

Hava Araçları için Yük ve Denge Problemi

Erhan Bulut

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018

Aircraft Load and Balance Problem

Erhan Bulut

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Industrial Engineering

May 2018

Hava Araçları için Yük ve Denge Problemi

Erhan Bulut

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yöneylem Araştırması Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Aydın Sipahioğlu

Mayıs 2018

## ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Erhan BULUT'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Hava Araçları için Yük ve Denge Problemi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye:** Prof. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU

**Üye:** Prof. Dr. Hüseyin Cenk OZMUTLU

**Üye:** Doç. Dr. Tuğba SARAÇ



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü



## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof.Dr. Aydın SİPAHİOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Hava Araçları için Yük ve Denge Problemi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 15/05/2018

Erhan BULUT

imza  


## ÖZET

Günümüzde ticari hava taşımacılığında, hava yolu şirketlerinin en büyük maliyet kalemini yakıt oluşturmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle modern yolcu uçaklarının imalatında daha hafif malzemeler kullanılarak uçakların ağırlıkları azaltılmaktadır. Ağırlık azalması doğal olarak yakıt tüketimini de azaltmaktadır. Bugün ki ağır rekabet koşullarında hava yolu şirketleri sadece uçak imalatından kaynaklanan yakıt tasarrufuyla yetinemezler. Uçuş operasyon verimliliğini de en üst düzeyde tutmaları gereklidir.

Bu çalışmada, ticari hava yolu taşımacılığında uçakların yakıt tüketimini düşürmek, hava yolu şirketlerinin karbon salınımını azaltmak ve maliyetlerini düşürmek için uçakların yüklenmesi esnasında ağırlık merkezi (CG) değerini ideal değere en yakın olacak şekilde, yükleme planını oluşturan karma tam sayılı matematiksel bir model geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hava aracı ağırlık ve denge problemi, tam sayılı modelleme, konteynır yükleme

## SUMMARY

Today, in commercial air transportation, fueling is the biggest cost item of airline companies. With the development of technology, the weight of aircraft is reduced by using lighter materials in the manufacturing of modern passenger aircraft. Weight reduction naturally also reduces fuel consumption. In today's severe competition conditions, airline companies can not afford only fuel savings from aircraft manufacturing. Flight operation efficiency should also be kept at the highest level.

In this study, in commercial air transportation, a mixed-integer mathematical model which create load plan when aircraft that the CG value is closest to ideal value is loaded is developed to reduces the fuel consumption of airplanes, reduces the carbon emissions and the cost of airline companies.

**Keywords:** Aircraft weight and balance problem, integer programming, container loading

## TEŞEKKÜR

Çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle çalıőmama büyük katkılar sağlayan danışman hocam sayın Prof. Dr. Aydın Sipahioğlu'na baőta olmak üzere, her zaman bana destek olan eőim Nurőah Bulut ve bana motivasyon kaynağı olan kızım Bilge Bulut'a teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	vi
SUMMARY .....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. HAVAYOLU TAŞIMACILIĞINDA KARGO YÜKLEME VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Bulk (Yığılma) Yükleme .....	5
2.2. CLS (ULD) Yükleme- Container Loading System .....	5
2.3. Uçak Yapısı .....	7
2.4. Hava Aracı Ağırlık Ve Denge Problemi.....	9
2.5. Hava Aracına Etki Eden Kuvvetler .....	11
2.5.1. Ağırlık .....	12
2.5.2. Kaldırma kuvveti .....	12
2.5.3. Geri sürüklenme kuvveti.....	13
2.5.4. İtme Kuvveti .....	13
2.6. Yüksek İrtifanın ve Ağırlık Merkezinin Ticari Hava Araçlarına Etkileri .....	14
2.7. Tanımlamalar ve Gösterimler .....	15
2.8. Ağırlık-Denge Zarfı .....	16
2.9. Ağırlık ve Denge Teorisi .....	19
2.9.1. Kuvvet Kolu .....	19
2.9.2. Moment .....	19
2.9.3. Kaldıraç Kanunu .....	20
2.10. Ortalama Aerodinamik Kordo Hattı (MAC) .....	20
2.11. Yük Ayrımı .....	22

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.12. Uçak Yüklemede Mevcut Durum.....	23
2.13. Hava Aracı Ağırlık ve Denge Problemi Literatür Araştırması.....	24
<b>3. HAVA YOLU KARGO VE BAGAJ TAŞIMACILIĞI İÇİN ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL.....</b>	<b>29</b>
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>34</b>
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>40</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>42</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR.....</b>	<b>44</b>
Ek Açıklama – A: Matematiksel Modelin Lingo Programında Yazımı.....	45
Ek Açıklama – B: Test Problemleri Verileri.....	47

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. AKE konteynır .....	6
2.2. PMC palet .....	6
2.3. PAG palet .....	7
2.4. PLA palet.....	7
2.5. Datum çizgisi.....	10
2.6. Uçağa etki eden kuvvetler .....	14
2.7. Ağırlık ve denge zarfı .....	18
2.8. Moment.....	20
2.9. Ortalama aerodinamik kordo hattı.....	21
2.10. MAC.....	22
3.1. Airbus A330 yükleme planı.....	29



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yük ayırım tablosu .....	23
2.2. Geçmiş çalışmalar .....	25
4.1. Test problemi 1 sonuçları .....	34
4.2. Test problemi 2 sonuçları .....	35
4.3. Test problemi 3 sonuçları .....	35
4.4. Test problemi 4 sonuçları .....	36
4.5. Test problemi 5 sonuçları .....	36
4.6. Test problemi 6 sonuçları .....	37
4.7. Test problemi 7 sonuçları .....	37
4.8. Test problemi 8 sonuçları .....	38
4.9. Test problemi 9 sonuçları .....	38
4.10. Test problemi 10 sonuçları .....	39



## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde hava yolu sektörü diğer taşıma türlerine göre çok daha fazla ilgi görmekte ve bu ilgi gün geçtikçe de artmaktadır. Sektör, hava yolu taşımacılığının gerçek anlamda başladığı ilk yıllarından bugüne sürekli bir değişim süreci içinde kalmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra ülkeler arasında artan bloklaşma ve soğuk savaş zaten var olan sosyoekonomik farklılıkları daha belirgin bir hâle getirmiştir. Ülkeler arasında meydana gelen büyük ekonomik ve politik farklılıklar ve bu ülkeler arasındaki ilişkiler tüm dünyadaki sektörleri etkilediği gibi hava yolu sektörünü de etkilemiştir.

Hava yolu sektörünün özelliklerinden biri ulusal ve uluslararası politikalara karşı aşırı hassas bir yapıda olmasıdır. Diğer yandan ülkeler hava yolu sektörünü hep kendi kontrolleri altında tutmak istemektedir. Bu nedenle uluslararası hava yolu taşımacılığı ülkelerin kendi politikaları çerçevesinde şekillenmiştir. Bunun en önemli etki ve göstergelerinden biri ülkelerin yaptıkları ikili anlaşmalarla hava yolu işletmelerinin hangi hatlarda operasyon düzenleyeceklerini belirlemiş olmalarıdır. Bu durumda hava yolu işletmelerinin pazara ulaşım ve erişim imkânları kendi amaçları, hedefleri, stratejileri doğrultusunda değil ülkelerin çeşitli faktörleri göz önünde tutarak belirledikleri politikalar doğrultusunda belirlenmektedir (MEB, 2011).

Hava yolu sektörüne getirilen bu kontrollerin, bir ölçüde sektörün işleyiş yapısına zarar verdiği düşünülmektedir. Hükümetler hâlen ikili anlaşmalarla hava yolu işletmeleri arasındaki uçuş sıklığını ve kapasiteyi kontrol etmektedirler. Bunun sonucunda ise hava yolu işletmelerinin istedikleri hatta serbestçe operasyon düzenlemeleri mümkün olamamaktadır. Ancak diğer sektör işletmeleri fazla bir engelle karşılaşmadan rahatlıkla istedikleri yerde mal ve hizmet üretebilmektedir. Hükümetler, artan rekabet ortamında daha etkin ve verimli çalışabilmeleri için hava yolu taşıyıcılarının özelleştirilmesini desteklemektedir. ABD'de havacılığın etkin ve verimli bir şekilde gelişmesinin temel nedeni, hükümetin 1978 yılındaki serbestleştirme hareketine dayanmaktadır. Ekonomik kriz hava yolu endüstrisinin küreselleşme sürecini hızlandırarak hava yolu şirketleri arasında iş birliğine yol açmıştır. Bu iş birliği anlaşmalarının bir kısmı, Asya hava yolu taşıyıcılarına kısa dönemde; kaynakların paylaşımı, trafik paylaşımı, uçak kullanım

etkinliğini artırma ve pazar durumlarını güçlendirme yolu ile sermaye girişi sağlayarak yardımcı olmuştur.

Küreselleşme ile birlikte tüm işletmelerin iş yapma alanı artmıştır. Küreselleşme son yıllarda tüm dünyayı etkileyen oldukça önemli bir kavramdır. Küreselleşmenin sonuçları ülkeler arası ilişkileri, politikaları, iletişimi, sektörleri, insanları ve doğal olarak işletmeleri doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle hava yolu sektörü ve hava yolu işletmeleri de bu durumdan etkilenmektedir. İş adamlarının dünyanın diğer bir noktasında yaptıkları bir iş bağlantısını kaçırmamak için çok hızlı hareket etmeleri gerekmektedir. Üretilen mal ve hizmetlerin farklı bölgelere en kısa zamanda ve güvenli bir şekilde ulaştırılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Değişen bu koşullar karşısında hava yolu işletmeleri, müşterilerine küresel bir şekilde hizmet verebilmek için bir takım çalışmasına girmek zorunda kalmışlardır. Ayrıca hava yolu işletmelerinin kendi aralarında birleşme yapmaları ve diğer ülkelerin hava yolu işletmelerine sahip olmaları da engellenmektedir.

Diğer yandan sözleşmenin tarafları (alıcı, taşıyıcı ve gönderici) birbirlerini sözleşmede belirtilen sorumlulukların dışındaki herhangi bir işle görevlendiremez. Örneğin alıcının, taşıma sözleşmesine göre taşıma bedelinin ödemesini yapması beklenemez. Alıcının taşıma bedelini ödemesi ancak alıcı ile gönderici arasında imzalanacak ticari sözleşmeye bağlıdır. Alıcı, gönderinin teslim alınması ile birlikte hava yolu konşimentosu kapsamındaki gönderi masraflarını üstlenir. Taşıma sözleşmesini reddetme hakkı ise sadece taşıyıcıya aittir. Hava yolu kargo taşımacılığının rahat anlaşılması açısından ulusal ve uluslararası hukuki düzenlemelerin irdelenmesi büyük önem taşımaktadır. Uluslararası hava yolu taşımacılığında geçerli olan yasal altyapı oluşumunu Varşova Konvansiyonu, Lahey Protokolü, Uluslararası Hava Yolu Taşımacılığı Birliği (IATA) düzenlemeleri ve Birleşmiş Milletler' in ilgili konvansiyonları oluşturmaktadır.

Hava yolu kargo taşıması; gönderici (lojistik firma) ile hava yolu kargo taşıması yapan hava yolu şirketi arasında imzalanan belge 'Hava Yolu Kargo Taşıma Senedi' veya diğer adıyla 'Hava Yolu Konşimentosu' (A Waybill – AWB) çerçevesinde yerine getirilmektedir. Hava yolu taşıma senedi (AWB) bir noktadan diğerine bireysel veya kombine taşımalarda da kullanılabilir. Bu sözleşmede adı geçen "söz verilen işin yapılması" cümlesi; gönderici, taşıyıcı ve alıcının haklarını da kapsamaktadır. Alıcı



sözleşme ortağı olmadığı hâlde, taşıyıcıya karşı sorumluluklarını yerine getirdiği takdirde, kargo ve hava yolu konşimentosunun kendisine verilmesi hakkına sahiptir. Hava yolu taşıma sözleşmesi gönderici (lojistik firma) ve taşıyıcı arasında imzalandığından, alıcı bu türden bir sözleşmede doğrudan yer almamaktadır. Ancak bu taşıma sözleşmesinin yapılmasının amacı taşımanın, teslim alacak kişinin lehine başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesidir.

IATA (International Air Transport Association) 2018 tahminlerine göre, dünyada 3,78 milyar yolcu 52,7 milyon ton da kargo taşınması beklenmektedir. Dünya üzerinde her gün yaklaşık 104 bin uçuş yapılmakta ve yaklaşık 10 milyon da yolcu taşınmaktadır. Havacılığın etki ettiği ekonomik büyüklük 2,7 trilyon dolar civarındadır. Bu da yaklaşık dünya gayri safi milli hasılasının %3,5 ine denk gelmektedir (IATA, 2018).

Bu kadar fazla yükün ve yolcunun taşındığı ticari hava yolu taşımacılığında, uçuş operasyonunun verimliliği ve emniyeti de en önemli çalışma alanlarından biri olmaktadır.

Uçağa kargo yüklemede yüklerin dengeli olması hem seyir güvenliği açısından hem de maliyet açısından büyük önem taşımaktadır. Yanlış yükleme uçağın dengesini bozabileceği gibi gereksiz yere uçağın hava sürtünmesine maruz kalmasına neden olmakta ve yakıt tüketimini arttırmaktadır. Bunun yanı sıra birlikte yüklenmemesi gereken kargoların olması halinde de nasıl bir yükleme planı yapılması gerektiğine dair bir karar problemi ortaya çıkmaktadır. Ek olarak kargonun ağırlığı, hacmi, uçağın taşımak zorunda olduğu kendi yükleri de düşünüldüğünde kargonun nasıl yüklenmesi gerektiğinin belirlenmesi ciddi bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'deki havayolu taşımacılığında uçağa yüklenecek kargonun uçaktaki bölmeleri dikkate alarak nasıl yüklenmesi gerektiğini belirleyecek bir matematiksel model geliştirilmiştir. Havayolu kargo taşımacılığında yüklerin dengeli dağıtılabilmesi için literatürde farklı matematiksel modellerin önerildiği görülmektedir. Ancak bu çalışmada önerilen model öncekilerden farklı olarak kısa sürede en iyi çözümü bulacak şekilde tasarlanmıştır ve istenen özel koşulları da sağlayacak şekilde geliştirilmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümünde genel olarak uçakla yapılan kargo taşımacılığına dair bilgiler verilmektedir. 3. Bölümde taşıma planını belirleyecek matematiksel model detaylı olarak açıklanmıştır. 4. Bölümde daha önce elle yapılan 10 farklı kargo yükleme planı ele alınarak bunların önerilen model ile çözümü sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiş ve önceki sonuçlarla kıyaslanmıştır. 5. ve son bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar geliştirilerek açıklanmış ve gelecekteki çalışmalar için öneriler verilmiştir.

## 2. HAVAYOLU TAŞIMACILIĞINDA KARGO YÜKLEME VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ticari yolcu uçaklarının yüklenmesi genel olarak ikiye ayrılır. Yığma yükleme ve Konteynır ile yükleme. Buna *CLS (ULD)* de denmektedir.

### 2.1. Bulk (Yığma) Yükleme

Konveyör adı verilen yürüyen bant sistemi olan teçhizat kullanılarak yapılan yüklemedir. Uçağın kargo ve bagaj yükleme bölümü fiziksel olarak iki ana bölümden oluşur ve buna İngilizce olarak hold ismi verilir. Hold içinde her kompartımanı birbirinden ayıran ve yüklerin karışmasını önleyen ağlar vardır.

### 2.2. CLS (ULD) Yükleme- Container Loading System

Konteynır ve paletlerin uçağa yüklenmesi için kullanılan asansör benzeri high loader adı verilen teçhizat kullanılarak ULD (Unit Load Device) yüklemesi yapılır. *CLS* bulunan uçaklarda konteynır ve palet ismi verilen iki çeşit yükleme aracı vardır. Kargo kompartıman zemininde konteynır ve palet yükleme için ayrı kilit sistemleri vardır. Bu yükleme araçlarının üzerinde IATA tanımlayıcı kodları bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde verilebilir:

KONTEYNIR	PALET
AKE/AVE 0051TK	PAG 2587TK
AKH 0087TK	PMC 3589TK
	PLA 1003TK
	PKC 0045TK

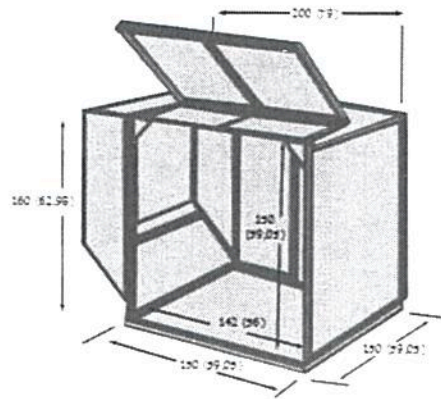
Uçak tipine göre yüklenebilecek, palet ve konteynırın sayısı ve türü değişmektedir.

Airbus uçaklar için aşağıdaki gibidir.

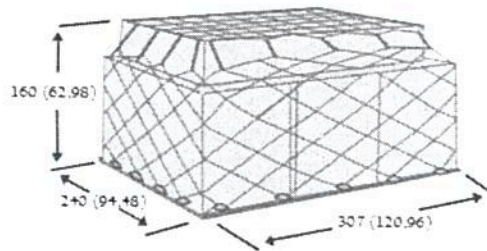
*AKE /AVE* konteynırlar *A310, A340 ve A330*, *AKH* konteynır ise *A320 ve A321* uçaklarında kullanılmaktadır.

*PMC/PAG/PLA* paletler *A310, A340 ve A330*, *PKC* palet ise *A320 ve A321* uçaklarında kullanılmaktadır.

Aşağıda çalışmada kullanılan *ULD* araçlarına ait resimler bulunmaktadır.

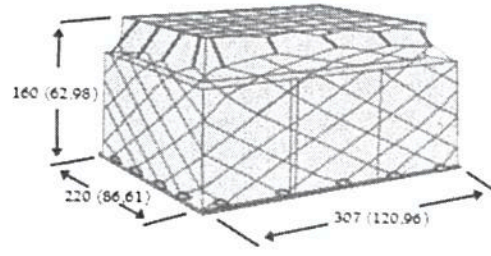


Şekil 2.1 AKE Konteynır

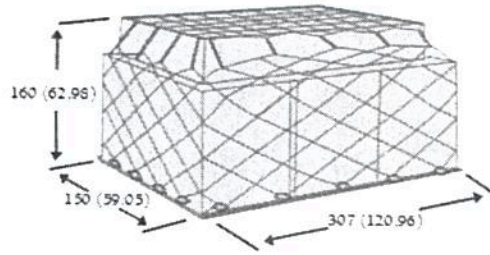


Şekil 2.2 PMC Palet





Şekil 2.3 (PAG Palet)



Şekil 2.4 (PLA Palet)

### 2.3. Uçak Yapısı

Uçak yapısını oluşturan bölümler aşağıdaki gibidir.

- 1- Kanat
- 2- Motor
- 3- İniş takımları
- 4- Kuyruk
- 5- Gövde



**Kanat:** Uçağın yakıt deposu özelliğine sahip olmakla beraber, uçağı yerden kaldırıp havada tutan kaldırma kuvvetini yaratırlar. Kanat çeşitli biçim ve büyüklükte olabilir. Kanadı küçük olan uçakların kaldırma gücü daha az, kanadı büyük olan uçakların kaldırma gücü daha fazladır.

Üzerlerinde uçağın sağa- sola yatmasını, fren görevi ve kanat yüzeyinin genişlemesini sağlayan kumanda yüzeyleri bulunmaktadır.

**Motor:** Bütün hava araçlarının havada ileri doğru yol almalarını sağlayacak bir ya da daha fazla sayıda motora ihtiyaç duyarlar. Motorların asıl görevi hava akımını kanatların üzerinden kaldırma kuvveti sağlayacak belirli bir hıza ulaştırmaktır.

**İniş Takımları:** Yerde iken uçağın tüm ağırlığını taşıyan ve hareket etmesini sağlayan tekerleklerden oluşan mekanik yapıdır.

**Kuyruk:** Uçağın ana uçuş kumandalarının bulunduğu kısımdır, bazı uçaklarda yakıt deposu olarak kullanılır.

**Gövde:** Kanatları ve kuyruk yüzeylerini bir araya getiren yapıdır. Gövde uçağın büyüklüğü ve kapasitesine göre en az sürükleme kuvveti verecek şekilde, hava akışına uygun bir aerodinamik şekle sahip olmalıdır. Aynı zamanda içinde taşıyacağı yük yolcu ve çeşitli cihazlar dışında kendine bağlanan kanat, kuyruk, iniş takımları ve motorları taşıyabilecek güçte ve sağlamlıkta olmalıdır.

Gövde iki bölümden oluşur:

- 1- Maindeck
- 2- Lowerdeck

**Maindeck:** Uçak gövdesinde yolcuların seyahat ettiği bölümdür. Seyahat eden yolcuların ücret ve servis sınıflarına göre ayrılmış toplam koltuk kapasitesini gösterir.

**Lowerdeck:** Uçak gövdesinde kuru yükün taşındığı bölümdür. Kargo taşımada kullanılan esas alan burasıdır.



Lowerdeck içerisinde bulunan yükleme bölümleri 4 türdür. Bunlar:

**Hold:** Ön (FWD), arka (AFT/REAR) olmak üzere ikiye ayrılır.

**Kompartıman:** *Hold* içinde ağırlarla ayrılmış yükleme alanıdır, her uçak içerisinde farklı sayıdadır.

**Section:** Yığma yükleme yapılan kompartımanlar içerisinde, kompartıman ağırları ile ayrılan yükleme bölümleridir.

**Position/Bay:** *ULD* yükleme yapılan uçaklarda *ULDlerin* (konteynır/palet) yüklenebileceği bölümlere denir.

#### 2.4. Hava Aracı Ağırlık Ve Denge Problemi

Hava aracı ağırlık ve denge problemi (AWBP), havacılık dünyasında karşılaşılan içerisinde birden fazla olasılığı barındıran bir eniyileme problemidir. Havayolu taşımacılığında, uçağın limitleri dahilinde mümkün olduğunca fazla kargo yüklenmesi yapılması temel amaçlardan biridir.

Ticari havayolu taşımacılığında kullanılan hava araçlarının toplam ağırlığı, hava aracının ağırlığı, trafik yükü ve yakıt ağırlığından oluşmaktadır. Trafik yükünün bileşenleri de, yolcu + bagaj+kargo+posta+ diğer yükler diye açıklanabilir.

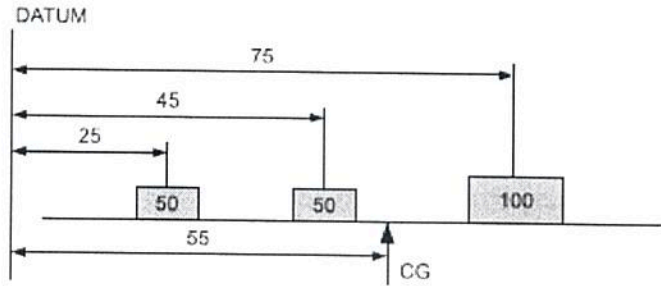
Uçuş verimliliğini ve emniyetini etkileyen en önemli faktörlerden birisi uçağın dengesidir. Bir uçağın emniyetli bir şekilde uçabilmesi için, uçağın yük limitlerinin ve *CG* (Centre of Gravity) değerinin uçak imalatçısının, uçağın yapısal şartlarına göre belirlemiş olduğu, aralıkta olması gerekmektedir. *CG* konumu uçağın yük dağılımına göre değişmektedir.

$W_i$ : *i*. Yükün ağırlığı

$F_i$ : *i*. Yükün uyguladığı yer çekimi kuvveti olmak üzere örnek bir *CG* hesabı şöyledir:

$$CG = \frac{\sum_i M_i}{\sum_i F_i} = \frac{\sum_i W_i g * r_i}{\sum_i W_i g} = \frac{\sum_i W_i * r_i}{\sum_i W_i}$$

$$CG = 55 = \frac{25 * 50 + 45 * 50 + 75 * 100}{50 + 50 + 100}$$



Şekil 2.5 Datum çizgisi

Hesapta önemli olan yükün ağırlığın merkezine olan mesafesi ve ağırlığıdır.

Diğer önemli bir konuda bazı yüklerin, ulusal, uluslararası kurallar ya da havayolu şirketlerinin kendi iç prosedürleri gereği, ayrılması zorunluluğudur. Örnek olarak, zehirli gazlar ya da radyoaktif maddeler gıda maddeleriyle, aynı kompartımanlara yüklenemez, ekonomi bagajlar ile *business* bagajlar karışık yüklenemez. Bunun gibi kısıtlar da problemin karmaşıklığını artırmaktadır.

Hava aracının ideal *CG* değerinde uçuşması yakıt tüketimini minimum düzeyde tutmaktadır. Böylelikle hava yolu şirketlerinde maliyetleri düşmekte ve çevreye vermiş oldukları zarar en az seviyeye indirilebilmektedir. Bir Airbus A340-300 uçağı eğer *CG* konumu 75 cm den küçük olursa 10.000 km'de 4000 kg yakıt tasarrufu yapabilmektedir (Mongeau ve Be' s (2003)).

Bugün, kargo ve yolcu taşımacılığı yapan ticari hava yolu firmalarında, uçakların yükleme planları bu konuda uzmanlaşmış personeller tarafından kağıt üzerinde veya bilgisayar destekli eniyileme içermeyen yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Bu da yükleme hatalarına ve ideal *CG* değerinden sapmalara yol açmaktadır.

Bu konuda önemli çalışmalar yapmış olan Verstichel vd.ne (2011) göre, hava araçlarında emniyetle ilgili çok fazla kısıt bulunmaktadır, uçağın ön tarafına çok fazla yükleme yapıldığında, bu durum uçağın kalkışına engel olabilir. Diğer taraftan arka tarafına fazla yükleme yapıldığında uçağın kuyruğu yere vurabilir. Başka emniyet kısıtları da uçağın yapısında olağandışı gerilmelere neden olacak durumlardan kaçınılmasını sağlar. Eğer hava araçları doğru yüklenmezse, uçuş karakteristiğinde değişikliğe sebep olur, bu da en kötü senaryo olan kazaya sebep olur (Awbh, 2007).

Uçağın aşırı yüklenmesi (over load) ya da çok az yükleme yapılmasına ilave olarak, yük dağılımının yapılması da önemli bir konudur. Ağırlık ve denge hesabı yapılırken, hayali bir nokta olan ağırlık merkezine, burun kısmındaki eksi (-) moment etkisi ile kuyruk kısmındaki artı (+) moment etkisi aynı eşit öneme sahiptir. (FAA,2016)

Uçağın tasarım esnasında yan simetriye de dikkat edilir. Uçağın merkez hattının sağında ve solunda eşit ağırlıklar bulunur. Uçağın sağ sol dengesi, dengesiz yakıt yüklenmesinden ya da dengesiz yakıt tüketiminden dolayı bozulabilir. Yan *CG* normal şartlarda hesaplanmaz ancak pilot yan denge konusunda dikkatli olmalıdır. Bu durum kanatlardaki ağır tarafta bulunan yakıt kullanılarak düzeltililebilir.

Emniyet kısıtlarının yanı sıra, uçağın dengeli bir şekilde yüklenmemesi yakıt tüketimini de olumsuz etkilemektedir. Emniyetli sahada olsa bile uçağın ağırlık merkezinin ideal ağırlık merkezi aralığından farklı olması yakıt tüketimini artırmaktadır. Optimal ağırlık merkezinde uçuş yapmak hava yolu firmalarının ekonomik kazançlarını artırmakta, buna paralel olarak karbon salınımını da azaltarak, çevreye vermiş oldukları zararı en alt seviyede tutmaktadır.

## 2.5. Hava Aracına Etki Eden Kuvvetler

Kuvvet belirli bir yöndeki itme ya da çekme etkisi olarak tanımlanabilir. Kuvvetin bir vektör büyüklüğü vardır, bu nedenle kuvvet büyüklük ve şiddete sahiptir. Kuvvet tanımlanırken şiddetinin ve yönünün belirtilmesi gerekir.



Hava aracına etki eden kuvvetler,

- 1- Ağırlık (Weight)
- 2- Kaldırma kuvveti (Lift)
- 3- Geri sürüklenme kuvveti (Drag)
- 4- İtme kuvveti (Thrust)

### 2.5.1. Ağırlık

Yönü yer merkezine doğru olan kuvvettir. Şiddeti ise, uçağın tüm parçalarının kütlesi, yakıt ve kuru yük (yolcu, kargo, bagaj vb.)'e bağlıdır. Ağırlık uçağın gövdesi boyunca dağılır ancak biz ağırlığı, bir noktada toplanan ve bir noktadan etki eden ağırlık merkezi olarak düşünürüz. Uçuşta bir uçak ağırlık merkezi etrafında döner.

Uçuş iki ana probleme neden olur. Bunlar, nesneye ters yönde etki eden ağırlıkla mücadele diğeri ise nesnenin uçuşta kontrol altında tutulmasıdır. Bu iki problemde nesnenin ağırlığı ve ağırlık merkezinin konumuyla ilgilidir. Uçuş esnasında uçağın ağırlığı, yakıt tüketiminden dolayı sabit bir biçimde değişir. Ağırlık dağılımı değişeceği için, ağırlık merkezi de değişir. Bu değişikliklerden dolayı pilot sabit bir şekilde, uçağı dengede ve düzgün tutmak için gerekli kontrolleri ayarlamalıdır.

### 2.5.2. Kaldırma kuvveti

Ağırlık kuvvetini yenebilmek adına, uçak kaldırma kuvveti denilen ters yönde bir kuvvet üretir. Kaldırma kuvveti uçağın hava içerisindeki hareketinden üretilir ve aerodinamik bir kuvvettir. Bu kuvvet uçuş yönünü dikey kesen bir kuvvettir. Kaldırma kuvvetinin şiddeti çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler uçağın şekli, boyutu ve hızıdır. Ağırlık gibi, uçağın her parçası da kaldırma kuvvetine katkıda bulunur. Bu kuvvetin çoğu kanat tarafından sağlanır. Uçağın kaldırma kuvveti, basınç merkezi denilen tek bir noktadan etki eder. Basınç merkezi de ağırlık merkezi gibi tanımlanır ancak ağırlık dağılımı yerine gövde etrafındaki basınç dağılımı kullanılır.

Kontrol problemlerini çözebilmek adına, uçağın etrafındaki kaldırma kuvveti dağılımı önemlidir. Aerodinamik yüzeyler, uçağın rotada tutulması için kullanılır.

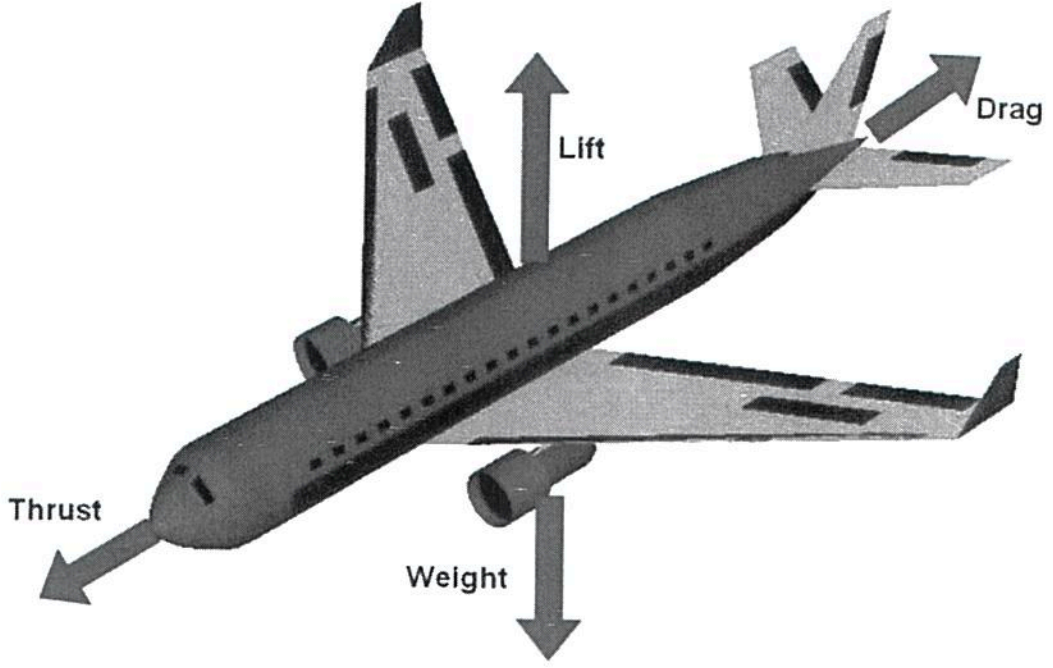
### 2.5.3. Geri sürüklenme kuvveti

Uçak hava içerisinde ilerlediğinde, başka bir aerodinamik kuvvet ortaya çıkar. Hava uçağa direnç gösterir ve bu direnç kuvvetine geri sürüklenme kuvveti denir. Geri sürüklenme kuvveti uçuş yönünün tersine etki eder. Kaldırma kuvveti gibi, geri sürüklenme kuvvetinin şiddeti de uçağın şekli, havanın kalınlığı ve uçağın hızı gibi birçok faktöre bağlıdır. Yine kaldırma kuvveti gibi geri sürüklenme kuvvetinin de şiddetini oluşturan kendine özgü birçok bileşeni vardır. Bu kuvvet de uçağın basınç merkezinden etki eder.

### 2.5.4. İtme Kuvveti

Geri sürüklenme kuvvetini yenebilmek adına, uçağın itme sistemleri, itme kuvveti denenen kuvveti meydana getirir. İtme kuvvetinin yönü, motorun uçağa nasıl monte edildiğine bağlıdır. Aşağıdaki şekil 1.2 uçağın kanat altına yerleştirilmiş, gövdeye paralel, itme kuvvetinin gövde merkez hattı boyunca etki ettiği iki türbinli motorları göstermektedir. İtme kuvvetinin şiddeti, motor tipi, motor sayısı, subap ayarı gibi itme sistemini oluşturan bileşenlerle ilgilidir. Jet motorlarında, itme kuvveti arkadan çıkan sıcak gazın tepkisinden oluşur. Sıcak gaz arkadan çıkar ve öne doğru itme kuvveti oluşur. Bu Newton'nun etki tepki kanunu olarak açıklanır.

Uçağın hava içerisindeki hareketi, Şekil 2.6'da gösterilen kuvvetlerin şiddet ve yönüne bağlıdır. Eğer bu kuvvetler dengede ise uçak sabit hızda hareket eder, değilse en büyük olan kuvvetin yönünde ivmelenir.



Şekil 2.6 Uçağa etki eden kuvvetler

## 2.6. Yüksek İrtifanın ve Ağırlık Merkezinin Ticari Hava Araçlarına Etkileri

Ağırlık merkezi ve yüksek irtifa ticari hava araçlarının boylamsal kararlılığını ve dengesini önemli bir ölçüde etkilemektedir. Çeşitli CG değerlerinde ve irtifada kullanım karakteristiklerini anlamak adına, oto pilotsuz uçuş esnasında, uçuş ekibine daha uygun kontrol girdisi sağlar.

Modern ticari uçaklarda, daha hızlı, sessiz ve konforlu olmalarına ilaveten, aero dinamik olarak da çok daha verimlidir. Boeing'in uçakları, yük sek hızlı sürüklenme kuvvetini azaltmak için kanat şeklini kullanmaktadır. Uçaklar arka CG aralığında uçarsa, kuyruğa binen yük en aza iner, bu da hücum açısını ve sürüklenme kuvvetini düşürür (Boeing, 2018).

Bilgisayar sistemlerinin uçakların uçuş kontrol sistemlerinin tasarımına girişiyle birlikte, aerodinamik bazı gelişmeler mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmelerin uçakların kararlılığını etkilemesiyle birlikte, yine de uçuş ekiplerinin, uçtukları uçakların, uçuş

karakteristiklerini ve performansını etkileyen *CG* ve irtifa konusunda dikkatli olması gerekmektedir.

## 2.7. Tanımlamalar ve Gösterimler

Kargo yükleme planının belirlenmesinde bilinmesi gereken bazı önemli kavramlar şöyle verilebilir:

**Temel Operasyon Ağırlığı (BOW):** Uçağın yapımcısı tarafından belirlenip uçuş el kitaplarına geçirilmiş bir ağırlıktır. Ağırlık-Denge hesaplamalarında başlangıç noktasıdır. Bu ağırlığın içinde uçağın döşemeleri, kullanılmayan yağ, yakıt, hidrolik ve tuvalet suları, ikram araç gereçleri ve acil durum gereçleri bulunur.

**Kuru Operasyon Ağırlığı (DOW):** Temel İşletme değerine işletme ağırlıkları (mürettebat, ikramlar, vb.) ilave edilerek bulunur. Uçuşun niteliğine göre değişir.

**Kuru Operasyon İndeksi (DOI):** Uçağın kuru operasyon ağırlığındaki indeks değerini ifade eder.

**Operasyon Ağırlığı (OW):** Kuru İşletme Ağırlığı'na kalkış yakıtının dahil edilmesi ile bulunur.

**Azami Yakıtsız Ağırlık (MZFW):** Uçağın yapımcısı tarafından belirlenmiş, uçak yakıtsızken yüklenebilecek azami yük ve yolcu ağırlığını ifade eder. Uçak kanatlarının taşıyabileceği yapısal yükü doğru orantılıdır.

**Azami Kalkış Ağırlığı (MTOW):** Uçağın kalkış yapabileceği yapımcı tarafından belirlenmiş azami ağırlık limitidir.

**Azami İniş Ağırlığı (MLW):** Uçağın iniş yapabileceği yapımcı tarafından belirlenmiş azami iniş ağırlığıdır.

**Trafik Yüğü:** Ticari sebeple uçakta taşınan tüm yüklerdir (yolcu, bagaj, kargo).



**Datum Çizgisi:** Ağırlık-Denge hesaplamaları için uçak yapımcısı tarafından belirlenen, genel olarak uçağın burnuna teğet veya bir miktar önünde bulunan matematiksel, hayali bir başlangıç hattıdır.

**MAC:** Uçak *CG*'sinin ifade edilmesini sağlamak üzere, uçak imalatçı firması tarafından tanımlanan, uzunluğu ve *datum* çizgisinden mesafesi sabit olan referans mesafedir. Kanat üzerine yayılmış yüzdelik gösterge çizelgesi ile gösterilir.

**MACTOW:** Kalkış *CG*'sinin *MAC* cinsinden ifade edilmesidir.

**MACZFW:** Yakıtsız *CG*'nin *MAC* cinsinden ifade edilmesidir.

**MACLW:** İniş *CG*'sinin *MAC* cinsinden ifade edilmesidir.

**CG:** Uçağın ağırlık merkezi

**İndeks:** Ağırlık-Denge hesaplarını kolaylaştırmak üzere, *datum* Çizgisi temel alınarak hesaplanan momentleri ifade etmek için kullanılan birimdir.

**Stab Trim:** *CG* hesaplandıktan sonra, bunun uçağın yunuslamasına etkisini ortadan kaldırmak üzere kuyruktaki yatay *stabilazörden* yapılan ayar.

**Trim Tank:** Havada uçağın dengesini sağlamak üzere, yakıtın otomatik olarak transfer olduğu yedek yakıt tankı.

## 2.8. Ağırlık-Denge Zarfı

Her uçak için yapımcısı tarafından uçağın yapısal özelliklerini, yükleme ve uçuş sınırlarını tanımlamak üzere bir grafik oluşturulur. Bu zarf kritik ağırlık ve *CG* değerlerini barındırır ve ağırlık-denge zarfı olarak adlandırılır. Hem yükleme, hem de uçuş bakımından ağırlık-denge zarfının iyi analiz edilmesi çok önemlidir. Zarf üzerinde amaçlanan noktanın iyi tespiti, çözümün de doğru olmasını sağlar (Daçe, 2007).

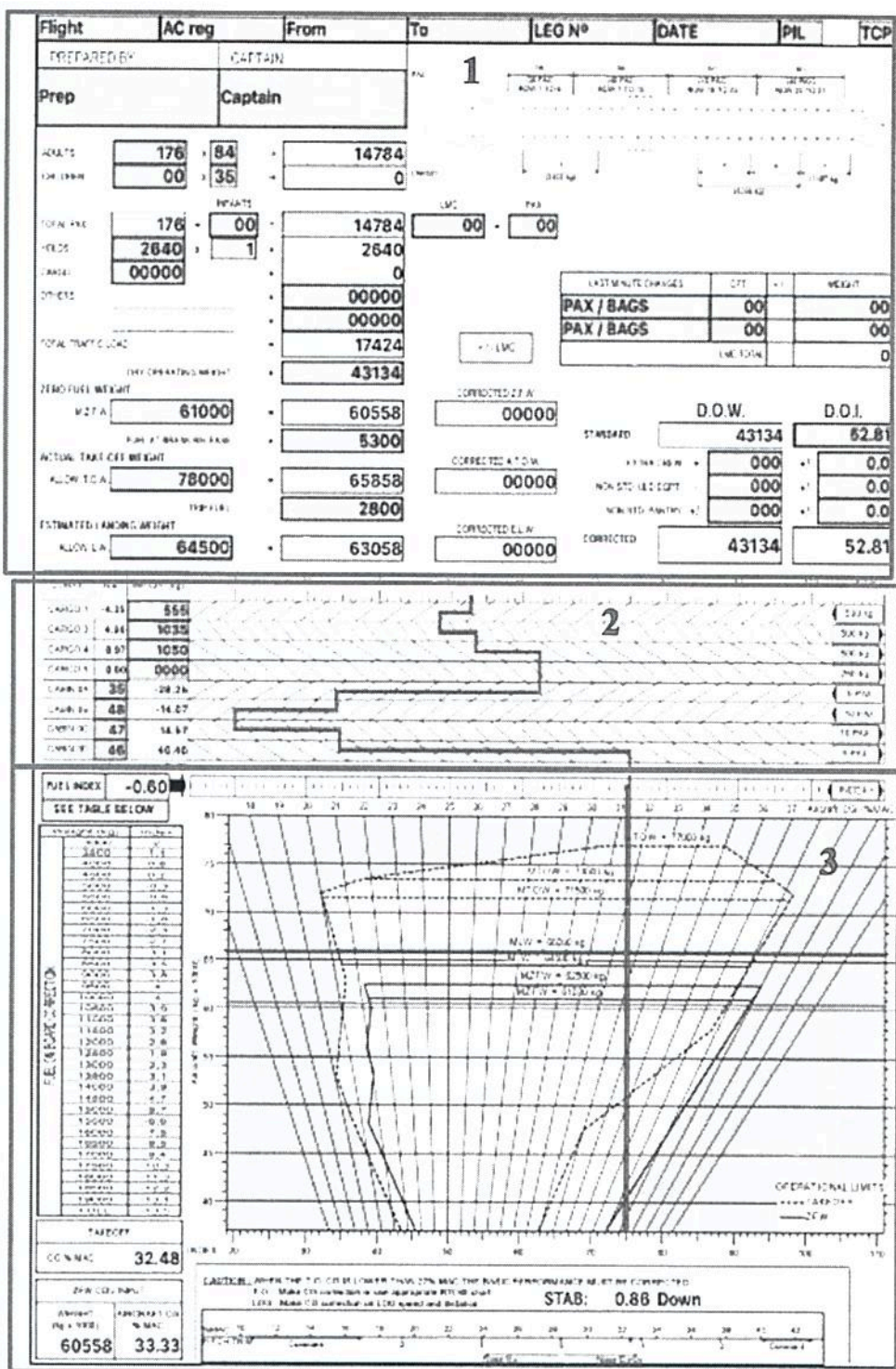


Ağırlık–denge zarfında (Bkz. Şekil 2.3), 1 numaralı alan, uçuşla ilgili genel bilgilerin, hazırlayan kişinin bilgilerinin ve uçağın ağırlık limitlerinin bulunduğu alandır. Bu alanda yolcu, kargo, posta vb. bilgilerin girildiği alanlar bulunmaktadır. Ayrıca burada çeşitli matematiksel işlemlerde yapıldığı alandır.

Şekil 2.7’de 2 numaralı alan ise, uçağın kabin kısmına yolcu yerleşiminin, dağılımın yapıldığı ve kompartıman bölümlerine ise kargo, bagaj vb. yüklerin dağılımın yapıldığı kısımdır. Burada dağıtılan yük ve yolcuya göre el yordamı ile trimleme denilen, uçağın indeks değerindeki değişimlerin gösterildiği alandır.

Şekil 2.7’de 3 numaralı bölümde görüldüğü üzere ağırlık limitleri dikey eksendeki kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

Uçağın *CG* değeri ise *MAC* cinsinden yatay eksende görülmektedir Zarf incelendiğinde kalkış zarfının *CG* bakımından daha kısıtlayıcı olduğu görülecektir. Dolayısı ile uçuş başlangıcında yapılan yüklemenin düzgün olması önem kazanmaktadır. Sayısal olarak tespit yapıldığında *CG*’nin tam merkezde olması için *MAC* değeri 28 civarında ve buna karşılık gelen indeks değeri 60 civarında bir değer olmalıdır.



Şekil 2.7 Ağırlık ve denge zarfı

## 2.9. Ağırlık ve Denge Teorisi

Bir hava aracının ağırlık ve dengesi için iki önemli unsur bulunmaktadır.

- Uçağın toplam ağırlığı uçağın tasarımında izin verilen en büyük ağırlığını aşmamalıdır.
- Uçağın ağırlık merkezi, uçağın operasyonel ağırlığı için, izin verilen aralıkta olmalıdır.

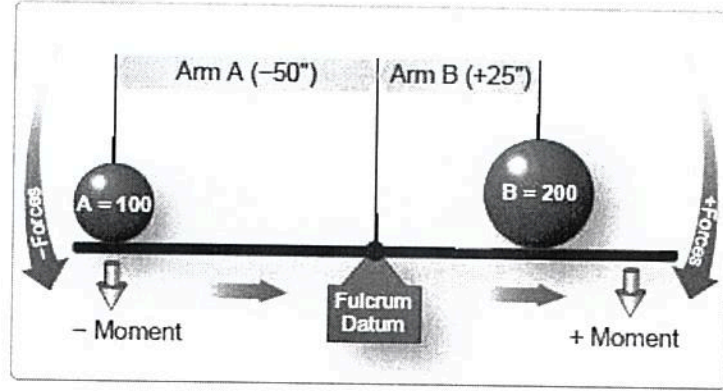
### 2.9.1. Kuvvet Kolu

Bir nesnenin ya da parçanın ağırlık merkezinden, bütün ölçümlerin alındığı bir referans düzleme olan uzaklık olarak tanımlanabilir, metre ve ya inç olarak ölçüm yapılır. Referans noktasının sol tarafındaki kuvvetler negatif, sağ tarafındakiler ise pozitif olarak yer alır. Referans düzlem, denge kapsamında bütün yatay mesafelerin ölçüldüğü hayali dikey bir düzlemdir. Referans düzlem, uçak imalatçısına ve uçak tasarımına göre değişiklik gösterir.

Eğer bu düzlem, kaldıracın sağında olursa, bütün kol pozitif değer alır ve hesaplama hataları da en aza indirilmiş olur. Uçaklar içinde referans düzlem, uçağın burnunda olduğu zaman bütün kol pozitif değer alır, bu şekilde hesap hataları en düşük seviyede tutulmuş olur.

### 2.9.2. Moment

Kol ile ağırlığın çarpılması sonucu elde edilen ve döndürme etkisi oluşturan bir kuvvettir. Pozitif ya da negatif değer alabilir.



Şekil 2.8 Moment

### 2.9.3. Kaldıraç Kanunu

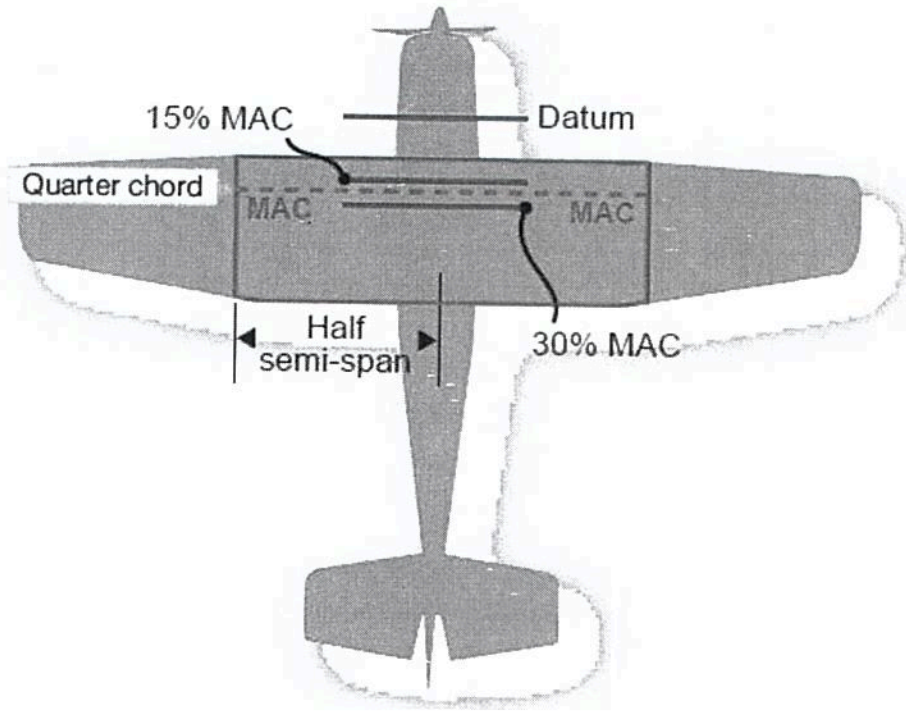
Hava aracı ağırlık ve denge problemleri, fizikteki kaldıraç kanununa dayanır. Mesnet noktasına göre sağdaki yüklerin momenti ile soldaki yüklerin momenti eşit olursa, bir kaldıraç dengededir. Bir uçakta ise denge noktası ağırlık merkezi ( $CG$ ) olarak isimlendirilir.

### 2.10. Ortalama Aerodinamik Kordo Hattı (MAC)

$CG$  noktası uçağın kararlılığını etkiler. Uçağın emniyetli bir şekilde uçuşmasını güvence altına almak amacıyla,  $CG$ 'nin imalatçı tarafından verilen limitlerin arasında olması gerekir.

Bazı uçaklarda  $CG$ , ortalama aerodinamik kordo hattının (Mean Aerodynamic Chord) yüzdesi ile ifade edilir. İlgili görsel Şekil 3' de görülmektedir ve aşağıda örnek bir %  $MAC$  hesabı verilmektedir.

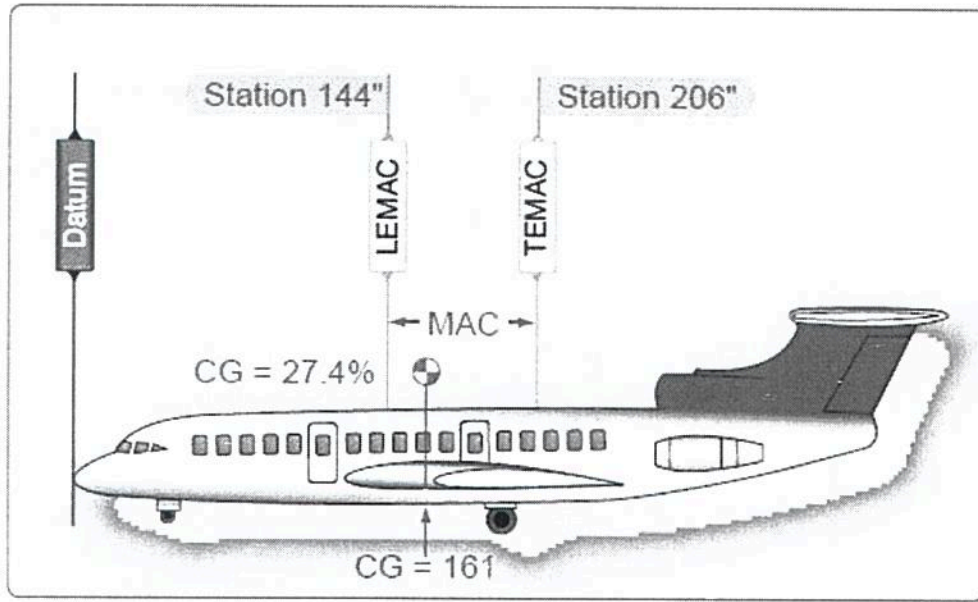




Şekil 2.9 Ortalama aerodinamik kordo hattı

$$\%MAC = \frac{(161 - 144) * 100}{(206 - 144)} = 27,4$$

Aşağıda verilen Şekil 2.10' da ve yukarıdaki formülden de görüldüğü üzere % *MAC* hesabı, *CG* değerinin *MAC* başlangıç noktasına olan uzaklığının, *MAC* başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki mesafeye oranıdır.



Şekil 2.10 MAC

### 2.11. Yük Ayrımı

Hava yolu otorite kuruluşlarının (FAA, EASA, ICAO, IATA, SHGM vb.) kuralları gereği ya da hava yolu firmasının kendi iç prosedürlerinden kaynaklı olarak bazı yüklerin ayrı yüklenmesi ya da aralarında belirtilen mesafelerin bırakılması gerekebilir. Örnek olarak, kuru buz (ICE) ile damızlık yumurta (HEG) arasında bir ULD boşluk bırakılmalıdır. Tehlikeli Maddeler El Kitabı (Dangerous Goods Regulations) bir havacılık otoritesi olan IATA tarafından belirli dönemlerde, üye tüm havayollarının ve ilgili otoritelerin görüşleri alınarak revizyonlar halinde yayınlanmaktadır. Çizelge 2.1'de IATA'nın bu düzenlemesine göre, problemin modellenme kolaylığı dikkate alınarak tekrar düzenlenmiştir.

Çizelge 2.1. Yük ayrım tablosu

DGR KODU	R C L	R F L	R S C	R F W	R O X	R O P	R P G	R P B	R I S	R R Y	R C M	I C E	F I L	H U M	H E G	A V I	E A T	P E M	P E P	P E S	P E F	L H O
RCL															1	1						
RFL					2																	
RSC					2																	
RFW										2												
ROX		2	2																			
ROP																						
RPG																2	2	2	2	2		
RPB																2	2	2	2	2		
RIS																2	2	2	2	2		
RRY									2				2		2	2						2
RCM				2																		
ICE														1	1							
FIL									2													
HUM																1	2	2	2	2		2
HEG	1								2			1										
AVI	1						2	2	2	2		1		1		2	2	2	2	2		
EAT							2	2	2					2		2						
PEM							2	2	2					2		2						
PEP							2	2	2					2		2						1
PES							2	2	2					2		2						
PEF																				1		
LHO									2					2								

Çizelge 2.1’de 1 ifadesi ürünlerin aynı hold’a yüklenemeyeceğini 2 ifadesi ise ürünlerin aynı kompartımana yüklenemeyeceğini göstermektedir.

## 2.12. Uçak Yüklemede Mevcut Durum

Günümüzde birçok ticari hava yolu firmasında uçakların yüklenmesine yönelik, *load master* ya da *harekât memuru* olarak isimlendirilen kişiler vasıtasıyla uçakların yük planlaması yapılmaktadır. İlgili kişiler yükleme planlarını el yordamıyla kağıt üzerinde ya da eniyileme özelliği içermeyen bilgisayar programları vasıtasıyla gerçekleştirmektedir. Bu da uçuş emniyetinin ve konforunun daha çok önemli olduğu ticari hava yolu yolcu

taşımacılığında hata olasılığını artırmaktadır. Uçuş emniyetinin yansıra uçağın ağırlık merkezinin konumu, uçağın harcadığı yakıt miktarını da önemli ölçüde etkilemektedir.

Uçağın fazla ya da yanlış yüklenmesi durumunda aşağıdaki durumlar ortaya çıkabilir.

- Uçak kalkış esnasında daha büyük hıza ihtiyaç duyar, bu da uzun kalkış mesafesine neden olabilir.
- Tırmanma oranı ve açışı düşer
- Uçağın çıkabileceği yükseklik düşer
- Seyir hızı düşer
- Seyir aralığı kısalmır
- Manevra yeteneği azalır
- İniş hızı yüksek olacağından, iniş mesafesi uzun olur
- Fazla yük özellikle iniş takımlarına yapısal hasar verebilir,

### **2.13. Hava Aracı Ağırlık ve Denge Problemi Literatür Araştırması**

Uçakların yüklenme problemi hava aracı ağırlık ve denge problemi içerisinde yer almaktadır. Literatürde ilgili problem kombinatoriyel en iyileme modeli olarak adlandırılmaktadır. Akademik düzeyde problemin çözümüne yönelik sezgisel yöntemler olsa da, genellikle karma tam sayılı modeller geliştirilmiştir.

Hava Aracı Ağırlık ve Denge Problemi üzerine yapılmış çalışmalar Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu çalışmalar ticari kargo ve askeri kargo uçaklarının yüklenmesine yönelik yapılmış çalışmalardır.



Çizelge 2.2 Geçmiş çalışmalar

Sıra	Yazarlar	Konu	Yöntem
1	Tian vd. (2009)	Air Cargo Load Planning System: a Rule-based Optimization Approach	Kural tabanlı
2	Yang vd. (2016)	Aircraft Centre-of-Gravity Estimation using Gaussian Process Regression Models	Regresyon modeli
3	Roesener ve Barnes (2016)	An advanced tabu search approach to the dynamic airlift loading problem	Tabu search
4	Nance vd. (2011)	An advanced tabu search for solving the mixed payload airlift loading problem	Tabu search
5	Vancroonenburg vd. (2014)	Automatic air cargo selection and weight balancing: A mixed integer programming approach	Karma tam sayılı model
6	Limbourg vd. (2012)	Automatic aircraft cargo load planning	Karma tam sayılı model
7	Kaluzny ve Shaw (2009)	Optimal aircraft load balancing	Karma tam sayılı doğrusal model
8	Mongeau ve Bes (2003)	Optimization of Aircraft Container Loading	Karma tam sayılı doğrusal model
9	Lurkin ve Schyns (2015)	The Airline Container Loading Problem with pickup and delivery	Karma tam sayılı doğrusal model
10	Chan vd. (2005)	Development of a decision support system for air-cargo pallets loading problem: A case study	Doğrusal Modelleme + Sezgisel
11	Daçe (2007)	Uçak Yükleme Optimizasyonu	Sezgisel
12	Verstichel vd. (2011)	A mixed integer programming approach to the aircraft weight and balance problem	Karma tamsayı model

Tian vd. (2009), 1) operasyonel verimliliği artırmayı, 2) trim indeksini optimize etmeyi 3) uçağın doluluğunu artırmayı amaçlayan kural tabanlı, kargo uçaklarının yüklenmesi için bir algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntem kuzey Amerika'daki bir havayolu firması tarafından da kullanılmaya başlanmıştır.

Yang vd. (2016), Gaussian ( $y = f(\mathbf{x}) + \epsilon$ ) regresyon modelini kullanarak uçağın ağırlık merkezinin tahminine yönelik bir çalışma yapmışlardır, çalışmanın iki önemli aşaması bulunmaktadır. Birincisi yakıt tanklarının ağırlık merkezinin tahmin edilmesi, ikincisi ağırlık merkezi denklemini kullanarak uçağın ağırlık merkezinin hesaplanmasıdır. Sayısal bir örnekler sonucunda da, küçük bir hata oranıyla uçağa ait ağırlık merkezini tahmin etmişlerdir.

Roesener ve Barnes (2016) dinamik hava aracı yükleme problemi için, bir yasaklı arama yöntemi geliştirmişlerdir. İlgili yöntem askeri kargo uçakları için uygulanmıştır. Kullandıkları yöntem paletlenmiş kargo kümesinden uygun kargoların seçilmesini ve bu kargoların, verimlilik ve etkinliği göz önüne alarak, uygun uçak alt kümelerine atanmasını sağlamaktadır. Algoritmanın uygulaması ise Birleşik Devletler ordusuna ait ulaştırma birliğinde yapılmıştır.

Nance vd. (2011), askeri kargo uçakları için karma kuru yüklerin (paletlenmiş yükler ve tekerli askeri araçlar vb) *C5* ve *C17* askeri kargo uçaklarına yüklenmesine yönelik, bir yasaklı arama yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada uçağın CG konumu güvenli alanda bir kısıt olarak modele eklenmiş modelin amaç fonksiyonu ise uçağın doluluk oranını artırarak, kullanılan uçak sayısını en azda tutmak üzerine kurmuşlardır. Kullandıkları yöntemin Amerikan hava kuvvetlerinde, bu iş için kullanılan mevcut yazılımdan daha kısa sürede, aynı sayıda ya da daha az uçak ile aynı problemi çözebildiğini savunmuşlardır.

Vancroonenburg vd. (2014), hava aracı ağırlık ve denge problemi üzerine, bir karma tam sayılı model önermişlerdir. Modelin iki amacı bulunmaktadır, birinci amaç, verilen bir kargo kümesi içerisinde en kazançlı olanların seçilerek uçağa yüklenmesi, ikinci amaç ise uçağın CG değerinden sapmanın en aza indirilmesidir. Yaptıkları uygulamada,

her iki amaçta da, işlemi elle yapan uzmanlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini ve daha hızlı işlem yaptıklarını savunmuşlardır.

Limbourg vd. (2012), kargo uçaklarının yüklenmesi için karma tam sayılı bir model geliştirmişlerdir, modelin amaç fonksiyonu uçağın atalet momentinin eniyilemektir. *CG* ise modele kısıt olarak eklenmiştir. İlgili modeli *CPLEX* çözücüsü tarafından desteklenen bir yazılım haline dönüştürmüşlerdir. Elde edilen veriler kargo uçaklarını yüklemeye uzmanlaşmış kişiler olan load masterların yükleme sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Dahası modelin load master'a çözümü kabul etmesi ya da istediği *ULD*'i kısıtlayarak, çok hızlı şekilde tekrar çözüm elde edebilmesine olanak sağladığını savunmuşlardır.

Kaluzny ve Shaw (2009), Kanada Hava Kuvvetleri için karma tam sayılı matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Problem Kanada Hava Kuvvetlerinin askeri kargo uçakları ile taşımış olduğu, ekipman, personel vb. yüklerin yüklemesine yöneliktir. İlgili problemde amaç fonksiyonu olarak, uçağın *CG* değerinin istenen bir *CG* değerinden sapmasının en iyilenmesi amaçlanmıştır. Model Kanada Savunma Araştırmaları ve Geliştirme birimi tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Modelde ekipmanların yerleştirilmesi esnasında pozisyonlar yerine koordinat düzlemi kullanılmıştır.

Mongeau ve Bes (2003), *A340-300* uçağının yüklenmesi için matematiksel bir model önermişlerdir. Modelde uçağa belirli olan *ULD*'lerin yüklenmesi yerine, yüklenecek *ULD*'leri de modelin belirlediği bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmanın amaç fonksiyonu uygun *CG* aralığında, yüklenebilecek en fazla yükün uçağa yüklenmesidir ( $E_{nb} M(x)$ ). Modelin 6 test problemi ile gerçek çalışma ortamında denenmesi yapılmış ve 10 dk gibi bir sürede çözüme ulaşıldığı belirtilmiştir.

Lurkin ve Schyns (2015), TNT Express hava yollarında kargo uçaklarının yüklenmesi için karma tam sayılı bir model önermişlerdir. Model birden fazla noktaya uçan uçaklar için geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu yakıt ve yer hizmetleri operasyon maliyetlerini en aza indirmektir. Sonuç kısmında modelin *CG* değerleri ile elle yüklemenin karşılaştırılması yapılmıştır, modelin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir, verilen modelde çözüm süresinin uzun olduğu da görülmektedir.



Chan vd. (2005), kargo uçaklarının yüklenmesi için iki fazlı bir karar destek sistemi önermişlerdir. Birinci fazda, kargoların ağırlık ve hacmini temel alan, en küçük maliyetli paletlerin seçilmesine karar veren doğrusal bir model yer almaktadır. İkinci fazda ise bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir, bu fazda birinci fazda karar verilen kargoların en uygun olanlarının yüklenmesi amaçlanmıştır.

Daçe (2007), bu çalışmada kargo uçaklarının yüklenmesindeki insan faktörünün azaltılması, yüklemenin ideal değerlere daha yakın yapılabilmesi ve olası en fazla yüklemenin yapılabilmesi amaçlanmıştır. Buluşsal çözüme dayalı yaklaşımla yükleme algoritması tasarlanmış ve bilgisayar programı haline getirilmiştir. Gerçek örnekler üzerinden program test edilmiş ve oldukça iyi sonuçlar ortaya çıktığı savunulmaktadır.

Verstichel vd. (2011), yaptıkları çalışmada, bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir, bu çalışma ile uçak yüklemesini otomatik hale getirmek istemişlerdir. Modelin iki amacı bulunmaktadır, birincisi taşınacak kargolardan elde edilecek gelirin en büyüklenmesi, ikincisi ise, yatay ve dikey *CG* den sapmaların en aza indirilmesidir. Çalışmalarının sonuçlarını ise, uzman kişilerin yapmış olduğu el ile yapılan yükleme verileriyle karşılaştırmışlardır.



Notasyon:

Kümeler:

$i=\{1,2, \dots, m\}$  yüklenecek kargo uld kümesi

$j=\{1,2, \dots, n\}$  kompartıman kümesi olmak üzere;

Karar Değişkenleri:

$x_{ij}$  :  $i$ . uld,  $j$ . kompartımana atanırsa 1, de 0

$y_j$ :  $j$ . kompartımana yüklenecek toplam bagaj ağırlığı

$f_j$ :  $j$ . kompartımana atanacak bagaj uld'si sayısı

$t_j$ :  $j$ . kompartımana yüklenecek toplam yük miktarı

$t_b$ : bulk bölüme yüklenecek toplam yük miktarı (kargo, posta vb yükler dâhil)

$u$ : uçağın bulk bölümüne yüklenecek bagaj ağırlığı

$m_j$ :  $j$ . kompartımanın moment değeri

$m_b$ : bulk bölümün moment değeri

$\varepsilon$ : İdeal CG değerinden sapma miktarı

Parametreler

$I_b$ : başlangıç indeks değeri (*DOI+ yolcu indeksi*)

$a_i$  :  $i$ . uld'nin alanı

$CA_j$ :  $j$ . Kompartımanın alanı (*A330 tipi uçak için CA=16 m<sup>2</sup>*)

$w_i$ :  $i$ . kargo uld'sinin ağırlığı

$dara_i$ :  $i$ . uld'nin dara ağırlığı

*BY*: Ekonomi tipi yolcuların toplam bagaj ağırlığı

*BC*: Business tipi yolcuların toplam bagaj ağırlığı

*H1*: Ön Hold olarak tabir edilen 1, 2, 3 numaralı kompartımanlara yüklenebilecek toplam yük kapasitesi (A330 tipi uçak için  $H1=22681$  kg)

*H2*: Arka Hold olarak tabir edilen 4 ve 5 numaralı kompartımanlara yüklenebilecek toplam yük kapasitesi (A330 tipi uçak için  $H2=18507$  kg)

*CB*: Bulk bölgesinin taşıma kapasitesi (A330 tipi uçak için  $CB=3468$  kg)

*FL*: Uçağa yüklene sabit yük (Toolkit, ekip bagajı, posta vb.)

$r_j$ :  $j$ . kompartımana ait moment hesabında kullanılacak birim indeks değeri

$r_b$ : bulk bölümün moment hesabında kullanılacak birim indeks değeri

*IM*: Uçağa ait ideal moment değeri (A330 tipi uçak için  $IM=106,8$  kg.m)

$b_{ik}$ :  $i$ . uld ile  $k$ . uld aynı kompartımanda olamıyorsa 1, de 0

Bu tanımlar altında geliştirilen matematiksel model şöyledir:

$$1) \sum_{i=1}^n a_i * x_{ij} + 2.4 * f_j \leq CA_j \quad \forall j$$

$$2) t_j = \sum_{i=1}^n (w_i + d a_i) * x_{ij} + y_j + 90 * f_j \quad \forall j$$

$$3) \sum_{j=1}^5 x_{ij} = 1 \quad \forall i$$

$$4) \sum_{j=1}^5 y_j + u = BY$$

$$5) \frac{y_j}{750} \leq f_j \leq \frac{y_j}{250}$$

$$6) y_2 + y_3 + y_4 = 0$$

$$7) \sum_{j=1}^3 t_j \leq H1$$

$$8) \sum_{j=4}^5 t_j \leq H2$$

$$9) t_b = u + FL + BC$$

$$10) t_b \leq CB$$

$$11) m_j = t_j * r_j \quad \forall j$$

$$12) m_b = t_b * r_b$$

$$13) \varepsilon \leq 10$$

$$14) IM - \varepsilon \leq (\sum_{j=1}^5 m_j) + m_b + I_b \leq IM + \varepsilon$$

15) <Özel yük kısıtları>

$$16) f_j, y_j \geq 0 \text{ ve tamsayı, } t_j, t_b, u \geq 0, x_{ij} \in \{0,1\} \quad m_j, m_b, \varepsilon \text{ serbest}$$

Enk  $z = \varepsilon$

1 numaralı kısıt, her bir kompartıman için ilgili kompartımana yüklenecek toplam uld alanının kompartıman alan değerini aşmamasını garantilemektedir.

2 numaralı kısıt, her bir kompartıman için ilgili kompartımana yüklenecek toplam yük (bagaj+kargo+dara) ağırlığını göstermektedir.

3 numaralı kısıt, yüklenmesi gereken bütün kargo uld'lerinin (palet yada konteynır) uçağa yüklenmesini garanti altına almaktadır.

4 numaralı kısıt, ekonomi tipi yolcuların bütün bagajlarının uçağa yüklenmesini garantilemektedir.

5 numaralı kısıt, bir kompartımana atanabilecek bagaj ULD sayısını sınırlamaktadır.

6 numaralı kısıt, yolculara ait bagajların kapıya daha yakın yüklenmesini garantilemektedir.



7 ve 8 numaralı kısıtlar, ön ve arka hold bölümlerinin yük kapasitelerinin aşılmamasını garantiler.

9 numaralı kısıt, uçağın bulk bölgesine yüklenen yükün toplan ağırlığını vermektedir.

10 numaralı kısıt, uçağın bulk bölgesi taşıma kapasitesinin aşılmamasını garantiler.

11 ve 12 numaralı kısıtlar, kompartımanlara ve bulk bölgesine ait moment değerlerini hesaplamaktadır.

13 numaralı kısıt, ideal CG değerinden sapmanın hesaplanması için kullanılan epsilon ( $\epsilon$ ) değerine ait izin verilen üst limit belirlemektedir.

14 numaralı kısıt uçağa ait toplam momentin değerinin izin verilen aralıkta olmasını garantiler.

15 numaralı kısıt, uçakta yük ayrımı gerektiren yüklerin, tehlikeli maddeler ayrım kurallarına göre yüklenmesini sağlamak amacıyla aşağıdaki gibidir.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^m b_{ik} * x_{ij} \leq 1 \quad \forall j$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 b_{ik} * x_{ij} \leq 1 \quad \text{ön hold}$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{j=4}^5 b_{ik} * x_{ij} \leq 1 \quad \text{arka hold}$$

16 numaralı kısıt, işaret kısıtlarıdır.

Modelin amaç fonksiyonu ise yapılan yüklemeye ait moment değerinin idealden sapmasını en küçüklemektedir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yükleme eniyileme çalışması Airbus A330 ve Boeing 777-ER tipi yolcu uçaklarında yapılmıştır. Bu bölümde önerilen matematiksel model ile mevcut yöntemlerin karşılaştırılması yapılmış olup, sonuçlar değerlendirilmiştir. 10 adet mevcut yöntemlerle yüklenmiş uçaklara ait yükleme planları ile aynı uçakların ve yüklerin önerilen matematiksel model ile tekrar yükleme planları üretilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki Çizelge 4.1'den, Çizelge 4.10'a kadar devam eden çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.1. Test problemi 1 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PAG	7.1	1800	110	1	1	0	0	0	115	-7,5
2	PMC	7.8	800	120	2	2	0	0			
3	PMC	7.8	1200	120	2	3	0	0			
4	PMC	7.8	1300	120	3	4	536	1			
5	AKE	2,4	650	90	4	5	2542	4			
6	PLA	4,9	1250	90	3	bulk	22				
BY	3100		<b>Ib</b>	117							
BC	900		<b>IM</b>	108							

Çizelge 4.2. Test problemi 2 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PAG	7,1	1800	110	5	1	1406	2	0	130	-10
2	PMC	7,8	2000	120	4	2					
3	PMC	7,8	2500	120	4	3					
4	PMC	7,8	2100	120	3	4					
5	AKE	2,4	750	90	2	5	496	1			
6	AKE	2,4	710	90	5	bulk	1848				
7	PLA	4,9	1200	90	2						
BY	3750		$f_b$	102							
BC	750		IM	120							

Çizelge 4.3. Test problemi 3 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PAG	7,1	1500	110	4	1	714	1	0	107	13
2	PMC	7,8	2000	120	5	2					
3	PMC	7,8	2500	120	3	3					
4	PMC	7,8	2100	120	2	4					
5	PAG	7,1	1400	110	2	5	2014	3			
6	AKE	2,4	1000	90	1	bulk	272				
7	PLA	4,9	1300	90	3						
BY	3000		$f_b$	126							
BC	200		IM	120							

Çizelge 4.4. Test problemi 4 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değeri den sapma miktarı
1	PAG	7,1	2110	110	2	1	713	1	0	117,5	2,5
2	PMC	7,8	3145	120	4	2					
3	PMC	7,8	2400	120	2	3					
4	AKE	2,4	1030	90	3	4					
5	AKE	2,4	870	90	1	5	2638	5			
6	PLA	4,9	1200	90	3	bulk	59				
7	AKE	2,4	890	90	4						
BY	3410		$I_b$	124							
BC	850		IM	120							

Çizelge 4.5. Test problemi 5 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değeri den sapma miktarı
1	PAG	7,1	2110	110	4	1	3050	5	0	118	11,2
2	AKE	2,4	436	90	2	2					
3	PLA	4,9	1200	90	2	3					
4	AKE	2,4	890	90	1	4					
						5	3456	6			
						bulk	41				
BY	6547		$I_b$	109							
BC	1400		IM	107							

Çizelge 4.6. Test problemi 6 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PMC	7,8	1400	120	4	1	3743	5	0	108	1,2
2	PMC	7,8	1500	120	5	2					
3	AKE	2,4	465	90	4	3					
4	PLA	4,9	1000	90	2	4					
5	AKE	2,4	1100	90	5	5	1063	2			
						bulk	504				
BY	5310		$I_b$	99,8							
BC	1350		IM	107							

Çizelge 4.7. Test problemi 7 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PAG	7,1	3000	110	4	1	1234	2	0	49	-5,25
2	PMC	7,8	2500	120	2	2					
3	PMC	7,8	2500	120	3	3					
4	AKE	2,4	1000	90	3	4					
5	AKE	2,4	650	90	3	5	5967	8			
6	PLA	4,9	1700	90	3	bulk	2161				
7	AKE	2,4	715	90	2						
BY	9362		$I_b$	47,77							
BC	1400		IM	54,25							



Çizelge 4.8. Test problemi 8 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PAG	7,1	2500	110	3	1	516	1	0	49	-5,25
2	PMC	7,8	4000	120	4	2					
3	PMC	7,8	2100	120	2	3					
4	AKE	2,4	1100	90	2	4					
5	AKE	2,4	900	90	3	5	5478	8			
6	PLA	4,9	970	90	2	bulk	1446				
<b>BY</b>	7440		$I_b$	45,6							
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	54,3							

Çizelge 4.9. Test problemi 9 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerden sapma miktarı
1	PAG	7,1	2000	110	3	1			0,1	49	-5,25
2	PMC	7,8	2500	120	4	2	756	2			
3	AKE	2,4	1100	90	2	3	2510	5			
4	AKE	2,4	1042	90	4	4					
5	PLA	4,9	970	90	3	5	4699	8			
6	AKE	2,4	1200	90	1	bulk					
<b>BY</b>	9612		$I_b$	47,58							
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	54,25							

Çizelge 4.10. Test problemi 10 sonuçları

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara	Atandığı kompartıman (j)	j	Atanan ekonomi bagaj miktarı	Ekonomi bagaj konteynır sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Mevcut durum çözümü	Mevcut durum ideal değerdn sapma miktarı
1	PAG	7,1	2161	110	4	1	3399	5	0,55	100	-6,8
2	PLA	4,9	1200	90	4	2					
3	AKE	2,4	890	90	5	3					
						4					
						5	1305	2			
						bulk	256				
BY	4960		$\frac{1}{b}$	97,62							
BC	1400		IM	106,8							

Önerilen karma tamsayılı model ile uçağa *ULD*'lerin yerleştirilmesi konusunda, ideal *CG* değerinden sıfır (0) sapma ya da sıfıra çok yakın değerler bulunmuştur. Önerilen modelin test problemi sayısının artırılması durumunda da benzer sonuçlar vermesi beklenir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada ticari hava taşımacılığında kullanılan uçaklardaki ağırlık ve denge problemi ele alınmıştır. Literatürde bu problem ile ilgili yapılan çalışmalarda da genellikle karma tam sayılı modeller, kural tabanlı modeller, regresyon modelleri ya da yasaklı arama yöntemleri kullanılarak çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada ise yine karma tam sayılı bir model ortaya konulmuş fakat diğer çalışmalardan farklı olarak, *ULD*'ler pozisyonlara değil, uçak içinde ayrılan belirli kompartımanlara atanmıştır. Diğer bir fark ise, uçağın ambarlarında taşınacak yolcu bagajlarının yükleneceği *ULD* planlamasını da modelin yapmasıdır. Yani bagaj *ULD*'lerinin ağırlığı önceden bilinmemektedir. Bunların kaç adet ve içerisinde ne kadar bagaj bulunduracağına önerilen model karar vermektedir.

Önerilen karma tam sayılı modelin performansını görmek adına gerçek uçuşlardan yararlanılarak test problemleri hazırlanmış, halen kullanılmakta olan yöntemlerle ve en iyileme yöntemi içermeyen bilgisayar programlarından elde edilen çözümler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Önerilen karma tam sayılı model, on adet test problemi ile Lingo yazılımında çözümler araştırılarak test edilmiştir.

Test problemlerinin çözüm sonuçları incelendiğinde, karma tamsayı model ile elde edilen sonuçların, halen kullanılmakta olan yöntemlerle elde edilen çözümlerden çok daha hızlı ve iyi sonuç verdiği görülmüştür. ve *CG* değerinin en iyilenmesi konusunda mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle ticari hava araçlarının yakıt tüketimi azaltılarak ekonomik katkı sağlanabilir, ilave olarak hava yolu taşımacılığı sektörünün karbon salınımını azaltmaya yardımcı olabilir. Test problemlerinde, karma tam sayılı model ile, halen kullanılmakta olan yöntemlere göre uçuşlarda, *CG* değerinde ortalama 30,57 cm iyileşme sağlanmıştır. Her 10000 km uçuşta, *CG* değerinin ideal değere 1 cm yaklaşmasıyla 50 kg yakıt tasarrufu sağladığı düşünülürse, buradan ilgili 10 uçuşta Amerika Birleşik Devletlerine uçaklar toplamda 80000 km uçuş yapmıştır.

$$\text{Toplam yakıt tasarrufu} = 8 \cdot 30,57 \cdot 50 = 12.228 \text{ kg}$$

$$\text{Birim yakıt maliyeti: } 0,645 \text{ \$/kg}$$

$$\text{Toplam maliyet} = 12.228 \cdot 0,645 = 7887,06 \text{ \$}$$

Amerika Birleşik Devletlerine günlük 11 uçuş yapıldığı düşünülürse yıllık yakıt tasarrufunun boyutu çok büyük miktarlara çıkmaktadır.

Geleceğe yönelik çalışmalarda ise, kargoların rezervasyonu aşamasından başlayarak belirli bir kargo kümesinden uçağa yüklenecek kargoların seçimini de içeren bir model geliştirilebilir. Diğer bir çalışma konusu ise, aynı uçakta birden fazla havalimanına gidecek yolcu ve kargonun olduğu çok bacaklı uçuşlar da bu çalışmanın konusu olabilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Tian, C., Zhang, H., Li, F., Liu, T., 2009, Air Cargo Load Planning System: a Rule-based Optimization Approach, IEEE, 454-459.
- Yang, X., Luo, M., Zhang, J., Yang L., 2016, Aircraft Centre-of-Gravity Estimation using Gaussian Process Regression Models, IEEE, 991-995.
- Roesener, A., Barnes, J., 2016, An advanced tabu search approach to the dynamic airlift loading problem, Springer, 1-18.
- Nance, R., Roesener, A., Moore, J., 2011, An advanced tabu search for solving the mixed payload airlift loading problem, Journal of the Operational Research Society, 62, 337-347.
- Vancroonenburg, W., Verstichel, J., Tavernier, C., Berghe, G., 2014, Automatic air cargo selection and weight balancing: A mixed integer programming approach, Transportation Research, 70-83.
- Limbourg, S., Schyns, M., Laporte, G., 2011, Automatic aircraft cargo load planning, Journal of the Operational Research Society, 63, 1271-1283.
- Kaluzny, B., Shaw, R., 2009, Optimal aircraft load balancing, International Transactions In Operational Research, 16, 767-787.
- Mongeau, M., Bes, C., 2003, Optimization of Aircraft Container Loading, IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems, 39,140-150.
- Lurkin, V., Schyns, M., 2015, TheAirline ContainerLoading Problem with pick up and delivery, European Journal of Operational Research, 244, 955-965.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Chan, F., Bhagwat, R., Kumar, N., Tiwari, M., Lam, P., 2006, Development of a decision support system for air-cargo pallets loading problem: A case study, *Expert Systems with Applications*, 31, 472-485.
- Dae, A., 2007, Uçak Yükleme Optimizasyonu, Yüksek Lisans tezi, YT Fen Bilimleri Enstitüsü, 69 s.
- Verstichel, J., Vancroonenburg, W., Souffriau, W., Berghe, G., 2011, A mixed integer programming approach to the aircraft weight and balance problem, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20, 1051-1059.

**EK AÇIKLAMALAR**

Ek Açıklama – A: Matematiksel Modelin Lingo Programında Yazımı

Ek Açıklama – B: Test Problemleri Verileri

## Ek Açıklama – A: Matematiksel Modelin Lingo Programında Yazımı

```

sets:
  uld /1..6/:a,w,dara; !i indisi:
  kom /1..5/:r,t,m,f,y,ca; !j indisi:
  veri /eps,tb,mb,rb,u,by,h1,h2,fl,bc,cb,ib,im/;
  uk(uld,kom):x;
endsets

data:
  a=7.1 7.8 7.8 7.8 2.4 4.9;
  w=1800 800 1200 1300 650 1250;
  dara=110 120 120 120 90 90;
  r=-0.00769 -0.00471 -0.00471 0.00287 0.0053;
  rb=0.00716;
  ca=16;
  by=3100;
  bc=900;
  h1=22681;
  h2=18507;
  cb=3468;
  fl=396;
  ib=117;
  im=107.5;
enddata

min=eps;
  @for(kom(j):@sum(uld(i):a(i)*x(i,j))+2.4*f(j)<ca(j));

  @for(kom(j):t(j)=@sum(uld(i):(w(i)+dara(i))*x(i,j))+y(j)+90*f(j));

  @for(uld(i):@sum(kom(j):x(i,j))=1);

  @sum(kom(j):y(j))+u=BY;

  @for(kom(j):f(j)<y(j)/250);
  @for(kom(j):f(j)>y(j)/750);

  @sum(kom(j)|j#le#3:t(j))<H1;

  @sum(kom(j)|j#ge#4:t(j))<H2;

  tb=u+FL+BC;
  tb<cb;

  @for(kom(j):m(j)=r(j)*t(j));
  mb=rb*tb;

```

```
eps<20;
```

```
@sum(kom(j):m(j))+mb+ib<im+eps;
```

```
@sum(kom(j):m(j))+mb+ib>im-eps;
```

```
@for(uk:@bin(x));
```

```
@for(kom(j):@gin(f));
```

```
@for(kom(j):@gin(y));
```

```
@for(kom(j):@free(m(j)));
```

```
@free(mb);
```

```
@free(eps);
```

```
end
```

## Ek Açıklama – B: Test Problemleri Verileri

Tablo Test Problemi 1 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	rj	CA	H
1	PAG	7,1	1800	110		1	-0,00769	16	22861
2	PMC	7,8	800	120		2	-0,00471	16	
3	PMC	7,8	1200	120		3	-0,00471	16	
4	PMC	7,8	1300	120		4	0,00287	16	18507
5	AKE	2,4	650	90		5	0,0053	16	
6	PLA	4,9	1250	90		bulk	0,00716		3468
<b>BY</b>	3100		<b><math>I_b</math></b>	117	<b>FL</b>	396			
<b>BC</b>	900		<b>IM</b>	107,5					

Tablo Test Problemi 2 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	rj	CA	H
1	PAG	7,1	1800	110		1	-0,00609	4,9	18869
2	PMC	7,8	2000	120		2	-0,00379	16	
3	PMC	7,8	2500	120		3	-0,00379	16	
4	PMC	7,8	2100	120		4	0,00243	16	15241
5	AKE	2,4	750	90		5	0,00444	16	
6	AKE	2,4	710	90		bulk	0,0063		3468
7	PLA	4,9	1200	90					
<b>BY</b>	3750		<b><math>I_b</math></b>	102	<b>FL</b>	258			
<b>BC</b>	750		<b>IM</b>	120					



Tablo Test Problemi 3 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	rj	CA	H
1	PAG	7,1	1500	110		1	-0,00609	4,9	18869
2	PMC	7,8	2000	120		2	-0,00379	16	
3	PMC	7,8	2500	120		3	-0,00379	16	
4	PMC	7,8	2100	120		4	0,00243	16	15241
5	PAG	7,1	1400	110		5	0,00444	16	
6	AKE	2,4	1000	90		bulk	0,0063		3468
7	PLA	4,9	1300	90					
<b>BY</b>	3000		<b><math>I_b</math></b>	126	<b>FL</b>	1338			
<b>BC</b>	200		<b>IM</b>	120					

Tablo Test Problemi 4 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	rj	CA	H
1	PAG	7,1	2110	110		1	-0,00609	4,9	18869
2	PMC	7,8	3145	120		2	-0,00379	16	
3	PMC	7,8	2400	120		3	-0,00379	16	
4	AKE	2,4	1030	90		4	0,00243	16	15241
5	AKE	2,4	870	90		5	0,00444	16	
6	PLA	4,9	1200	90		bulk	0,0063		3468
7	AKE	2,4	890	90					
<b>BY</b>	3410		<b><math>I_b</math></b>	124	<b>FL</b>	648			
<b>BC</b>	850		<b>IM</b>	120					

Tablo Test Problemi 5 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	r <sub>j</sub>	CA	H
1	PAG	7,1	2110	110		1	-0,00769	16	22861
2	AKE	2,4	436	90		2	-0,00471	16	
3	PLA	4,9	1200	90		3	-0,00471	16	
4	AKE	2,4	890	90		4	0,00287	16	18507
						5	0,0053	16	
						bulk	0,00716		3468
<b>BY</b>	6547		<b>I<sub>b</sub></b>	108,5	<b>FL</b>	480			
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	106,8					

Tablo Test Problemi 6 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	r <sub>j</sub>	CA	H
1	PMC	7,8	1400	120		1	-0,00769	16	22861
2	PMC	7,8	1500	120		2	-0,00471	16	
3	AKE	2,4	465	90		3	-0,00471	16	
4	PLA	4,9	1000	90		4	0,00287	16	18507
5	AKE	2,4	1100	90		5	0,0053	16	
						bulk	0,00716		3468
<b>BY</b>	5310		<b>I<sub>b</sub></b>	99,83	<b>FL</b>	508			
<b>BC</b>	1350		<b>IM</b>	106,8					

Tablo Test Problemi 7 İçin Parametre Bilgileri

<b>i</b>	<b>ULD</b>	<b>Alan</b>	<b>Ağırlık</b>	<b>Dara</b>		<b>j</b>	<b>rj</b>	<b>CA</b>	<b>H</b>
1	PAG	7,1	3000	110		1	-0,003036	7,8	40823
2	PMC	7,8	2500	120		2	-0,003036	15,6	
3	PMC	7,8	2500	120		3	-0,001734	40	
4	AKE	2,4	1000	90		4	0,001288	30	31751
5	AKE	2,4	650	90		5	0,002379	20	
6	PLA	4,9	1700	90		bulk	0,002985		4082
7	AKE	2,4	715	90					
<b>BY</b>	9362		<b><math>I_b</math></b>	47,77	<b>FL</b>	485			
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	54,25					

Tablo Test Problemi 8 İçin Parametre Bilgileri

<b>i</b>	<b>ULD</b>	<b>Alan</b>	<b>Ağırlık</b>	<b>Dara</b>		<b>j</b>	<b>r<sub>j</sub></b>	<b>CA</b>	<b>H</b>
1	PAG	7,1	2500	110		1	-0,003036	7,8	40823
2	PMC	7,8	4000	120		2	-0,003036	15,6	
3	PMC	7,8	2100	120		3	-0,001734	40	
4	AKE	2,4	1100	90		4	0,001288	30	31751
5	AKE	2,4	900	90		5	0,002379	20	
6	PLA	4,9	970	90		bulk	0,002985		4082
<b>BY</b>	7440		<b>I<sub>b</sub></b>	45,61	<b>FL</b>	585			
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	54,25					

Tablo Test Problemi 9 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	r <sub>j</sub>	CA	H
1	PAG	7,1	2000	110		1	-0,003036	7,8	40823
2	PMC	7,8	2500	120		2	-0,003036	15,6	
3	AKE	2,4	1100	90		3	-0,001734	40	
4	AKE	2,4	1042	90		4	0,001288	30	31751
5	PLA	4,9	970	90		5	0,002379	20	
6	AKE	2,4	1200	90		bulk	0,002985		4082
<b>BY</b>	9612		<b>I<sub>b</sub></b>	47,58	<b>FL</b>	285			
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	54,25					

Tablo Test Problemi 10 İçin Parametre Bilgileri

i	ULD	Alan	Ağırlık	Dara		j	r <sub>j</sub>	CA	H
1	PAG	7,1	2161	110		1	-0,00769	16	22861
2	PLA	4,9	1200	90		2	-0,00471	16	
3	AKE	2,4	890	90		3	-0,00471	16	
						4	0,00287	16	18507
						5	0,0053	16	
						bulk	0,00716		3468
<b>BY</b>	4960		<b>I<sub>b</sub></b>	97,62	<b>FL</b>	508			
<b>BC</b>	1400		<b>IM</b>	106,8					