performans ölçütünü dikkate almışlardır. Her iki durum incelendiğinde, karşılaştırma sonuçlarına göre GİA yönteminin Çok

Ölçütlü Karar Verme problemlerinin çözümünde VZA'ya göre daha etkin olduğunu ortaya çıkarmışlardır [22].

Wang ve arkadaşları, 2004 yılında Tayvan'daki 10 ana havaalanının operasyonel performansını karşılaştırmış ve değerlendirmiştir. Havaalanı, yolcular, havayolu şirketleri, yardım ve kurtarma hizmetleri gibi 4 kriter arasındaki ilişkiye bağlı olarak operasyonel performans ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Tayvan'daki havaalanlarının performansını ortaya çıkarmak için göstergelerin kümelenmesinde GİA yöntemine başvurmuşlardır [23].

Lin ve arkadaşları, Tayvan'daki 37 sanayi kuruluşundaki CO₂ emisyonunu analiz etmek için GİA yöntemini kullanmıştır. Üretim, toplam enerji tüketimi, kömür, petrol, gaz ve elektrik kullanımını faktörlerini belirlemiştir. Çalışmanın sonucunda endüstriyel üretimin, CO₂ emisyon değişimi ile en yakın ilişkiye sahip olduğunu, elektrik tüketiminin ise ikinci önemli faktör olduğunu ortaya çıkarmışlardır [24].

Chen ve Chen, 2010 yılında yarı iletken üretim endüstrisinde yaptıkları çalışmada, AHP, GİA ve TOPSIS yöntemlerini beraber kullanmış ve bakım stratejisi için seçim yöntemi geliştirmişlerdir. Sundukları yöntem, gerçek yaşamdan elde edilen sonuçlara bağlı olarak oldukça faydalı bir metodolojidir [25].

Pophali ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada fabrika atığı arıtma sisteminin seçimini bütünleşik AHP ve GİA yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Önerdikleri yöntemin etkinliğini gerçek verileri kullanarak doğrulamışlardır [26].

2011 yılında Xu ve arkadaşları, AHP ve GİA yönteminin entegre edildiği yeni bir yaklaşım önermişler ve kömürle çalışan enerji santrallerinin mevcut durumlarını, santrallerin termal, çevresel, ekonomik performanslarını dikkate

olarak test etmişlerdir. Önerdikleri metodun politikacılar için kompleks enerji kullanım sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir [21].

Özcan ve arkadaşları, 2011 yılında yaptıkları çalışmada en iyi depo yer seçim probleminin çözümü için birim maliyet, stokta tutma kapasitesi, mağazalara ortalama uzaklık, ana tedarikçilere ortalama uzaklık ve hareket esnekliği kriterlerini belirleyerek AHP, TOPSIS, ELECTRE ve GİA yöntemlerini karşılaştırmıştır [27].

Hu, tedarikçi seçim probleminde AHP ve GİA yöntemlerini kullanmıştır. Yaptığı çalışmanın sonucunda; firmaların sırasıyla maliyet, mali durum, teslimat, ürün kalitesi ve müşteri hizmet kalitesi faktörlerine dikkat etmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır [28].

Üstünişik, Türkiye'deki coğrafi bölgeler ve istatistiki bölge birimleri bazında gelişmişlik sıralamasının belirlenmesi amacıyla sistemler arasındaki ilişki yapısını ortaya çıkarmada önemli bir yer tutan Gri İlişkisel Analizi uygulamıştır. Çalışmasında Devlet Planlama Teşkilatı tarafından yapılan "illerin ve bölgelerin sosyo - ekonomik gelişmişlik sıralaması araştırması" verilerini kullanarak 81 ile ait sosyal ve ekonomik alanlardan seçilen 58 değişkeni kullanmıştır [29].

Demiray, otomotiv yan sanayi sektöründe faaliyet gösteren bir üretim şirketinde yapılan makine yatırımı seçim probleminde çözüm önerisinde bulunmuştur. Çok kriterli karar verme problemlerine örnek makine seçim probleminde, 5 ana grupta 27 faktör açısından 3 alternatif makine karşılaştırılmış, böylece firma gereksinimlerine en uygun makinenin seçilmesi HGİA yöntemi ile sağlanmıştır [30].

Hui ve Bifeng, 2007 yılında yaptıkları çalışmada satıhtan havaya fırlatılan füzelerin etkinliğini değerlendirmek için GİA ve TOPSIS yöntemlerinin

entegre edildiği bir model önermiş, önerdikleri modelde satıhtan havaya fırlatılan 7 farklı füze sistemini belirledikleri 11 kriter yönünden karşılaştırmışlardır [31].

Zheng ve arkadaşları, 2010 yılında yaptıkları çalışmada sübjektif ağırlıklandırma metodu olan AHP ile objektif bir ağırlıklandırma metodu olan TOPSIS yöntemlerini birleştirerek kombine bir ağırlıklandırma metodu önermiş, bu kombine metodu kriterlerin ve indekslerin ağırlıklarını hesaplamada kullanmış ve GİA yöntemine entegre etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, optimum bina yalıtım sistemini seçmişlerdir [32].

Ho, 2005 yılında yaptığı çalışmada, Tayvan'daki 3 bankanın performansını 38 mali göstergeye göre GİA, FSA (Finansal Durum Analizi) ve TOPSIS yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmada, GİA ve FSA karşılaştırıldığında, GİA yönteminin bilginin sınırlı ve örnekleme boyutunun küçük olduğu durumlarda, Finansal Durum Analizi yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiğini öne sürmüştür [33].

3.2. Gri İlişkisel Analiz (GİA)

Gri sistem teorisi, ilk defa 1982 yılında Tayland'daki Hua Chung Bilim ve Teknoloji Üniversitesi öğretim üyelerinden Profesör Julong Deng tarafından ortaya atılmıştır [34].

Gri terimi, zayıf, eksik ve belirsizliği ifade eder ve gri ifadesi, genellikle bilgi kavramı ile ilişkili olarak kullanılır. Sistem kontrol teorisinde; ilgili bilginin bilindiği sistem beyaz sistem, ilgili bilginin tamamen bilinmediği sistem ise siyah sistem olarak adlandırılırken, bu sınırlar arasındaki herhangi bir sistem ise, gri sistem olarak ifade edilir [35].

GİA, gri modellemenin alt başlıklarından biri olup gri bir sistemdeki her bir faktör (alternatif seri) ile kıyas yapılan faktör (referans serisi) serisi arasındaki

ilişki derecesini belirlemeye yarayan bir metottur. Her bir faktör bir dizi (satır veya sütun) olarak tanımlanır. Faktörler arası etki derecesi ise gri ilişkisel derece olarak isimlendirilir [29].

GİA, tek bir değer içerisinde her bir alternatif için dikkate alınan performans ölçüt değerlerinin tüm sırasını birleştirerek Çok Ölçütlü Karar Verme problemlerini çözer. Orijinal problemi tek ölçütlü karar verme problemine dönüştürür. Böylece çok ölçütlü alternatifler, GİA sürecinden sonra kolaylıkla kıyaslanabilir. Ölçüt değerlerini tek bir değere dönüştürme işlemi, SAW ve TOPSIS yöntemleriyle kullanılan metoda benzerdir [22].

GİA, güç dağıtım sistemlerinin yenilenmesinin planlanmasında, entegre devre işaretleme proses denetiminde, kalite yayılım fonksiyonunun modellenmesi gibi farklı türdeki Çok Ölçütlü Karar Verme problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [22].

3.3. GİA Yönteminin Adımları

GİA'in temel prosedürü, tüm alternatiflerin performansını karşılaştırılabilir seriye dönüştürmektir. Bu adım, gri ilişkisel oluşum olarak adlandırılır. Daha sonra tüm karşılaştırılabilir seriler ve referans seri arasındaki gri ilişkisel katsayı hesaplanır. Son olarak, gri ilişkisel katsayılara dayalı olarak referans seri ve her bir karşılaştırılabilir seri arasındaki gri ilişkisel derece hesaplanır. GİA süreci detaylı olarak aşağıda sunulmuştur [22].

3.3.1. Referans seri ve karşılaştırılabilir serilerin belirlenmesi

Referans seri, tüm serilerin karşılaştırıldığı referans değerlerden oluşan temel bir vektördür. Referans serideki her bir kriter, kriterin tipine göre ya maksimum, minimum ya da optimum değer alır. Maksimum değer tipi kriter için en yüksek değer alınırken, minimum değer tipi kriter için en düşük değer

ve optimum değer tipi kriter için ise önceden belirlenmiş tercih edilen değer alınır [29].

n uzunluğundaki referans seri aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\chi_0 = (\chi_0(1), \chi_0(2), \chi_0(3), \dots, \chi_0(n)) \quad (3.1)$$

Referans seri (χ_0) ile karşılaştırılacak m tane n uzunluğundaki seri tanımlanmış olsun.

$$\chi_i = (\chi_i(1), \chi_i(2), \chi_i(3), \dots, \chi_i(n)), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.2)$$

3.3.2. Gri ilişkisel oluşum (Verilerin normalize edilmesi)

Faktörlerin farklı kaynaklardan geldiği, farklı birimlerde ölçüldüğü düşünüldüğünde verilerin aynı birime dönüştürülmesi gereklidir. Ayrıca serinin çok geniş aralıklarda değer aldığı durumlarda standartlaştırmayla verilerin küçük bir aralığa çekilmesinde fayda vardır [29].

Normalizasyon işlemi, verilerin aynı birime dönüştürülmesi ve aynı skalada değerlendirilmesini sağlamaktadır. Gri sistem teorisinde bu normalizasyon işlemine “gri ilişkisel oluşum” adı verilmektedir [22].

Veriler normalize edildikten sonra karşılaştırılan seriler aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\chi_i^* = (\chi_i^*(1), \chi_i^*(2), \chi_i^*(3), \dots, \chi_i^*(n)), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.3)$$

Verilerin normalizasyonunda en kullanılan yöntemlerden birisi “lineer normalizasyon” yöntemidir. Seriler normalize edilirken kriterin fayda veya zarar kriteri sınıfından hangisine dahil olduğu önem kazanmaktadır [30].

“Daha yüksek daha iyi” durumunda normalizasyon işlemi Eş. 3.4’deki gibidir.

$$\chi_{ij} = \frac{\chi_i(j)}{\max_i \{\chi_i(j)\}} \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

“Daha düşük daha iyi” durumunda normalizasyon işlemi Eş. 3.5’deki gibidir.

$$\chi_{ij} = \frac{\min_i \{\chi_i(j)\}}{\chi_i(j)}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

χ_{ij} , i. serideki j. indeks normalize edilmiş değeri,

$\chi_i(j)$, i. serideki j. indeksin gerçek değerini,

$\max_i \{\chi_i(j)\}$, i. serideki maksimum değeri,

$\min_i \{\chi_i(j)\}$, i. serideki minimum değeri ifade etmektedir.

Verilerin normalize edilmesinden sonra tüm performans değerleri [0,1] aralığında derecelenir ve bu değerlerin referans seriye olan uzaklığı bulunur.

i alternatifinin j kriteri için normalize edilmesiyle elde edilen χ_{ij} değeri, diğer herhangi bir alternatifin değeri ile karşılaştırıldığında 1’e eşit veya 1’e daha yakın ise, i alternatifinin performansı j kriteri için daha iyidir. Yani; bir alternatifin tüm performans değerleri 1’e eşit veya yakınsa alternatif en iyi seçim olacaktır [22].

3.3.3. Gri ilişkisel katsayının hesaplanması

Aşağıdaki eşitlikler yardımı ile gerekli değerler hesaplanarak, j. kriter için χ_0 referans seri ile χ_i serisi karşılaştırılarak gri ilişkisel katsayı hesaplanır.

j, n uzunluğundaki serideki j. sırayı gösterebilir. $\zeta(\chi_0(j), \chi_i(j))$, j. noktadaki gri ilişkisel katsayı olup Eş. (3.6, 3.7, 3.8, 3.9)'a göre hesaplanır, $\rho \in [0,1]$ arasındaki bir katsayıdır ve çalışmalarda genellikle $\rho = 0.5$ olarak alınır [29].

$i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere;

$$\zeta(\chi_0(j), \chi_i(j)) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(j) + \rho \Delta_{\max}} \quad (3.6)$$

$$\Delta_{0i}(j) = |\chi_0(j) - \chi_i^*(j)| \quad (3.7)$$

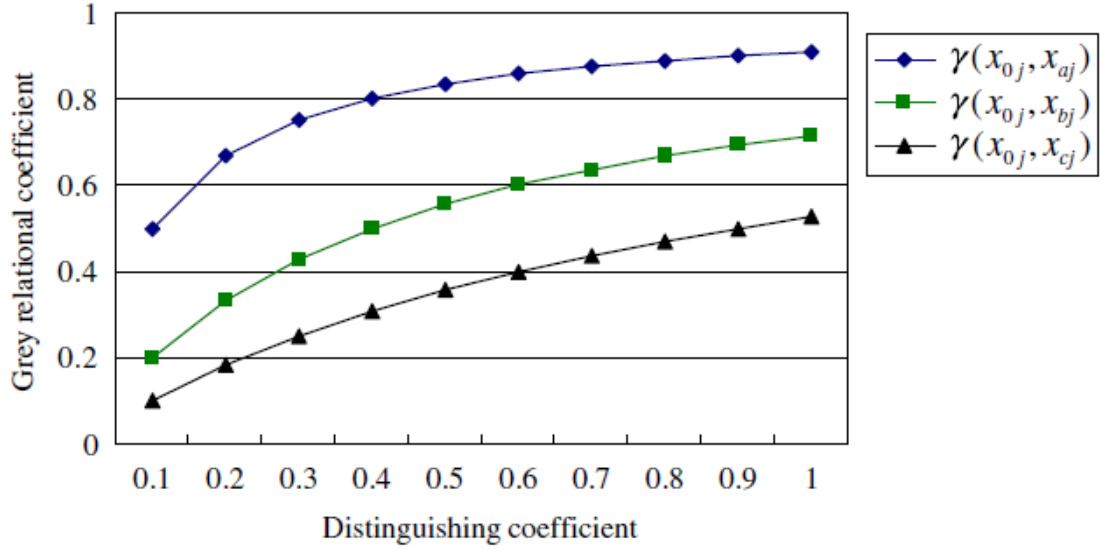
$$\Delta_{\min} = \min_i \min_j |\chi_0(j) - \chi_i^*(j)| \quad (3.8)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_j |\chi_0(j) - \chi_i^*(j)| \quad (3.9)$$

Gri ilişkisel katsayı, $\chi_i(j)$ 'nin $\chi_0(j)$ 'ye ne kadar yakın olduğunu belirlemek için kullanılır. Gri ilişkisel katsayı ne kadar büyük ise $\chi_i(j)$ ve $\chi_0(j)$ serileri j kriteri için o kadar yakındır [22].

ρ , ayırt edici katsayıdır. Amacı, gri ilişkisel katsayının aralığını genişletmek veya bastırmaktır. Örneğin; "a", "b", "c" gibi üç alternatifi dikkate alalım. $\Delta_{aj} = 0,1$, $\Delta_{bj} = 0,4$ ve $\Delta_{cj} = 0,9$ ise, a alternatifinin j ölçütü için referans seriye daha yakındır [22].

Çalışmalar, ρ değerinin gri ilişkisel derece sonrası oluşacak sırayı etkilemediğini göstermektedir. Şekil 3.1, farklı ayırt edici katsayılar kullanıldığında elde edilen gri ilişkisel katsayı değerlerini göstermektedir [22].



Şekil 3.1. Gri ilişkisel katsayı ve ayırt edici katsayı arasındaki ilişki [22]

Şekil 3.1'e göre, $\zeta(x_{0j}, x_{aj})$, $\zeta(x_{0j}, x_{bj})$ ve $\zeta(x_{0j}, x_{cj})$ arasındaki farklılıklar, farklı ayırt edici katsayılar kullanıldığında her zaman değişir. Fakat hangi ayırt edici katsayı kullanılırsa kullanılsın $\zeta(x_{0j}, x_{aj})$, $\zeta(x_{0j}, x_{bj})$, $\zeta(x_{0j}, x_{cj})$ 'nin sıralaması daima aynı kalır [22].

3.3.4. Gri ilişkisel derecenin hesaplanması

Tüm $\zeta(x_0(j), x_i(j))$ gri ilişkisel katsayıları hesaplandıktan sonra, gri ilişkisel derece Eş. 3.10 kullanılarak hesaplanır. Her bir kriterin ağırlıkları biliniyorsa, kriterin gri ilişki katsayısı ile kriterin önem derecesine ilişkin ağırlık değeri çarpılarak gri ilişkisel derece bulunur [29].

$$\varepsilon(x_0, x_i) = \sum_{j=1}^n w_j \zeta(x_0(j), x_i(j)), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.10)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \text{ dir.} \quad (3.11)$$

$\varepsilon(\chi_0, \chi_i)$, χ_0 ile χ_i arasındaki gri ilişkisel derece olup referans seri ve karşılaştırılan seri arasındaki korelasyon seviyesini göstermektedir. w_j , j kriterinin ağırlığıdır ve karar vericinin kararına veya önerilen problemin yapısına bağlıdır [22].

$\varepsilon(\chi_0, \chi_i)$, gri bir sistemdeki χ_i serisi ile χ_0 referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür. Gri ilişkisel derecenin büyüklüğü χ_i ile χ_0 arasında kuvvetli bir ilişki olduğunun göstergesidir. Eğer; karşılaştırılan iki seri, birbirinin aynı ise gri ilişkisel derece değeri 1 olarak bulunur. Gri ilişkisel derece karşılaştırılan serinin referans seriye ne kadar benzer olduğunu gösterir [29].

Diğer bir deyişle; gri ilişkisel derecesi en yüksek olan alternatif, karar verme probleminde en iyi karar alternatifini gösterecektir.

3.4. Hiyerarşik Gri İlişkisel Analiz Yöntemi

3.4.1. Hiyerarşik gri ilişkisel analiz yönteminin adımları

HGİA yönteminin uygulanması için diğer bölümlerde anlatılan işlemlere ek olarak yapılması gereken üç adım aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır [18], [26], [30].

Adım 1: Birincil gri ilişkisel katsayı matrisinin hesaplanması

j. indeks için referans seri ve alternatif seri arasındaki göreceli uzaklık Eş. 3.7' ye göre hesaplanır.

Gri ilişkisel Katsayı $\zeta_{0i}(j)$ değerlerinin oluşturduğu matris aşağıdaki eşitliğe göre her kriterin her alternatifteki değeri için hazırlanır.

$$\zeta_{0i}(j) = \frac{\min_i \left(\min_j |\chi_{0j} - \chi_{ij}| \right) + \rho \max_i \left(\max_j |\chi_{0j} - \chi_{ij}| \right)}{|\chi_{0j} - \chi_{ij}| + \rho \max_i \left(\max_j |\chi_{0j} - \chi_{ij}| \right)} \quad (3.12)$$

Referans serinin indeks değerlerinin tümü 1'e eşittir. Bundan dolayı $\min_i \left(\min_j |\chi_{0j} - \chi_{ij}| \right) = 0$ ve $\rho = 0,5$ olduğundan dolayı yukarıdaki eşitlik Eş. 3.13'e dönüştürülür.

$$\zeta_{0i}(j) = \frac{0,5 * \max_i \left(\max_j |\chi_{0j} - \chi_{ij}| \right)}{|\chi_{0j} - \chi_{ij}| + 0,5 * \max_i \left(\max_j |\chi_{0j} - \chi_{ij}| \right)} \quad (3.13)$$

Bu eşitliğe her i-j değeri yerleştirildiğinde çıkan sonuçlarla Eş. 3.14'deki birincil gri ilişkisel katsayı matrisi elde edilir. Burada n indeks sayısını, m ise alternatif sayısını göstermektedir.

$$G = \begin{bmatrix} gc_1 \\ gc_2 \\ \dots \\ gc_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{01}(1) & \zeta_{02}(1) & \dots & \zeta_{0m}(1) \\ \zeta_{01}(2) & \zeta_{02}(2) & \dots & \zeta_{0m}(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \zeta_{01}(n) & \zeta_{02}(n) & \dots & \zeta_{0m}(n) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Şekil 2.1'deki hiyerarşik yapıya göre, k. kritere ait indekslerin oluşturduğu matris aşağıdaki gibidir.

$$gc_k = \begin{bmatrix} \zeta_{01}(p) & \zeta_{02}(p) & \dots & \zeta_{0m}(p) \\ \zeta_{01}(p+1) & \zeta_{02}(p+1) & \dots & \zeta_{0m}(p+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \zeta_{01}(q) & \zeta_{02}(q) & \dots & \zeta_{0m}(q) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

gc_k matrisindeki $\zeta_{0i}(p)$, $\zeta_{0i}(p+1)$, $\zeta_{0i}(p)$,....., $\zeta_{0i}(q)$ elemanları, referans seri ve alternatif seriler arasındaki gri ilişkisel katsayıları göstermektedir.

Adım 2: İkincil gri ilişkisel katsayı matrisinin hesaplanması

İndeks seviyesinden kriter seviyesine çıkabilmek için o kriterine ait indeksleri, ağırlıklarını da dikkate alarak bütünleştirmek ve tek bir kriter olarak ifade edebilmek gerekmektedir.

Eş. 3.15'deki k kriterine ait indekslerin oluşturduğu gri ilişkisel katsayı matrisi, indekslere ait ağırlıklar ile çarpılarak ağırlıklı katsayı vektörü elde edilir.

$$\delta c_k = Wc_k gc_k = (w_{1p}, w_{(p+1)}, \dots, w_{1q}) * \begin{bmatrix} \zeta_{01}(p) & \zeta_{02}(p) & \dots & \zeta_{0m}(p) \\ \zeta_{01}(p+1) & \zeta_{02}(p+1) & \dots & \zeta_{0m}(p+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \zeta_{01}(q) & \zeta_{02}(q) & \dots & \zeta_{0m}(q) \end{bmatrix}$$

$$= (\delta c_k(1), \delta c_k(2), \dots, \delta c_k(m)) \quad (3.16)$$

Tüm kriterler için oluşturulan Eş. 3.16'daki vektörler birleştirilerek Eş. 3.17'deki ağırlıklı birincil katsayı matrisi elde edilir.

$$G_{weighed} = \begin{bmatrix} \delta_{c1}(1) & \delta_{c1}(2) & \dots & \delta_{c1}(m) \\ \delta_{c2}(1) & \delta_{c2}(2) & \dots & \delta_{c2}(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{cs}(1) & \delta_{cs}(2) & \dots & \delta_{cs}(m) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$G_{weighed}$ matrisinden hareketle, Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 kullanılarak Eş. 3.18'deki normalize ağırlıklı birincil katsayı matrisi elde edilir.

$$G'_{weighed} = \begin{bmatrix} \delta'_{c1}(1) & \delta'_{c1}(2) & \dots & \delta'_{c1}(m) \\ \delta'_{c2}(1) & \delta'_{c2}(2) & \dots & \delta'_{c2}(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta'_{cs}(1) & \delta'_{cs}(2) & \dots & \delta'_{cs}(m) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Eş. 3.13 kullanılarak $G'_{weighed}$ matrisinden ikincil gri ilişkisel katsayı matrisi (G_c) elde edilir.

$$G_c = \begin{bmatrix} \zeta_{c1}(1) & \zeta_{c1}(2) & \dots & \zeta_{c1}(m) \\ \zeta_{c2}(1) & \zeta_{c2}(2) & \dots & \zeta_{c2}(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \zeta_{cs}(1) & \zeta_{cs}(2) & \dots & \zeta_{cs}(m) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Adım 3: Gri ilişkisel derecenin hesaplanması

Eş. 3.19'daki kriterler için oluşturulan matris, kriterlerin ağırlıkları ile çarpılarak amaç seviyesi için gri ilişkisel derece vektörü elde edilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon = W_c * G_c = (w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cs}) * \begin{bmatrix} \zeta_{c1}(1) & \zeta_{c1}(2) & \dots & \zeta_{c1}(m) \\ \zeta_{c2}(1) & \zeta_{c2}(2) & \dots & \zeta_{c2}(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \zeta_{cs}(1) & \zeta_{cs}(2) & \dots & \zeta_{cs}(m) \end{bmatrix} \\ = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Burada elde edilen ε vektörü, alternatiflerin gri ilişkisel derecelerini göstermektedir. En yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olan alternatif maksimum faydayı sağladığı için en iyi alternatiftir [18], [26], [30].

4. HİYERARŞİK GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK OPTİMAL TEMEL EĞİTİM UÇAĞININ SEÇİLMESİ

4.1. Problemin Tanımlanması

Savaş uçakları teknolojisindeki gelişmeler, pilot eğitime ve eğitim uçaklarının tasarımına da yansımış, askeri pilot eğitimi konseptlerinde yeni arayışlara neden olmuştur.

İleri teknoloji savaş uçakların ortaya çıkışı, askeri jet pilotu eğitiminde geleneksel eğitim programlarının yeniden gözden geçirilmesini ve yeni yaklaşımların aranmasını gerekli kılmıştır. Değişen savaş uçağı teknolojileri ile pilot eğitimi ihtiyacının örtüşebilmesi, yeni nesil savaş uçakları dikkate alınarak tasarlanmış eğitim uçaklarıyla verilen eğitime bağlıdır.

İleri teknoloji kullanarak üretilen silah ve uçakların maliyeti çok yüksektir ve bunların etkin bir şekilde kullanılması gerekir. Bu hususlar silah ve uçak sistemlerinin kullanıcısı olan pilotların eğitiminin önemini de artırmaktadır. Modern bir hava gücünün önemli unsuru; ileri teknoloji savaş uçaklarını etkin bir şekilde kullanabilecek, iyi derecede eğitim almış pilotların yetiştirilmesidir.

Muharip bir pilotun yetiştirilmesi hem zahmetli hem de masraflı bir iştir. Teknolojik gelişmeler neticesinde harp uçaklarının performanslarında ortaya çıkan büyük artışlar, bir pilotun yetiştirilmesi için gerekli olan eğitim, uçak ve sistemlerinin de geliştirilmesi lüzumunu gündeme getirmiştir.

Kısıtlanan savunma harcamaları nedeniyle küçülen dünya savunma sektöründe eğitim uçağı üreten birçok firma bulunmakta olup KAI (Güney Kore), Raytheon Aircraft (Amerika) ve Embraer (Brezilya) firmaları, sektörün en güçlü rakipleri olarak gösterilmektedir.

Yukarıda belirtilen nedenlerden ve envanterinde bulunan temel eğitim uçaklarının demode olmasından dolayı birçok ülke, yeni nesil uçakların tedarik edilmesi kapsamında KAI KTX-1, T-6A TEXAN II ve EMB-314 Super Tucano eğitim uçaklarını dikkate almaktadır.

Bu bölümde; bahse konu üç askeri temel eğitim uçağı HGİA yöntemi ile değerlendirilecek ve seçim işlemi gerçekleştirilecektir.

4.1.1. Alternatiflerin tanıtılması

Karar verme probleminde seçimi yapılacak alternatif üç temel eğitim uçağının teknik özellikleri aşağıda kısaca anlatılmıştır.

KAI KTX-1

Kore Hava Kuvvetlerinde başlangıç ve temel pilot eğitimi için T-41B ve T-37 temel eğitim uçaklarının yerini almak üzere Kore'de tasarlanmış ve geliştirilmiş bir temel uçuş eğitim uçağıdır.

Kol uçuşu, gece uçuşu, aletli alçak, orta irtifa seyrüsefer ve akrobasi manevrası yeteneklerine sahiptir. Otomatik direksiyon ayar sistemi, ayrılabilir direksiyon sistemi, dayanıklı bir iniş takımı sistemi ve 10 000 saatten fazla yorulma ömrü olan uçak iskeletiyle donatılmıştır.

Kokpit standart seyrüsefer ve haberleşme teçhizatları ve yoğun ana ikaz sistemleriyle donatılmıştır.



Şekil 4.1. KAI KTX-1 askeri temel eğitim uçağı

T-6A TEXAN II

Tek motorlu turboprop, iki kişilik, alttan kanatlı, jet benzeri kullanım karakteristiklerine sahip başlangıç, temel eğitim uçağı olarak Raytheon Aircraft firması tarafından tasarlanmıştır.

Kademeli pilot sandalyeleri yerleşimi, kokpit konfigürasyonu ve bir miktar yükseltilmiş öğretmen pilot sandalyesi ile arka kokpit görüş açısı geliştirilmiş ve modern aviyonik cihazlarla donatılmıştır. Her iki kokpit de tek, yana açılan fırlatılmaz kanopiyle kapatılmıştır. Kanopi, 270 knot'a kadar kuş çarpmalarına karşı dirence sahiptir.

Uçak daha yüksek, az yoğun irtifalarda eğitime imkan veren ve öğrenci pilot üzerinde baskıyı da azaltan basınçlı bir kokpite sahiptir. Uçuşlar arasında servis zamanını kısaltacak kendinden oksijen üretim sistemiyle donatılmıştır.



Şekil 4.2. T-6A TEXAN II askeri temel eğitim uçağı

EMB-314 Super Tucano

Brezilya havacılık ve uzay şirketi Embraer tarafından geliştirilip üretilen çift koltuklu eğitim uçağıdır. İlk uçuşunu 1980 senesinde yapan Tucano'nun hafif saldırı amaçlı olanı da dahil olmak üzere çeşitli versiyonları bulunmaktadır.

Tek motorlu, çok amaçlı askeri eğitim uçağı olarak tasarlanan EMB-314, turboprop motor yapısına ve 4. nesil aviyonik ve silah sistemlerine sahiptir.

İskelet yapısı, en son teknoloji ve bilgisayar destekli araçlar kullanılarak +7g/-3,5g'lik yüklere dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Yandan mafsallı kanopi yapısı 270 knot'a kadar kuş çarpmalarına karşı dayanıklı olup, uçağın iskelet yapısı korozyona karşı korumalıdır.

Standart eğitim görevleri için 18 000 saatlik yorulma ömrüne sahipken, operasyonel olarak kullanılırsa 12 000 saatlik yorulma ömrüne sahiptir.

Kokpit, pilotun iş yükünü azaltmak için tasarlanmış 4. nesil İnsan-Makine Arayüzüne (HMI) sahiptir.

Gelişmiş uçuş simülatörü desteği, öğrenci pilotlara görevlerini daha etkin bir şekilde yapmalarına yardımcı olmakta ve pilotun durumsal farkındalığının artmasını sağlamaktadır.

Her türlü hava koşullarında görev yapabilme yeteneğine sahip olan uçak, taktik data-link sistemleri sayesinde hem yerde konuşlu komuta - kontrol sistemleri ile hem de havadaki diğer platformlarla data alış verişi yapabilmektedir.

Uçak aynı zamanda radar ikaz alıcısı (RWR), füze ikaz sistemi (MAWS), chaff, jammer, flare gibi yerden havaya ve havadan havaya atılan füzelere karşı elektronik destek ve elektronik koruma sistemlerine sahiptir [36].



Şekil 4.3. EMB-314 Super Tucano askeri temel eğitim uçağı [36]

4.1.2. Kriterlerin ve indekslerin tanımlanması

Temel eğitim uçağı seçimi, çok kriterli, çok alternatifli ve çok karar vericinin bulunduğu karmaşık bir problemdir. Kompleks uçak sistemleri ise, en iyi şekilde sistemleri oluşturan elemanlara bölünmesiyle anlaşılabilir [37].

Bu nedenle, temel eğitim uçaklarını karşılaştırmak ve optimal olanı seçmek amacıyla konusunda uzman kişilerle birlikte literatürde yer alan kaynaklar ve akademik çalışmalar ışığında 5 kriter ve 22 indeks belirlenmiştir. Kriterler ve indeksler aşağıda açıklanmıştır.

Performans

Bu kritere ait 6 adet indeks bulunmaktadır ve indeksler sayısal değerler ile ölçülmektedir. İndekslerin tamamı fayda kriteri olduğu için indeksler “*daha yüksek daha iyi*” yöntemine göre normalize edilecektir.

Motor gücü

Uçağın kanatlarında kaldırma kuvvetinin oluşması için kanadın etrafından belirli bir hız aralığında hava akımı geçmesi gerekir. Bu hava akımı motorlardan elde edilen itme gücü ile sağlanır ve havacılık biliminde “thrust” olarak adlandırılır. Bu güç sayesinde uçak ileri doğru hareket eder. Uçak motorunun ana fonksiyonu uçağa gereken hareketi sağlamak olduğu gibi, motorun uçaktaki elektrik, hidrolik, pnomatik gücü sağlamak gibi farklı görevleri de mevcuttur.

Maksimum kalkış ağırlığı

Uçağın kalkış sırasında kaldırabileceği azami ağırlığı belirtmek için kullanılan terimdir ve MTOW (Maximum Take Off Weight) olarak bilinir. MTOW, çok önemli bir rakam olup bir uçağın verimliliğindeki en büyük etkenlerden biridir.

Uçağın maksimum kalkış ağırlığı ne kadar yüksek ise, o kadar dahili, harici yakıt alabilir, faydalı yük, silah yükü taşıyabilir. Ayrıca, uçağa modifikasyon amaçlı yeni aviyonik sistemler takılabilir.

Menzil

Hava platformlarının, dahili ve harici yakıt kapasiteleri sayesinde uzun harekât menziline sahip olması istenir ve hareket çarpanı olarak bilinir.

Maksimum havada kalış

Eğitimin ihtiyacına göre gerektiğinde uçuş eğitim süresinin uzatılmasına imkan vermesi için havada kalma süresinin uzun olmasıdır.

Maksimum irtifa

Uçağın, atmosferik basınca dayanabileceği ve etkin olarak görev icra edebileceği irtifadır. Uçak maksimum irtifasının üzerinde uçurulursa yapısal hasarlar meydana gelebilir. Hava platformlarının yüksek irtifalara çıkabilmesi istenen bir özelliktir.

Maksimum hız

Uçak hızının uçtuğu yükseklik ve ortam sıcaklığına göre olan havadaki ses hızına olan oranı "mach number" olarak isimlendirilir ve ölçülür. Yüksek irtifalarda uçan uçaklarda pilotlar mach numarasını kullanırlar. Öğrenci pilotun bir sonraki aşama olan tekâmül eğitiminde süpersonik bir uçağa intibak etme süresini kısaltması açısından uçağın yüksek hız limitlerine sahip olması amaçlanır.

Ses Hızı = 1 Mach = 340 m/sn = 1200 km/saat'dir.

Teknik

Bu kritere ait 4 adet indeks bulunmaktadır ve indeksler sayısal değerler ile ölçülmektedir. İndekslerin tamamı zarar kriteri olduğu için indeks verileri “*daha düşük daha iyi*” yöntemine göre normalize edilecektir.

İniş mesafesi

İnişteki bir hava aracının pist başında 50 feet (yaklaşık 15 m) yükseklikten alçalıp iniş sonrasında durabileceği (ground run) mesafedir. Uçak ne kadar kısa mesafede iniş yapabiliyorsa o kadar iyidir [38].

Kalkış mesafesi

Kalkıştaki bir hava aracının kalkış süratine erişip yerden kesilebilmesi (ground run) ve etrafındaki maniaları (engel) temizleyecek şekilde 50 feet'e çıkması için gerekli olan mesafedir. Uçak ne kadar kısa mesafede kalkış yapabiliyorsa o kadar iyidir [38].

Stall sürati

Uçağın havada tutunabileceği minimum hızı ifade etmektedir. Her uçağın tasarımına göre havada tutunma sürati vardır. Uçağın hızı, bu süratin altına düşerse uçağın kanadında oluşan kaldırma kuvveti uçağın ağırlığını kaldıramaz ve stall meydana gelir. Düşük süratlerde uçağın havada tutunması istenir.

15 000 feet'e tırmanma zamanı

Hava taşıtının belirli bir zamanda kazandığı irtifanın zaman/yükseklik cinsinden ifadesidir. Genellikle min/feet cinsinden ölçülür. Tırmanma zamanını, motorun gücü, pervane ve uçağın toplam uçuş ağırlığı belirler.

Yapısal sağlamlılık

Bu kritere ait 5 indeks bulunmaktadır ve indeksler sayısal değerler ile ölçülmektedir. İndekslerin tamamı fayda kriteri olduğu için indeks verileri “*daha yüksek daha iyi*” yöntemine göre normalize edilecektir.

Uçağın yorulma ömrü

Tekrarlı gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir zaman sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takiben kopmalar meydana gelebilir. Motor ve iskelet yapısına bağlı olarak uçağın temel eğitim ve hareket görevlerinde kullanımı için yorulma ömrünün yüksek olması amaçlanır.

Pozitif g limiti

Uçağın yatay uçuşu esnasında kaldırma kuvveti ağırlığa eşittir. Fakat yatışlı keskin dönüşlerde ve yere dik yapılan dairesel akrobatik manevralarda yerçekimi etkisi ile uçağa binen yük artar. Örneğin; 5 g'lik bir etki yaratan dönüşte, bir ton ağırlığındaki bir uçağın ağırlığı 5 ton olur. Akrobasi hareketlerinde, uçağın aşırı yüklenmeye maruz kalacağı durumlarda yapısal hasarın en az olabilmesi için pozitif g limitinin yüksek olması gerekir. Pozitif g, pilot dalıştan çıkmak veya içe doğru lup atmak için lövyeyi çektiğinde meydana gelir.

Negatif g limiti

Akrobasi hareketlerinde, uçağın aşırı yüklenmeye maruz kalacağı durumlarda yapısal hasarın en az olabilmesi için negatif g limitinin yüksek olması gerekir. Negatif g, pilotun dalışa geçmesiyle yaşanır ve uçağın inişi sırasında motor gücünün azaltılmasıyla ortaya çıkar.

Anti-g sistemi

Uçağın, pilot ve öğrenci pilot üzerindeki fiziksel yükünü en aza indirebilecek sistemlere sahip olmalıdır. Anti-g sistemi, anti-g valf ve anti-g suit (koruyucu elbise) sistemlerinden oluşmaktadır. Anti g valf, mekaniksel bir alettir. Anti g valfler ile desteklenen anti-g suit'ler 1,5g- 2,0g'lik bir koruma sağlayabilir. Uçaklarda anti-g sisteminin olması istenen bir özelliktir [39].

Kanopi yapısı ve dayanıklılığı

Kanopi, bazı uçak türlerinde kokpiti saran saydam yapıdır. Gürültü ve meteorolojik etkileri yalıtırken, görüş imkânını artırdığı ve sürtünmeyi azalttığı için özellikle akrobasi ve savaş uçaklarında tercih edilir. Kanopinin optik kalitesinin çok yüksek, kavisli yüzeylerin dış görüşleri bozmayacak şekilde ve kuş çarpmalarına karşı dayanıklı olması istenir.

Aviyonik sistemler

Bu kritere ait 4 indeks bulunmaktadır ve indeksler sözel değerler ile ölçülmektedir. İndekslerin tamamı fayda kriteri olduğu için indeks verileri “*daha yüksek daha iyi*” yöntemine göre normalize edilecektir.

Haberleşme ve tanıma sistemleri

Uçak ile komuta- kontrol merkezleri arasında ses, bilgi iletimini sağlayan VHF, UHF telsizler ve IFF sistemlerinden oluşmaktadır. Uçak, modern VHF/UHF telsiz sistemlerine sahip olmalıdır.

VHF (Very High Frequency) sistemler, çok yüksek frekans bandına ait alıcı, verici ve antene ait komponentler, parçalar ve devrelerden oluşur.

UHF (Ultra High Frequency) sistemler, ultra yüksek frekans bandına ait alıcı, verici ve antene ait komponentler, parçalar ve devrelerden oluşmaktadır.

IFF (Identification Friend and Foe) sistemi, savaş alanında bulunan dost platformların sorgulama ve cevaplama yöntemiyle hızlı ve doğru bir şekilde teşhis edilmesini sağlayan dost-düşman tanıma tanıtma sistemleri olarak askeri harekât açısından hayati öneme haizdir.

Gösterge ve kontrol sistemleri

MFD, HOTAS, HUD başlıca gösterge ve kontrol sistemleridir.

MFD (Multi Functional Display), LCD ekran ve etrafında butonlardan oluşan pilot bilgilendirme ve hava aracı kontrol sistemidir. Aviyonik sistemlerden aldıkları bilgileri, sadece ekrana yansıtmakla kalmayıp gerektiğinde görev yönetim fonksiyonlarını da yerine getirebilmektedir.

HOTAS (Hands on Throttle and Stick), pilotun ellerini gaz pedalı ile lövyeden ayırmadan havadan havaya, havadan yere elektronik harp, haberleşme, seyrüsefer ve silah seçimi olanaklarını sağlayan bir sistemdir.

HUD (Head up Display), uçağın temel uçuş verilerinin yansıtıldığı cam ekrandır. Normal olarak askeri havacılık için geliştirilse de bugünün yaşamında yolcu uçakları, otomobil endüstrisi ve diğer uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Seyrüsefer sistemleri

Bir noktadan başka bir noktaya (deniz, hava, kara) seyahat etmek "seyrüsefer" olarak adlandırılır. TACAN, GPS, ILS gibi uçuşu kolaylaştıran sistemler seyrüsefer yardımcılarıdır.

TACAN (Tactical Air Navigation), askeri uçaklar tarafından kullanılır. Hava aracı ile yer istasyonu arasındaki diyagonal mesafe ile uçak ve yer istasyonlarının birbirlerine göre manyetik istikametlerini verir.

GPS (Global Positioning System), ABD Savunma Bakanlığı tarafından kara, deniz ve havada kullanılmak üzere geliştirilmiş uzayda konuşlandırılmış radyo vericilerine sahip uydulardan alınan sinyaller ile konum ve hız bilgilerini sağlayan bir sistemdir.

ILS (Instrument Landing System), aletli iniş sistemi olarak bilinir. Pist başına yerleştirilmiş vericiler vasıtasıyla uçakların inişine yardımcı olan bir hassas yaklaşma sistemidir. Bulut tavanının alçak, görüş faktörlerinin kötü olduğu hava koşullarında, uçağın alçak bir biçimde piste yaklaşmasını ve piste elektronik cihazlarla emniyetli iniş yapmasını sağlar.

Genel aviyonik sistemler

Pilotun iş yükünü azaltarak istediği bilgiye anında ulaşmasını sağlayan elektronik ve elektromekanik sistemlerdir. Hava veri bilgisayarı, yedek göstergeler, motor veri birimleri, dış ortam algılayıcıları başlıca genel aviyonik sistemlerdir.

Maliyet

Bu kritere ait 3 indeks bulunmaktadır ve indeksler sayısal değerler ile ölçülmektedir. İndekslerin tamamı zarar kriteri olduğundan indeks verileri “*daha düşük daha iyi*” yöntemine göre normalize edilecektir.

Satınalma maliyeti

Temin projesi kapsamında uçak ve diğer donanımlara ödenen birim maliyettir.

İdame/ İşletme maliyeti

Özgül yakıt sarfiyatı maliyeti, uçağın gerekli performans hedeflerini karşılması için gerekli bakım ve revizyon maliyetleri gibi sorti başına ortaya çıkan maliyet kalemlerini içermektedir.

Simülatör maliyeti

Temin projesi kapsamında uçuş eğitim simülatörüne ödenen ücrettir. Simülatörler, pilotların gerçek uçaktaymış gibi eğitilmelerini sağlayan gerçek uçağın neredeyse birebir aynısı olan bir kokpit ve dış dünyadaki görüntüleri aslına çok yakın uyarlayan bir sistemdir. Eğitim, idame/işletme maliyetlerinin ve zaman etkenlerinin azaltılmasında bir kuvvet çarpanı olarak görülmektedir.

4.2. AHP ile Hiyerarşik Yapının Oluşturulması

HGİA yöntemi ile temel eğitim uçağı seçim probleminin çözümü için ilk önce hiyerarşik yapı oluşturulur. Hiyerarşik yapı oluşturulurken uçak sistemleri analizi en iyi yapılabilen ve en fazla kontrol altına alınabilen alt sistemlere kadar bölünmüştür. AHP ile oluşturulan hiyerarşik yapı, 4 seviyeli olup Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

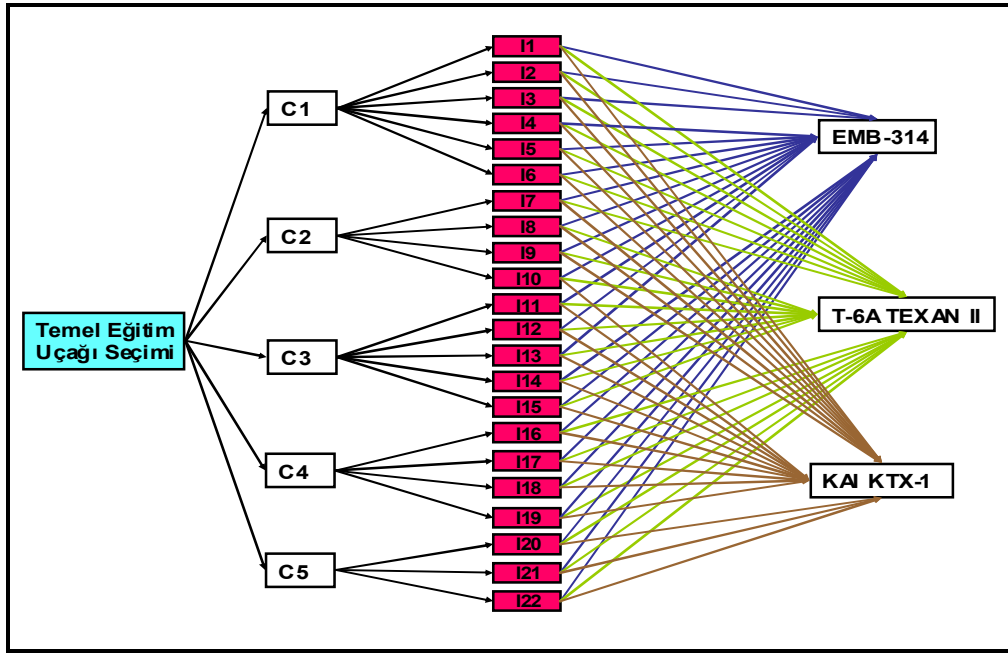
Birinci seviyede, “Amaç” bulunmaktadır. Yapılan çalışmada amaç, kriterleri ve indeksleri dikkate alarak alternatifleri değerlendirmek ve optimal temel eğitim uçağını seçmektir.

İkinci seviye kriterlerin bulunduğu seviyedir. Bu seviyede “performans”, “teknik”, “yapısal sağlamlılık”, “aviyonik sistemler” ve “maliyet” olmak üzere 5 ana kriter bulunmaktadır.

Üçüncü seviye indekslerin bulunduğu seviyedir. “Performans” kriterine ait 6 adet indeks, “teknik” kriterine ait 4 adet indeks, “yapısal sağlamlık” kriterine

ait 5 adet indeks, “aviyonik sistemler” kriterine ait 4 adet indeks ve “maliyet” kriterine ait 3 adet indeks olmak üzere toplam 22 adet indeks bulunmaktadır.

Dördüncü seviye ise alternatiflerin bulunduğu seviyedir. Bu seviyede alternatif EMB-314 Super Tucano, T-6A Texan II, KAI KTX-1, temel eğitim uçakları yer almaktadır.



Şekil 4.4. Problemin hiyerarşik yapısı

Aşağıda Çizelge 4.1’de problemin çözümünde kullanılan kriterler, indeksler ve bunlara karşılık gelen kodlar sunulmuştur. Ayrıca kriter ve indekslerin fayda veya zarar gruplarından hangisine dahil olduğu gösterilmiştir.

İndeks ve kriterlere ait normalizasyon işlemi yapılırken Çizelge 4.1 dikkate alınacaktır.

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra AHP ile kriter ve indekslerin önem ağırlıkları belirlenecektir.

Çizelge 4.1. Kriter – indeks listesi

Kodlar	Kriterler	Fayda/ Zarar	Kodlar	İndeksler	Fayda/ Zarar
C1	Performans	Fayda	I1	Motor gücü	Fayda
			I2	Maksimum kalkış ağırlığı	Fayda
			I3	Menzil	Fayda
			I4	Maksimum havada kalış	Fayda
			I5	Maksimum irtifa	Fayda
			I6	Maksimum hız	Fayda
C2	Teknik	Zarar	I7	İniş mesafesi	Zarar
			I8	Kalkış mesafesi	Zarar
			I9	Stall sürati	Zarar
			I10	15000 feet'e çıkış zamanı	Zarar
C3	Yapısal sağlamlılık	Fayda	I11	Ekonomik ömür	Fayda
			I12	Pozitif "g" limiti	Fayda
			I13	Negatif "g" limiti	Fayda
			I14	Anti "g" sistemi	Fayda
			I15	Kanopi dayanıklılığı	Fayda
C4	Aviyonik sistemler	Fayda	I16	Haberleşme ve tanıtma sistemleri	Fayda
			I17	Gösterge ve kontrol sistemleri	Fayda
			I18	Seyrüsefer sistemleri	Fayda
			I19	Genel aviyonik sistemler	Fayda
C5	Maliyet	Zarar	I20	Satınalma maliyeti	Zarar
			I21	İdame-İşletme maliyeti	Zarar
			I22	Simülatör maliyeti	Zarar

4.3. AHP ile Ağırlıkların Belirlenmesi

Bu bölümde, Şekil 4.4'deki hiyerarşik yapıyı oluşturan kriter ve indekslerin önem ağırlıkları AHP yöntemi ile hesaplanacaktır. Bunun için ilk adım, Eş. 2.1'de gösterilen ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasıdır.

4.3.1. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra amaca göre kriterlerin karşılaştırılması ve kriterlere ait indekslerin kendi aralarında karşılaştırılması için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur.

Oluşturulan ilk matris, amaca göre kriterlerin karşılaştırıldığı matristir. Çizelge 4.2'de yer alan kriterlere ait karşılaştırma matrisi, 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 istenmiştir. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulurken Çizelge 2.1'deki Saaty'nin karşılaştırma ölçütleri kullanılmıştır.

İkili karşılaştırmalar bir grup tarafından yapıldığı için, bir kriterin/indeksin ikili karşılaştırma değeri, değerlendirmeye katılanların verdikleri değerlerin geometrik ortalaması alınarak bulunmuştur. Geometrik ortalamaların alınma nedeni, bir kritere bir uzmanın vereceği değer (a), diğer bir uzman tarafından (1/a) şeklinde değerlendirilme olasılığıdır.

Çizelge (4.2-4.7)'de kriter ve indeks seviyesindeki ikili karşılaştırma matrisleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Kriterlerin karşılaştırma matrisi

C	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	4	2	3	1/2
C2	1/4	1	1/3	1	1/3
C3	1/2	3	1	3	1/2
C4	1/3	1	1/3	1	1/3
C5	2	3	2	3	1

Çizelge 4.3. C1 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi

C1	I1	I2	I3	I4	I5	I6
I1	1	4	2	2	5	3
I2	1/4	1	1/4	1/4	1	1/3
I3	1/2	4	1	1	4	3
I4	1/2	4	1	1	4	2
I5	1/5	1	1/4	1/4	1	1/4
I6	1/3	3	1/3	1/2	4	1

Çizelge 4.4. C2 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi

C2	I7	I8	I9	I10
I7	1	2	1/5	1/2
I8	1/2	1	1/6	1/3
I9	5	6	1	4
I10	2	3	1/4	1

Çizelge 4.5. C3 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi

C3	I11	I12	I13	I14	I15
I11	1	4	7	8	8
I12	1/4	1	5	4	4
I13	1/7	1/5	1	1/2	1
I14	1/8	1/4	2	1	1
I15	1/8	1/4	1	1	1

Çizelge 4.6. C4 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi

C4	I16	I17	I18	I19
I16	1	1/3	1/5	1/2
I17	3	1	1/2	3
I18	5	2	1	4
I19	2	1/3	1/4	1

Çizelge 4.7. C5 kriterine ait indekslerin ikili karşılaştırma matrisi

C5	I20	I21	I22
I20	1	4	7
I21	1/4	1	3
I22	1/7	1/3	1

4.3.2. Kriterlerin ve indekslerin ağırlıklarının bulunması

Bu bölümde kriterlere ve indekslere ait hesaplanacak ağırlık vektörleri, HGİA yönteminde ikincil gri ilişkisel katsayıların ve gri ilişkisel derecenin hesaplanmasında kullanılır. Kriter ve indekslere ait önem ağırlıkları, Eş. (2.2 - 2.5) kullanılarak hesaplanacaktır.

Kriterlerin ağırlıklarının bulunması

C matrisi kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisini göstermektedir.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 3 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Eş. 2.2 kullanılarak yukarıdaki C matrisinin sütunlarının toplamı alınır ve matristeki her bir eleman ilgili sütun toplamına bölünerek ^{Norm}C matrisi elde edilir.

$$^{Norm}C = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,33 & 0,35 & 0,27 & 0,19 \\ 0,06 & 0,08 & 0,06 & 0,09 & 0,12 \\ 0,12 & 0,25 & 0,18 & 0,27 & 0,19 \\ 0,08 & 0,08 & 0,06 & 0,09 & 0,12 \\ 0,49 & 0,25 & 0,35 & 0,27 & 0,37 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Eş. 2.4'e göre, ^{Norm}C matrisinin satır toplamları alınır.

$$^{Norm}w_i = \begin{bmatrix} (0,25 + 0,33 + 0,35 + 0,27 + 0,19) \\ (0,06 + 0,08 + 0,06 + 0,09 + 0,12) \\ (0,12 + 0,25 + 0,18 + 0,27 + 0,19) \\ (0,08 + 0,08 + 0,06 + 0,09 + 0,12) \\ (0,49 + 0,25 + 0,35 + 0,27 + 0,37) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,39 \\ 0,41 \\ 1,01 \\ 0,43 \\ 1,73 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\sum_{k=1}^n ^{Norm}w_k = [(1,39 + 0,41 + 1,01 + 0,43 + 1,73)] = [4,97] \quad (4.4)$$

Eş. 2.5'e göre, ilgili satır toplamları Eş 4.4' e bölünür.

$$w_i = \begin{bmatrix} 1,39 / 4,97 \\ 0,41 / 4,97 \\ 1,01 / 4,97 \\ 0,43 / 4,97 \\ 1,73 / 4,97 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,28 \\ 0,08 \\ 0,20 \\ 0,09 \\ 0,35 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$W_C = (w_{C1}, w_{C2}, w_{C3}, w_{C4}, w_{C5}) = (0,28, 0,08, 0,20, 0,09, 0,35) \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'ya göre, C5 kriteri yani "maliyet" kriteri optimal eğitim uçağı seçim probleminde en büyük ağırlığa sahiptir.

İndekslerin ağırlıklarının bulunması

Bu bölümde indekslere ait hesaplanacak ağırlık vektörü, HGİA yönteminde birincil gri ilişkisel katsayının hesaplanmasında kullanılacaktır. Kriterlere ait ağırlıkların hesaplanmasında yapılan işlemlerin aynısı indekslere ait ağırlıkların hesaplanması için de yapılır. Çizelge (4.8 - 4.12)'de indekslere ait tespit edilen ağırlıklar gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. C1 kriterine ait indekslerin ağırlıkları

C1	I1	I2	I3	I4	I5	I6	Ağırlık	Sıralama
I1	1	4	2	2	5	3	0,33	1
I2	1/4	1	1/4	1/4	1	1/3	0,06	5
I3	1/2	4	1	1	4	3	0,22	2
I4	1/2	4	1	1	4	2	0,21	3
I5	1/5	1	1/4	1/4	1	1/4	0,05	6
I6	1/3	3	1/3	1/2	4	1	0,13	4

$$(w_{I1}, w_{I2}, w_{I3}, w_{I4}, w_{I5}, w_{I6}) = (0,33, 0,06, 0,22, 0,21, 0,05, 0,13) \quad (4.7)$$

Eş. 4.7'ye göre, I1 indeksi yani "motor gücü" indeksi C1 kriterine ait indeksler arasında en büyük ağırlığa sahiptir.

Çizelge 4.9. C2 kriterine ait indekslerin ağırlıkları

C2	I7	I8	I9	I10	Ağırlık	Sıralama
I7	1	2	1/5	1/2	0,12	3
I8	1/2	1	1/6	1/3	0,08	4
I9	5	6	1	4	0,60	1
I10	2	3	1/4	1	0,20	2

$$(w_{I7}, w_{I8}, w_{I9}, w_{I10}) = (0,12, 0,08, 0,60, 0,20) \quad (4.8)$$

Eş. 4.8'e göre, I9 indeksi yani "stall sürati" indeksi C2 kriterine ait indeksler arasında en büyük ağırlığa sahiptir.

Çizelge 4.10. C3 kriterine ait indekslerin ağırlıkları

C3	I11	I12	I13	I14	I15	Ağırlık	Sıralama
I11	1	4	7	8	8	0,57	1
I12	1/4	1	5	4	4	0,23	2
I13	1/7	1/5	1	1/2	1	0,06	5
I14	1/8	1/4	2	1	1	0,08	3
I15	1/8	1/4	1	1	1	0,06	4

$$(w_{I11}, w_{I12}, w_{I13}, w_{I14}, w_{I15},) = (0,57, 0,23, 0,06, 0,08, 0,06) \quad (4.9)$$

Eş. 4.9'a göre, I11 indeksi yani "ekonomik ömür" indeksi C3 kriterine ait indeksler arasında en büyük ağırlığa sahiptir.

Çizelge 4.11. C4 kriterine ait indekslerin ağırlıkları

C4	I16	I17	I18	I19	Ağırlık	Sıralama
I16	1	1/3	1/5	1/2	0,09	4
I17	3	1	1/2	3	0,29	2
I18	5	2	1	4	0,50	1
I19	2	1/3	1/4	1	0,13	3

$$(w_{I16}, w_{I17}, w_{I18}, w_{I19},) = (0,09, 0,29, 0,50, 0,13) \quad (4.10)$$

Eş. 4.10'a göre, I18 indeksi yani "seyrüsefer sistemleri" indeksi C4 kriterine ait indeksler arasında en büyük ağırlığa sahiptir.

Çizelge 4.12. C5 kriterine ait indekslerin ağırlıkları

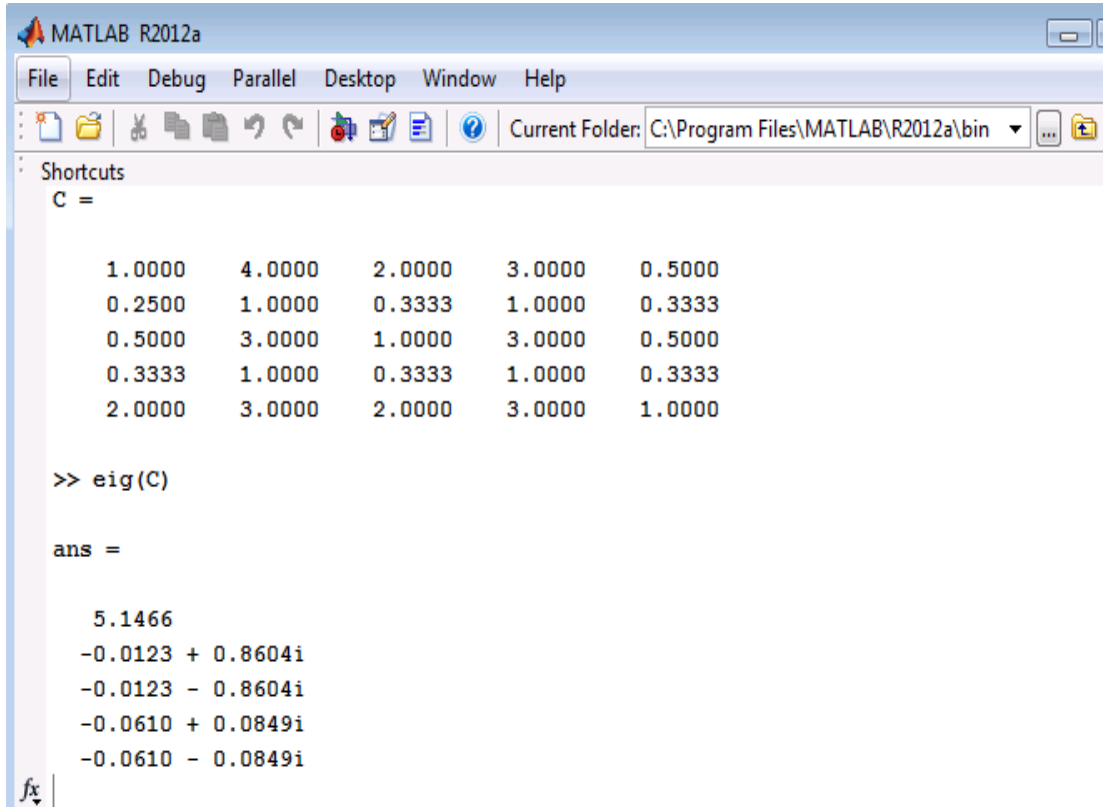
C5	I20	I21	I22	Ağırlık	Sıralama
I20	1	4	7	0,70	1
I21	1/4	1	3	0,21	2
I22	1/7	1/3	1	0,09	3

$$(w_{I20}, w_{I21}, w_{I22},) = (0,70, 0,21, 0,09) \quad (4.11)$$

Eş. 4.11'e göre, I20 indeksi yani "satınalma maliyeti" indeksi C5 kriterine ait indeksler arasında en büyük ağırlığa sahiptir.

4.3.3. Matrislerin tutarlılık oranlarının hesaplanması

Matrislere ait özdeğerlerin (eigenvalue) hesaplanmasında, MATLAB® paket programı kullanılmıştır. Kriterlere ait C matrisi programa girildiğinde $\lambda_{\max} = 5,1466$ olarak bulunur. Bu değere bağlı olarak tutarlılık indeksi (CI) ve tutarlılık oranı (RI) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.



```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts
C =

    1.0000    4.0000    2.0000    3.0000    0.5000
    0.2500    1.0000    0.3333    1.0000    0.3333
    0.5000    3.0000    1.0000    3.0000    0.5000
    0.3333    1.0000    0.3333    1.0000    0.3333
    2.0000    3.0000    2.0000    3.0000    1.0000

>> eig(C)

ans =

    5.1466
   -0.0123 + 0.8604i
   -0.0123 - 0.8604i
   -0.0610 + 0.0849i
   -0.0610 - 0.0849i

```

Şekil 4.5. C matrisi için özdeğer hesaplaması

$$\lambda_1 = 5,1466, \lambda_2 = -0,0123 + 0,8604i, \lambda_3 = -0,0123 - 0,8604i, \lambda_4 = -0,0610 + 0,0849i,$$

$$\lambda_5 = -0,0610 - 0,0849i \text{ ve } \lambda_1 = \lambda_{\max} = 5,1466.$$

Eş. 2.7 kullanılarak tutarlılık indeksi hesaplanır.

$$CI = \left(\frac{5,1466 - 5}{5 - 1} \right) = 0,0362, RI = 1,12 \quad (4.12)$$

Eş. 2.8 kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanır.

$$CR = \left(\frac{0,0362}{1,12} \right) = 0,03 \leq 0,10 \quad (4.13)$$

Tutarlılık oranının 0,1 değerinden küçük olması karar vericilerin kriterlere yönelik yargılarının tutarlı olduğunu göstermektedir. C matrisi için yapılan tutarlılık testi, diğer matrisler için de yapılacaktır.

Şekil (4.6 - 4.10)'da C1, C2, C3, C4 ve C5 ikili karşılaştırma matrislerine ait tutarlılık oranlarının hesaplanması gösterilmiştir.

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts
C1 =
    1.0000    4.0000    2.0000    2.0000    5.0000    3.0000
    0.2500    1.0000    0.2500    0.2500    1.0000    0.3333
    0.5000    4.0000    1.0000    1.0000    4.0000    3.0000
    0.5000    4.0000    1.0000    1.0000    4.0000    2.0000
    0.2000    1.0000    0.2500    0.2500    1.0000    0.2500
    0.3333    3.0000    0.3333    0.5000    4.0000    1.0000

>> eig(C1)
ans =
    6.1756
   -0.0117 + 1.0091i
   -0.0117 - 1.0091i
   -0.0761 + 0.2377i
   -0.0761 - 0.2377i
   -0.0000

```

Şekil 4.6. C1 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması

Şekil 4.6'ya göre, $\lambda_{\max} = 6,1756$, $CI = 0,0351$, $RI = 1,24$, $CR = 0,02 \leq 0,10$ olduğu için matris tutarlıdır.

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin

Shortcuts
C2 =

    1.0000    2.0000    0.2000    0.5000
    0.5000    1.0000    0.1667    0.3333
    5.0000    6.0000    1.0000    4.0000
    2.0000    3.0000    0.2500    1.0000

>> eig(C2)

ans =

    4.0658
   -0.0098 + 0.5162i
   -0.0098 - 0.5162i
   -0.0461

```

Şekil 4.7. C2 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması

Şekil 4.7'ye göre, $\lambda_{\max} = 4,0658$, $CI = 0,0219$, $RI = 0,9$, $CR = 0,02 \leq 0,10$ olduğu için matris tutarlıdır.

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin

Shortcuts
C3 =

    1.0000    4.0000    7.0000    8.0000    8.0000
    0.2500    1.0000    5.0000    4.0000    4.0000
    0.1429    0.2000    1.0000    0.5000    1.0000
    0.1250    0.2500    2.0000    1.0000    1.0000
    0.1250    0.2500    1.0000    1.0000    1.0000

>> eig(C3)

ans =

    5.1432
   -0.0243 + 0.8110i
   -0.0243 - 0.8110i
   -0.0473 + 0.2676i
   -0.0473 - 0.2676i

```

Şekil 4.8. C3 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması

Şekil 4.8'e göre, $\lambda_{\max} = 5,1432$, $CI = 0,0358$, $RI = 1,12$, $CR = 0,03 \leq 0,10$ olduğu için matris tutarlıdır.


```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin

Shortcuts

C4 =

    1.0000    0.3333    0.2000    0.5000
    3.0000    1.0000    0.5000    3.0000
    5.0000    2.0000    1.0000    4.0000
    2.0000    0.3333    0.2500    1.0000

>> eig(C4)

ans =

    4.0566
   -0.0148 + 0.4780i
   -0.0148 - 0.4780i
   -0.0269

```

Şekil 4.9. C4 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması

Şekil 4.9'a göre, $\lambda_{\max} = 4,0566$, $CI = 0,0141$, $RI = 0,90$, $CR = 0,01 \leq 0,10$ olduğu için matris tutarlıdır.

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin

Shortcuts

    1.0000    4.0000    7.0000
    0.2500    1.0000    3.0000
    0.1429    0.3333    1.0000

>> eig(C5)

ans =

    3.0324
   -0.0162 + 0.3129i
   -0.0162 - 0.3129i

```

Şekil 4.10. C5 kriterine ait indeksler için özdeğer hesaplaması

Şekil 4.10'a göre, $\lambda_{\max} = 3,0324$, $CI = 0,0162$, $RI = 0,58$, $CR = 0,02 \leq 0,10$ olduğu için matris tutarlıdır.

4.4. Gri İlişkisel Analiz Yönteminin Uygulanması

Bir önceki bölümde, AHP yöntemi kriter ve indekslerin ağırlığını belirlemek için kullanıldı. Bu bölümde, Gri İlişkisel Analiz yöntemi ise her bir indeksin tercih edilebilirlik sırasını belirlemek için kullanılacak ve alternatifler arasında bir sıralama oluşturulacaktır.

4.4.1. Referans seri ve alternatif serilerin belirlenmesi

Normalize veri ne kadar büyük ise, performans o kadar iyidir. Optimal normalize veriler 1'e eşit olmalıdır. Bundan dolayı referans (ideal) seri aşağıdaki gibi alınabilir [26].

$$\chi_0 = (\chi_0(1), \chi_0(2), \dots, \chi_0(22)) = (1, 1, \dots, 1) \quad (4.14)$$

Temel uçak seçim probleminde karşılaştırılan üç alternatif uçağa ait indeks değerleri Çizelge 4.14'de gösterilmiştir. Tez çalışmasında; toplam 5 kriter ve 22 indeks dikkate alınmıştır. İndeks değerlerinden bazıları nitel, bazıları ise nicel değerlere sahiptir.

Temel eğitim uçaklarının güvenilirlik, hareket amaçlı kullanımı, haberleşme, komuta-kontrol, lojistik destek, lojistik kolaylık gibi nitel özelliklere göre değerlendirilmesi oldukça zordur [37].

Buna göre, "aviyonik sistemler" kriterine ait indeksler alanında uzman kişiler tarafından mevcut katalog değerleri, eldeki bilgilerin incelenmesi ve tecrübelerine dayanarak yapılan değerlendirmeler sonucunda sözel değerler kullanılarak ifade edilmiştir. Bunun için Çizelge 4.13'deki sözel değerlere karşılık gelen sayısal değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.13. Sözel değerlerin sayısal karşılıkları [37]

Sözel Değerler	Sayısal Puan
Mükemmel	0,9
İyi	0,7
Orta	0,5
Zayıf	0,3
Çok Zayıf	0,1

Çizelge 4.14. Alternatiflere ait indeks değerleri [36], [37]

İndeksler	İndeks Kodları	Alternatifler		
		EMB 314	T-6 A	KTX-1
Motor gücü (shp)	I1	1600	1100	950
Maksimum kalkış ağırlığı (kg)	I2	5400	2890	2540
Menzil (km)	I3	1500	1667	1333
Maksimum havada kalış (dk)	I4	520	390	300
Maksimum irtifa (feet)	I5	35 000	35 000	38 000
Maksimum hız (knot)	I6	320	316	310
İniş mesafesi (feet)	I7	2820	1900	900
Kalkış mesafesi (feet)	I8	2950	1775	650
Stall sürati (knot/saat)	I9	80	82	70
15 000 feet'e çıkış zamanı (dk)	I10	5,0	5,3	5,0
Uçağın ekonomik ömrü (saat)	I11	18 000	18 720	12 000
Uçağın pozitif "g" limiti	I12	7,0	7,0	7,0
Uçağın negatif "g" limiti	I13	3,5	3,5	3,5
Anti "g" sistemi	I14	0,9	0,9	0,7
Kanopi dayanıklılığı (knot)	I15	300	270	270
Haberleşme ve tanıtma sistemleri	I16	0,9	0,7	0,9
Gösterge ve kontrol sistemleri	I17	0,7	0,9	0,9
Seyrüsefer sistemi	I18	0,9	0,9	0,9
Genel aviyonik sistemler	I19	0,9	0,5	0,7
Satınalma maliyeti (milyon dolar)	I20	9	5	4
İdame-İşletme maliyeti(dolar/sorti)	I21	460	400	375
Simülâtör maliyeti (milyon dolar)	I22	18	14	10

4.4.2. Verilerin normalize edilmesi

Çizelge 4.14'den görüleceği üzere, indeksler shp, kg, km, dk, feet gibi farklı birimlere ve büyüklüklere sahiptir. Verilerin aynı birime dönüştürülmesi ve aynı skalada değerlendirilmesi için normalizasyon işlemi gereklidir.

Bu çalışmada indeksleri normalize etmek için lineer normalizasyon yöntemi kullanılacaktır.

Alternatiflere ait indeks serileri, Eş. 3.4 ve Eş. 3.5' e göre normalize edilir. I1 indeksi için normalizasyon işlemi aşağıdaki gibidir.

I1 indeksi fayda kriteri olduğu için “daha yüksek daha iyi” durumuna göre normalize edilir ve Eş. 3.4 kullanılır.

$$\chi_{11} = \frac{\chi_1(1)}{\max_i \{\chi_1(1)\}} = \frac{1600}{\max_i \{1600, 1100, 950\}} = \frac{1600}{1600} = 1 \quad (4.15)$$

$$\chi_{21} = \frac{\chi_2(1)}{\max_i \{\chi_2(1)\}} = \frac{1100}{\max_i \{1600, 1100, 950\}} = \frac{1100}{1600} = 0,69 \quad (4.16)$$

$$\chi_{31} = \frac{\chi_3(1)}{\max_i \{\chi_3(1)\}} = \frac{950}{\max_i \{1600, 1100, 950\}} = \frac{950}{1600} = 0,59 \quad (4.17)$$

I7 indeksi, zarar kriteri olduğu için “daha düşük daha iyi” durumuna göre normalize edilir ve Eş. 3.5 kullanılır.

$$\chi_{17} = \frac{\min_i \{\chi_1(7)\}}{\chi_1(7)} = \frac{\min_i \{2820, 1900, 900\}}{2820} = \frac{900}{2820} = 0,32 \quad (4.18)$$

$$\chi_{27} = \frac{\min_i \{\chi_2(7)\}}{\chi_2(7)} = \frac{\min\{2820, 1900, 900\}}{1900} = \frac{900}{1900} = 0,47 \quad (4.19)$$

$$\chi_{37} = \frac{\min_i \{\chi_3(7)\}}{\chi_3(7)} = \frac{\min\{2820, 1900, 900\}}{900} = \frac{900}{900} = 1 \quad (4.20)$$

Tüm indeks değerleri için hesaplamalar yukarıdaki gibi yapıldıktan sonra indekslere ait normalize değerler elde edilir. Çizelge 4.15’de indekslere ait normalize değerler gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. İndekslerin normalize değerleri

Kriterler	İndeksler	Referans Seri	Normalize Değerler		
		χ_0	χ_1	χ_2	χ_3
C1	I1	1,00	1,00	0,69	0,59
	I2	1,00	1,00	0,54	0,47
	I3	1,00	0,90	1,00	0,80
	I4	1,00	1,00	0,75	0,58
	I5	1,00	0,92	0,92	1,00
	I6	1,00	1,00	0,99	0,97
C2	I7	1,00	0,32	0,47	1,00
	I8	1,00	0,22	0,37	1,00
	I9	1,00	0,88	0,85	1,00
	I10	1,00	1,00	0,94	1,00
C3	I11	1,00	0,96	1,00	0,64
	I12	1,00	1,00	1,00	1,00
	I13	1,00	1,00	1,00	1,00
	I14	1,00	1,00	1,00	0,78
	I15	1,00	1,00	0,90	0,90
C4	I16	1,00	1,00	0,78	1,00
	I17	1,00	0,78	1,00	1,00
	I18	1,00	1,00	1,00	1,00
	I19	1,00	1,00	0,56	0,78
C5	I20	1,00	0,44	0,80	1,00
	I21	1,00	0,82	0,94	1,00
	I22	1,00	0,56	0,71	1,00

4.5. Hiyerarşik Gri İlişkisel Analizin Uygulanması

4.5.1. Birincil gri ilişkisel katsayıların hesaplanması

Normalizasyon işleminden sonra, ilk olarak referans seri ile alternatif seriler arasındaki uzaklıkların bulunması gerekir. Eş. 3.7 kullanılarak alternatif seriler ile referans seri arasındaki uzaklıklar bulunur.

I1 indeksi için; χ_0 referans serisi ile χ_1 , χ_2 , χ_3 alternatif serileri arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta_{0i}(j) = \Delta_{01}(1) = |\chi_0(1) - \chi_1^*(1)| = |1 - 1| = 0 \quad (4.21)$$

$$\Delta_{0i}(j) = \Delta_{02}(1) = |\chi_0(1) - \chi_2^*(1)| = |1 - 0,69| = 0,31 \quad (4.22)$$

$$\Delta_{0i}(j) = \Delta_{03}(1) = |\chi_0(1) - \chi_3^*(1)| = |1 - 0,59| = 0,41 \quad (4.23)$$

I2 indeksi için; χ_0 referans serisi ile χ_1 , χ_2 , χ_3 alternatif serileri arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta_{0i}(j) = \Delta_{01}(2) = |\chi_0(2) - \chi_1^*(2)| = |1 - 1| = 0 \quad (4.24)$$

$$\Delta_{0i}(j) = \Delta_{02}(2) = |\chi_0(2) - \chi_2^*(2)| = |1 - 0,54| = 0,46 \quad (4.25)$$

$$\Delta_{0i}(j) = \Delta_{03}(2) = |\chi_0(2) - \chi_3^*(2)| = |1 - 0,47| = 0,53 \quad (4.26)$$

Tüm hesaplamalar yukarıda gösterildiği gibi yapıldıktan sonra Çizelge 4.16'dan Eş. 3.8 ve Eş. 3.9' a göre Δ_{\max} (global maksimum) ve Δ_{\min} (global minimum) değerleri hesaplanır.

Çizelge 4.16. Referans seri – alternatif seriler arasındaki uzaklık

Kriterler	İndeksler	Normalize Değerler		
		χ_1	χ_2	χ_3
C1	I1	0	0,31	0,41
	I2	0	0,46	0,53
	I3	0,10	0	0,20
	I4	0,00	0,25	0,42
	I5	0,08	0,08	0
	I6	0	0,01	0,03
C2	I7	0,68	0,53	0
	I8	0,78	0,63	0
	I9	0,12	0,15	0
	I10	0	0,06	0
C3	I11	0,04	0	0,36
	I12	0	0	0
	I13	0	0	0
	I14	0	0	0,22
	I15	0	0,10	0,10
C4	I16	0	0,22	0
	I17	0,22	0	0
	I18	0	0	0
	I19	0	0,45	0,22
C5	I20	0,56	0,20	0
	I21	0,18	0,06	0
	I22	0,44	0,29	0

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_j |\chi_0(j) - \chi_i^*(j)|, \Delta_{\max} = \Delta_{01}(8) = 0,78 \quad (4.27)$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_j |\chi_0(j) - \chi_i^*(j)|, \Delta_{\min} = \Delta_{01}(1) = \Delta_{02}(3) = 0 \quad (4.28)$$

Birincil gri ilişkisel katsayıların hesaplanması için gerekli tüm veriler elde edilmiş olup indeksler için birincil gri ilişkisel katsayılar hesaplanabilir.

Çizelge 4.17. İndeks seviyesi birincil gri ilişkisel katsayılar (G matrisi)

Kriterler	İndeksler	Referans Seri	Alternatifler Serisi		
		χ_0	χ_1	χ_2	χ_3
C1	I1	1,00	1,00	0,56	0,49
	I2	1,00	1,00	0,46	0,42
	I3	1,00	0,80	1,00	0,66
	I4	1,00	1,00	0,61	0,48
	I5	1,00	0,83	0,83	1,00
	I6	1,00	1,00	0,97	0,92
C2	I7	1,00	0,36	0,43	1,00
	I8	1,00	0,33	0,38	1,00
	I9	1,00	0,76	0,73	1,00
	I10	1,00	1,00	0,87	1,00
C3	I11	1,00	0,91	1,00	0,52
	I12	1,00	1,00	1,00	1,00
	I13	1,00	1,00	1,00	1,00
	I14	1,00	1,00	1,00	0,64
	I15	1,00	1,00	0,80	0,80
C4	I16	1,00	1,00	0,64	1,00
	I17	1,00	0,64	1,00	1,00
	I18	1,00	1,00	1,00	1,00
	I19	1,00	1,00	0,47	0,64
C5	I20	1,00	0,41	0,66	1,00
	I21	1,00	0,68	0,86	1,00
	I22	1,00	0,47	0,58	1,00

Eş. 3.6 kullanılarak birincil gri ilişkisel katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. I1 indeksi için, χ_0 referans serisi ile χ_1 serisi arasındaki gri ilişkisel katsayı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta_{\max} = 0,78, \Delta_{\min} = 0, \rho = 0,5 \text{ ve } \Delta_{01}(1) = 0 \text{ olmak üzere;} \quad (4.29)$$

$$\zeta(\chi_0(1), \chi_1(1)) = \frac{0 + (0,5 * 0,78)}{0 + (0,5 * 0,78)} = 1,00 \quad (4.30)$$

I1 indeksi için, χ_0 referans serisi ile χ_2 serisi arasındaki gri ilişkisel katsayı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\zeta(\chi_0(1), \chi_2(1)) = \frac{0,5 * 0,78}{0,31 + 0,5 * 0,78} = 0,56 \quad (4.31)$$

I1 indeksi için, χ_0 referans serisi ile χ_3 serisi arasındaki gri ilişkisel katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\zeta(\chi_0(1), \chi_3(1)) = \frac{0,5 * 0,78}{0,41 + 0,5 * 0,78} = 0,49 \quad (4.32)$$

Tüm alternatifler için birincil gri ilişkisel katsayılar hesaplandığında Çizelge 4.17'ye ulaşılmaktadır. Bu çizelge, aynı zamanda Eş. 3.14'deki G matrisini göstermektedir.

4.5.2. İkincil gri ilişkisel katsayıların hesaplanması

Eş. 3.16'ya göre, C1 kriterine ait I1, I2, I3, I4, I5 ve I6 indekslerinin ağırlık matrisi bu indekslere ait birincil gri ilişkisel katsayı değerleri matrisi ile çarpılır.

$$\delta_{C_1} = [0,33 \quad 0,06 \quad 0,22 \quad 0,21 \quad 0,05 \quad 0,13] * \begin{bmatrix} 1,00 & 0,56 & 0,49 \\ 1,00 & 0,46 & 0,42 \\ 0,80 & 1,00 & 0,66 \\ 1,00 & 0,61 & 0,48 \\ 0,83 & 0,83 & 1,00 \\ 1,00 & 0,97 & 0,92 \end{bmatrix}$$

$$\delta_{C_1} = [0,94 \quad 0,72 \quad 0,60] \quad (4.33)$$

Yukarıdaki işlemlerin aynısı tüm kriterler için yapılır.

$$\delta_{C_2} = [0,12 \quad 0,08 \quad 0,60 \quad 0,20] * \begin{bmatrix} 0,36 & 0,43 & 1,00 \\ 0,33 & 0,38 & 1,00 \\ 0,76 & 0,73 & 1,00 \\ 1,00 & 0,87 & 1,00 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\delta_{C_2} = [0,72 \quad 0,69 \quad 1,00]$$

$$\delta_{C_3} = [0,57 \quad 0,23 \quad 0,06 \quad 0,08 \quad 0,06] * \begin{bmatrix} 0,91 & 1,00 & 0,52 \\ 1,00 & 1,00 & 1,00 \\ 1,00 & 1,00 & 1,00 \\ 1,00 & 1,00 & 0,64 \\ 1,00 & 0,80 & 0,80 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\delta_{C_3} = [0,94 \quad 0,98 \quad 0,68]$$

$$\delta_{C_4} = [0,09 \quad 0,29 \quad 0,50 \quad 0,13] * \begin{bmatrix} 1,00 & 0,64 & 1,00 \\ 0,64 & 1,00 & 1,00 \\ 1,00 & 1,00 & 1,00 \\ 1,00 & 0,47 & 0,64 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\delta_{C_4} = [0,90 \quad 0,91 \quad 0,96]$$

$$\delta_{C_5} = [0,70 \quad 0,21 \quad 0,09] * \begin{bmatrix} 0,41 & 0,66 & 1,00 \\ 0,68 & 0,86 & 1,00 \\ 0,47 & 0,58 & 1,00 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$\delta_{C_5} = [0,47 \quad 0,69 \quad 1,00]$$

$\delta_{C_1}, \delta_{C_2}, \delta_{C_3}, \delta_{C_4}, \delta_{C_5}$ vektörleri birleştirilerek $G_{weighed}$ matrisi elde edilmiş olup Eş. 4.38'de gösterilmiştir. $G_{weighed}$ matrisi, kriterler bazında normalize edilir.

Normalizasyon işlemi daha önce indeksler için yapılan normalizasyon işlemlerinin aynısıdır.

$$G_{weighed} = \begin{bmatrix} 0,94 & 0,72 & 0,60 \\ 0,72 & 0,69 & 1,00 \\ 0,94 & 0,98 & 0,68 \\ 0,90 & 0,91 & 0,96 \\ 0,47 & 0,69 & 1,00 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

C1 kriteri “fayda kriter” olduğu için “daha yüksek daha iyi” durumuna göre normalize edilir ve Eş. 3.4 kullanılır.

$$\chi_{11} = \frac{\chi_1(1)}{\max_i \{\chi_1(1)\}} = \frac{0,94}{\max_i \{0,94, 0,72, 0,60\}} = \frac{0,94}{0,94} = 1 \quad (4.39)$$

C2 kriteri “zarar kriter” olduğu için “daha düşük daha iyi” durumuna göre normalize edilir ve Eş. 3.5 kullanılır.

$$\chi_{12} = \frac{\min_i \{\chi_1(2)\}}{\chi_1(2)} = \frac{\min_i \{0,72, 0,69, 1,00\}}{0,72} = \frac{0,69}{0,72} = 0,96 \quad (4.40)$$

Tüm kriterler için normalizasyon işlemleri yapıldıktan aşağıdaki Çizelge 4.18 elde edilir. Kriter seviyesinde normalize değerler elde edilmiş olup ikincil gri ilişkisel katsayılar hesaplanabilir.

Çizelge 4.18. İkincil gri ilişkisel katsayılar için normalize değerler

Kriterler	Referans Seri	Alternatifler Serisi		
	χ_0	χ_1	χ_2	χ_3
C1	1	1,00	0,77	0,64
C2	1	0,96	1,00	0,69
C3	1	0,96	1,00	0,69
C4	1	0,94	0,95	1,00
C5	1	1,00	0,68	0,47

Eş. 3.7 kullanılarak kriter seviyesinde alternatif seriler ile referans seri arasındaki uzaklıklar bulunur ve Çizelge 4.19 elde edilir.

Çizelge 4.19. Referans seri – alternatif seriler arasındaki uzaklık

Kriterler	Alternatifler Serisi		
	χ_1	χ_2	χ_3
C1	0	0,23	0,36
C2	0,04	0	0,31
C3	0,04	0	0,31
C4	0,06	0,05	0
C5	0	0,32	0,53

$$\Delta_{\max} = \Delta_{03}(5) = 0,53 \text{ ve } \Delta_{\min} = \Delta_{01}(1) = \Delta_{01}(5) = 0 \quad (4.41)$$

Eş. 3.6 kullanılarak kriterler için ikincil gri ilişki katsayılar hesaplandığında Çizelge 4.20 elde edilir. Bu matris aynı zamanda G_C matrisini göstermektedir.

Çizelge 4.20. İkincil gri ilişki katsayı değerleri

Kriterler	Alternatifler		
	EMB 314	T-6 A	KTX-1
C1	1,00	0,53	0,42
C2	0,86	1,00	0,46
C3	0,87	1,00	0,46
C4	0,81	0,84	1,00
C5	1,00	0,45	0,33

4.5.3. Gri ilişki derecenin hesaplanması

Eş. 3.20 kullanılarak daha önce AHP ile hesaplanan kriterlerin ağırlıklarını gösteren vektör ile kriterler için hesaplanan ikincil gri ilişki katsayı matrisi (G_C) çarpılır ve elde edilen vektör gri ilişki derece vektörünü verir.

$$\varepsilon = W_C * G_C = [0,28, 0,08, 0,20, 0,09, 0,35] * \begin{bmatrix} 1,00 & 0,53 & 0,42 \\ 0,86 & 1,00 & 0,46 \\ 0,87 & 1,00 & 0,46 \\ 0,81 & 0,84 & 1,00 \\ 1,00 & 0,45 & 0,33 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = [0,94 \quad 0,66 \quad 0,45] \quad (4.42)$$

Vektörün sonucu alternatifin ağırlığını gösterir. Alternatifin ağırlığı ne kadar yüksek ise, alternatif serinin ilişkisi referans seri ile o kadar yüksektir ve maksimum faydayı sağlar [26].

Çizelge 4.21. Alternatifler için gri ilişkisel derece ve sıralama

Alternatifler	Gri İlişkisel Derece	Sıralama
EMB 314 Super Tucano	0,94	1
T-6 A Texan II	0,66	2
KAI KTX-1	0,45	3

Çizelge 4.21'den görüldüğü üzere gri ilişkisel dereceler sıralandığında EMB 314 Super Tucano temel eğitim uçağı, en yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olduğundan temel eğitim uçağı değerlendirme probleminde optimal alternatiftir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Uçuş eğitiminin başarısı için iyi bir temel eğitim uçağı önemlidir. Bu yüzden temel eğitim uçaklarının performansı önemli bir faktör olup verimli ve efektif bir eğitim sistemi gereklidir. Optimal silah sistemlerinin seçimi ve silah sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesi çok aşamalı bir süreç olup çok faktörlü özelliklere sahiptir [37].

Bu tez çalışmasında, GİA ve AHP'nin kombinasyonundan oluşan HGİA yöntemi kullanılarak temel eğitim uçaklarının performansları 5 kriter ve 22 indeks dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Problemin çözümünde, ilk olarak seçim probleminin hiyerarşik yapısı oluşturulmuş ve hiyerarşik yapıyı oluşturan değerlendirme kriterleri ve indekslerin ağırlıkları AHP metodu ile hesaplanmıştır. GİA yöntemi ile kriter ve indekslerin her birinin genel performans değerlerine göre tercih edilebilirliği saptanmış, HGİA yöntemi ile de indekslerin ve kriterlerin ağırlıklarına bağlı olarak sırasıyla gri ilişkisel katsayılar ve gri ilişkisel derece elde edilmiştir.

Elde edilen sonuca göre, EMB 314 Super Tucano, en yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olduğu için optimal temel eğitim uçağı olarak seçilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, temel eğitim uçağı seçim probleminin çözümünde GİA, entropi ağırlıklı TOPSIS, bulanık TOPSIS yöntemlerine başvurulmuştur. Bu çalışmalarda, yalnızca uçaklara ait teknik ölçütler dikkate alınmış olup *maliyet*, *aviyonik sistemler*, *yapısal sağlamlılık* gibi hem nicel hem de nitel değerlere sahip performans ölçütleri dikkate alınmamıştır.

Bu tez çalışmasında, temel eğitim uçakları seçim probleminde ilk defa HGİA yönteminin kullanılması ve ölçütlerin kapsamlı olarak değerlendirilmesi

nedenlerinden dolayı bu çalışmanın literatüre katkıda bulunacağı değerlendirilmektedir.

İleriye yönelik çalışmalarda; dikkate alınan ölçütlerin sayısı artırılarak, Shannon Entropi, SAW gibi farklı ağırlıklandırma yöntemleri GİA yöntemine entegre edilebilir. Bu entegre metotlar, farklı alanlardaki Çok Ölçütlü Karar Verme problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabilir.

Ayrıca, bu çalışma ile optimal eğitim uçağının değerlendirilmesinde karar vericilere teknolojik performans verileri sağlanmış olup, HGİA yönteminin Çok Ölçütlü Karar Verme problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. İlerde geliştirilebilecek yazılımsal uygulamalarla, üst düzey yöneticiler için Karar Destek Sistemi oluşturulabilir ve duyarlılık analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Karakaya, Ç., “Analitik hiyerarşik proses yöntemi ile teknoloji transfer yöntemi seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 77-85 (2009).
2. Çoban, M., “Personel seçiminde analitik hiyerarşi prosesi ve imalat sanayiinde bir uygulama”, Yüksek lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü**, Balıkesir, 75-76 (2012).
3. Sürekli, F., “Yat tasarımının AHP yöntemi ile değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 58 (2010).
4. Al-Subhi Al-Harbi, K. M., “Application of the AHP in project management”, **International Journal of Project Management**, 19: 19-27 (2001).
5. Kuo, R. J., Chi, S. C., Kao, S. S., “A decision support system for selecting convenience store location through integration of fuzzy AHP and artificial neural network”, **Computers in Industry**, 47: 199-214 (2002).
6. Greiner, M. A., Fowler, J. W., Shunk, D. L., Matthew Carlyle, W. and McNutt, R. T., “A hybrid approach using the analytic hierarchy process and integer programming to screen weapon systems projects”, **IEEE Transactions on Engineering Management**, 50 (2): 192-202 (2002).
7. Kulak, O., Kahraman, C., “Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process”, **Information Sciences**, 170: 191-210 (2005).
8. Wei, C. C., Chien, C. F., Wang M. J., “An AHP-based approach to ERP system selection”, **Int. J. Production Economics**, 96: 47-62 (2005).
9. Cheng, C. H., Yang, K. L. and Hwang, C. L., “Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight”, **European Journal of Operational Research**, 116: 423-435 (1999).
10. Kang, H. Y., Lee, A. H. I., “Priority mix planning for semiconductor fabrication by fuzzy AHP ranking”, **Expert Systems with Applications**, 32: 560-570 (2007).
11. Wang, J., Fan, K., Su, Y., Liang, S. And Wang, W., “Air combat effectiveness assessment of military aircraft using a fuzzy AHP and

- TOPSIS methodology”, **Asia Simulation Conference**, China, 655-662 (2008).
12. Chen, C. C., Chen, J., Lin, P. C., “Identification of significant threats and errors affecting aviation safety in Taiwan using the analytical hierarchy process”, **Journal of Air Transport Management**, 15: 261-263 (2009).
 13. Lee, J., Kang, S. H., Rosenberger, J., Kim, S. B., “A hybrid approach of goal programming for weapon systems selection”, **Computers&Industrial Engineering**, 58: 521-527 (2010).
 14. Yin, G. Y., Zhou, S. L., Zhang, W. G., “A threat assessment algorithm based on AHP and principal components analysis”, **Procedia Engineering**, 15: 4590-4596 (2011).
 15. Zheng, G., Zhu, N., Tian, Z., Chen, Y., Sun, B., “Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments”, **Safety Science**, 50: 228-239 (2012).
 16. Öztürk, S. P., “OECD ülkelerinin Arge etkinliklerinin VZA/AHP sıralı metodu ile belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 24-25 (2010).
 17. Gülten, H., “Tesis yeri seçimi probleminde AAS kullanılması ve karar sisteminin AHS ile doğrulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 33-38 (2009).
 18. Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M., Li, J., “Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis”, **Journal of Environmental Management**, 82: 250-259 (2007).
 19. Korkmaz, İ., “Analitik hiyerarşi prosesi ve iki taraflı eşleşme algoritmasının silahlı kuvvetler personel atamasında kullanımı: bir karar destek sistemi uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 20-25 (2007).
 20. Sarucan, A., Baysal, M. E., Kahraman, C., Engin, O., “A hierarchy grey relational analysis for selecting the renewable electricity generation Technologies”, **Proceedings of the World Congress on Engineering**, London, 568-574 (2011).
 21. Xu, G., Yang, Y. P., Lu, S. Y., Li, L., Song, X., “Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process”, **Energy Policy**, 39: 2343-2351 (2011).

22. Kuo, Y., Yang, T., Huang, G. W., "The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems", ***Computers and Industrial Engineering***, 55: 80-93 (2008).
23. Wang, R. T., Ho, C. T., Feng, C. M., Yang Y. K., "A comparative analysis of the operational performance of Taiwan's major airports", ***Journal of Air Transport Management***, 10: 353-360 (2004).
24. Lin, s. J., Lu, I. J., Lewis C., "Grey relation performance correlations among economics, energy use and carbondioxide emission in Taiwan", ***Energy Policy***, 35: 1948-1955 (2007).
25. Chen, F. L. And Chen, Y. C., "Evaluating the maintenance performance of the semiconductor factories based on the analytical hierarchy process and grey relational analysis", ***American Journal of Applied Sciences***, 7(4): 568-574 (2010).
26. Pophali, G. R., Chelani, A. B., Dhodapkar, R. S., "Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach", ***Expert Systems with Applications***, 38: 10889-10895 (2011).
27. Özcan, T., Çelebi, N., Esnaf, Ş., "Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem", ***Expert Systems with Applications***, 38: 9773-9779 (2011).
28. Hu, Y., "Supplier selection based on analytic hierarchy process and grey relational analysis", ***ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management***, China, 607-610 (2009).
29. Üstünişik, N. Z., "Türkiye'deki iller ve bölgeler bazında sosyo-ekonomik gelişmişlik sıralaması araştırması: gri ilişkisel analiz yöntemi ve uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 50-60 (2007).
30. Demiray, A., "Makine seçim probleminin çok kriterli karar verme yöntemi ile çözümü", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 25-28 (2007).
31. Hui, G. And Bifeng, S., "Study on effectiveness evaluation of weapon systems based on grey relational analysis and TOPSIS", ***Journal of Systems Engineering and Electronics***, 20 (1): 106-111 (2009).

32. Zheng, G., Jing, Y., Huang, H., Gao, Y., "Application of improved grey relational projection method to evaluate sustainable building envelope performance", *Applied Energy*, 87: 710-720 (2010).
33. Ho, C. T., "Measuring bank operations performance: an approach based on grey relation analysis", *Journal of the Operational Research Society*, 57: 337-349 (2006).
34. Akay, D., "Kullanıcı merkezli ürün tasarımı için bütünleşik bir zeki model: cep telefonları üzerine bir uygulama", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 39 (2006).
35. Yıldırım, S., "Ürün tasarımı geliştirilmesi: TAGUCHI tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 22 (2011).
36. İnternet: Embraer "Embraer defence systems"
<http://www.embraerds.com/english/content/download/brochures.asp>
(2013).
37. Wang, T. C., Chang, T. H., "Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment", *Expert Systems with Applications*, 33: 870-880 (2007).
38. İnternet: Virginia Tech College of Engineering "Takeoff and Landing"
<http://www.dept.aoe.vt.edu/~lutze/AOE3104/takeoff&landing.pdf> (2013).
39. İnternet: Aviation Medicine: Aerospace Medicine "Protection against the 'G' "
<http://www.avmed.in/2012/06/protection-against-the-g/> (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞEN, Serkan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 02.11.1981/ Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (506) 509 48 13
e- mail : serkanindustrial@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü	2004
Lise	Ankara Keçiören Kalaba Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2013	Hava Kuvvetleri Komutanlığı	Subay

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Sinema, kitap okumak