

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAREKETLİ SİSTEMLERİN PERFORMANS VE BOYUT
İLİŞKİSİ: YAPISAL GELİŞİM TEORİSİ

Ümit GÜNEŞ

DOKTORA TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Eş Danışman

Prof. Dr. Adrian BEJAN

Temmuz, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAREKETLİ SİSTEMLERİN PERFORMANS VE BOYUT
İLİŞKİSİ: YAPISAL GELİŞİM TEORİSİ**

Ümit GÜNEŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Prof. Dr. Adrian BEJAN

Duke Üniversitesi

Eş Danışman

Jüri Üyeleri

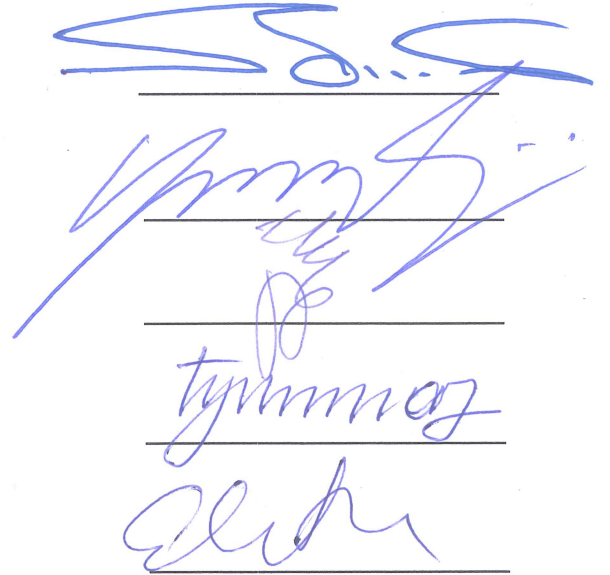
Prof. Dr. Bahri ŞAHİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yasin ÜST, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ, Üye
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Tamer YILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdal ÇETKİN, Üye
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü



Danışmanlarım Prof. Dr. Bahri ŞAHİN ve Prof. Dr. Adrian BEJAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Hareketli Sistemlerin Performans ve Boyut İlişkisi: Yapısal Gelişim Teorisi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.



Ümit GÜNEŞ

Bu alışma, TÜBİTAK 2214 2214-A - Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim sırasında örnek bilim insanı olarak yaptığı yönlendirmeler ile yaşadığım sıkıntıları aşmama yardımcı olan muhterem hocam Prof. Dr. Bahri ŞAHİN'e, örnek bilim insanı ve iyi bir arkadaş olan Prof. Dr. Adrian BEJAN'a tez izleme komitemde tezime katkı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ ve Prof. Dr. Yasin ÜST'e şükranlarımı sunuyorum.

Doktora tezimin tamamlanması aşamasında katkılarını esirgemeyen değerli dostlarım ve meslektaşlarım Dr. Asım Sinan KARAKURT, Veysi BAŞHAN, Dr. Serdar Turgut İNCE, Dr. Turgay KÖROĞLU ve ismini zikredemediğim diğer meslektaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Son olarak insanın en uzun ve meşakkatli çalışmalarından birisi olan doktora tez çalışması boyunca genellikle zamanlarından çaldığım aileme manevi destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Ümit GÜNEŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Yapısal Gelişim Teorisi	2
1.1.2 Akış Sistemleri	6
1.1.3 Ölçek Analizi.....	9
1.2 Tezin Amacı.....	10
1.3 Hipotez.....	10
2 Sosyal Organizasyonlara Termodinamik Bakış Açısı.....	11
2.1 Nehir Akışı.....	13
2.2 Sosyal Organizasyon.....	16
2.3 Akış Kanallarında İyileştirme	26
2.4 Sonuç	27
3 Araçlarda ve Canlılarda Performans - Boyut İlişkisi.....	29
3.1 Teori.....	31
3.1.1 İvmelenme	33
3.1.2 Seyir	34
3.1.3 Boyut	35

3.1.4	En Hızlı Uçaklar	38
3.2	Uçaklarda Boyut - Hız İlişkisi.....	40
3.3	Ortamin Boyut Üzerindeki Etkisi	41
3.4	Ölçek Ekonomileri	43
3.5	Sonuç	47
4	Hava ve Deniz Taşımacılığında Performans - Boyut İlişkisi.....	50
4.1	Boyut - Verim İlişkisi.....	55
4.2	Gelişim	85
4.3	Hız.....	93
4.4	Sonuç	99
5	Sonuç ve Öneriler	103
	Kaynakça	106
	Tezden Üretilmiş Yayınlar.....	113

SİMGE LİSTESİ

H	Yakıt alt ısıl değeri
N	Kullanıcı sayısı
m	Kütle
q	Isı miktarı
F	Kuvvet
V	Hız
L	Mesafe
t	Zaman
P	Kol sayısı
C	Sabit katsayı
D	Boru çapı
d	Boru boyu
α	Boyut-güç ilişkisindeki üstel sayı
ε	Akış debisi oranı
β	Toplam popülasyon oranı
ϕ	Canlılarda taşıyıcı organ hacminin toplam hacme oranı

Alt indisler

f	Yakıt
a	İvmelenme
c	Seyahat

Üst indisler

$\sim$	Normalize edilmiş değer
--------	-------------------------

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Gemi ve otomobil tasarımlarının zaman içindeki değişimi [23]	3
Şekil 1.2	Su akışının zamana bağlı olarak incelenmesi [24]	4
Şekil 1.3	Kar tanelerinin oluşumu, (Kaynaklar (a): [25], (b): [26])	5
Şekil 1.4	İstanbul'da yıldırım [29]	6
Şekil 1.5	Boru akış sisteminin modellenmesi	7
Şekil 2.1	Dünyadaki bölgelerin ve ülkelerin gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) değerine karşı yıllık yakıt tüketimi [44]	12
Şekil 2.2	Dört kollu akışın oluşturduğu bir sistem (solda), daha sonra birleşerek yine 4 kolu başka bir sistemin oluşumu (sağda)	13
Şekil 2.3	Şekil 2.2'de gösterilen nehir akışı kollarındaki debilerinin kademeli dağılımı	15
Şekil 2.4	2, 3 ve 6 kollu akışlardaki hareket	16
Şekil 2.5	Kullanıcı sayısına göre dairesel yapının oluşturduğu ısı kayıpları.....	17
Şekil 2.6	Sosyal organizasyon türleri	21
Şekil 2.7	Kullanıcı sayısına göre dairesel ve dallı yapıda meydana gelen ısı kayıpları	22
Şekil 2.8	Dağılımın dairesel yapıdan dallı yapıya dönüşmesinden elde edilen tasarruf	23
Şekil 2.9	Sıcak su akışının kullanıcı sayısına bağlı olarak oluşturduğu kademeli dağılım ve artan grup büyüklüğünün etkisi	24
Şekil 2.10	Toplam akış debisinin (ϵ), toplam popülasyonun (β) $n \times n$ boyutuna bağlı olarak oluşturduğu kademeli yapı.....	25
Şekil 2.11	Akış sisteminde yapılan iyileştirmenin akış dağılımına etkisi	27
Şekil 3.1	Uçan, koşan ve yüzen canlılar için kütle-hız değerleri (Kaynak [49]'dan yeniden üretilmiştir)	30
Şekil 3.2	Canlılar için Hirt vd.[50] yayınından derlenen en yüksek hızın en büyüğe yakın ancak en büyük olmayan boyuttaki canlılara ait olduğunu gösteren hız boyut verisi	31
Şekil 3.3	Boyutun uçak motorlarının verimine etkisi (Veriler [55]'da sunulmuştur).	32
Şekil 3.4	B_M ve B_V değerlerinin α 'ya bağlı olarak değişimi	37
Şekil 3.5	Askerî ve ticari uçaklarda boyut hız ilişkisi a) gerçek hız değerleri, b) irtifaya göre normalize edilmiş hız değerleri	40

Şekil 3.6 Savaş uçaklarının hız değerleri a) 1-300 ton arası, b) 1-100 ton arası, c) 1-10 ton arası (Veriler [55]'da sunulmuştur).	43
Şekil 3.7 Askerî uçakların yıllara göre ulaştığı a) hız, b) çıkabilecekleri maksimum irtifa değerleri	44
Şekil 3.8 İrtifa etkisinin ortadan kaldırılmasıyla revize edilen Şekil 3.1.....	45
Şekil 3.9 Günümüzde servisteki en büyük uçaklardan üçünün kütle değeri ve motor sayısına bağlı olarak itme değerleri (Tablo 4.1).	47
Şekil 3.10 Savaş uçağı (F-18A) ve ticari uçaklarının (737-800, A320-200, A330-200 ve 77-300ER) ömür boyu ortalama hızları ve maksimum hızları.....	49
Şekil 4.1 Temel uçak modellerinin 100 yıllık havacılık tarihi boyunca gelişimi (Kaynak: [57]'dan yeniden üretilmiştir)	51
Şekil 4.2 Gemi modellerinin ve boyutlarının ortaya çıkışı ve çoğalışı (Veri kaynağı: [107]).....	52
Şekil 4.3 Canlılar (uçanlar, koşanlar ve yüzenler) aynı büyüklükte olacak şekilde çizildiklerinde canlılar arasındaki farklılık ve çeşitlilik (Orta bölüm için kaynak: [23])	53
Şekil 4.4 Uçakların ve canlıların dünya üzerindeki uçuşlarının kademeli yapısı: Popülasyon ile gövde büyüklüğü arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.5 Zambiya, Busanga Plains'teki hayvan yolları (Fotoğraf: Adrian Bejan)	57
Şekil 4.6 (a) küçük çaplı iki borudaki akışın büyük çaplı bir boru ile taşınması, (b) küçük çaplı bir küre yerine büyük çaplı bir kürenin kullanılması	58
Şekil 4.7 Büyüklüğün, kullanılan birim yakıt başına motor iş çıktısı üzerindeki etkisi: a) gemi ana makineleri [110], b) helikopter motorları [53] c) uçak jet motorları [57].....	60
Şekil 4.8 2 zamanlı MAN gemi ana makinelerinde kütle - güç ilişkisi [110]....	61
Şekil 4.9 Tüm gemi türleri için yük taşıma kapasitesi (DWT) - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])	62
Şekil 4.10 Dökme yük gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107]) ..	63
Şekil 4.11 Dökme yük gemileri için DWT - güç ilişkisi ile Harvald korelasyonunun mukayesesi (Veri kaynağı: [107]).	64
Şekil 4.12 Kargo gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])	65
Şekil 4.13 Konteyner gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])....	65
Şekil 4.14 Balıkçı gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])	66
Şekil 4.15 Yolcu gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])	66

Şekil 4.16	Tankerler için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])	67
Şekil 4.17	Küçük boyutta tankerlerki (Small, < 10.000 DWT) için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107]).	68
Şekil 4.18	Orta boyutta tankerlerki (Handysize + Handymax: 10.000 -55.000 DWT) için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107]).....	68
Şekil 4.19	Büyük boyuttaki tankerler (Panamax + Aframax + Suezmax + VLCC + ULCC: 55.000-550.00 DWT) için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])	68
Şekil 4.20	Gemilerde taşınan yük kapasitesi (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	70
Şekil 4.21	Dökme yük gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	71
Şekil 4.22	Kargo gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	72
Şekil 4.23	Konteyner gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	72
Şekil 4.24	Balıkçı gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	73
Şekil 4.25	Yolcu gemilerin (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	73
Şekil 4.26	Tankerlerde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	74
Şekil 4.27	Gemilerde (DWT) ile boş gemi kütlesi (lightship) arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).....	75
Şekil 4.28	Dökme yük gemileri için DWT - Deplasman/DWT ilişkisi.....	76
Şekil 4.29	Tankerler için DWT-Deplasman/DWT ilişkisi	76
Şekil 4.30	Dökme yük gemileri için DWT - Güç/DWT ilişkisi	77
Şekil 4.31	Ticari uçaklarda maksimum kalkış kütlesinin a) toplam üretim sayısı ile b) kullanımda olan sayı ile c) yıllık ortalama üretim sayısı ile ilişkisi [90].....	79
Şekil 4.32	Kuşlar ve uçaklar için popülasyon ve gövde büyüklüğü arasındaki ilişki (Kaynaklar: uçaklar için [90], kuşlar için [126], [127]).	80
Şekil 4.33	Tabiattaki kademeli yapı: Sibiryada bulunan Lena nehri deltası (solda), insan akciğer modeli (sağda) [83]	81
Şekil 4.34	Bugün var olan gemiler: popülasyon yoğunluğu ve gövde büyüklüğü (Veri kaynağı: [107]).	82
Şekil 4.35	Temmuz 2016'da uçan hava taşıtlarının sayısı [90].....	83

Şekil 4.36	1970'ten sonra Boeing, Airbus, Bombardier ve Embraer tarafından inşa edilen hava taşıtlarının sayısı [90]	84
Şekil 4.37	Uçuş sayıları ve maksimum kalkış kütlesi [90] (Kademeli yapılar siyah semboller ile gösterilmiştir).....	84
Şekil 4.38	1970'ten beri Boeing hava taşıtı modellerinin yıllık üretimi [90]....	85
Şekil 4.39	Helikopterlerdeki özgül yakıt tüketimindeki azalış [53] (Siyah noktalar askeri helikopterleri göstermektedir)	86
Şekil 4.40	Uçaklardaki özgül yakıt tüketimindeki azalış [57], [93].....	87
Şekil 4.41	Ticari uçakların spesifik yakıt tüketimlerinin pervaneden jet motoruna geçişiyle yıllara göre azalması [84].	88
Şekil 4.42	Uçaklarda a) maksimum yakıt miktarı ile motor kütlesi arasındaki ilişki, b) yakıt kütlesi ile maksimum kalkış kütlesi arasındaki ilişki, c) maksimum kalkış kütlesi ile maksimum mesafe arasındaki ilişki [57].....	89
Şekil 4.43	Uçaklarda kanat açıklığı ve gövde uzunluğu arasındaki ilişki [57].	91
Şekil 4.44	Helikopterlerde (a) Gövde büyüklüğü ve motor büyüklüğü arasındaki ilişki. (b) Pervane çalı ile gövde büyüklüğü arasındaki ilişki (c) Yakıt yükü ile motor büyüklüğü arasındaki ilişki [53] (Siyah noktalar askeri helikopterleri göstermektedir)	92
Şekil 4.45	Son yüzyıl boyunca gemicilik hızının gelişimi (Veri kaynağı: [107]).	94
Şekil 4.46	Gövde büyüklüğünün günümüzde çalışmakta olan gemilerin hızı üzerindeki etkisi (Veri kaynağı: [107]).	94
Şekil 4.47	Gemilerde gövde büyüklüğü ile seyahat mesafesi arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).	95
Şekil 4.48	Gemilerde gücün gelişimi (Veri kaynağı: [107]).	95
Şekil 4.49	Dünya üzerindeki tüm ortamlarda hareket eden tüm varlıklara yönelik bir genel bir bakış. (Gemi verileri kaynak: [49], Balık verileri kaynak: [131], [132])	97
Şekil 4.50	Şekil 4.49'da sunulan genel bakış açısının, hava yoğunluğu ile uçuş yüksekliği arasındaki ilişki de göz önünde bulundurularak güncellemesi	99
Şekil 4.51	Tasarımların zamana bağlı olarak gelişimi (Kaynak [79]).	100

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Günümüzde servisteki en büyük uçaklardan üçünün gelişimi [61]–[66].....	46
Tablo 3.2 Bazı uçakların ömür boyu uçak hızı, uçuş süresi ile yerde geçirdiği sürenin toplamının ortalaması [61], [67]–[74].	48
Tablo 4.1 Gemiler için DWT – güç bağıntıları.....	69
Tablo 4.2 Gemiler için DWT – deplasman bağıntıları	74

Hareketli Sistemlerin Performans ve Boyut İlişkisi: Yapısal Gelişim Teorisi

Ümit GÜNEŞ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Eş-Danışman: Prof. Dr. Adrian BEJAN

Yapısal gelişim teorisi yardımıyla sistem boyutlarının performans üzerine etkilerinin araştırıldığı bu tezde boyutun etkileri sosyal organizasyonlarda, yüzen ve uçan canlılarda, gemi ve uçaklarda incelenmiştir. Çalışma boyunca, bu incelemelerde ulaşılan teorik sonuçlar ile ampirik veriler arasındaki ilişki gösterilmeye çalışılmıştır. Sonuçlara bakıldığında ise teorik yaklaşım ile ampirik değerler arasında yüksek derecede bir uyum olduğu görülmüştür.

Tezin birinci bölümünde yapısal gelişim teorisinin tarihçesi, prensipleri ve analizlerde kullanılan matematik açıklanmıştır. İkinci bölümde ise sosyal organizasyonu oluşturan fiziksel temeller açıklanmıştır. Organizasyonun oluşumunu açıklamak için nehir akışı ve insanlar için çok büyük öneme sahip ihtiyaçlardan birisi olan sıcak suyun taşınması modellenmiştir. Sosyal organizasyon olgusunun bir araya gelerek yakıt israfının azalmasına büyük bir etki yaptığı görülmüştür. Ayrıca sosyal organizasyondaki bireylerin artmasıyla sistem boyutları büyüdüğünden kademeli yapının tabii olarak gerçekleştiği görülmüştür.

Homojen olmayan bu dağılımları iyileştirmenin yollarından birinin ise tasarımlarda yapılacak lokal iyileştirmeler olduğu gösterilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde canlıların ve araçların boyutuna bağlı olarak yapısal gelişim teorisi tarafından sunulan boyut-hız ilişkisinde açıklanmamış kısımlara cevap bulunmuştur. Ayrıca boyut-hız teorisine göre neden en hızlı canlıların en büyük kütleye sahip olmadığı konusu hareketin iki bileşeni (ivmelenme ve seyir) yardımıyla analiz edilmiştir. Kütleye bağlı olarak daha önce bulunan teorik yaklaşıma uçakların uymadığı görülmüş olup bu sapmanın düzeltilmesi sağlanmıştır. Ayrıca en hızlı uçanların en hızlı yüzenlerden bin kat daha küçük olduğu gerçeği teorik olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde uçak ve gemilerin boyut performans ilişkisi gösterilmiştir. Yapısal gelişim teorisinden yola çıkarak geliştirilen yaklaşım Marine Traffic sitesinden elde edilen 100.000 adet gemi verisiyle mukayese edilmiştir. Teorik yaklaşımla ampirik veriler arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca 6 farklı gemi türü için (Dökme Yük Gemisi, Kargo, Konteyner, Yolcu Gemisi, Balıkçı Gemisi ve Tanker) taşıma kapasitesiyle harcanan güç arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Böylelikle bu kadar büyük bir veri bulutuyla yapısal gelişim teorisinden bulunan sonuçların uyumu kanıtlanmıştır. Tezin son kısmında ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal gelişim teorisi, Boyut, Gemiler, Uçaklar, Sosyal organizasyon.

Performance and size in Moving Systems: Constructal Law

Ümit GÜNEŞ

Department of Naval Architecture and Maritime Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Bahri ŞAHİN

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Adrian BEJAN

The effects of system size on performance was analyzed via Constructal Law in this thesis. The effects of size have been examined in social organizations, swimmers and fliers, and ships and airplanes. Relationships that have been found between the empirical data and the theoretical results are shown. When looking at the results, a high correlation is observed between the theoretical approach and the empirical data. The first chapter explains the theory of Constructal Law through its history, principles, and the mathematical models that have been used in the analyses. The second chapter explains the physical bases of social organization. River flows and hot water transportation, which is one of humans' most important needs, have been modeled in order to explain the formation of organization. By gathering around the phenomenon of social organization, its seen that it has a great importance on diminishing fuel waste. In addition, due to the growth of system size and the increase of individuals in social organization,

hierarchy is seen to occur. One of the ways to improve these non-uniform distributions has been shown to be the local innovations performed on designs.

The third chapter introduces an answer to the unexplained part in the size-speed relationship that Constructal Theory presents and that depend on the size of animals and vehicles. In addition, the reason why the fastest living animals and vehicles are not biggest has also been shown in the detailed analyses. This case includes the effects of acceleration and cruise parts, the two components of movement. The fact that aircraft were seen to not conform to the earlier theoretical approach, which is based on mass - speed, has allowed for this deviation to be amended. Additionally, why the fastest animal fliers are 10^3 times smaller than the fastest animal swimmers has been explained theoretically. The fourth chapter shows the relationship of airplanes' and ships' size with their performance. The approach that exists according to the Constructal Law has been compared with the data of 100,000 ships as obtained from the Marine Traffic website. A high correlation has been seen between the empirical data and the theoretical approach. Also, the relationship between power spent and carrying capacity of ship (deadweight tonnage) has been shown for six different ship types (bulk carrier, cargo, container, passenger ship, fishing ship, and tanker). Thus, correlation is shown for the results present in the Constructal Theory with as large a data cloud. The final chapter of the thesis summarizes the results.

Keywords: Constructal law, Size, Ships, Aircrafts, Social organization.

1.1 Literatür Özeti

Tarihsel olarak kalorik teori, sonrasında mekanik alanının imkanlarını kullanarak ısı transferi adını almıştır [1]. Bununla beraber William Thomson'un (Lord Kelvin) 1851 yılında yayınlanan makalesinde termodinamik kavramı ilk kez kullanılmıştır [2]. 1982 yılında ısı transferi ile termodinamik arasındaki bütüncül ilişki termal bilim adı altında birleşmiştir [3]. "International Journal of Thermal Sciences" dergisinin ismi de yine bu yıla dayanmaktadır. 1996 yılında ise Constructal Law'ın tanımlanmasıyla beraber termodinamik artık bünyesinde zamana bağlı olarak gelişim süreçlerini de barındıracak bir yapıya kavuşmuştur [1], [4].

"Constructal" terimi 1996 yılında yayınlanan bir makalede [5, s. 106] ilk kez Adrian Bejan tarafından kullanılmış ve bu makalede "Constructal" kavramının neden geliştirildiği açıklanmıştır. Bejan, daha öncesinde mevcut olan "Fractal" teorisinin tabiattaki sistemlerin geliştiği yönün tersini ifade ettiğini ve tabiattaki gelişimleri ifade edecek terimin "Fractal" değil "Constructal" olması gerektiğini ileri sürmüştür.

Kasım 1996'da yayınlanan ikinci makalede [6, s. 815] ise "Constructal" teorisine nihai halini verilmiştir. Teorinin çıkış tarihi ile ilgili bir karışıklık mevcuttur. İkinci makale yayın tarihi olarak Mart 1997'yi gösterse bile aslında makale Kasım 1996 yılında yayınlanmıştır. Bu yıllarda "International Journal of Heat and Mass Transfer" dergisine yoğun bir makale kabulü yaşanmaktaydı. Bu süreçte gelen makaleler aslında yayınlanıp kütüphane raflarında yerini almasına rağmen sayılar geç tarihli yayınlanmaktaydı [7, s. 191].

Bu iki makaleden sonra "Constructal Law" ilk kez bir kitapta, kitap bölümü olarak yerini almıştır [8, ss. 704-814]. Aynı yıl teori, ısı transferinde ve akışkanlar dinamiğinde dallı yapı [9]–[11] ve tabiattaki gelişim [12], [13] gibi konularda kendisine yer bulmuştur.

Tezde "Constructal Law" ifadesi "Yapısal Gelişim Teorisi" olarak kullanılacaktır. Teori ilk olarak 2014 yılında Erdal Çetkin tarafından "Yapısal Gelişim Teorisi"

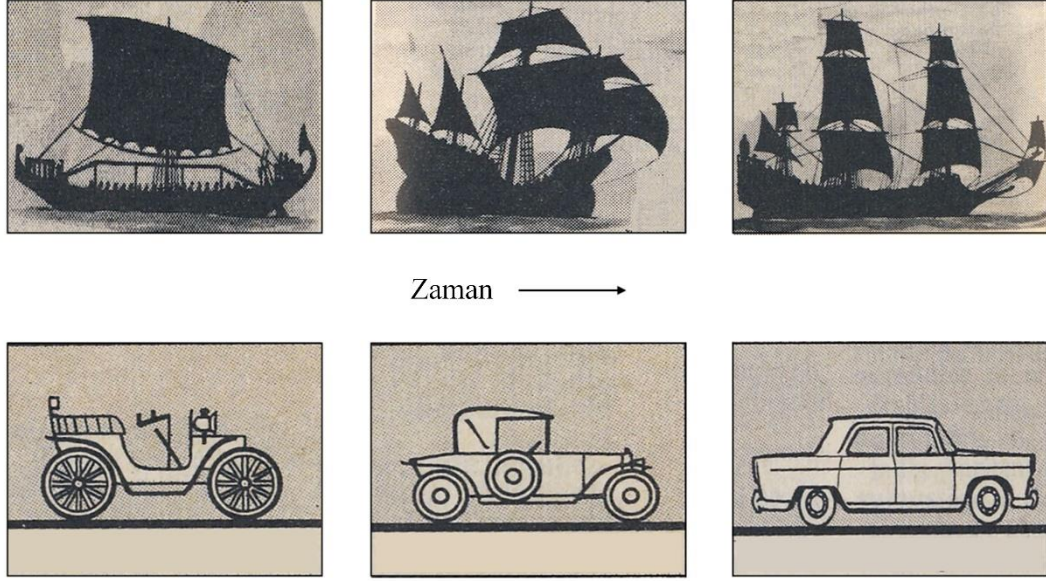
olarak Türkçeye çevrilmiş ve bir lisansüstü dersi olarak okutulmaya başlanmıştır. Bu tezin başlığında ve içerisinde kullanılan, “Constructal law”ı tam anlamıyla karşılamasa da en uygun Türkçe karşılığı buradan alınmıştır.

Yapısal gelişim teorisinin kullanıldığı çalışmalar geniş bir alana yayılmış bulunmaktadır. Bugüne kadar dallı akış yapısının ve boyutun yapısal gelişim teorisi ile açıklayan [14], mühendislikten fiziğe kadar akış sistemlerinin şeklinin ve yapısının nasıl geliştiğini gösteren [15], tabiatta ve mühendislikte yapısal gelişim teorisiyle tasarımların nasıl geliştiğini değerlendiren [16]–[19], yapısal gelişim teorisinin biyoloji ile fizik arasındaki köprü görevini gösteren [20], yapısal gelişim teorisindeki ilerlemeyi ve uygulamalarını gösteren [21], yapısal gelişim teorisinin teknolojideki gelişimlere katkısını sunan [7], fizik, biyoloji, teknoloji ve toplumsal çalışmaları birlikte değerlendiren [22] ve termodinamikteki gelişimleri yapısal gelişim teorisiyle açıklayan [1] çalışmalar yapılmıştır.

1.1.1 Yapısal Gelişim Teorisi

Yapısal gelişim teorisi, sonlu boyutlu bir sistemin zaman içinde yaşamını devam ettirmesi için, akışlara daha kolay erişim sağlayacak şekilde gelişmesi gerektiğini ifade etmektedir. Akışın zamana bağlı olarak kendine en kolay yolu (en az direnci) bulacak şekilde hareketine devam ettiğini göstermektedir [23]

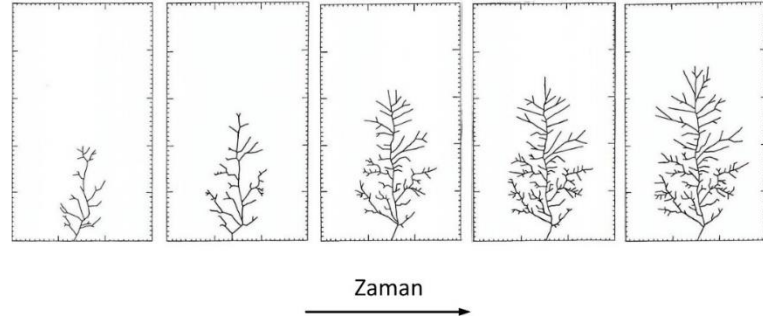
Yapısal gelişim teorisi bir optimizasyon metodu değildir. Optimum olan aslında en iyi seçenek değil birkaç seçenek arasından o an için en iyi seçimdir. Aslında en iyi olan bugün optimum ama yarın değişebilecek şeylerdir. Yapısal gelişim teorisi ise gelişimleri ve değişimleri zamana bağlı olarak değerlendirmektedir. Herhangi bir tasarım için kısıtlar ortadan kalktığında zaman içerisinde daha iyi tasarımlara dönüşecektir. Şekil 1.1’de gemilerin ve araçların zamanla değişimi görülmektedir. Bu tasarımlar zamanının en iyi tasarımlarıyken zamanla daha iyi tasarımlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 1.1 Gemi ve otomobil tasarımlarının zaman içindeki değişimi [23]

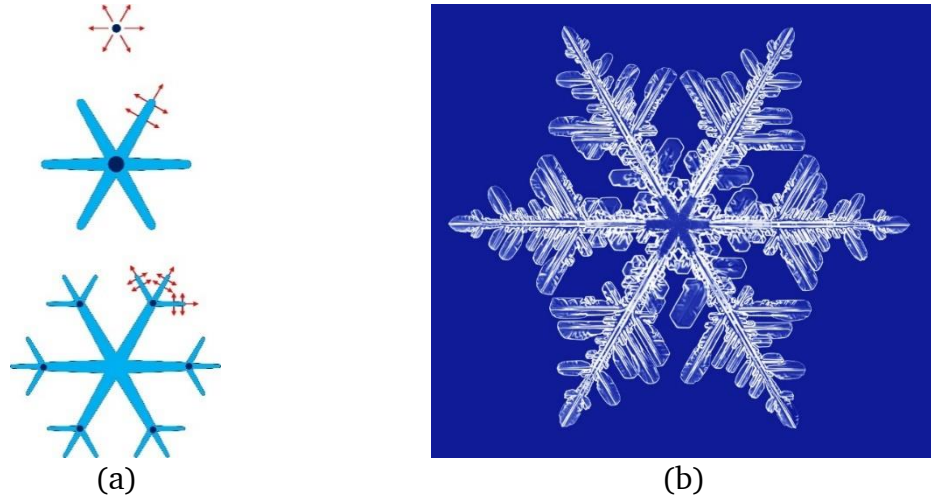
Gelişim zaman içinde kaçınılmazdır. Gelişimin olması için hareketin gerçekleşeceği doğrultuda özgürlüğe ihtiyaç vardır. Özgürlük ise yeni tasarımların çıkmasının altında yatan en önemli unsurdur. Tek serbestlik dereceli bir denklemin çözümü tektir. Dolayısıyla bunun sonucunda özgün ve özgür tasarımların çıkması beklenmez. Serbestlik derecesi arttıkça çözümler de artmaktadır.

Yapısal gelişim teorisi hem tabiatın işleyişini hem de mühendislik alanında ortaya çıkan yapıların genel prensiplerini ortaya koymaktadır. Tabiatта hiçbir zaman sabit bir tasarım bulunmaz. Her tasarım zamanla kendi durumu için en uygun, en kısa, en az dirençli ya da en ekonomik yolu takip eder. Tabiatın hareketi sabit bir optimum değere göre değil, zamana bağlı olarak değişen en uygun durumların bütününe göredir. Bu durum için Şekil 1.2 iyi bir örnek sunmaktadır. Burada suyun toprak üzerinde akışını gözlemlemek için bir deney düzeneği hazırlanmıştır [24]. Suyun hareketi zaman içerisinde incelendiğinde, dallanarak yoluna devam ettiği görülmektedir. Burada önemli nokta dallanma hareketlerinin genellikle değişken oluşudur çünkü her bir durum için en kolay yollar farklılık göstermektedir. Tabiat ise bu değişen dirençler karşısında kendisi için minimum direnci bularak yoluna devam etme eğilimindedir.



Şekil 1.2 Su akışının zamana bağlı olarak incelenmesi [24]

Yapısal gelişim teorisi nehir akışı, yıldırımın oluşumu, ısı transferi gibi tüm akış yapılarını açıklamaktadır. Örneğin her bir kar tanesi de aslında bir akış sistemidir [25]. Kar tanesinin oluşumu 2 temel prensibe dayanmaktadır. Birincisi ısının sıcaktan soğuğa doğru akmasıdır. İkincisi ise akış sistemlerinin, içinden geçen akımlara daha kolay erişim sağlamak için zaman içinde gelişmesidir. Kar tanelerinin oluşumu ilk olarak havadaki soğuk bir nem taneciğinin donmasıyla başlar. Sonra bu tanecik etrafındaki diğer nem tanecikleri de donmaya başlar ve giderek büyüyen bir tanecik oluşur. Oluşan bu tanecik (damlacık), etrafındaki havadan daha sıcaktır ve tanecikli yapıdan çevresine doğru bir ısı transferi gerçekleştirmeye başlar. Bu tanecik belli bir noktaya kadar küresel olarak büyür. Taneciğin yüzey alanı r^2 ile orantılı olarak artarken ($4\pi r^2$) taneciğin kütlesi r^3 ile orantılı olarak artmaktadır ($\frac{4}{3}\pi r^3 \rho$). Dolayısıyla tanecik büyüdükçe birim miktar için ısı transfer alanı azalmaktadır. Bu da tanecik büyüdükçe ısı transferini zorlaştırmaktadır. Tanecik belli bir noktaya kadar büyüdükten sonra ısı transferini daha kolay yapmak için yüzey alanını arttıracak olan 6 kollu büyüme evresine geçer. Bu 6 kolun büyümesi belli bir yere kadar devam ettikten sonra bu kollarda aynı şekilde ısı transferini daha kolay yapabilmek için yine 6 kollu bir yapı oluşmaya başlar (Şekil 1.3). Bunlardan sadece 3 tanesi gelişir çünkü 6 koldan bir tanesi geri yönde olacağı için gerçekleşmez. Kalan 2 tanesi ise büyüyeceği yerde yeterince soğuk hava bulunmadığı için gelişemez. Bu işlem kollar soğuk hava bulana kadar devam eder.



Şekil 1.3 Kar tanelerinin oluşumu, (Kaynaklar (a): [25], (b): [26])

Benzer prensip yıldırımın oluşumunda da görülmektedir. Yıldırım oluşumu akımın gideceği en kolay yol prensibine dayanmaktadır. Güneş ışığı, oksijen ve nitrojen gazlarından oluşan dünyanın atmosferinde çok büyük bir gerilim meydana getirir. Bu esnada meydana gelen su buharının oluşturduğu güç, fırtına bulutlarına sebep olur ve bu gerilimlerin sonucunda bulutlarda elektrik yükü birikir. Tabiattaki tüm olaylar her zaman dengeye ulaşmak ister. Fırtına bulutları meydana gelen bu yükü dengelemek için negatif yükleri yer yüzüne yıldırım olarak iletmeye çalışırken pozitif yükleri de hidrojen ve helyum gazlarından oluşmuş iyonosfere doğru taşır. Bulutların içindeki elektrik yükü havayı iyonlarına ayıracak kadar artar [27], [28]. Daha sonra bulutlarla yeryüzü arasında elektrik akımının taşınabileceği bu akış, tabiatın tüm hareketlerinde olduğu gibi kendisine bu hareket için en az dirençli (en kolay) yolu bularak yeryüzüne inmeye çalışır. Yıldırım kollara ayrılarak kendisi için muhtemel en kolay yolu bulmaya çalışır ve ana akım bu kollar arasından en kolay yol ile hareketine devam ederek yeryüzüne iner (Şekil 1.4).



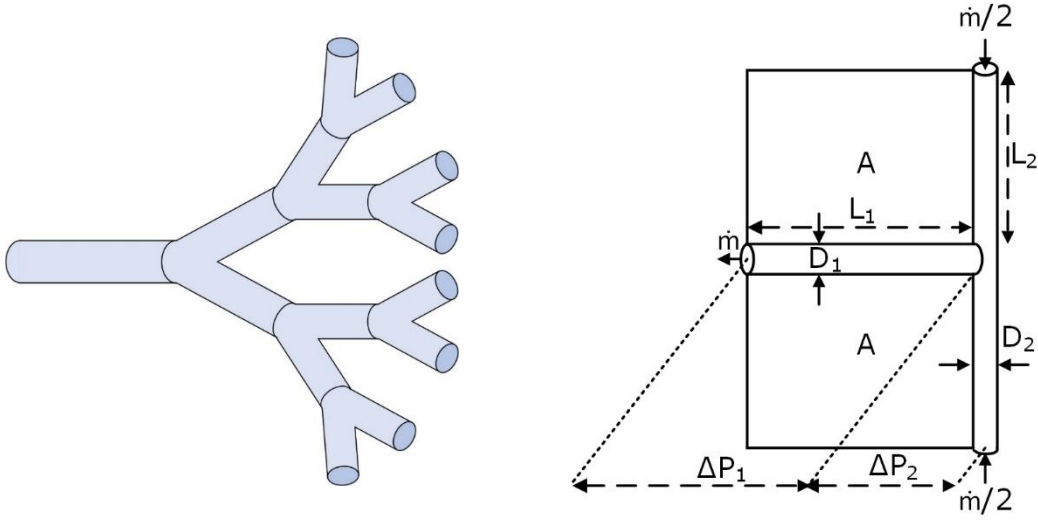
Şekil 1.4 İstanbul'da yıldırım [29]

1.1.2 Akış Sistemleri

Yapısal gelişim teorisi, sistemleri durağan ya da hareket eden sistemler olarak sınıflandırmaktadır. Eğer bir sistemdeki akış duruyorsa biyolojik olarak olmasa bile bir hareket olamadığı için aslında bu sistemler ölü sistemlerdir. Çünkü zaman içindeki hareket canlılığın en belirgin özelliğidir. Hareket (yer değiştirme) olmazsa iş ($W = F \times x$) yapmak, enerji üretmek ya da harcamak mümkün olmayacaktır. Tabiat canlılığı hareket üzerine kurulmuştur. Jeofiziksel olarak bakıldığında nehir yatakları, yıldırım, türbülans, atmosferik dolaşım ve okyanus dolaşımının tamamı hareket etme üzerine kurulmuştur. Yine şehir trafiği, lavların akışı, rüzgarlar, tektonik hareketler ve magma olayları da dünyadaki harekete neden olan, ya da hareketten etkilenmiş olaylardır. Ayrıca biyolojik akış olarak canlılar gibi sosyal dinamikler ve teknoloji de yine hareket esasına dayanır [17]. Yeryüzündeki akışı ya da hareketi fiziksel olarak sınırlandırmak yanlış olacaktır. Örneğin fikirlerin bir yerden başka bir yere ulaşması ve oradaki fikirleri ve insanları etkilemesi de yine bir akış sistemi olarak ele alınabilir.

Bir nehir akışı düşünüldüğünde nehir kollarından gelen sular ileride birleşerek daha büyük kollara dönüşmektedir. Bu da bize aslında tabiattaki ve mühendislik tasarımlarındaki boyut ve verim ilişkisini göstermektedir. Şekil 1.5'te bir boru akışı bu durum için modellendiğinde debisi fazla bir kol ve her biri debisi fazla olan

kolun yarısı kadar olan az debili iki kol bulunmaktadır [30]. Aşağıda bu sistemin her durumunu kapsayan genel bir çözüm üretilmiştir.



Şekil 1.5 Boru akış sisteminin modellenmesi

Denklem (1.1), bir borudan 2 küçük boruya ayrılması durumunda büyük çaplı bir boru (L_1 , D_1) ile küçük çaplı bir borunun (L_2 , D_2) toplam sürtünme direncini göstermektedir.

Bir boru içindeki sürtünme direnci en genel formda Denklem (1.1) şeklinde yazılabilir:

$$\Delta P \sim f \frac{4L}{D} \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1.1)$$

Burada sürtünme direnç katsayısı olan f değeri Laminer akış için $f = 16/Re_D^1$ ve türbülanslı akışlar için $f = K/Re_D^0$ olarak yazılabilir. Burada K değeri pürüzlülük faktörüne göre sabit bir katsayıdır. Reynold sayısına üst olarak α yazılarak (Laminer akış için $b = 1$, türbülanslı akışlar için $b = 0$) genel bir çözüm üretilebilir. Ayrıca Reynold sayısının içinde bulunan (UD/ν) hız ifadesi için $U = \dot{m}/\rho D^2$ yazılabilir. Tüm bu değişikliklerden sonra Denklem (1.1) ifadesi Denklem (1.2) olarak gösterilebilir:

$$\Delta P \sim C \dot{m}^{2-b} \frac{L}{D^{5-b}} \quad (1.2)$$

Laminer bir akış için basınç kaybı $C_m L/D^4$ olurken türbülanslı akışlar için ise $C_m^2 L/D^5$ olmaktadır [30].

Bununla beraber büyük çaplı ve küçük çaplı bir borunun oluşturduğu sistemdeki toplam akış direnci (R) Denklem (1.3)'te verilmiştir:

$$R = \left(\frac{L_1}{D_2^{5-b}} + \left(\frac{1}{2} \right)^{2-b} \frac{L_2}{D_2^{5-b}} \right) \quad (1.3)$$

Burada gösterilen toplam akış direnci, toplam hacim $\left(V = \frac{\pi}{4} (D_1^2 L_1 + 2D_2^2 L_2) \right)$

sabit kısıtıyla ve Lagrange çarpanı methoduyla çözüldüğünde Denklem (1.4) elde edilir.

$$\frac{D_1}{D_2} = 2^{\frac{b-3}{b-7}} \quad (1.4)$$

Çap oranları için yapılan aynı işlem her bir kol uzunluğu için tekrar edildiğinde Denklem (1.5) elde edilir:

$$\frac{L_1}{L_2} = 2^{\frac{b+1}{7-b}} \quad (1.5)$$

Aynı şekilde iki küçük kol arasındaki açığı bulmak için çap oranları ve uzunluk oranları yerine yazıldığında Denklem (1.6) elde edilir.

$$\Delta P_{tot} = 2K \rho^{b-1} \nu^b 2^{b-3} (4V)^{\frac{b-5}{2}} \pi^{\frac{5-b}{2}} A^{\frac{7-b}{2}} \left[c \cos\left(\frac{x}{4}\right) - \sin\left(\frac{x}{4}\right) \left(\frac{2^{\frac{-b-1}{b-7}}}{\sin \beta} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \right]^{\frac{7-b}{2}} \quad (1.6)$$

Denklem (1.6)'yı minimum yapan değer aradaki açının optimum değerini verir. Laminer akış için çap oranı (D_1/D_2) $2^{1/3}$, boy oranı (L_1/L_2) $2^{1/3}$ ve açı oranı (β_1/β_2) 75° iken türbülanslı akışta çap oranı $2^{3/7}$, boy oranı $2^{1/7}$ ve açı 50° olmaktadır. Bulunan bu değerler, Miguel [31] tarafından yapılan analizlerle de uyumludur.

1.1.3 Ölçek Analizi

Ölçek analizi bir ifadedeki değişkenlerin ifadenin tamamına olan etkisinin büyüklüğünü analiz etmeyi sağlamaktadır. Bu metot problem çözümlerinde hız ve kolaylık sağlamaktadır. Denklemin kesin çözümünden ziyade denklemin sonucunu etkileyen değişkenlerin etkisi hakkında fikir vermektedir [32, s. 17]. Örneğin uzunluğu L olan bir şeklin alanı uzunluğun karesi ile ($A \sim L^2$) ve hacmi ise uzunluğun küpü L^3 ile ($V \sim L^3$) orantılı olacağı gösterilebilmektedir.

Ölçek analizinde aradaki işaret eşittir ($=$) değil yaklaşık anlamına gelen tilde ($\sim$) işaretidir. Böylece ifadenin tam karşılığından ziyade ifadenin hangi değişkenlerle orantılı olduğu görülmektedir. Örneğin kuşun hareketi modellenirken canlının boy, en ve kalınlık boyutları farklı olmasına rağmen canlının kütlesi yoğunluk (ρ) ile boyunun küpünün (L^3) çarpımı olarak orantılanabilir.

Burada iki önemli ayrıntı vardır. Birincisi, bir boyut diğerinden basamak değeri olarak çok büyükse basamak değeri büyük olanların skala olarak hesaplamaya dahil edilemeyeceğidir. Örneğin boy, genişlik ve derinlik değerleri bilinen bir gemi için derinlik ve genişlik basamak mertebesinde birbirine yakındır. Dolayısıyla $B \sim D$ olarak düşünülebilir. Geminin deplasman hacmi $\Delta \sim L \times B \times D$ olarak değil de $\Delta \sim L \times D^2$ olarak yazılabilir.

İkinci önemli nokta ise ölçek analizinin bize sunduğu yaklaşımda katsayılar olsa bile denklemlerdeki değişkenlerin değişmesiyle sabit kaldıklarından bu katsayıların denklem üzerinde hep sabit etkilerinin olmasından dolayı genelde gösterilmemesidir. Örneğin yukarıda yazılan deplasman formülünde ($L \times D^2$) ifadesinin başında bir katsayı her zaman vardır ama katsayı olmadan ifadedeki değişkenlerin ifadeyi ne kadar değiştirdiğini görebiliriz. Katsayı eklendiği zaman ise ifadenin yaklaşık olarak neye eşit olduğunu görmemiz mümkündür. ($L \times D^2$) ifadesi için katsayı C_b olarak bilinen blok katsayısıdır.

Ölçek analizi mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bahrami vd. [33] termal temas direncini ölçek analizi yardımıyla modellemiştir. Dowell [34] ses ötesi potansiyel kararsız akışların ölçek analizleri yardımıyla lineer ve lineer olmayan dinamiğini modellemiştir. Capobianchi ve Aziz [35] dikey yüzeyler üzerinde doğal taşınım akışını ölçek analizi metodunu kullanarak

modellemişlerdir. Bununla beraber ölçek analizi metodu yapısal gelişim teorisi uygulamalarında [23], [30], farklı ısı transfer problemleri çözümlerinde [32] ve termodinamik uygulamalarda [36] başarıyla kullanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı yapısal gelişim teorisi yardımıyla tabiattaki ve araçlardaki (hareketli sistemler) boyut ile performans arasındaki ilişkiyi incelemektir. Boyut ve performans arasındaki ilişkinin bir örneği olarak sosyal organizasyonun oluşumu fiziksel olarak modellenerek kişi sayısı arttıkça yani topluluk boyutu büyüdükçe verimin nasıl değiştiği araştırılmıştır. Bununla beraber kütle arttıkça araçlarda ve canlılarda maksimum ve optimum hızın değişmesi diğer bir inceleme alanı olmuştur. Canlılarda ve araçlarda maksimum hızın belirlenmesi için hareketin iki bileşenini (ivmelenme ve seyahat) dikkate alarak yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Ortamın vücut büyüklüğüne olan etkisi de yine araştırılan konulardan birisi olmuştur. Aynı zamanda boyut ile maksimum seyahat mesafesi arasındaki ilişki de gösterilmektedir. Canlıların ve araçların boyutları ile popülasyon sayıları arasındaki ilişki ampirik veriler ile desteklenmiştir. Boyut ile gemi ve hava taşımacılığında birim kütle başına harcanması gereken güç arasındaki ilişki hem teorik analizlerle hem de ampirik verilerle sunulmuştur. Gemiler için yük taşıma kapasitesi (DWT) ile hem güç hem de toplam gemi kütlesi (deplasman) arasında korelasyon düzeyi yüksek yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Canlılarda ve araçlarda boyut çok önemli bir kriter olduğu için verim, optimum hız, maksimum hız gibi tüm performans göstergelerine etkisi bulunmaktadır. Boyut büyüdükçe sistem verimleri artmaktadır. Optimum hız boyut arttıkça artmaktadır. Maksimum hızın hangi boyutta olduğu devamlı yapılan hareketin türü (ivmelenme ya da seyahat) belirlemektedir. Ayrıca büyük boyuttakiler daha uzun mesafelere gidebilmektedir. Bununla beraber canlıların ve araçların popülasyon sayısı ile boyut arasında bir ilişki mevcuttur ve bu çok sayıda küçük, az sayıda büyük şeklinde kademeli bir yapıdadır.

Sosyal Organizasyonlara Termodinamik Bakış Açısı

Bu bölümde insanların bir araya gelmesine bağlı olarak oluşan yapı olarak tanımlayabileceğimiz sosyal organizasyon olgusu, termodinamik bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Bu olgunun modellenmesinde fizik temelleri dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Fiziksel modellemeyi temel alan bu organizasyon çalışması; toplum dinamiği, ekonomi, kentsel tasarım ve tabiat ile teknolojiadaki gelişimsel tasarım alanlarında gözlemlenebilir bir ilerlemeye dayanan, büyüyen bir etki alanı oluşturmaktadır [1], [20], [37]–[43].

Bu bölümde yapılan analizler yeryüzündeki tüm hareket türlerinin aşağıda belirtilen ön kabulleri esas alınarak yapılmıştır.

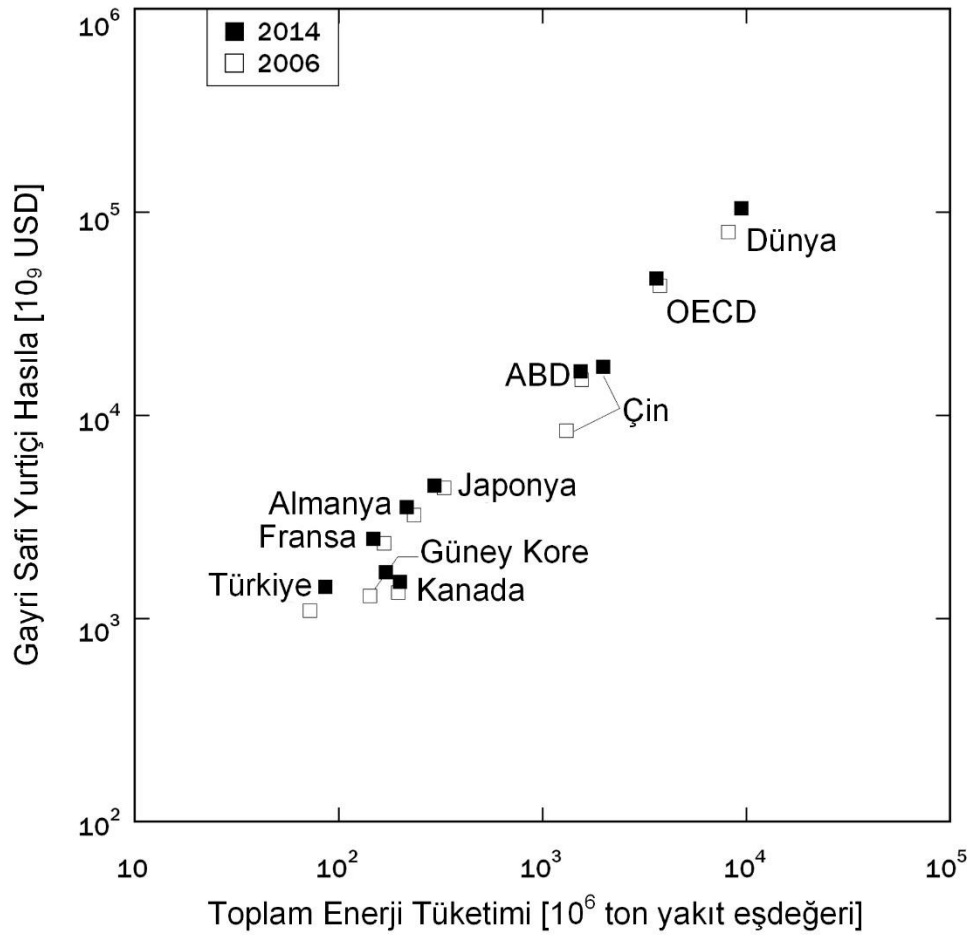
1. Hiçbir şey kendini hareket ettirecek bir kuvvet olmadıkça harekete başlamaz.
2. Güç, canlıların yiyecek, makinelerin ise yakıt tüketimi sonucunda ortaya çıkar.
3. Hareket, daha az direnç olan yollara doğru yönelir.
4. Birlikte hareket etmek, tek başına hareket etmekten daha kolaydır. Örneğin ulaşımda, büyük bir araçta birim yük başına harcanan yakıt, küçük bir araca göre daha düşüktür. Benzer şekilde canlı hareketlerinde, hareket eden canlının birim kütlesi başına tüketilen yiyecek karşılaştırıldığında bir filin tüketeceği yiyeceğin bir antilobunkinden daha düşük olduğu görülmektedir. Akış sisteminin büyümesiyle enerji yasasına bağlı olarak enerji santrallerinin değerlendirildiği çalışmalarda boyut arttıkça verimin de arttığı ortaya konulmuştur [36].
5. Sonlu bir alanda ve sonlu bir hacimde büyüyen akış yapıları az sayıda büyük ve çok sayıda küçük kanalların birlikte oluşturdukları bir sistem olarak

* Bu bölüm 13.06.2019 tarihinde “Social organization: The thermodynamic basis” başlığıyla International Journal of Energy Research (42/12) dergisinde yayınlanmıştır (DOI: 10.1002/er.4093).

(nehir havzaları, akciğerler, yıldırım, şehir ve hava trafiği, kar taneleri gibi) dallı kademeli bir yapıya sahiptir.

6. Toplumda yıllık yakıt tüketimi gayri safi yurt içi hasıla ile doğru orantılıdır [23].

7. Bir bölgedeki hareketin kademeli; yakıt tüketiminin dolayısıyla enerji tüketiminin fiziksel sonucu olmasından ve tüketilen yakıt miktarının da zenginlikle doğru orantılı olmasından dolayı akışın homojen olmayan bir şekilde dağıtıldığını göstermektedir.



Şekil 2.1 Dünyadaki bölgelerin ve ülkelerin gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) değerine karşı yıllık yakıt tüketimi [44]

Sosyal organizasyonun fiziksel olarak modellenmesinde insanoğlunun daha verimli, daha ekonomik olarak hareket etmek için yakıt ve diğer enerji tüketimindeki kayıpları azaltma eğilimi dikkate alınmıştır. Bu bölümde,

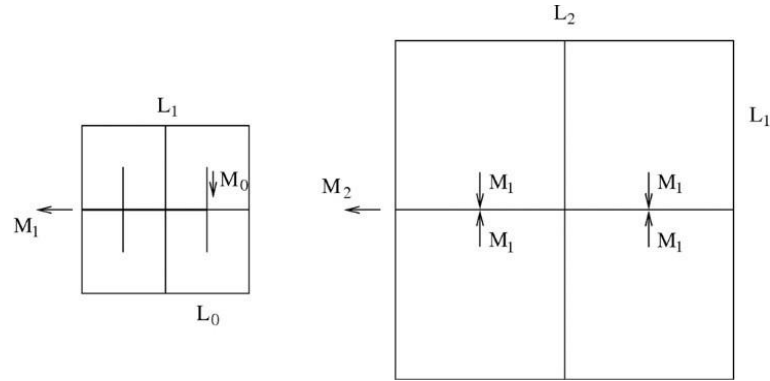
literatürdeki çalışmalar ile sosyal organizasyon arasında bağlantı kurularak sosyal organizasyon konusu termodinamik modeller ile açıklanmaktadır.

2.1 Nehir Akışı

Yapısal gelişim teorisinin temelini oluşturan akış sistemleri için gösterilebilecek en iyi örneklerden birisi nehir akışıdır. Nehir akışındaki hareket bir alanda homojen olmayan dağılım ile yani kendiliğinden gerçekleşir. Nehir morfolojisindeki klasik çalışmalar akarsu yataklarının tüm boyutlarına ait yapıların ampirik kurallara uyduğunu göstermiştir [45]–[48]. Örneğin Horton Kuralı'na [44] göre yaklaşık dört nehir kolu bir ana kanalı oluşturmaktadır ($n = 4$). Kenarı L_1 olan kare bir alandan 4 kollu akış yapısının oluşumu Şekil 2.2'de gösterilmiştir. En küçük kolların sayısı $n_0 = 4^k$ olarak kabul edilirse tüm havzadaki nehir kollarının sayısı Denklem (2.1) ile hesaplanır.

$$P_k = n_0 + \frac{1}{4}n_0 + \frac{1}{16}n_0 + \dots + 1 = \frac{4^{k+1} - 1}{4 - 1} \quad (2.1)$$

Burada k havzasındaki dört kollu yapının kaç kademeli olduğunu göstermektedir. Ayrıca $n_0/4$ ilk dört kollu yapıdaki ana kanal sayısını göstermektedir. “1” ise bölgedeki tüm akışı taşıyan büyük nehri temsil etmektedir.



Şekil 2.2 Dört kollu akışın oluşturduğu bir sistem (solda), daha sonra birleşerek yine 4 kolu başka bir sistemin oluşumu (sağda)

Her kanalın hareketi akış debisinin ve uzunluğunun bir sonucudur. Bu hareket su kanalındaki akışın kanal boyunca akması için harcanması gereken güçle doğru orantılıdır.

Modelde her bir nehir kolu M_0 kütle debisini $L_1/4$ mesafesinde taşımaktadır. Ana nehir ise toplam $M_1 = 4M_0$ kütle debisini $L_1/2$ mesafesinde taşımaktadır. En küçük akarsu kolundaki ve ana kanaldaki hareket sırasıyla $M_0L_1/4$ ve $M_1L_1/2$ ile orantılıdır. Buradan hareketle ana kanaldaki hareketin herhangi bir nehir kolundakinden 8 kat, kendi 4 nehir kolunun birleşiminden ise iki kat daha fazla olduğu söylenebilir. Tüm akarsu havzasındaki hareketin toplamı ise Denklem (2.2) ile hesaplanır.

$$W_k = n_0 M_0 \frac{L_1}{4} (1 + 2 + 4 + \dots + 2^k) = n_0 M_0 \frac{L_1}{4} \frac{2^{k+1} - 1}{2 - 1} \quad (2.2)$$

Toplam hareket W_k , tüm havzadaki akarsu kanallarında (P_k) dağılmış olup yapının ilk birkaç j adımındaki hareket oranı Denklem (2.3) ile gösterilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{W_j}{W_k}, \quad W_j = n_0 M_0 \frac{L_1}{4} \frac{2^{j+1} - 1}{2 - 1} \quad (2.3)$$

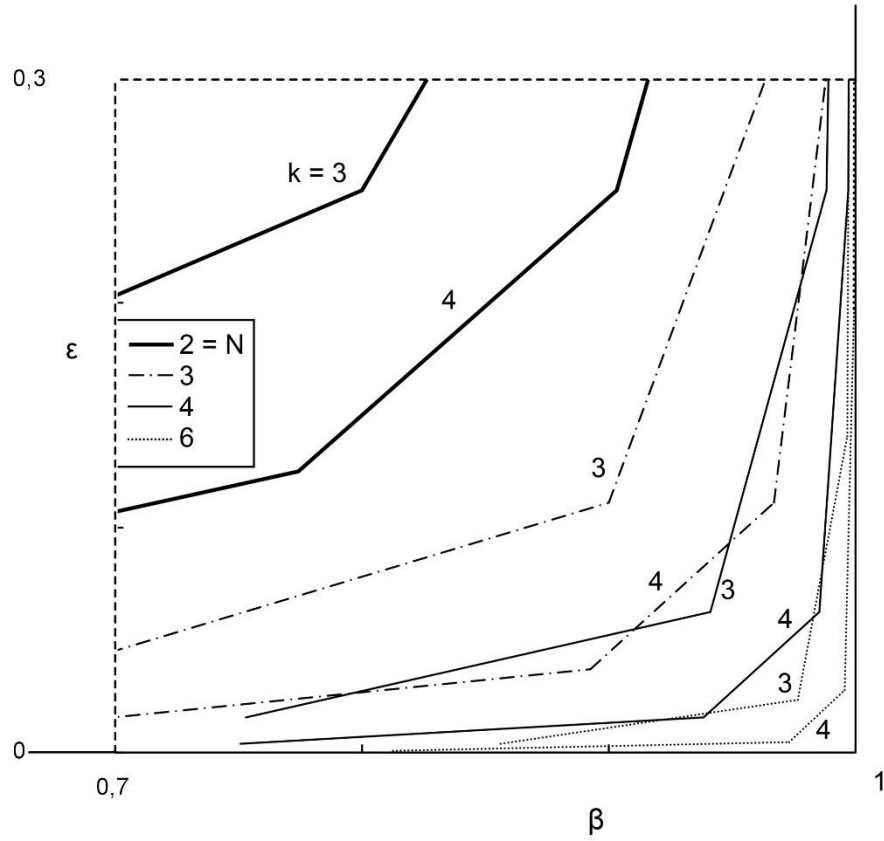
Burada ε ifadesi ilgili koldaki akış debisinin toplam akış debisine oranını göstermektedir.

Buna karşılık yapının ilk birkaç j adımında nehir kolları sayısı (P_j) Denklem (2.4) ile hesaplanır.

$$\beta = \frac{P_j}{P_k}, \quad P_j = \frac{4^{j+1} - 1}{4 - 1} \quad (2.4)$$

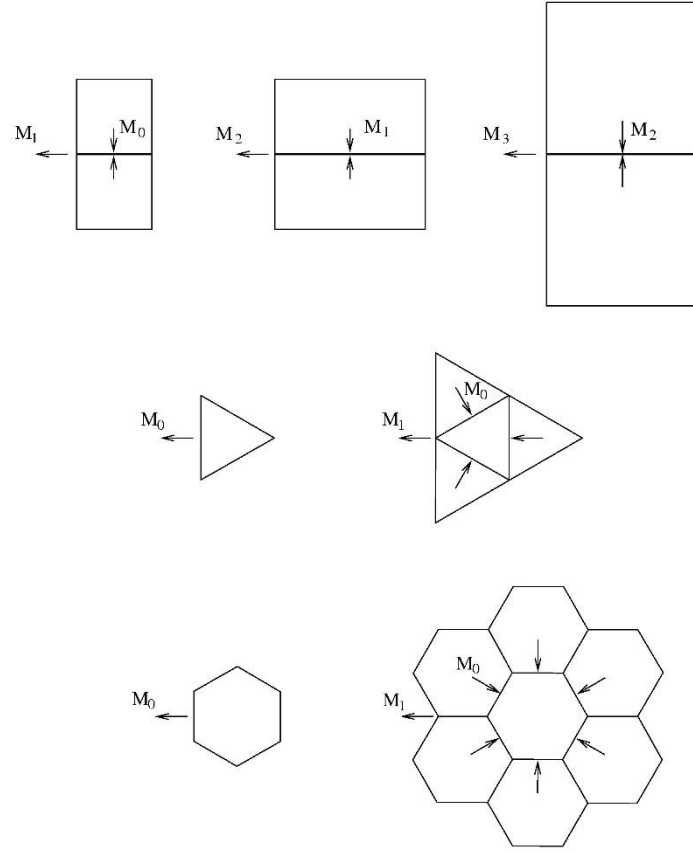
Burada β ifadesi ilgili kol sayısının toplam kol sayısına oranını göstermektedir.

Belirlenen bir j değerine göre denklem (2.3) ve (2.4) ile hesaplanan ε ve β değerlerine göre Şekil 2.3 çizilmiştir. Eğriler, sağ alt köşeye doğru yoğunluğu arttığı için hareketin incelenen alanda yüksek oranda homojen olmayan bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



Şekil 2.3 Şekil 2.2'de gösterilen nehir akışı kollarındaki debilerinin kademeli dağılımı

Benzer hesaplama Şekil 2.4'te görüldüğü üzere $n = 2, 3$ ve 6 kollu diğer yapılara da uygulanarak $\varepsilon(k, \beta)$ sonuç eğrileri Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar göstermektedir ki nehir akışlarında kademeli yapı düzeyinin yüksek ve akış yapısındaki derece (n ve k) arttıkça arttığı görülmektedir.



Şekil 2.4 2, 3 ve 6 kollu akışlardaki hareket

2.2 Sosyal Organizasyon

Sosyal organizasyonların oluşumunda birbirine zıt iki olgu öne çıkmaktadır.

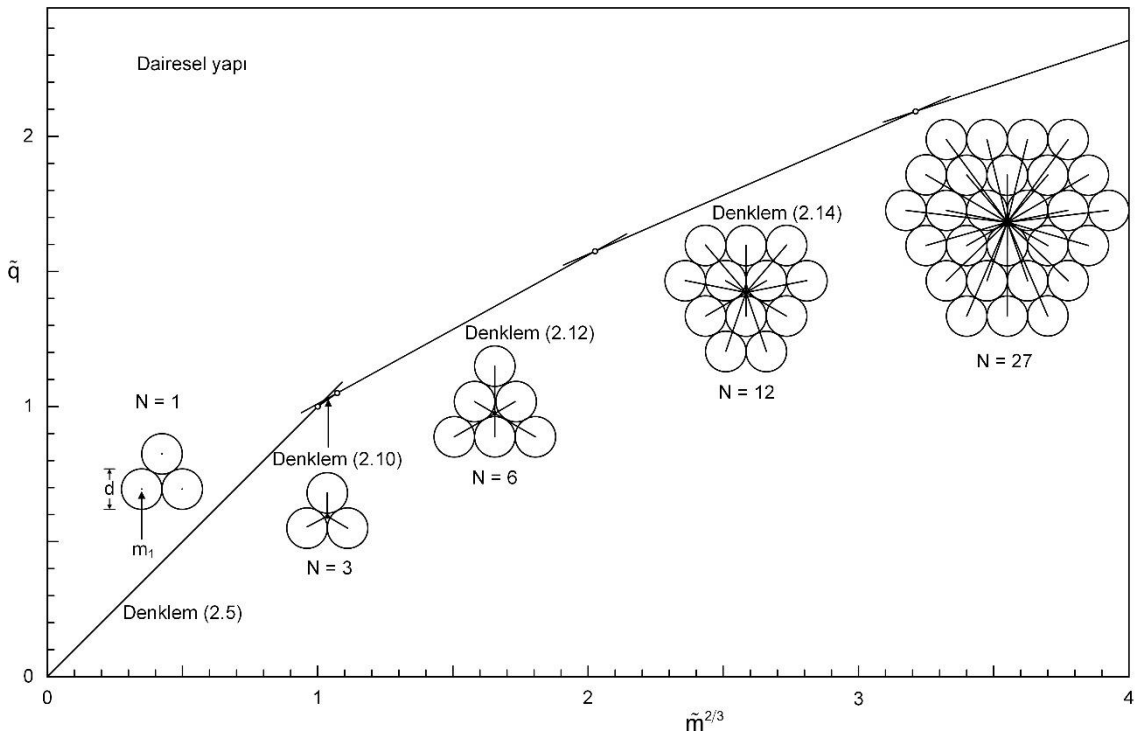
1. Ana kaynak daha büyük olduğu zaman israfın daha az olması
2. Kaynaktan kullanıcıya taşıma yapılırken mesafe uzadıkça kayıpların artması

Sosyal organizasyonu açıklamak için tarih boyunca daha iyi yiyecek, barınma (sıcaklık), hijyen, sağlık vb. işler için gerekli olan sıcak suya erişim modeli kullanılmıştır. Sıcak suyun kullanıcılar arasında homojen şekilde paylaşıldığı kabulü yapılmıştır. Şekil 2.5 bir yerleşim biriminde üretilen sıcak suyu kullananların sayısını göstermektedir. Ayrıca şekil 2.5'in sol alt köşesinde sıcak suyun bireysel üretildiği ve üretilen bu sıcak suyun yine üreten tarafından

tüketildiği kısım ($N = 1$) görülmektedir. Burada N ifadesi kullanıcı sayısını göstermektedir.

Sıcak su modelinin temel özelliği, bir yerleşim biriminin birim zamanda kullandığı suyun miktarını göstermesidir (m_1 , kg). m_1 miktarı zamanla yaşam standartlarının artmasıyla artmaktadır. Diğer bir temel özellik ise bireysel yerleşim alanının boyutudur. Temel alan d ölçek uzunluğuna sahip olup zamanla değişmemektedir. Sıcak su kullanımı (m_1) yerleşim alanında d^2 ölçeğindeki alanlara paylaştırılmıştır.

Suyun ya da bir evin ısıtılması sürecinde ısı kaybı meydana gelmektedir. Bu kayıp yakıt israfına neden olmaktadır. Tüm insanlık tarihi boyunca, yakıt zor bulunan bir ihtiyaç olmuştur. Yakıtı bulabilmek, toplayabilmek, taşıyabilmek ve ısı kayıplarını azaltan kapalı bir alanda yakabilmek efor sarf ederek ve zaman harcayarak mümkün olmuştur. Bu yüzden, bu modelde insan hareketliliğini (hayatını) kolaylaştırmak anlamına gelen yakıt israfını azaltmaya yönelik eğilimi içeren sıcak su kullanımının gelişimsel yönelimi temel alınmıştır.



Şekil 2.5 Kullanıcı sayısına göre dairesel yapının oluşturduğu ısı kayıpları

m_1 miktarındaki su ısıtılırken çevreye kaybedilen ısı miktarı, suyun ısıtıldığı kabın yüzeyi ile doğru orantılıdır. Kap küresel kabul edilirse çapı D_1 olan kabın yüzey alanı D_1^2 ile doğru orantılıdır. Ayrıca kütlesi ise yoğunluğun (ρ) ve çapın küpünün

(D_1^3) çarpımı ile orantılıdır ($m_1 \approx \rho D_1^3$). Kaybedilen ısı ise $q_1 \approx U D_1^2 \Delta T$, olarak belirlenir. Burada U kabın ve ortamın sıcaklıkları arası farkla (ΔT) ilişkili toplam ısı transfer katsayısıdır. Bu yaklaşıma dayanarak denklem (2.5) elde edilir:

$$q_1 = a m_1^{2/3} \quad (2.5)$$

Burada $a = \rho^{-2/3} U \Delta T$ olup sabit kabul edilmiştir.

Denklem (2.5), bireysel sıcak su ihtiyacının artmasıyla ısı kaybının artacağını göstermektedir. Kullanılan su miktarının artışı ve buna bağlı olarak yakıt israfının (ısı kaybının, q_1) da artmasından dolayı yakıt ihtiyacı zamanla artmaktadır. Yakıt israfının artışının yavaşlatılması ise sosyal organizasyon ile mümkün olmaktadır.

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere üç haneli bir topluluk ($N = 3$), merkezlerindeki bir ısı kaynağından sıcak sularını ($3m_1$) temin etmektedir. Denklem (2.5) ile hesaplanan sıcak su kaynağından kaybedilen ısı miktarı ($3m_1$)^{2/3} değerine eşit olur. Ancak kazan yüzeyindeki ısı kaybı tek ısı kaybı değildir. Sıcak suyun merkezden üç kullanıcıya taşınması sırasında başka ısı kayıpları da meydana gelmektedir. Her bir kayıp taşıma mesafesi olan $d/2$ ile doğru orantılıdır. Ateşin üstünde ısıtılan su $d/2$ mesafesindeki kullanıcıya geçmişte el ile taşınmaktayken günümüzde bir kullanıcıya $d/2$ uzunluğundaki bir boru ile taşınmaktadır. Taşıma sırasında meydana gelen ısı kaybı her iki durumda da $d/2$ (yani $U_p \cdot D_p \cdot \Delta T \cdot d/2$) ile doğru orantılı olacaktır. Burada D_p ve U_p sırasıyla boru çapı ve boru ile ortam arasındaki toplam ısı transfer katsayısıdır. Dolayısıyla organize olmuş üç kullanıcıya sıcak su taşınmasından meydana gelen toplam ısı kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$q_3 = a(3m_1)^{2/3} + 3 \frac{1}{2} db \quad (2.6)$$

Burada b değeri $U_p \cdot D_p \cdot \Delta T$ ifadesine eşit olan sabit bir değerdir.

Denklem (2.5) ve (2.6) yardımıyla sıcak suyun bireysel dağılımından organize hale geçişi Denklem 2.7'ye göre hesaplanır.

$$m_{tr}^{2/3} = \frac{bd}{a} \frac{1/2}{1 - 3^{-1/3}} \quad (2.7)$$

Burada m_{tr} bireysel kullanımdan toplu kullanıma geçişteki bireysel olarak kullanılan su miktarıdır.

Taşınan sıcak su miktarı ve ısı kaybı Denklem (2.8) ile boyutsuzlaştırılabilir.

$$\tilde{m} = \frac{m_1}{m_{tr}} \quad \tilde{q} = \frac{\text{kullanıcı başına ısı kaybı}}{q_{tr}} \quad (2.8)$$

Burada q_{tr} 'nin geçişteki q_1 (ya da $\frac{1}{3}q_3$) değeri olmaktadır.

$$q_{tr} = \frac{bd / 2}{1 - 3^{-1/3}} \quad (2.9)$$

Geçişten önce ($\tilde{m}^{2/3} < 1$) ısı kaybındaki artış ($\tilde{q}$) kullanılan sıcak suyun miktarındaki artışa bağlı olarak $\tilde{q} = \tilde{m}^{2/3}$ şeklinde bulunur ve Şekil 2.5'te sol altta bulunan Denklem (2.1)'in eğimiyle gösterilmektedir. Geçişten sonra çizginin eğimi azalmaktadır.

$$\tilde{q} = 3^{-1/3} \tilde{m}^{2/3} + 1 - 3^{-1/3} \quad (2.10)$$

Zamanla daha çok sayıda kullanıcının oluşturduğu organize grup kendi başına yaşayan organize olmamış bireylere göre sıcak su taşımalarını daha ekonomik olarak gerçekleştirir. Boyutu $6m_1$ olan bir merkezi ısıtıcıdan sıcak su taşımaları yapan 6 kişilik bir grup için üçü $d/2$ uzunluğunda, üçü de d uzunluğunda altı adet dağıtım hattı gerekir. Denklem (2.6)'nın yerine, Şekil 2.5'te $N = 6$ ile gösterilen organizasyon nedeniyle meydana gelen toplam ısı kaybı denklem (2.11) ile hesaplanır:

$$q_6 = a(6m_1)^{2/3} + 3\frac{1}{2}db + 3db \quad (2.11)$$

Bu yeni grupta altı kullanıcı vardır dolayısıyla kullanıcı başına ısı kaybı $1/6 q_6$ 'dır ve Şekil 2.5'te bulunan eğrinin üçüncü parçasıyla gösterilmektedir:

$$\tilde{q} = 6^{-1/3} \tilde{m}^{2/3} + \frac{3}{2}(1 - 3^{-1/3}) \quad (2.12)$$

Bu çizgi denklem (2.10) ile $\tilde{q} = 1,033$ iken $\tilde{m}^{2/3} = 1,072$ değerinde kesişir. Kesişim noktası ikinci geçişi göstermektedir. Bireysel tüketim (m_1) artarken yakıt

tüketimi yavaşlamaktadır. $N = 3$ 'ten $N = 6$ 'ya olan eğim, $N = 1$ 'den $N = 3$ 'e olan eğimden daha azdır. Bu, daha büyük boyutlar ve karmaşıklıklar doğrultusunda tüm organizasyon dizisini gösteren Şekil 2.5'teki azalan verimler olgusunun bir göstergesidir.

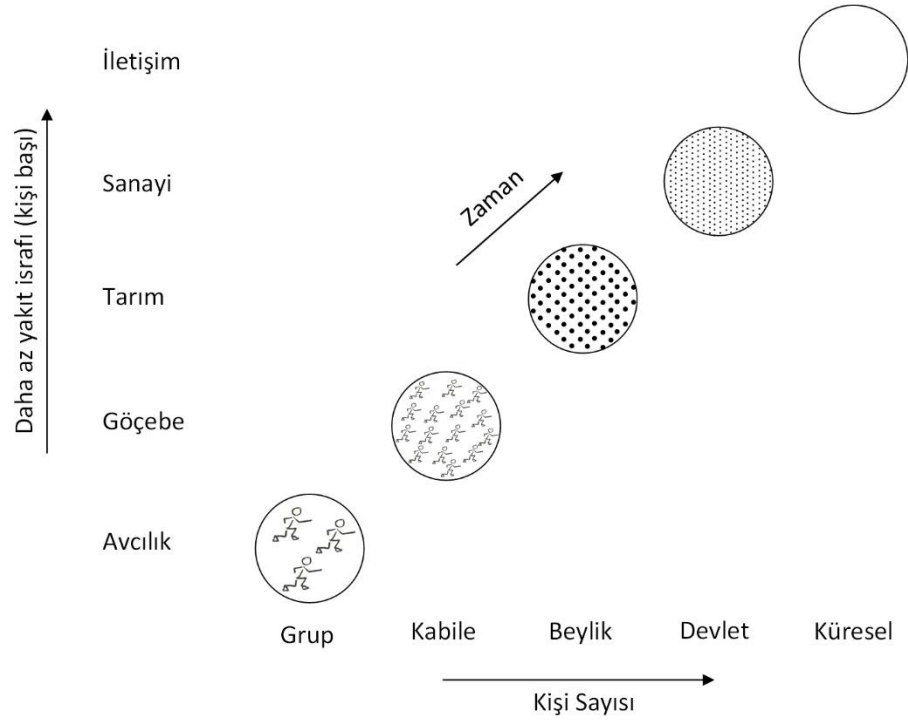
Daha fazla birey daha kolay yaşam için organize olur. İhtiyaçları büyüdükçe, organizasyonlarının boyutu ve karmaşıklığı artar. Organizasyon gruplarının adım adım büyümesiyle organizasyonun zamanla daha verimli olduğunun gösterilmesi adına analizlere daha çok kullanıcı ($N = 12, 27$ ve 48) eklenmiştir. Şekil 2.5'teki kullanıcı sayıları sıcak suyun merkezi ısıtıcıdan doğrudan grubun tüm üyelerine dağıtılmasından dolayı dairesel bir akış yapısına sahiptir. Örneğin on iki kullanıcıya $12m_1$ boyutundaki bir ısıtıcı ile tedarik yapılmaktadır. Kullanıcılara sıcak suyun düz hatlar ile dağıtılması nedeniyle ortaya çıkan ısı kayıpları $d/2$ uzunluğundaki üç hat, d uzunluğundaki üç hat ve $3d/2$ uzunluğundaki altı hat kullanılarak gerçekleşir. Toplam ısı kaybının hesabı Denklem (2.13)'de gösterilmiştir.

$$q_{12} = a(12m_1)^{2/3} + 3\frac{1}{2}db + 3db + 6\frac{3}{2}db \quad (2.13)$$

Kullanıcı başına ısı kaybı $1/12 q_{12}$ 'dir. Denklem (2.13)'ün Şekil 2.5'te boyutsuz gösterimi Denklem (2.14)'de verilmiştir.

$$\tilde{q} = 12^{-1/3} \tilde{m}^{2/3} + \frac{27}{12} (1 - 3^{-1/3}) \quad (2.14)$$

Denklem (2.12) ve (2.14)'ün kesişimi ile üçüncü geçiş bölgesinde $\tilde{q} = 1,575$ değerine karşılık su kullanım miktarı $\tilde{m}^{2/3} = 2,026$ olarak bulunur. 27 kullanıcılı sıcak sisteminin analizi de aynı yolla gerçekleştirilir.



Şekil 2.6 Sosyal organizasyon türleri

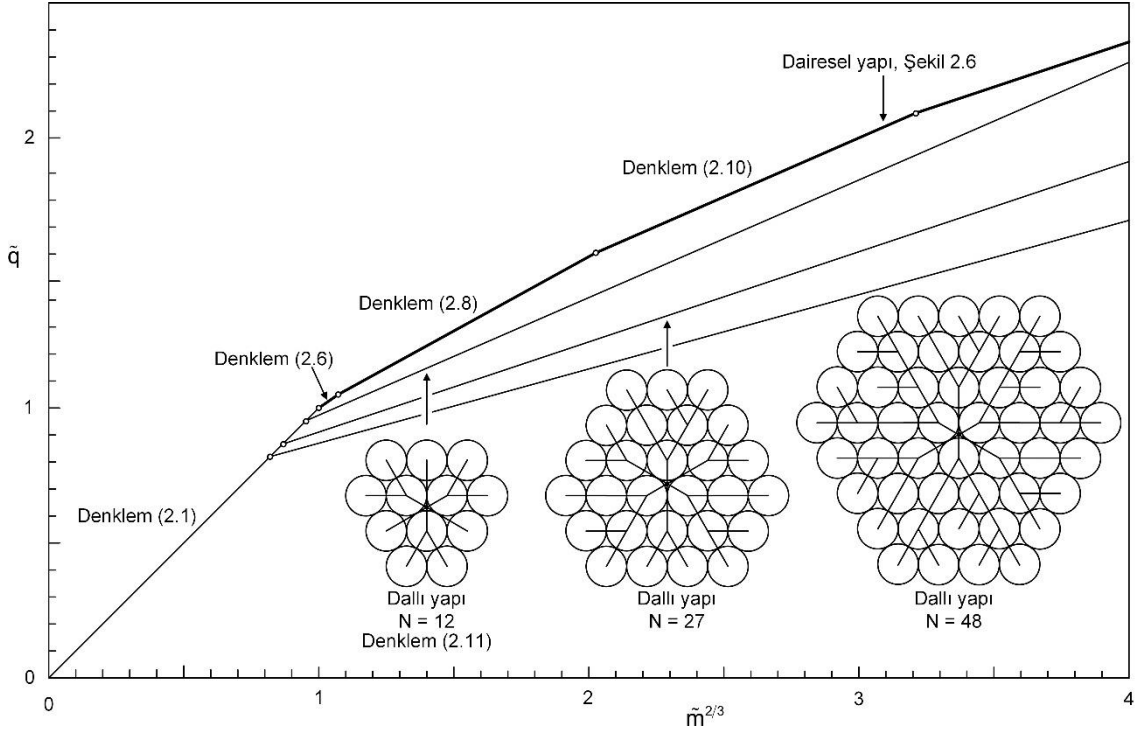
Şekil 2.5'teki yatay eksen toplumun zamanla gelişimi Şekil 2.6 ile aynı doğrultudadır. Bireyleri besleyen ve bağlayan akışın organizasyonu bir akış yapısından yenisine geçer. Organizasyonun yapısı en fazla yakıt ekonomisini sağlayacak şekilde gelişir. Organize akışların gelişimi Şekil 2.5'te gösterilmiş olan beş akış yapısı tarafından temsil edilen eğimlerde görülen parçalı lineer eğriler ile gösterilmiştir.

Organizasyon, dallı yapı sayesinde daha fazla verimli hale gelebilmektedir. Şekil 2.7'de görüleceği üzere dairesel yapıdan dallı yapıya geçilmiştir. Örneğin on iki kullanıcıya doğrudan (dairese yapıda) değil de kademeli olarak nehir akışına benzer bir şekilde dallı akış yapısıyla sıcak su taşınması sağlanabilir. Bu yapı ile ısı kayıpları $d/2$ uzunluğunda üç hat ve d uzunluğunda dokuz hat kullanılmasını gerekli kılar. Dallı yapıda kullanıcı başına ısı kaybının boyutsuz ölçücüsü Denklem (2.15)'te gösterilmiştir.

$$\tilde{q} = 12^{-1/3} \tilde{m}^{2/3} + \frac{21}{12} (1 - 3^{-1/3}) \quad (2.15)$$

Kullanıcı sayısı 27 olan bir grubun dallı yapısı da benzer şekilde analiz edilmiştir. Dallı yapılar Şekil 2.7'de dairesel yapılarla karşılaştırılmaktadır. Eğrilerinin

Denklem (2.5) ile kesişimleri, dallı yapıların çevreye ısı kaybını azaltmada daha ekonomik olduğunu göstermektedir. Dallı yapılara geçiş tek merkezli kaynak etrafında sadece 3 veya 6 kullanıcılı en basit organizasyonlar için bile daha ekonomiktir.



Şekil 2.7 Kullanıcı sayısına göre dairesel ve dallı yapıda meydana gelen ısı kayıpları

Buna ek olarak, eğer iki yapının da suyun pompalanması için gerekli güç ihtiyacı değerlendirildiğinde, dallı yapıların dairesel emsallerine göre daha da ekonomik oldukları ortaya çıkmaktadır. Güç ihtiyacı, dairesel yapılardan dallı yapılara geçiş sürecinde ciddi oranda azalmaktadır. Akıştaki kullanıcı sayısı arttıkça bu azalma daha büyük oranda devam etmektedir.

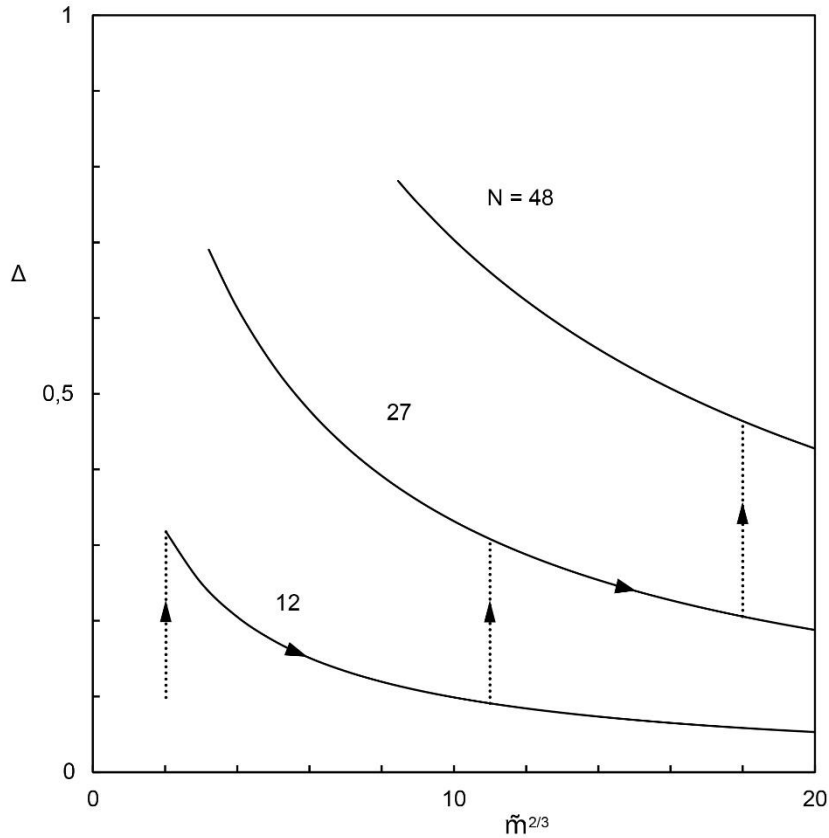
Aynı gruba (N) sıcak su taşınması sırasında dairesel yapıdan dallı yapıya geçişteki azalmaların bağıl değerleri Denklem (2.16) yardımıyla hesaplanarak Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

$$\Delta = \frac{\tilde{q}_{dairese} - \tilde{q}_{ağaçsı}}{\tilde{q}_{dairese}} \quad (2.16)$$

Δ değeri, dairesel yapıdan dallı yapıya geçişte ısı kaybında büyük oranda azalma olduğunu gösterir. Ekonomide bu durum marjinal fayda olarak adlandırılır. Δ 'nın

bağıl ölçüsü zamanla ya da m 'nin artışıyla azalır. Bu duruma azalan verimler yasası denilmektedir. Şekil 2.6'de kesikli çizgiler bu organizasyonda dairesel yapıdan dallı yapıya geçişteki farkları göstermektedir.

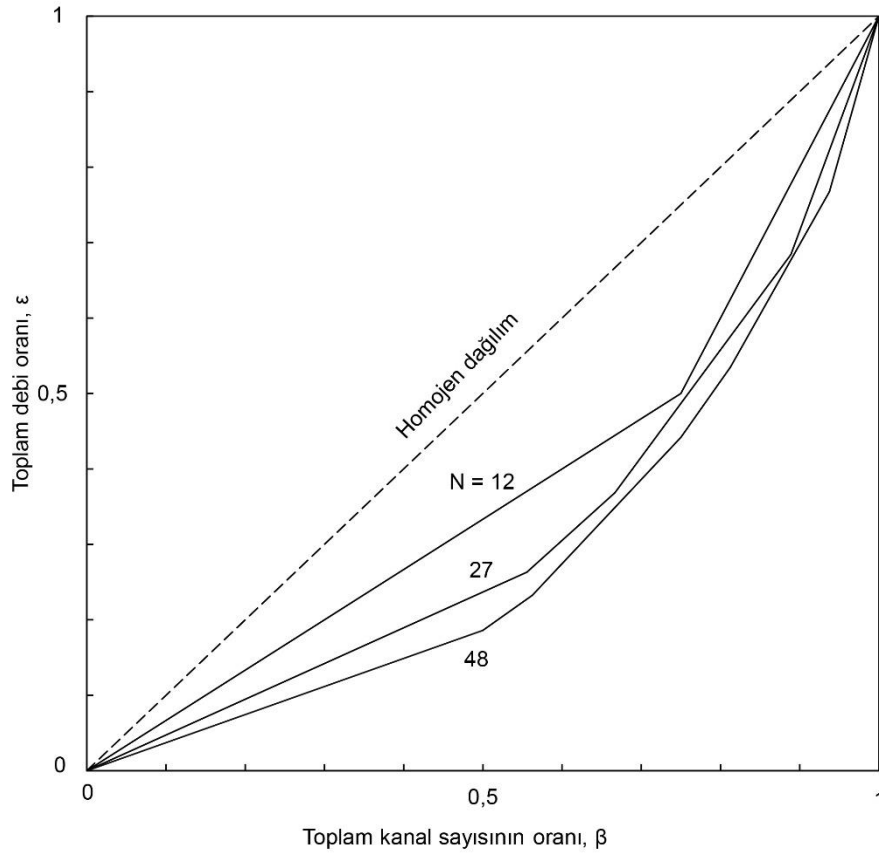
Şekil 2.5 ve Şekil 2.7'de sıcak su dağılımının gelişmesi için kullanılan model, sosyal organizasyonun doğal oluşumunun iki hayati özelliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu özelliklerden birincisi, tüm grup üyelerinin faydalandığı daha verimli bir kaynak etrafında birleşme isteğidir.



Şekil 2.8 Dağılımın dairesel yapıdan dallı yapıya dönüşmesinden elde edilen tasarruf

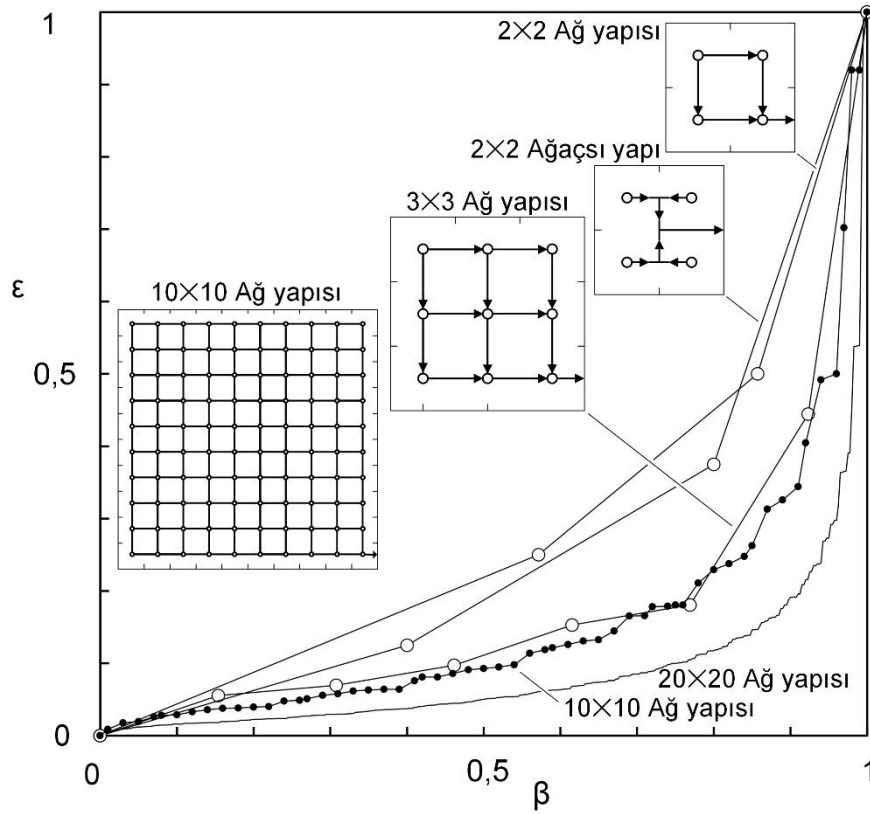
İkinci özellik ise bir büyük (merkez) kullanıcı ve birden çok küçük ve eşit (çevresel) kullanıcılar arasındaki dağılımın ara aktarma noktalarına sahip daha karmaşık kademeli yapılar ortaya çıkarmasıdır. Daha karmaşık kademeli yapılar dallı yapılar olarak tanımlanır. Sistem yapısının daha karmaşık hale gelmesini organizasyona katılan bireylerin sayılarının artmasıyla zamanla arttırmaktadır.

Şekil 2.9'da sıcak suyun bireylere homojen olmayan şekilde dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.7'deki dallı yapı için üç eğri çizildiği görülmektedir. Yatayda 0'dan 1'e dağıtımın akış kanallarının sayısı (β) gösterilmektedir. Dikeyde ise dağıtımın akış kanallarının sayısının oranına karşılık gelen toplam akış oranı (ε) gösterilmiştir. Akarsu havzalarının Şekil 2.3'teki durumu gibi parçalı lineer eğriler dışı büküktür. Eğriler, organize akış sistemlerin büyüklüğünün artmasıyla aşağı yönde kayar.



Şekil 2.9 Sıcak su akışının kullanıcı sayısına bağlı olarak oluşturduğu kademeli dağılım ve artan grup büyüklüğünün etkisi

Şekil 2.10'da görülen akışların homojen olmadığı gösterilmiştir. Kare bölgede aynı ölçülü kanallarla birbirine bağlanmış aynı elemanlar bulunmaktadır. Her elemanın merkezi küçük bir çember ile işaretlenmiştir. Her merkez komşuları gibi Şekil 2.2'de sol tarafta gösterilen tek tip M_0 girişine benzer olan aynı akış girişini almaktadır. Tüm elemanlardan toplanan akış kare bölgenin bir köşesinden bir akış olarak boşaltılmaktadır.



Şekil 2.10 Toplam akış debisinin (ϵ), toplam popülasyonun (β) $n \times n$ boyutuna bağlı olarak oluşturduğu kademeli yapı

Şekil 2.10'da bireyler $n \times n$ şeklinde kare yapıda bağlıdır. $n = 2, 3$ ve 10 olmak üzere üç farklı sayıda gruplar gösterilmiştir. Bağlantı düğümünden bağlantı düğümüne $n = 3, 10$ ve 20 durumları incelenmiş olup akış debilerinin hesaplanması için akış debisinin bağlantı düğümleri arasındaki basınç farkıyla doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir. Burada n değeri için limit sonsuza giderken kare bölgede difüzyonla ısı transferi olmaktadır. Burada difüzyon sabiti tüm bölge için aynı değere sahip olup tüm bölgeden çıkan akış yüzeye düşen yağmur damlları gibi bölgenin her noktasında aynı değerde üretilir.

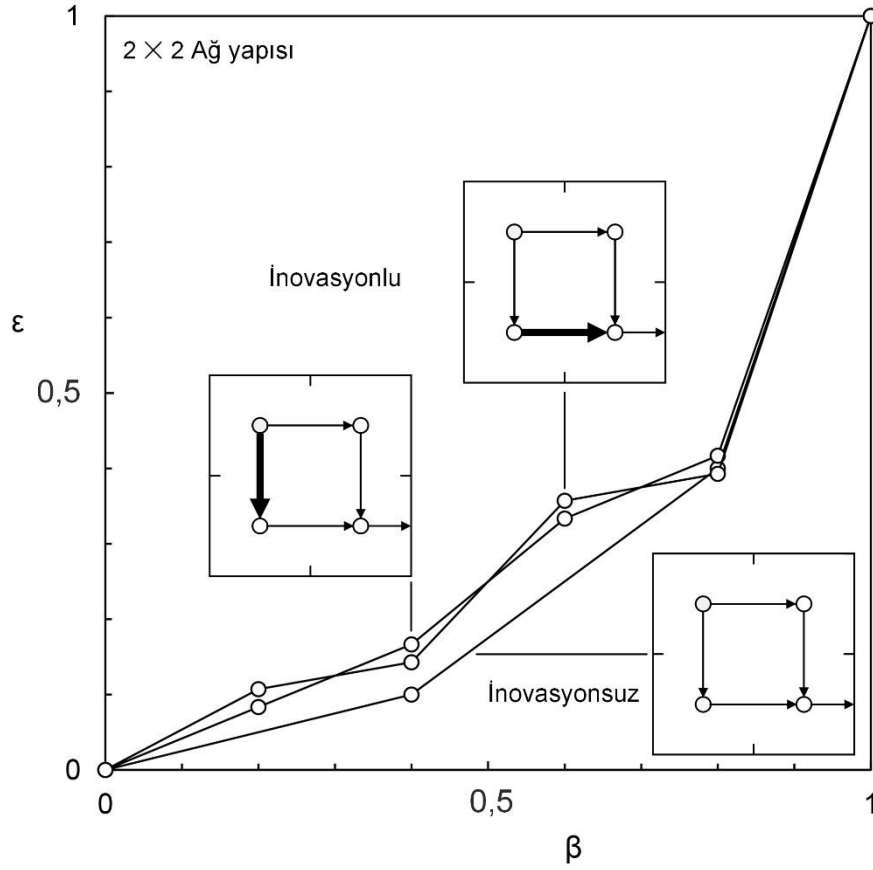
Düğüm noktalarının arasındaki bireysel akış debilerinin hesaplanmasıyla Şekil 2.10'da gösterilen ϵ - β eğrileri oluşturulmuştur. Kare bölgeden dışarı doğru akış homojen olmayan şekilde dağıtılmıştır. Toplam akış debisinin büyük çoğunluğu ($\epsilon = 1$) küçük bir kanal topluluğunda ($\beta = 1$ yakınında) toplanmıştır.

2.3 Akış Kanallarında İyileştirme

Burada akış kanallarında iyileştirme ile akış direncinin azaltılmasının sonucu incelenmiştir. Bu yerel tasarım değişikliği iyileştirme ile daha az dirence sahip olan kanaldan daha fazla akış geçmesini sağlar. Tüm bölgedeki akış da bu iyileştirmeden dolayı çoğalır ve iyileşir. Tüm grup bir tek iyileştirme sayesinde daha fazla miktardaki akışa erişebilir duruma gelebilir. Bununla beraber akış kanallarındaki iyileştirme toplumda homojen olmayan dağılımı azaltma yönünde etki etmektedir.

Bu değişimi ve sonuçlarını göstermek için Şekil 2.10'da üstte görülen 2×2 ağa dağılmış akış analiz edilmiştir. Bireyden bireye kanallar eşit olduğu zaman kanallardan geçen akışlar Şekil 2.10'da görüldüğü gibi; akış kanallarında iyileştirmenin olmadığı 2×2 ağ için ise Şekil 2.11'de görülen homojen olmayan şekilde dağılır.

Bir kanaldaki direncin bu yenilikten önceki değerinin yarısına düştüğü kabul edildiğinde, Şekil 2.11 bu değişimin gerçekleşebileceği iki muhtemel bölgeyi göstermektedir. İki durum için de ε - β akış dağılımı daha homojen ve Şekil 2.11'deki diyagonale daha yakındır. Bunun sebebi ise esasen akış debilerinin az olduğu yerlerde akış kanallarındaki iyileştirmenin akışta artış meydana getirmesidir. Tek bir iyileştirme, akışı kolaylaştıran ve iyileştirme yapılan yere daha fazla akış gelmesine neden olan yerel bir tasarım değişikliğidir. Bu sayede inovasyon ile alan üzerindeki akışın daha homojen bir şekilde dağılması sağlanabilmektedir.



Şekil 2.11 Akış sisteminde yapılan iyileştirmenin akış dağılımına etkisi

2.4 Sonuç

Harekette homojen olmayan dağılım yerleşik bir bölgede akan her şeyin bir alandan bir noktaya ya da bir noktadan bir alana akışı ile coğrafyaya ve fiziksel gerçekliğe bağlıdır. Bir topluluğun üyeleri birbirlerine eşit şekilde bağlı oldukları zaman (Şekil 2.10), kaynağın yanına yerleşmiş olan bireyler, çevredekilere daha büyük bir akışa sahip olacaklardır. Bu durum sadece insanların toplumsal organizasyonunda değil nehir akışı gibi tabii sistemlerde de görülmektedir. Organizasyon, gruplaşmadan türemiş marjinal faydadan ortaya çıkmaktadır.

Matematiksel olarak bireyler arasındaki akışları homojen yapmanın tek yolu tüm bölgede tahliye noktalarının tekdüze dağılmasıdır. Diğer bir deyişle, her bir düğüm noktası komşuları gibi aynı akış girdisini almalı ve aynı şekilde tahliye etmelidir. Bu durum sistemsiz bir sosyal organizasyondur. Her birey kendi başına hayatta kalır, komşularına bağlı değildir.

Özet olarak bu bölümde sosyal organizasyon olgusu termodinamik yaklaşımla açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca bir alandaki sosyal organizasyon, az sayıda büyük ve çok sayıda küçük akış kanalının oluşturduğu kademeli bir yapıyı meydana getirir. Kademeli yapı ise homojen olmayan dağılıma neden olmaktadır. Bütün büyük akış yapısının veriminin yerel tasarım iyileştirmesi ile tüm toplum için faydalı olduğu da görülmüştür.

Araçlarda ve Canlılarda Performans - Boyut İlişkisi

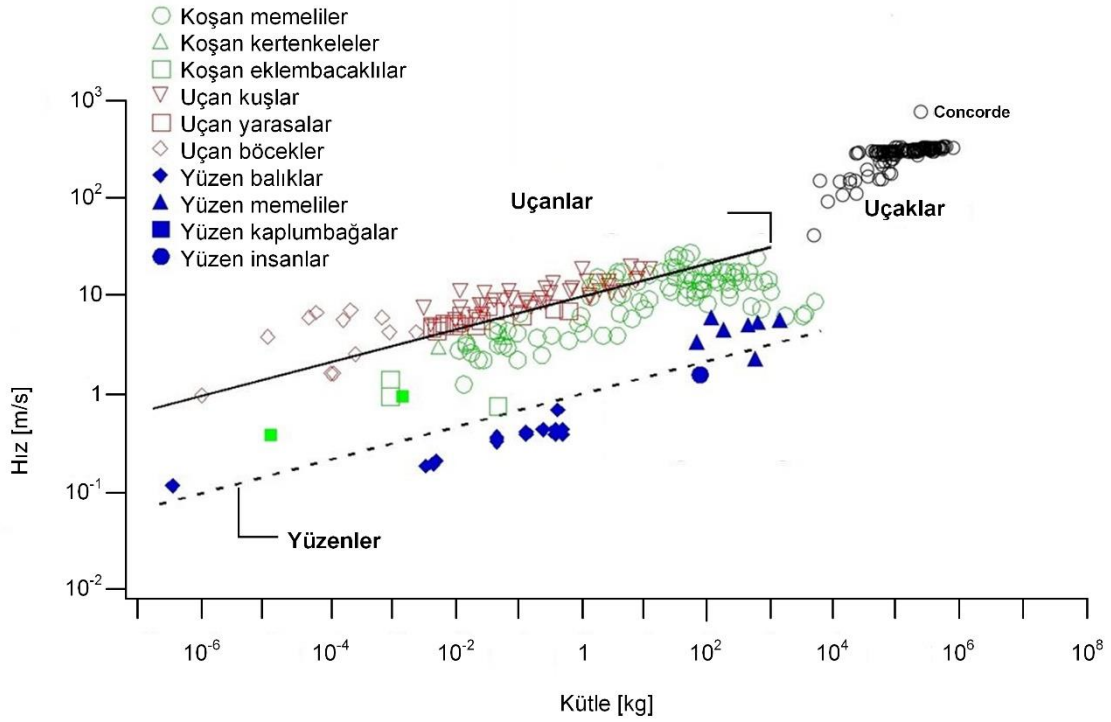
Canlılar ve araçlar için boyut büyük bir öneme sahiptir. Çünkü boyuta bağlı olarak canlılar ve araçların performansı değişmektedir. Büyük canlılar ve araçlar, suda, karada ve havada daha hızlı hareket etme eğilimindedir. Bu eğilim; uçan, koşan ve yüzen canlılar için birçok kaynaktan toplanan hız büyüklüğü verileriyle desteklenmektedir (Şekil 3.1) [49]. Bu eğilime uymayan örnekler de bulunmaktadır. Örneğin çitanın koşma hızı, filin sabit hızından daha büyüktür, ton balığı balinadan daha hızlı yüzebilir. Genel eğilimden daha uzakta olan bazı istisnalar da vardır ancak bunların en hızlı koşanlar, yüzenler ve uçanlar ile karıştırılmaması gerekir. Örneğin hız-kütle teorisinin [49] öngördüğünden çok daha büyük hızlarda sıçrama yapan pire gibi canlılar da bulunmaktadır. Bir karınca türü olan *Odontomachus*'un hızı tehlikeden kurtulmak için kenara atlayacağında 200 km/s'yi bulmaktadır ama bu tek seferlik bir olaydır ve sürekli bir hareket değildir. Ancak yaşamlarının çoğunda bu karıncalar, hız-kütle teorisine uygun olan karınca hızında karada yürümeye devam ederler [49].

Hirt vd. [50] en hızlı canlıların hareketindeki başlangıç dönemi olan ivmelenmeyi hesaba katan bir modelle canlı hareketinin boyut-hız teorisine uymayan durumunu açıklamaya çalışmıştır. Modelde hızın beden boyutunun iç bükey bir fonksiyonu olarak ortaya çıktığı gösterilmektedir. Ayrıca en yüksek hızın en büyük beden boyutundan ziyade başka bir boyutta gerçekleşebileceğini de göstermektedir (Şekil 3.2). Yerde uzun süre dinlendikten sonra yüksek ivmelenme hızına sahip avlanan canlıların ve savaş jetlerinin tasarımının da en yüksek hıza karşılık bir beden boyut trendinin olduğu gözlemlenmiştir [51].

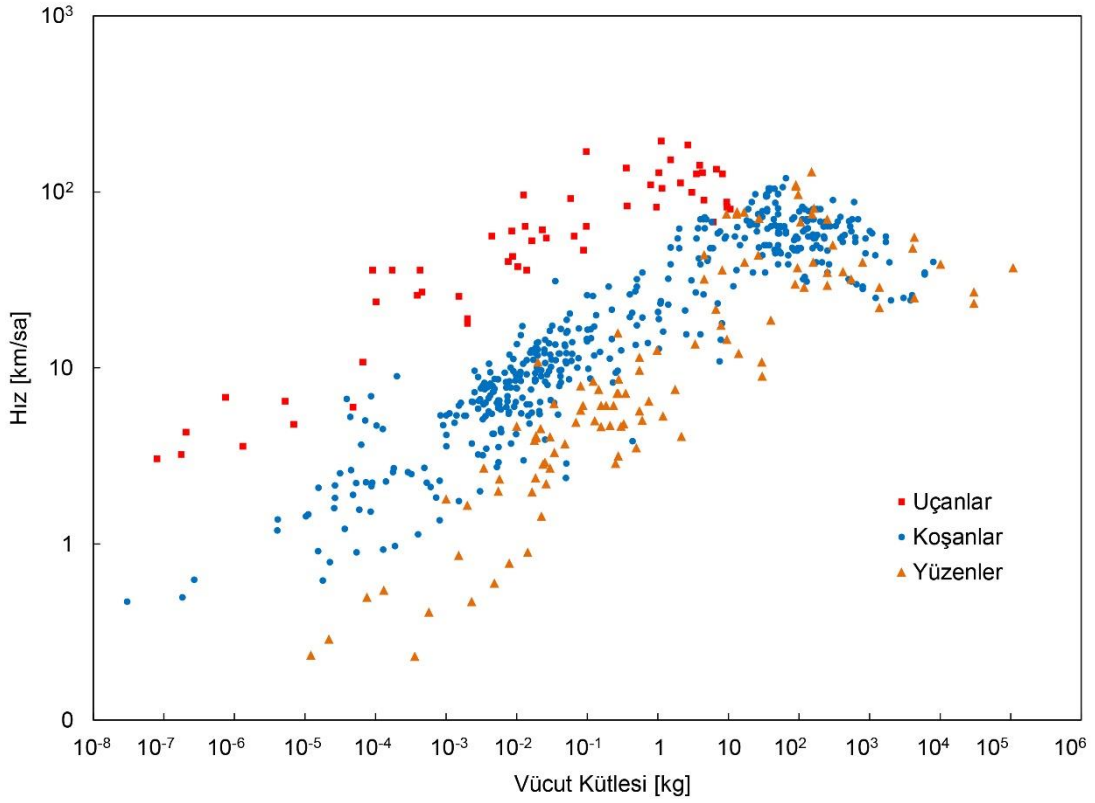
Bu bölümde hareketin bu fiziksel yönünü dikkate alınarak, canlıların ve araçların ömrü boyunca yaptığı hareket için birleştirici teori bir [52] geliştirilerek

* Bu bölüm 27.08.2019 tarihinde "The fastest animals and vehicles are neither the biggest nor the fastest over lifetime" başlığıyla Nature Scientific Reports (8/1) dergisinde yayınlanmıştır (DOI: 10.1038/s41598-018-30303-1).

açıklanmıştır. Bu yeni teori ile Şekil 3.1'deki uçakların neden uçan canlılarla boyut-hız ilişkisi bakımından aynı hizada olmadığını da açıklamaktadır. Uçak verileri canlı hızı-kütle trendinin üstünde bir eğilim göstermektedir. Uçak verileri uçan canlıların verilerinden daha üste bir çizgide yer almaktadır. Ayrıca bu teori en yüksek hız için vücut ölçüsünün yüzenlerden koşanlara ve uçanlara doğru neden azaldığını da açıklamaktadır.



Şekil 3.1 Uçan, koşan ve yüzen canlılar için kütle-hız değerleri (Kaynak [49]'dan yeniden üretilmiştir)



Şekil 3.2 Canlılar için Hirt vd.[50] yayınından derlenen en yüksek hızın en büyüğe yakın ancak en büyük olmayan boyuttaki canlılara ait olduğunu gösteren hız boyut verisi

3.1 Teori

Yer yüzünde yatay olarak L mesafesine hareket eden M [kg] büyüklüğünde bir araç veya canlı $V = 0$ olan hareketsiz halinden hareketine başlayarak ivmelenme hareketinin sonucunda V_c olan seyahat hızına L_a mesafesinde ve t_a zamanında ulaştığı görülür. Bu gövde hareketine V_c hızıyla L_c yolunda t_c süresince devam eder. Burada amaç fonksiyonumuz hangi boyut büyüklüğünün (M) bu toplam mesafeyi ($L = L_a + L_c$) en hızlı şekilde alacağıdır.

M kütleli bir gövde, bir motor tarafından üretilen güç ile hareket eder. Motorun hareket ettirmek amacıyla ürettiği güç Denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$\dot{W} = \eta \dot{Q} \quad (3.1)$$

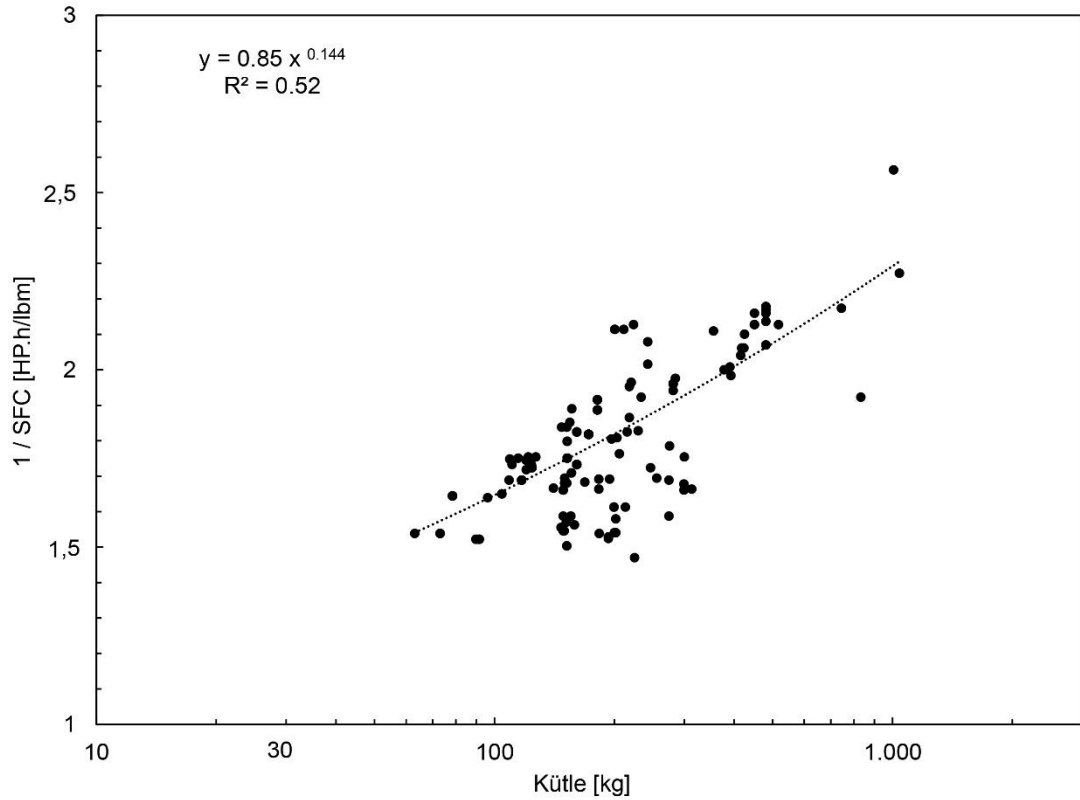
Burada $\dot{Q} = \dot{m} H$ motoru çalıştıran ısı transfer miktarı, $\dot{m}$ [kg/s] yakıt debisi (veya yiyecek) tüketimi ve H [J/kg] tüketilen yakıtın ısı değeri.

Denklem (3.1)'deki verim (η) Denklem (3.2)'de gösterilir [52].

$$\eta = C_I M^\alpha \quad (3.2)$$

Burada üstel α değeri 1'den küçüktür ve her bir canlı ve araç türü için farklıdır. Örneğin helikopter motorları için $\alpha = 1/4$ [53] ve canlı hareketleri (uçan, koşan ve yüzen) için $\alpha = 5/12$ [52]'dir. Şekil 3.3 uçaklardaki jet motorlarının gelişimini göstermekte ve şekilde α değerinin 0,14 civarında olduğu görülmektedir. Şekil 3.3'te kullanılan veriler [54] no'lu kaynaktan alınarak [55]'de sunulmuştur. Verilerin korelasyonu değerlendirildiğinde R^2 değeri 0,52 olup P değerleri 0,001 olduğundan bulunan bu ilişkinin düzeyi istatistiksel olarak yüksektir [56]. Denklem (3.1) ve (3.2) birlikte değerlendirildiğinde bedenin hareket etmesi için gerekli olan güç Denklem (3.3) ile hesaplanır.

$$\dot{W} = C_I H M^\alpha \dot{m} \quad (3.3)$$



Şekil 3.3 Boyutun uçak motorlarının verimine etkisi (Veriler [55]'de sunulmuştur).

Güç üç şekilde harcanır:

1. Gövdeyi hareket ettirip ivmelendirmek için
2. Gövdeyi kaldırmak için (yüzenler için yer değiştirdiği eşdeğer su kütlesi [49]).
3. Gövdenin hareket ettiği ortamda meydana gelen sürtünme direncinin yenmek için

Hareketin sıralı bu iki bölümü aşağıdaki bilgiler doğrultusunda analiz edilmektedir:

- a) İvmelenme: (2) ve (3) bileşenin (1) bileşenine kıyasla ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir.
- b) Seyahat: (1) bileşeni (2) ve (3) bileşenlerine kıyasla önemsizdir.

3.1.1 İvmelenme

İvmelenme sırasında motorun gövdeye uyguladığı güç Denklem (3.4)'de gösterildiği üzere kütleyi hızlandırma kuvveti (MdV/dt) ile anlık hızın (V) çarpımına eşittir.

$$C_1 H M^\alpha \dot{m} = M \frac{dV}{dt} V \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'ün $t = 0$ anından $V=V_c$ olununcaya kadar ($t = t_a$) integrali alındığında denklem (3.5), (3.6) ve (3.7) elde edilir.

$$m_a = \frac{M^{1-\alpha} V_c^2}{2C_1 H} \quad (3.5)$$

$$t_a = \frac{M^{1-\alpha} V_c^2}{2C_1 H \bar{m}_a} \quad (3.6)$$

$$L_a = \frac{M^{1-\alpha} V_c^3}{3C_1 H \bar{m}_a} \quad (3.7)$$

Burada m_a ivmelenme periyodu boyunca harcanan yakıtı ve $\bar{m}_a$ ise bu periyot boyunca harcanan ortalama yakıt miktarını (m_a/t_a) göstermektedir.

Teorik seyir hızı, kaldırmaya harcanan güç (ii) ile sürtünmeyi aşmak için harcanan güç (iii) arasındaki denge olarak ortaya çıkmaktadır. Seyir hızı gövde büyüklüğüne bağlı olarak Denklem (3.8)'deki gibi bulunur [49].

$$V_c = C_2 M^{1/6} \quad (3.8)$$

Burada $C_2 = rg^{1/2} \rho^{-1/6}$ ve ρ ise gövdenin yoğunluğunu göstermektedir. İfadedeki r değeri gövdenin yoğunluğu (ρ) ile gövdenin hareket ettiği ortamın yoğunluğuna (ρ_a) bağlıdır. $r = (\rho/\rho_a)^{1/3}$ olup hem yüzen hem koşan hem de uçan canlılar için vücut yoğunluğu yaklaşık olarak suyun yoğunluğuna eşit iken hareket edilen ortam yoğunluğu yüzenler için su yoğunluğuna ($1.000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), uçanlar için ise yaklaşık havanın yoğunluğuna ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) eşittir. Sonuç olarak r değeri uçanlar için 10, yüzenler için 1 ve karada hareket edenler için $1 < r < 10$ aralığında olmaktadır. Denklem (3.6) ve (3.8) birlikte değerlendirildiğinde daha büyük varlıkların seyir hızlarına ulaşma sürelerinin daha uzun sürdüğü Denklem (3.9)'dan anlaşılmaktadır.

$$t_a = \frac{M^{4/3-\alpha} C_2^2}{2C_1 H \bar{m}_a} \quad (3.9)$$

3.1.2 Seyir

Seyir için analizler Denklem (3.8) ile başlamaktadır. Burada seyir hızı (V_c) seyir mesafesinin (L_c) seyir süresine (t_c) oranıdır. Motorun L_c mesafesi boyunca harcanan iş Denklem (3.10)'da gösterilmiştir.

$$W_c = C_1 H M^\alpha \bar{m}_c t_c \quad (3.10)$$

Gövde daha büyük olduğunda seyahat süresinin (t_c) daha kısa olduğu Denklem (3.11)'de görülmektedir.

$$t_c = \frac{L_c}{C_2 M^{1/6}} \quad (3.11)$$

3.1.3 Boyut

Yakıt tüketim oranı $\dot{m}_a = \dot{m}_c$ sabit değer olarak alındığında en kısa seyahat süresi için vücut büyüklüğünü belirleyen noktayı bulmak mümkündür. Denklem (3.11)'de L_c yerine $L - L_a$ yazılır. Burada L sabit olup L_a denklem (3.7)'den gelmektedir. Toplam seyahat süresi ya da seyahat mesafesindeki ortalama hız ifadesinin tersi Denklem (3.12)'de gösterilmiştir.

$$\frac{t_a + t_c}{L} = \frac{C_2^2}{6C_1 H L m_a} M^{4/3-\alpha} + \frac{1}{C_2} M^{-1/6} \quad (3.12)$$

Burada $L_a < L$ kabulü yapılmıştır. Denklem (3.12) sabit birim kütleli ($M_0 = 1$ kg) bir referans gövdesinin seyir hızı ($V_0 = C_2 M_0^{1/6}$) ile boyutsuz hale getirilebilir. Bu durumda Denklem (3.12), Denklem (3.13)'e dönüşmektedir.

$$\frac{1}{\tilde{V}_{avg}} = A \tilde{M}^{4/3-\alpha} + \tilde{M}^{-1/6} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'teki değer α 'ya bağlı olmakla birlikte α 'nın alacağı herhangi bir değer için sonuç değişmemektedir. α değeri 0 ile 1 arasında olan bir değer olduğu için tüm α değerleri için $1/\tilde{V}_{avg}$ değeri boyut büyürken önce bir yere kadar azalacak dağa sonra artacaktır. Dolayısıyla $\tilde{V}_{avg}$ değeri boyut büyürken önce artacak daha sonra azalacaktır.

Denklem (3.13)'te $\tilde{V}_{avg} = V_{avg}/V_0$ ve $V_{arg} = L/(t_a + t_c)$ olacağı için aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{1}{\tilde{V}_{avg}} = \frac{t_a + t_c}{L} \cdot C_2 M_0^{1/6} \quad (3.14)$$

$$\tilde{M} = \frac{M}{M_0} \quad (3.15)$$

$$A = \frac{C_2^3 M_0^{3/2-\alpha}}{6C_1 H L \bar{m}_a} \quad (3.16)$$

Denklem (3.13), toplam seyahat süresinin gövde boyutuna göre bir minimumu olduğunu gösterir. Alternatif olarak, toplam hareket boyunca ortalama hız vücut

boyutuna göre bir maksimuma sahiptir. En yüksek hıza karşılık gelen kütle Denklem (3.17) ile, en yüksek hız ise Denklem (3.18) ile bulunabilir.

$$\tilde{M}_{peak} = A^{\frac{-1}{3/2-\alpha}} B_M(\alpha) \quad (3.17)$$

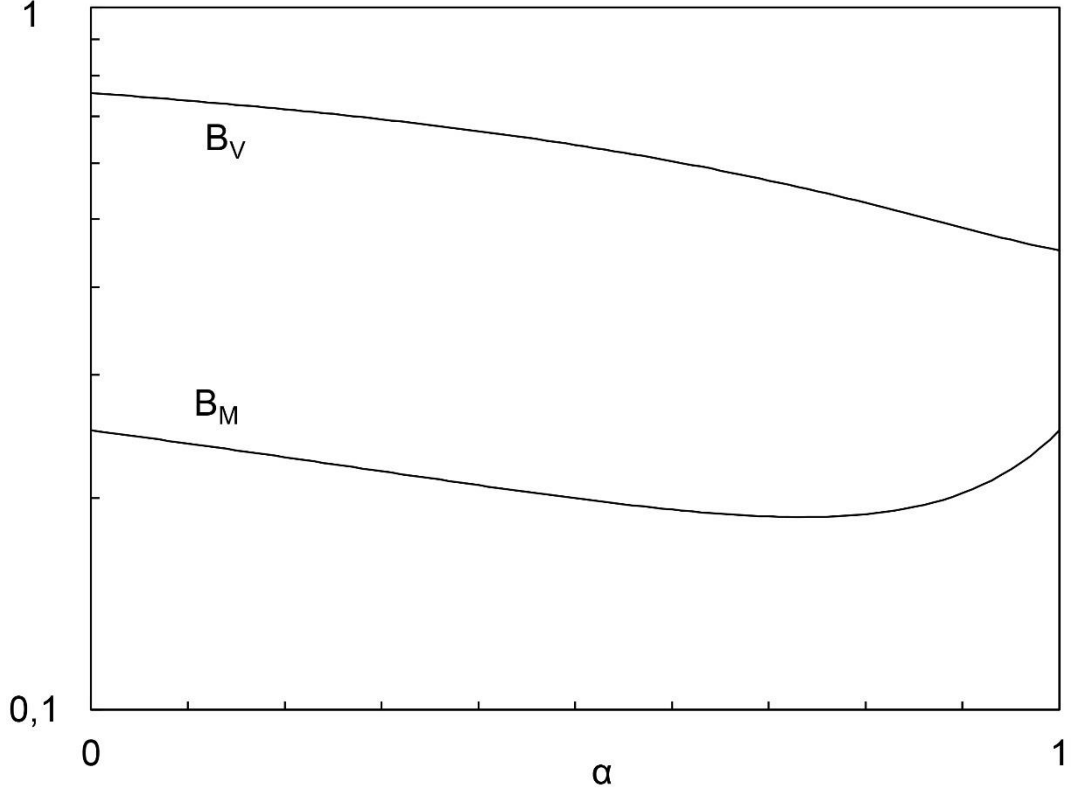
$$\tilde{V}_{peak} = A^{\frac{-1/6}{3/2-\alpha}} B_V(\alpha) \quad (3.18)$$

burada

$$B_M(\alpha) = \left[6 \left(\frac{4}{3} - \alpha \right) \right]^{\frac{-1}{3/2-\alpha}} \quad (3.19)$$

$$B_V(\alpha) = \left(B_M^{4/3-\alpha} + B_M^{\frac{-1/6}{3/2-\alpha}} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilmiştir. B_M en hızlı kütle ($\tilde{M}_{peak}$) için, B_M en yüksek hız için ($\tilde{V}_{peak}$) için α 'ya bağlı katsayılarıdır ve bu katsayıların değeri boyut arttıkça 0 ile 1 arasındadır. Dolayısıyla sonuca etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir.



Şekil 3.4 B_M ve B_V değerlerinin α 'ya bağlı olarak değişimi

Bu sonuçlar Hirt vd.'nin [50] geliştirdiği modelle uyumludur. En büyük canlılar en hızlı olanlar değildir ve en hızlı canlılar (ve araçlar) orta büyüklükte ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber hızlanma süresi toplam seyahat süresine kıyasla önemsiz değildir. Bu özellik avcı canlılar ve savaş uçakları için önemli bir durumdur. Çıkarılan başka bir sonuç ise en hızlı olanda bile [Denklem (3.17) ve (3.18)] boyut ve hız arasındaki ilişki Denklem (3.8)'deki teorik [49] $M^{1/6}$ oranına uymaktadır.

$$\tilde{V}_{peak} = \frac{B_V}{B_M^{1/6}} \tilde{M}_{peak}^{1/6} \quad (3.21)$$

Yukarıda sunulan analiz yakıt tüketim oranının ($\dot{m}$) sabit olduğu kabul edilerek basitleştirilerek yapılmıştır. Eğer gövde boyutunun yakıt tüketim oranı ($\dot{m}$) üzerindeki etkisi de dikkate alınırsa, analizler $\dot{m}$ değerinin $C_3 M^\beta$ ifadesiyle değiştirilmesi durumu ile tekrar yapılmalıdır. Burada β daha sonra gösterileceği gibi yaklaşık $1/2$ 'dir. β değeri daha önce deneysel olarak ticari uçaklar için [57] ve teorik olarak canlılar için [52] bulunmuştur. Spesifik olarak, uçaklar için yakıt

yük oranı kabaca $M/3$ ile seyahat mesafesi istatistiksel olarak $M^{0,64}$ ile ve ortalama hız $M^{1/6}$ ile orantısı alınırsa β değeri yaklaşık olarak 0,53 olmaktadır. β değeri [58] nolu referansta canlılar için 0,5 olarak vermektedir. Buradan, yukarıda gösterilmiş olan değerlerden C_1 'in C_1C_3 ve α 'nın $\alpha + \beta$ ile değiştirilebileceği anlamı çıkarılabilir. Başka bir deyişle, bu zamana kadar $\alpha \lesssim 0,5$ olarak kullanılan üstel değer, $\alpha + \beta \lesssim 1$ değerine sahip bir üs ile değiştirilebilir.

3.1.4 En Hızlı Uçaklar

En hızlı uçaklar için önemli noktalar Şekil 3.5a ve Şekil 3.6'da uçaklar için veriler kronolojik olarak gösterilmektedir [58]. Şekillerin çizilmesinde kullanılan veriler [55]'de sunulmuştur. Şekil 3.7a askeri hava araçlarının hızlarının zaman içerisindeki değişimini göstermektedir.

Şekil 3.5 - 3.7'de ifade edilen genel görüş son seksen yılda, en hızlı modellerin daha büyük ve aynı zamanda daha da hızlı modellerle birleştirildiğidir. Denklem (3.21)'de elde edilen teorik eğilim, ticari uçakların ve Şekil 3.5a'da derlenen ilk askerî modellerin verisiyle uyum sağlamaktadır. İki hattın izlenmesinde $r \approx 10$, $B_v \approx 1.5$ ve $B_M \approx 0.2$ gibi çeşitli yaklaşım varsayımları yapılmıştır. Uçağın ortalama yoğunluğu için [Denklem (3.8)'deki C_2 'deki ρ değeri] [59]'deki yöntem kullanılmış ve B747-400'nin yoğunluğu, su yoğunluğunun da %3'üne karşılık geldiği ($31.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) hesaplanmıştır. Bununla beraber bu yoğunluk değeri $\rho = 10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (yani $\rho = \rho_{su}/100$) ile $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (yani $\rho = \rho_{su}/10$) eğrileri arasında olduğu gösterilmiştir.

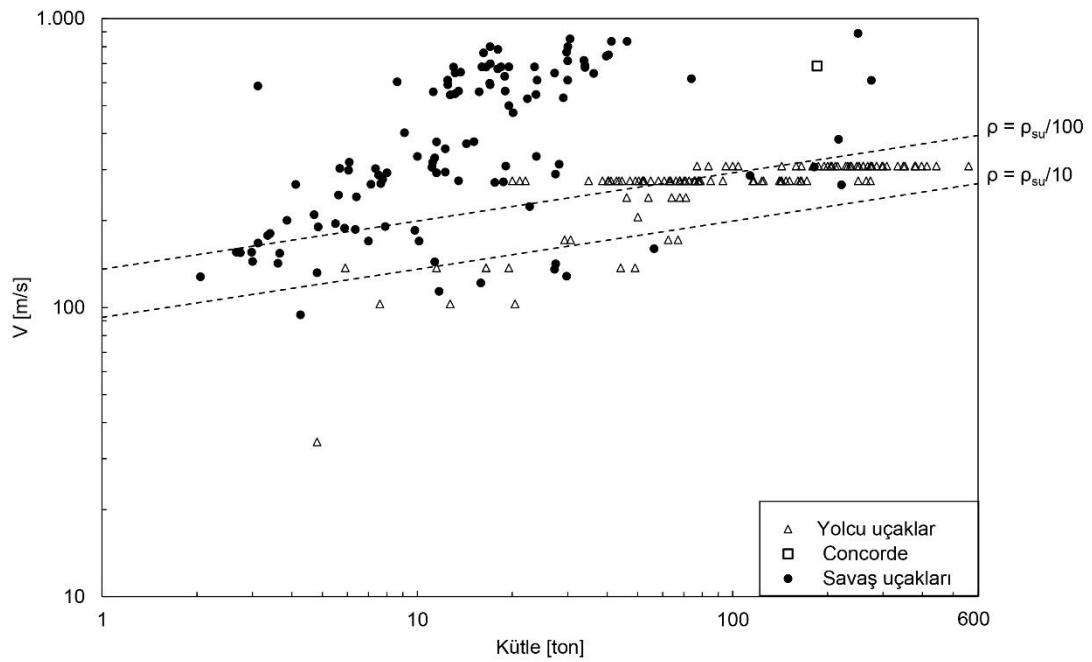
Şekil 3.5a'da en hızlı askerî modeller için verilerin çoğu Denklem (3.21)'deki eğri trendinin üzerindedir. Bu durumun temelinde erken askerî uçakların, ses altı hızlarda ve aynı yıllardaki ticari uçaklar ile mukayese edilebilir irtifalarda uçmaları yatmaktadır. 1950'lerden bu yana en hızlı askerî modellerin süpersonik hızları olmasına rağmen, bu modeller daha yüksek irtifalarda da uçmaktadırlar.

Şekil 3.7 (alt), her bir modelin uçabileceği en yüksek irtifalarını göstererek Şekil 3.5a'yı tamamlamaktadır. Yüksek irtifalarda hava yoğunluğu düşüktür, bundan dolayı da r faktörü (C_2 'de ve V_{peak} 'de) oldukça büyüktür. r faktörü Denklem (3.22)'deki şekilde tanımlanır:

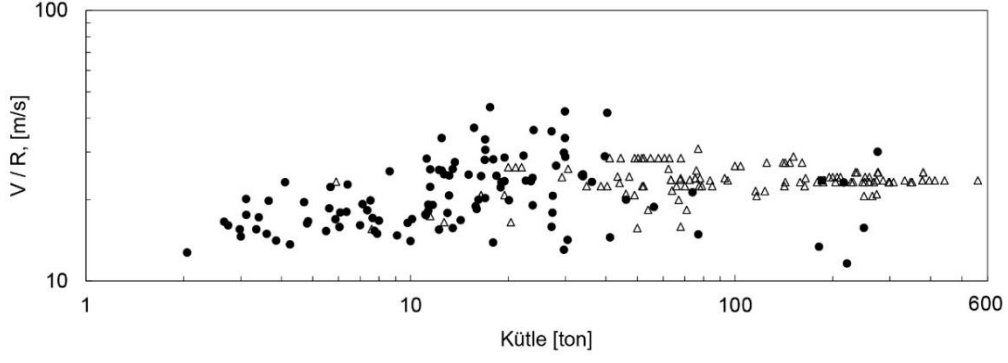
$$r = \left(\frac{\rho}{\rho_a} \right)^{1/3} \quad (3.22)$$

Burada r değeri canlı ya da araç yoğunluğunun ortam yoğunluğuna oranı olup ρ_a değeri düşük irtifalarda yeryüzü seviyesindeki yoğunluğa yakındır. Ardından, V_{peak} [Denklem. (3.21)] için teorik sonuca ait doğru r faktörü Denklem (3.23)'teki gibi hesaplanmıştır.

$$r = \left(\frac{\rho}{\rho_{a, \text{irtifa}}} \right)^{1/3} = \left(\frac{\rho}{\rho_{a, \text{yer seviyesi}}} \right)^{1/3} R \quad (3.23)$$



(a)



(b)

Şekil 3.5 Askerî ve ticari uçaklarda boyut hız ilişkisi a) gerçek hız değerleri, b) irtifaya göre normalize edilmiş hız değerleri

$$R = \left(\frac{\rho_{a, \text{ yer seviyesi }}}{\rho_{a, \text{ irtifa }}} \right)^{1/3} \quad (3.24)$$

Yeni R faktörü 1'den büyüktür ve Şekil 3.7'de (altta) gösterilen maksimum yüksekliğe bağlı olarak yükseklik arttıkça artmaktadır.

3.2 Uçaklarda Boyut - Hız İlişkisi

İrtifa teorik maksimum hız üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (Denklem 3.23) çünkü V_{peak} değeri r ile orantılıdır. Bu etkiyi ortaya çıkarmak için Şekil 3.5b'de V yerine V/R değeri konularak Şekil 3.5a'nın verileri tekrar çizilmiştir. Bu şekilde irtifanın etkisi kaldırılmış olup tüm teorik hızlar yer seviyesindeki hava yoğunluğuna karşılık gelen r değerine göre hesaplanmıştır.

Şekil 3.5b'de kullanılan R değeri Denklem (3.24)'den gelmekte ve o yükseklikteki hava yoğunluğu ile atmosferik hava yoğunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir [60]. Örneğin 10 km irtifada $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de havanın yoğunluğu $0,41\text{ kg/m}^3$ iken yer seviyesinde $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $1,2\text{ kg/m}^3$ 'dir. Bu örnekte R faktörü yaklaşık 0,15 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.5'te altta askerî uçak verileri ticari uçak verilerinin hizasına yaklaşmakta ve irtifa etkisi dâhil edildiğinde öngörülen teorik eğilim gözlenmektedir.

Şekil 3.5b, Şekil 3.5a ile karşılaştırıldığında, irtifanın etkisi (R faktörü) göz önünde bulundurularak elde edilen hız verilerinin canlıların uyduğu teorik trendin üzerinde olduğu görülmüştür. Şekil 3.1'deki klasik canlı hızı verilerinde kullanılan

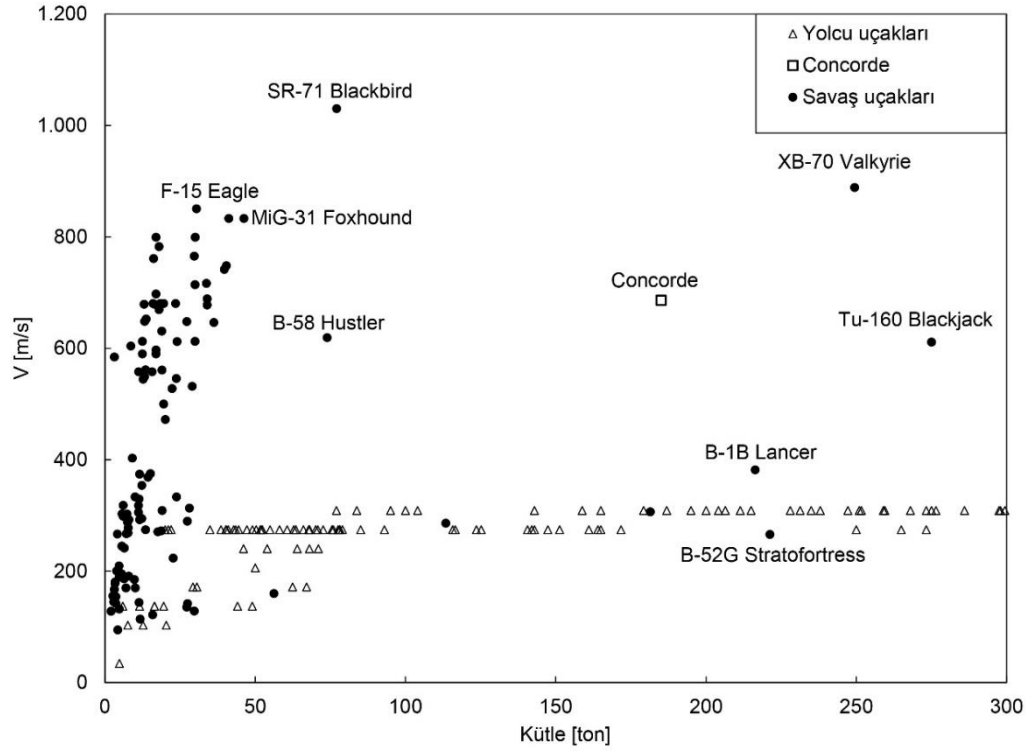
V'ye karşılık gelen M, V/R'ye karşılık gelen M olarak tekrar edildiğinde teoremin doğruluğu güçlenmektedir. Bu yeni gösterim Şekil 3.8'de verilmiştir. Bunun sayesinde Şekil 3.1'in orijinal versiyonunda, uçak verilerinin neden teorik trendin üstünde olduğu açıklanabilmektedir. İrtifa etkisi dikkate alındığında teori, canlılardan (Şekil 3.1) ticari ve askerî uçaklara (Şekil 3.5-3.7) kadar tüm hız verilerini doğru bir şekilde kapsamaktadır. Dikkat çekici olan kısım V/R ile yeniden düzenlenmiş Şekil 3.5b ve Şekil 3.8'deki uçak verilerinin, Şekil 3.2'de çizilen canlı verilerini andıran bir çan eğrisi göstermesidir.

3.3 Ortamın Boyut Üzerindeki Etkisi

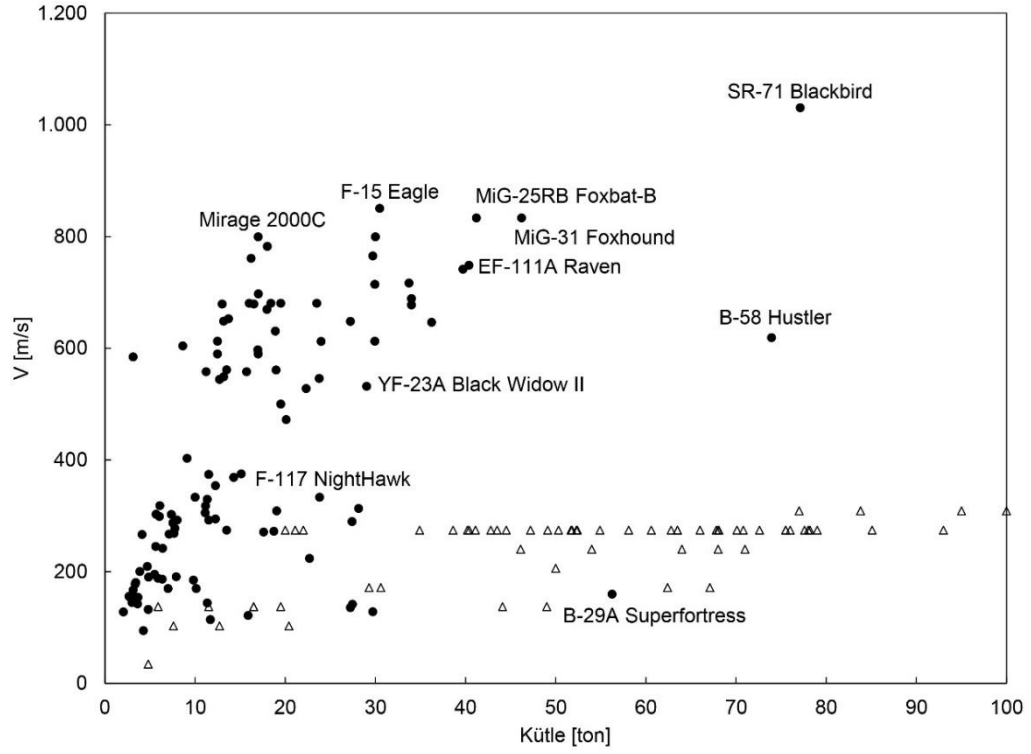
Şekil 3.2'de derlenen verilerde en hızlı uçan canlıların en hızlı yüzen canlılara göre 10^3 kat daha küçük olduğu görülmektedir. Bu etkinin Denklem (3.17) - (3.20) ile sonuçlanan teoriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

En yüksek hız için gövde boyutu (M_{peak}) A'nın $-1/(3/2-\alpha)$ kuvveti ile orantılıdır. Burada α pozitif ve 1'den küçük bir değere sahiptir. Diğer bir deyişle, teorik M_{peak} 'in $1/A$ ile orantılı olması beklenmektedir. Burada A değeri C_2^3 ile ya da $r^3 g^{3/2} \rho^{-1/2}$ ile orantılıdır. Sonuç olarak, M_{peak} değeri ortam yoğunluğu olan ρ_a ile orantılı olan r^{-3} değeri ile değişmektedir.

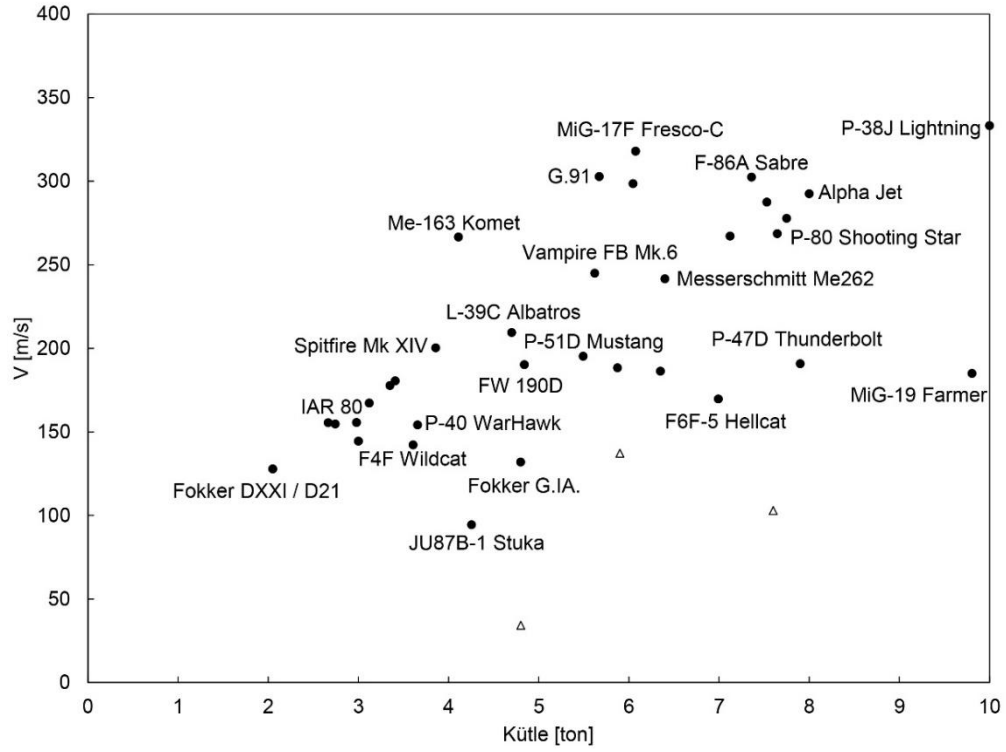
Ortamın yoğunluğu yüzen canlılarda uçan canlılara doğru 10^3 kat azalır. Şekil 3.2, en hızlı canlıların vücut büyüklüğünün azalışının aynı faktör göz önüne alındığında yüzenlerden uçanlara doğru olduğunu göstermektedir. Bu durum yüzenler ve uçanlar için veri bulutunun eğer x eksenindeki vücut büyüklüğü (M) r^3 ile çarpılırsa aynı bulutu doldurduğunu ortaya koymaktadır. Bahsedilen r değeri uçanlar için yaklaşık 10, yüzücüler için yaklaşık 1 ve koşucular için yaklaşık 3 gibi bir değere sahiptir.



(a)



(b)



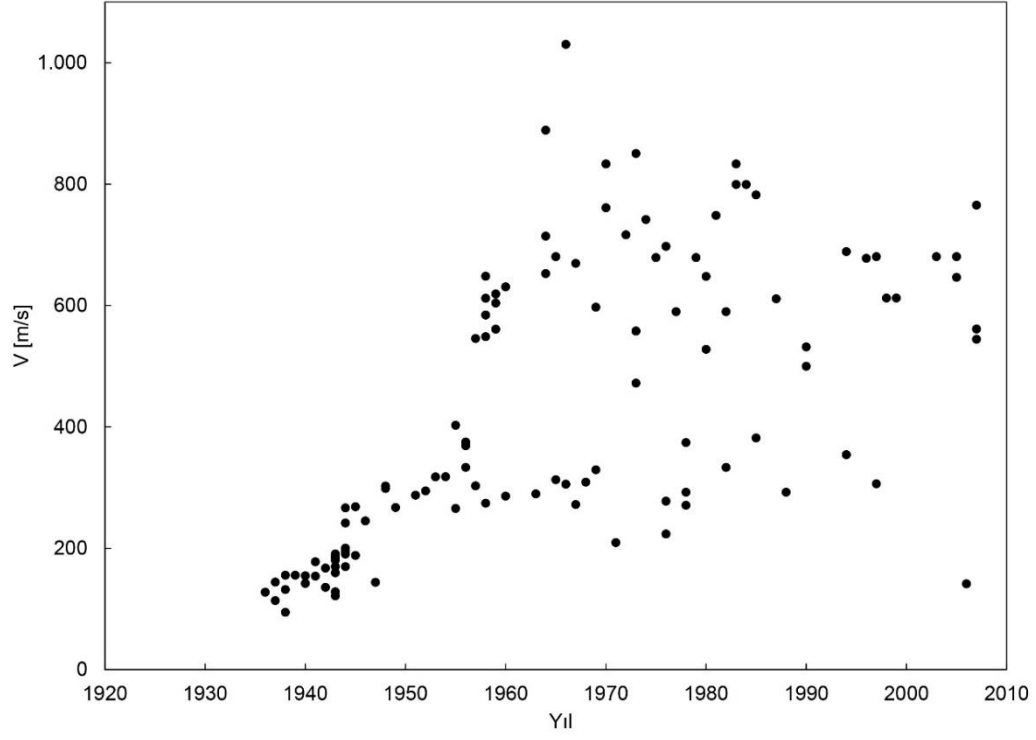
(c)

Şekil 3.6 Savaş uçaklarının hız değerleri a) 1-300 ton arası, b) 1-100 ton arası, c) 1-10 ton arası (Veriler [55]'da sunulmuştur).

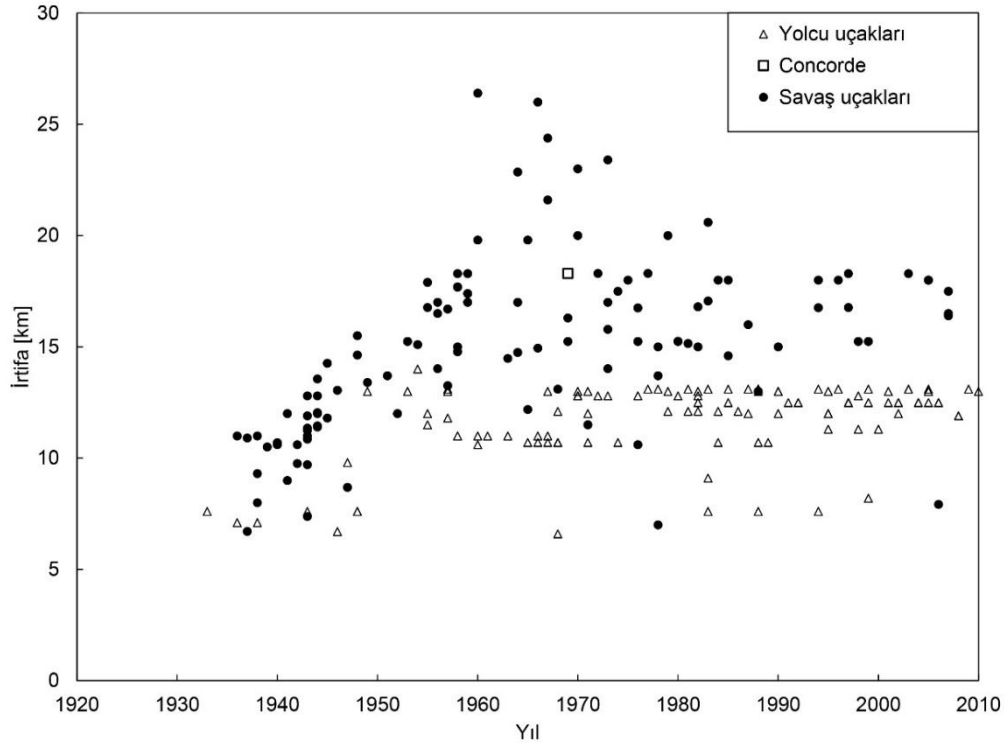
Denklem (3.18)'e göre en yüksek hız değeri $M_{peak}^{1/6}$ ile değişmektedir. Bu da V_{peak} değerinin $r^{-1/2}$ ile ya da $(\rho/\rho_a)^{-1/6}$ ile değiştiğini göstermektedir. Uçanlar için r faktörü 10, yüzenler için de 1 alındığında, öngörüler uçanlar için V_{peak} değerinin yüzücüler için V_{peak} 'nin 1/3'ü olması gerektiğini göstermektedir. Bu zıt eğilim, Şekil 3.2'deki veriler ile gösterilmektedir.

3.4 Ölçek Ekonomileri

Büyük boyutta hareket eden araçlar ve canlılar küçük boyutta hareket edenlere göre daha verimlidir. Fizikte güç ile hareketin bu yönü, denklem (3.2)'de $\alpha < 1$ olarak ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bu teoremin temelini oluşturmaktadır. Bu olgu genel olarak ölçek ekonomileri olarak bilinmektedir. Burada bu olgu sadece Şekil 3.3'teki gibi motor büyüklüklerine göre çizilmesiyle değil, aynı zamanda uçakların verimlerinin boyuta bağlı değişiminde de görülebilmektedir.

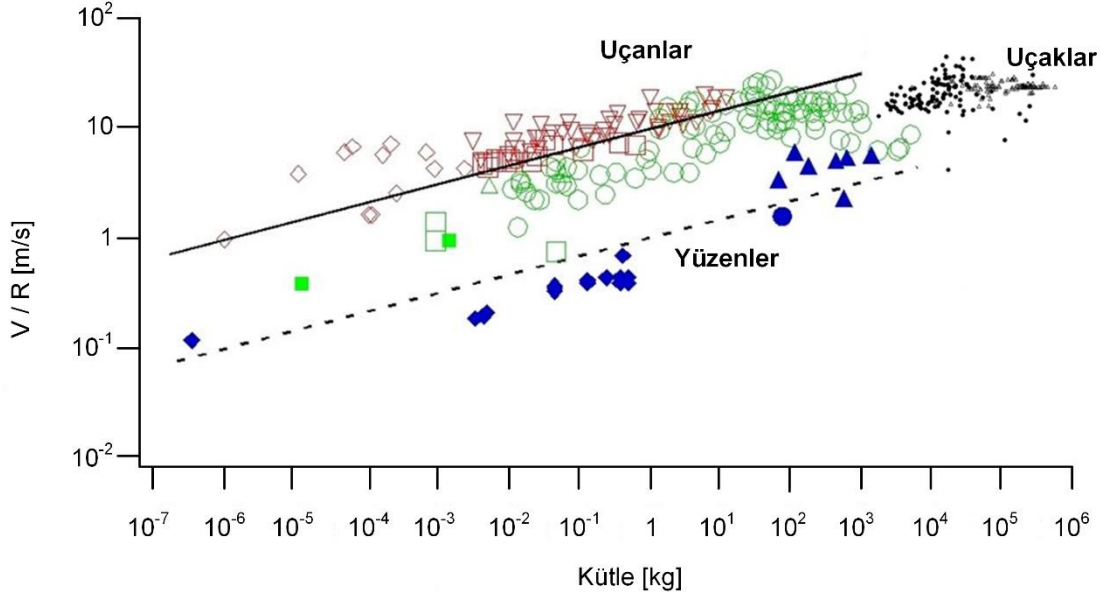


(a)



(b)

Şekil 3.7 Askerî uçakların yıllara göre ulaştığı a) hız, b) çıkabilecekleri maksimum irtifa değerleri



Şekil 3.8 İrtifa etkisinin ortadan kaldırılmasıyla revize edilen Şekil 3.1.

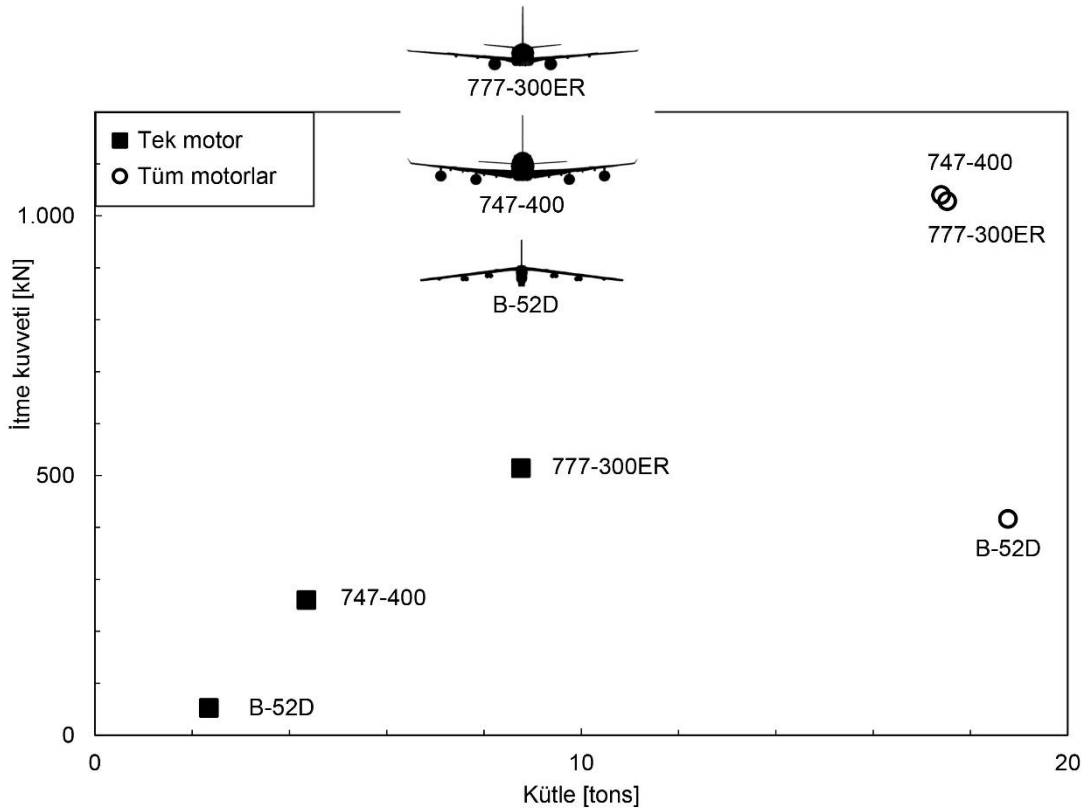
Şekil 3.8'de uçakların yüksek irtifaya bağlı olarak düşük hava yoğunluğunun oluşturduğu sürtünme etkisi göz önüne alındığında uçan canlılar ile aynı hizada yer aldığı görülmektedir.

Şekil 3.9 ve Tablo 3.1'de, bugün uçan en büyük nakliye uçağının gelişimini göstermek için üç uçak modeli kullanılmıştır. B52'den B747'ye ve B777'ye kadar, motor itiş gücü (kuvvet) ve boyutu (kütle), 10'un kuvveti olarak artmıştır. Motor sayısı 8'den 4'e ve sonunda 2'ye düşmüştür.

Şekil 3.9'un sağ tarafındaki veriler, uçağı hareket ettiren motorların toplam itme gücünü ve toplam kütlesini göstermektedir. Düşeydeki veriler 1956 yılına ait B52'nin 1984'ün B747'si ve 2004'ün B777'si ile aynı motor kütlesi tarafından çalıştırıldığı anlamına gelmektedir. 1950'lerden 1980'lere kadar toplam motor kütlesi aslında aynıdır, toplam itiş büyüklüğü ise 10'un kuvvetleri şeklinde arttığı görülmüştür. Bununla beraber aracın boyutu B52'den B747 ve B777'ye kadar aynı oranda artmıştır. Gelişim zaman içinde daha büyük bir kuvvete, daha büyük boyuta ve daha verimli motorlara doğru olmuştur.

Tablo 3.1 Günümüzde servisteki en büyük uçaklardan üçünün gelişimi [61]–[66]

	B52-D	B747-400	B777-300ER
Yıl	1956	1984	2004
Maksimum mesafe [km]	14.080	13.490	13.650
Yakıt kapasitesi [litre]	181.610	216.840	181.283
Yüklü kütle [kg]	120.000	396.890	351.533
Yakıt verimliliği [kg·km/l]	9.303	24.694	26.469
Motor	Pratt & Whitney J57-P-23	GE CFM-80C2	GE 90 115-B
Motor sayısı	8	4	2
Motorun boyu [m]	6,19	4,27	7,28
Motorun fan çapı [m]	0,99	2,69	3,3
Motorun kütlesi [kg]	2.347	4.350	8.762
Motorun itmesi [kN]	52	260	513,9
Motorun özgül yakıt tüketimi mg/(N·s)	59	9,32	8,31
Motor yakıtı ısı değeri [MJ/kg]	43,15	44,65	44,65



Şekil 3.9 Günümüzde servisteki en büyük uçaklardan üçünün kütle değeri ve motor sayısına bağlı olarak itme değerleri (Tablo 4.1).

3.5 Sonuç

Bu bölümde gövde boyutunun çevre etkisiyle maksimum hıza nasıl etki ettiğini göstermek için bir fiziksel modelleme yapılmıştır. Çita gibi canlıların maksimum hızlarının fiziksel nedeni günlük yaşamlarında genellikle hep maksimum hızda hareket etmemeleridir. Otlayan canlılar sürekli hareket eder ve sürekli yemek yerken, avcı canlılar hareketlerini ve yeme işlemini çok hızlı yapar. Aslında avcılar, hayatlarının çoğunu dinlenerek, uyuyarak veya avını izleyerek geçirir.

Canlılardaki istisnai durumlar (küçük vücut kütleindeki daha yüksek hız) için geçerli olanların araçlardaki istisnai durumlar için de geçerli olduğu gösterilmiştir. Saldırı ve keşif için kullanılan savaş uçakları, büyük ticari uçaklardan küçük olmasına rağmen daha yüksek hızlara ulaşmaktadır. Benzer şekilde, çita gibi, jet uçağı da aktif yaşamının çoğunu hareketsiz olarak yerde geçirir.

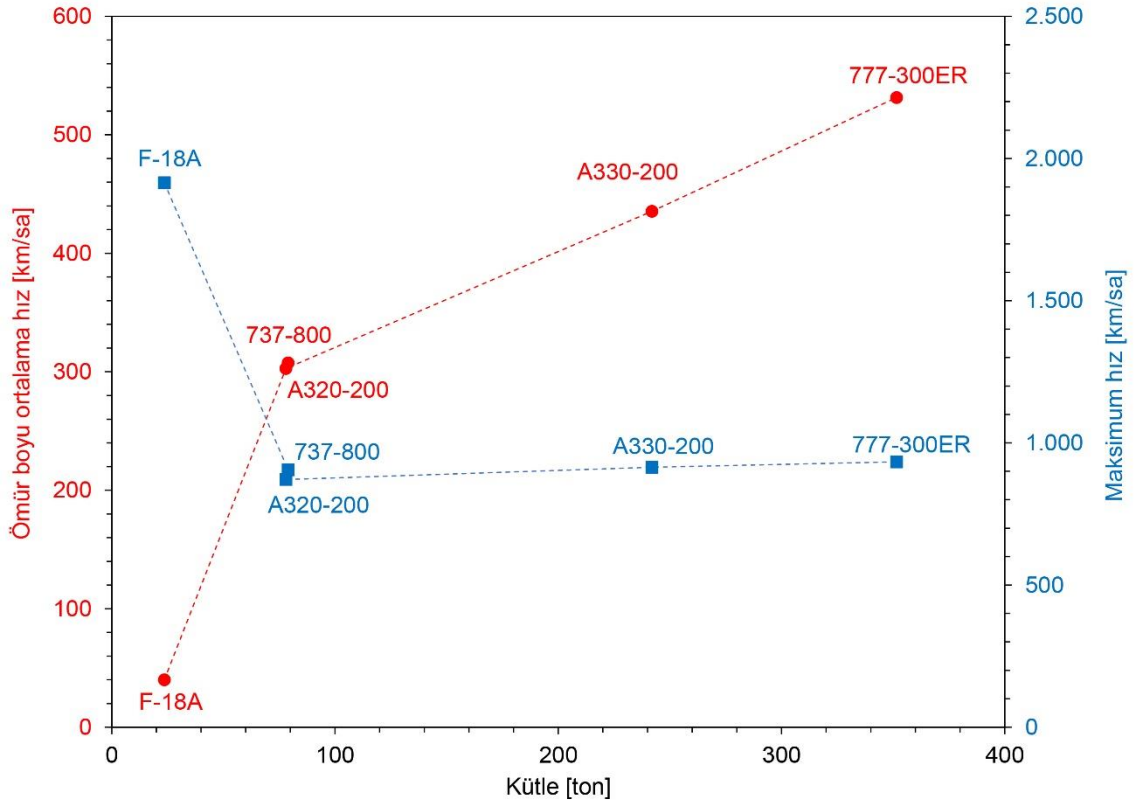
Bu bölümde gösterilen teori iki açıklamayı da beraberinde getirmiştir. Bunlardan birincisi Şekil 3.1'deki ticari uçak verilerinin (canlı verilerine göre yukarı doğru)

sapması durumudur. Bunun nedeni, uçakların uçtuğu yüksek irtifalarda hava yoğunluğunun yere yakın irtifalara göre daha düşük olması ve buna bağlı olarak teorik hızlarının da daha yüksek olmasıdır. İrtifanın etkisiyle hareketin olduğu ortam yoğunluğu dikkate alındığında, canlı ve uçak verilerinin aynı trende uyduğu görülmektedir (Şekil 3.8).

Diğer sonuç ise en hızlı uçan canlıların en hızlı yüzen canlılardan 10^3 kat daha küçük olduğunun bulunmasıdır (Şekil 3.2). Maksimum hız için vücut büyüklüğü, canlının içinde hareket ettiği ortamın yoğunluğuna (ρ_a) bağlıdır. Teorik vücut boyutu, ortam yoğunluğunun canlının yoğunluğuna oranına (ρ_a/ρ) bağlıdır. Havanın yoğunluğu da suyun yoğunluğunda 10^3 oranında daha azdır.

Tablo 3.2 Bazı uçakların ömür boyu uçak hızı, uçuş süresi ile yerde geçirdiği sürenin toplamının ortalaması [61], [67]–[74].

	F-18A	737-800	A320-20	A330-300	B777-300ER
Yüklü kütle (kg)	23.541	79.016	78.000	242.000	351.533
Maksimum hız (km/saat)	1.915	905	871	914	933
Seyir hızı (km/saat)	1.062	842	829	871	892
Maksimum mesafe (km)	2.017	5.436	6.100	11.750	13.650
Uçuş hizmet ömrü (Sadece havadaki süre) (saat)	10.000	60.000	60.000	100.000	125.000
Maksimum varsayım ömrü uzunluğu (10^6 km)	10,6	50,5	49,7	87,1	115,0
Yıllık uçuş saati (saat)	330	3.200	3.200	4.380	5.219,5
Beklenen toplam servis ömrü (havadaki + yerdeki zaman) (saat)	265.454,5	164.250	164.250	200.000	209.790,21
Toplam uçak ömrü boyunca ortalama hız (km/saat)	40,01	307,58	302,83	435,5	531,48



Şekil 3.10 Savaş uçağı (F-18A) ve ticari uçaklarının (737-800, A320-200, A330-200 ve 77-300ER) ömür boyu ortalama hızları ve maksimum hızları

Bu bölüme konu olan boyut ile hız ilişkisi Ezop'un “Kaplumbağa ile Tavşan” masalında sunulan daha eski perspektiflerden de okunabilir. Hareket edenin yaşamında önemli olan şey yaşam boyu harekettir. Yani hızın yüksek olması değil ortalama hızın yüksek olmasıdır. Tablo 3.2 ve Şekil 3.10'da ticari havacılık iş gücü ve F-18A savaş uçağının ömür boyu hız ve mesafe verileri bir araya getirilmiştir.

Hava ve Deniz Taşımacılığında Performans - Boyut İlişkisi

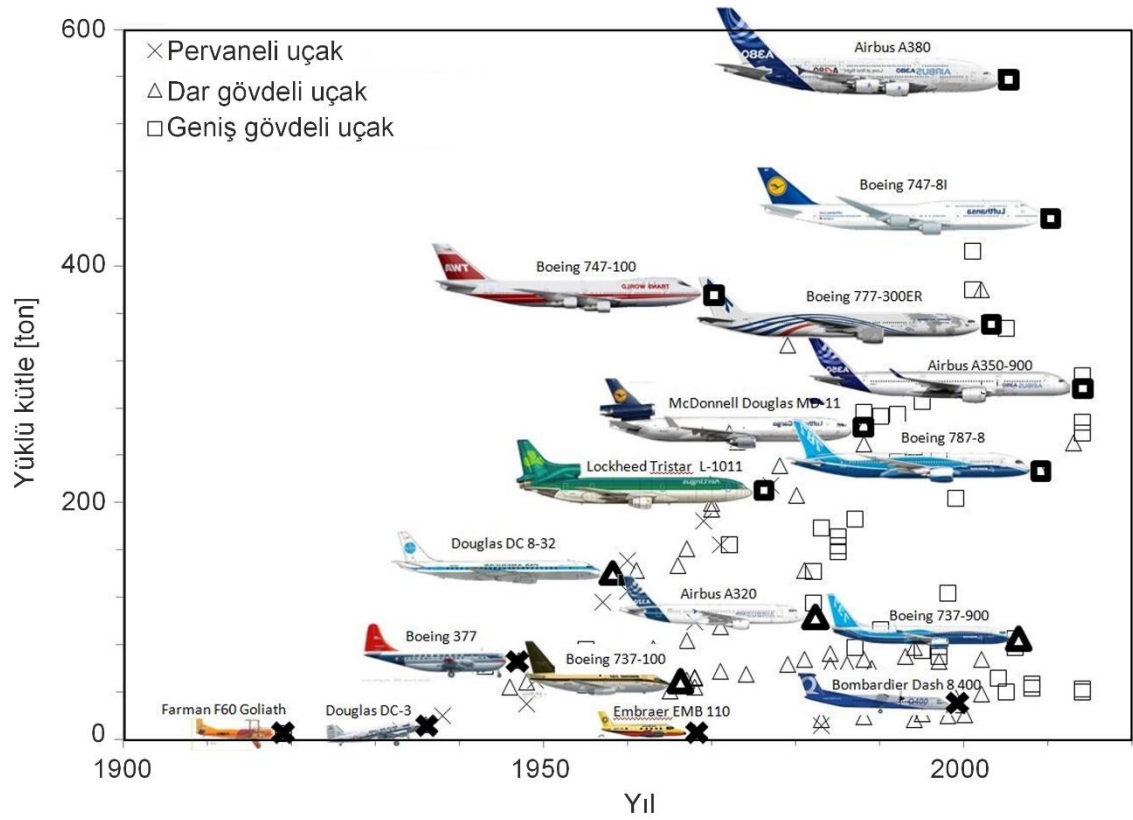
Uçan, koşan ve yüzen varlıklar büyük ya da küçük, az ya da çok, tarih öncesi ya da günümüzde, canlı ya da insan yapımı olarak her yerdedir. Bu varlıkların sürekli olarak bilimsel çalışmalara konu olması ise dünya üzerindeki hareketin fiziğinin hepimiz için önemli olmasından kaynaklanmaktadır [23], [75]–[83]. Canlıların hareket kabiliyetine ve canlıların uçuşunun fiziğine yönelik ilgi 20. yüzyılda insanların uçabilmesi için icat edilen makinelerin gelişimi esnasında artmıştır [15], [53], [57], [64]–[66], [84]–[96].

Bugün teknolojinin gelişiminde canlıların tasarımından ilham alınması ile ilgili yapılan çalışmalar giderek artmaktadır [16], [18], [22], [73], [94], [97]–[106]. Ancak canlıların tasarımı hakkındaki bazı sorular hala yüzyıl önce oldukları kadar merak uyandırmaya devam etmektedir. Bugün canlıların tasarımı ile ilgi bilinen şeylerin bir örneği, belirli hacim ve yapısal düzenlemeye sahip tek bir cismin (canlı ya da makine) biyomekaniği ve performansdır. Bu bilgi, belirli tasarımların önerildiği, taklit edildiği, kopyalandığı, karşılaştırıldığı ve nihayetinde inşa edildiği taşıt tasarımı faaliyetinin ve biyomimetik ile geliştirilen hava taşıtları, gemiler, denizaltılar, robotların temelini teşkil etmektedir.

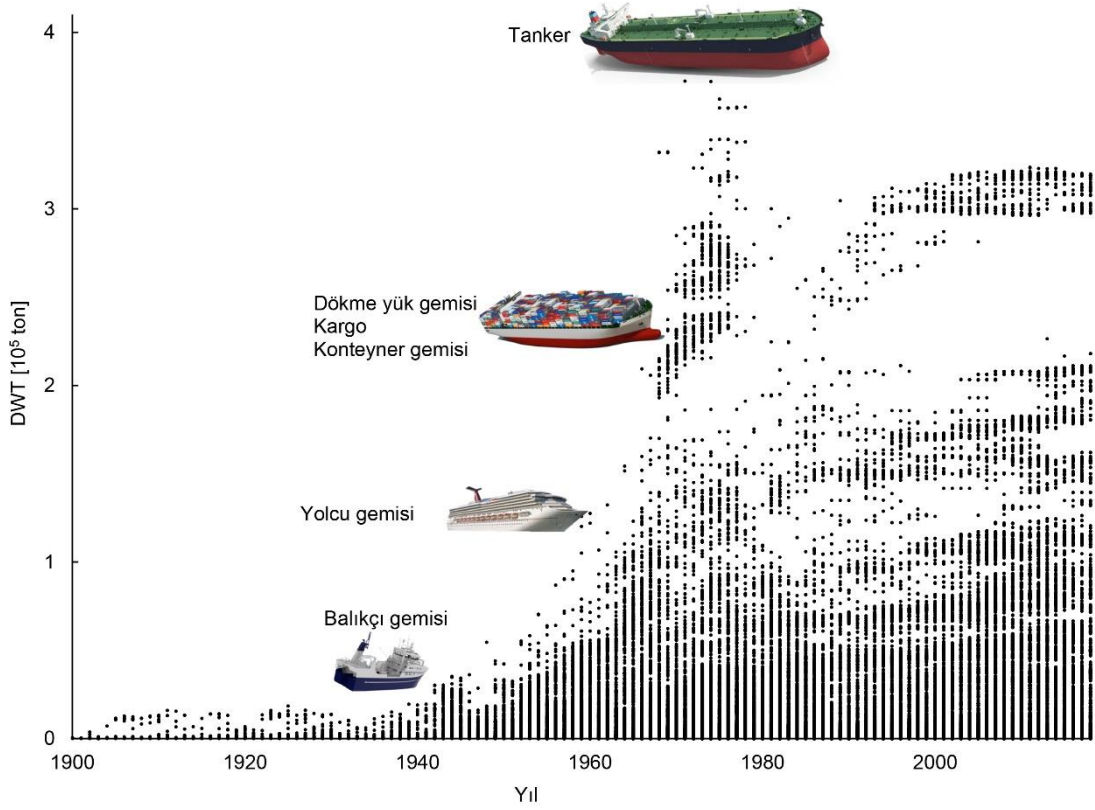
Gerçekte, dünya üzerinde hareket eden varlıklar, sahip oldukları boyuta bağlı olarak bulundukları boyut konumu ile sıkı bir etkileşim içerisinde özgürce gelişen, son derece karmaşık ve görünürde sürekli olan bir akış sistemini oluşturmaktadır. Bu konumlar içerisinde hareket eden varlıklar ise çeşitlilik gösterir. Bazıları büyüktür, bazıları küçüktür. Söz konusu durum Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de uçak ve gemi modellerinin ortaya çıkışı üzerinden gösterilmektedir [57], [107]–[109]. Yağmurlu mevsimlerde oluşan nehir havzalarından, varlıklarını nesiller boyunca sürdürmüş olan canlı popülasyonlarına kadar, hareket eden tüm varlıklar (su kanalları, canlı toplulukları da dahil olmak üzere), çok çeşitli boyutlarda ortaya

* Bu bölüm 18.06.2019 tarihinde “The evolution of air and maritime transport” başlığıyla Applied Physics Reviews (6/2) dergisinde yayınlanmıştır (DOI: 10.1063/1.5099626).

çıkmiştir ve çıkmaya devam etmektedir.

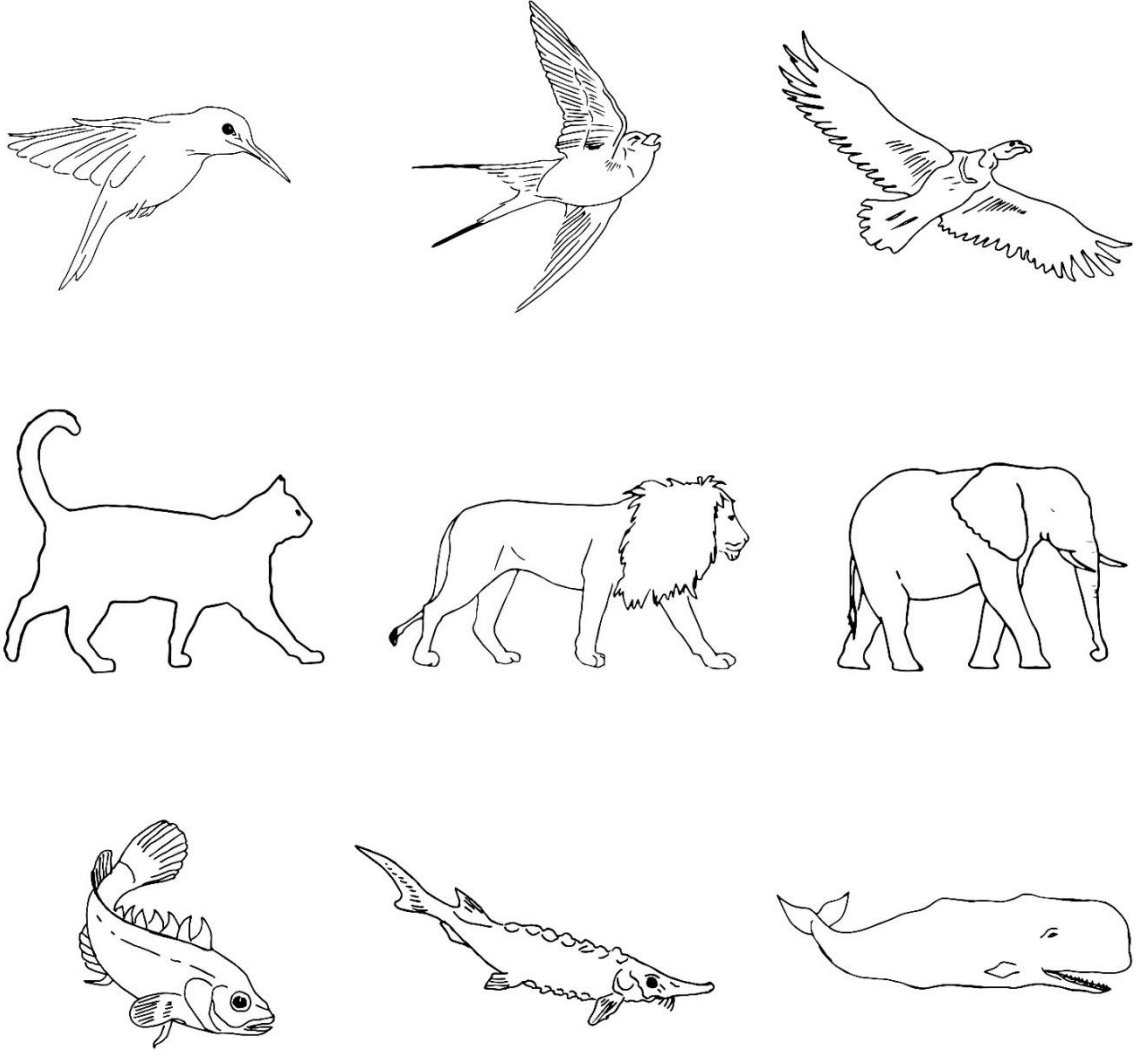


Şekil 4.1 Temel uçak modellerinin 100 yıllık havacılık tarihi boyunca gelişimi
(Kaynak: [57]'dan yeniden üretilmiştir)



Şekil 4.2 Gemi modellerinin ve boyutlarının ortaya çıkışı ve çoğalışı (Veri kaynağı: [107]).

Şekil 4.3'te en üst sırada yer alan çizimlerde görüldüğü gibi hareket eden varlıklar aynı boyutta çizilseler bile birbirlerinden önemli ölçüde farklılık gösterirler. Örneğin akbaba, bir kır kırlangıcının ya da sinekkuşunun tasarımının belli bir ölçekte büyütülmüş bir versiyonu değildir. Boyut değiştikçe canlının tasarımı da boyuta bağlı olarak değişmektedir. Bu tür bir çeşitlilik koşan ve yüzen varlıklarda da gözlemlenmektedir. Bunun örnekler Şekil 4.3'te ikinci ve üçüncü sıralarda verilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere gövde büyüdükçe taşıyıcı organlar da (kanatlar, bacaklar ve kuyruklar) hareket eden varlığın vücudunun daha büyük bir oranını kapsamaktadır.



Şekil 4.3 Canlılar (uçanlar, koşanlar ve yüzenler) aynı büyüklükte olacak şekilde çizildiklerinde canlılar arasındaki farklılık ve çeşitlilik (Orta bölüm için kaynak: [23])

Koşan bir canlının kaslarını L yüksekliğinde ve D çapında silindirler olarak canlandırdığımızda L yüksekliği, gövde uzunluğu skalası olan $(M/\rho)^{1/3}$ ile aynıdır. Taşıyıcı kuvvet F , σD^2 ile aynı dereceden olmalıdır. Burada σ , bir kas dokusunun kendisine ait gerilme direncini temsil eden bir sabittir. F (ya da Mg) ile σD^2 arasındaki denklemden yola çıkılırsa, bu taşıyıcı organın incelik oranı Denklem (4.1)'deki gibi gösterilebilir [23].

$$\frac{L}{D} \sim M^{-1/6} g^{-1/2} \rho^{-1/3} \sigma^{1/2} \quad (4.1)$$

Buradan da anlaşıldığı üzere narinlik (L/D), gövde büyüklüğü M arttıkça artmalıdır. Bunu günlük hayatımızda şöyle gözlemleyebiliriz: Küçük canlıların

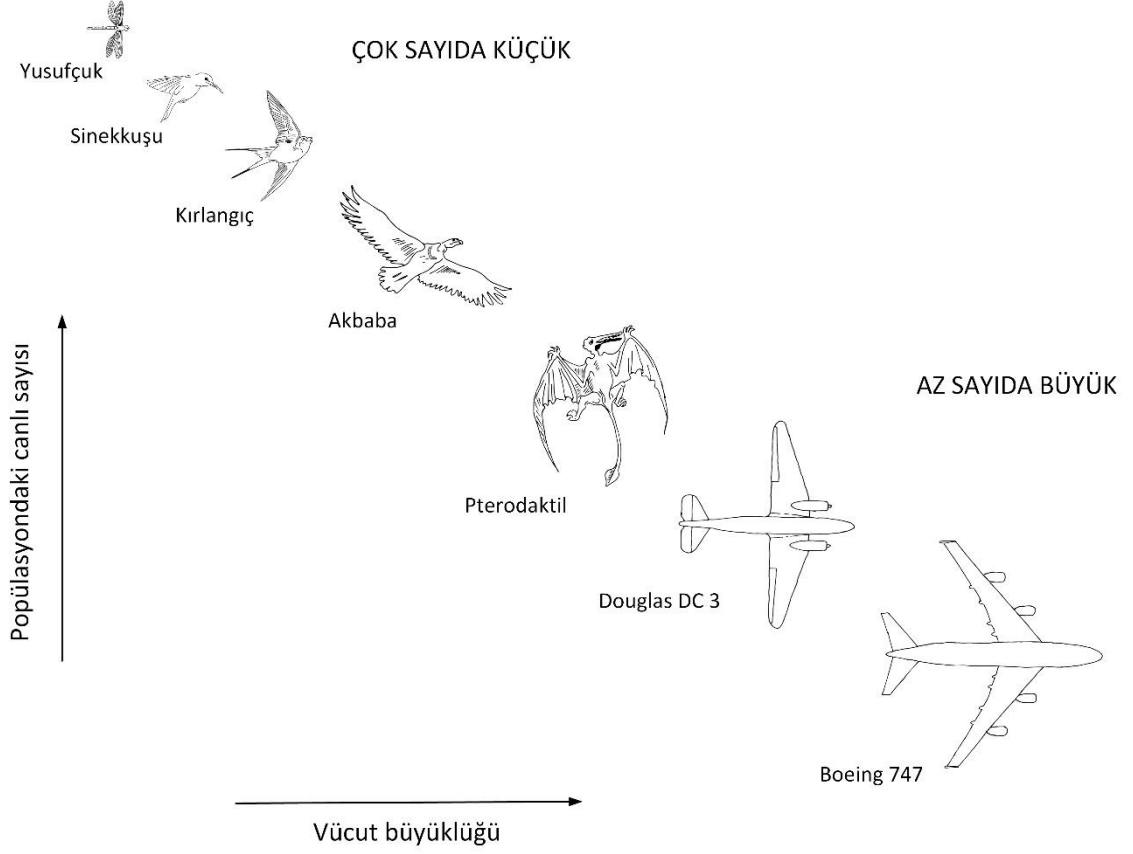
taşıyıcı uzuvları kendilerinden daha büyük canlılarınkinden daha narindir.

Ancak bu inceleme esnasında önümüze çıkan başka bir tasarım da söz konusudur. Bu tasarım, taşıyıcı organların tüm gövde kütlesi M ya da toplam hacim içerisinde işgal ettiği kütle ya da hacmin oranıdır. Taşıyıcı organın hacmi, LD^2 ile doğru orantılı iken, toplam hacim L^3 'tür. Hacim oranı ϕ , $L \cdot D^2$ 'nin L^3 'e bölünmesiyle $(D/L)^2$ olarak elde edilir ve daha önce verilen denklemleri kullanarak ϕ değeri Denklem (4.2)'deki gibi bulunur [23].

$$\phi \sim M^{1/3} \frac{g}{\sigma} \rho^{2/3} \quad (4.2)$$

Buradan anlaşılan şey ise ϕ 'nin 1'den küçük olması gerektiğidir. Gerçekten de eğer σ/g 'nin büyüklük derecesini, bir insan ($M = 100$ kg, $D = 0,2$ m olarak varsayarsak) gibi bir canlı türü örneğinden yola çıkarak hesapladığımızda σ/g 'nin $2,500 \text{ kg/m}^2$ derecesinde olduğunu buluruz. Yoğunluğun yaklaşık $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ olduğunu göz önünde bulundurduğumuzda da insanlarda bu oranın $1/5$ derecesinde olduğunu buluruz. Ayrıca bu oranın daha küçük canlılarda daha küçük, daha büyük olan canlılarda daha büyük olması gerektiği çıkarımını yapabiliriz. Bacaklardaki (taşıyıcı organlar) kütle oranı, gövde büyüklüğü ile, Denklem 4.2'ye göre $M^{1/3}$ oranında yavaşça artmalıdır. Bacakların narinliği (L/D), $\phi^{-1/2}$ ile aynıdır. İnsanlarda $M^{1/6}$ ile orantılı olarak değişmektedir [23].

Dünya üzerindeki hareketin karmaşıklığı yalnızca çeşitliliğinden kaynaklanmaz. Şekil 4.1 - 4.3'te ortaya konulan karmaşıklığa ek olarak, yaygın olarak yapılan bir başka gözlem de hareket eden büyük varlıkların küçük olanlardan daha az sayıda olduğudur. Şekil 4.4, bu noktayı uçan varlıklar üzerine niceliksel bir gözlem ile ortaya koymaktadır. Küçük olan varlıklar çok sayıdayken büyük olan varlıklar az sayıdadır. Bu her türlü ortamda (suda, karada ve havada) hareket eden varlıklar için geçerlidir.



Şekil 4.4 Uçakların ve canlıların dünya üzerindeki uçuşlarının kademeli yapısı: Popülasyon ile gövde büyüklüğü arasındaki ilişki

Kısacası, her ne kadar hareket eden varlıklar dünya üzerinde farklı boyutlarda bulunsalar da tüm popülasyonlar (uçan, koşan ve yüzen) içinde bu boyutlar kademeli bir şekilde organize olmuştur. Bu bölümde bu özellikler, fizik bağlamında gelişimsel bir bakış açısıyla ele alınmakta [23], [83] hava ve deniz taşımacılığı için geliştirilen taşıtlar üzerinden örneklendirilmektedir. Hava ve deniz taşımacılığını tercih etmemizden nedeni bu araçların taşımacılık açısından çok önemli oluşu ve devamlı kullanılmalarıdır. Bunlara paralel olarak burada gösterilen şey insan yapımı tasarımların canlıların hareket kabiliyetleri ve vücut tasarımlarına [23], [75]–[83] ve ayrıca jeofizikteki tüm cansız akış yapılarının gelişimine dair çıkarımlara müsaade etmesidir.

4.1 Boyut - Verim ilişkisi

Eğer popülasyon boyutları ile vücut boyutlarının dağılımını belirlenebilirse şimdiye kadar sayılmamış olan ya da hiçbir zaman sayılamayacak olan popülasyonlar hakkında bazı soruları cevaplanabilecektir. Örneğin Dinozorlar

Çağı'nın en dikkat çekici canlılarından biri olan Pterodaktıl gibi canlıların popülasyon büyüklüğü hakkında bize fikir verecektir.

Ayrıca bu bilgiye sahip olarak gelecekte dünya üzerinde hareket etme ihtimali olan popülasyonların büyüklüklerini hesaplayabiliriz. Bu öngörü gücü, ulaşım teknolojilerinin ve iş alanının gelişimi açısından büyük bir öneme sahiptir. Örneğin, ulaşım için eğer büyük hava aracı modelleri tercih edilecekse, bu araçların kaç tanesi, dünya çapındaki insan popülasyonunu taşıyan diğer hava araçlarıyla aynı anda uçacaktır? Aynı soru büyük tırlar ve gemiler için de geçerlidir.

Bu tür sorular aynı zamanda gelecek için tasarlanan daha küçük modeller için de geçerli olacaktır. Örneğin havacılıkta, bireysel hava araçları popüler hava ulaşım biçimleriyle ilişkili olarak bir sonraki dönüm noktasını mı teşkil edecektir? Bugün işe gidip gelirken araba kullananlarımız nihayetinde bu iş için kişisel hava araçlarını mı kullanmaya başlayacaktır? Peki ya insanlara kargolarını insansız hava araçları mı taşıyacaktır?

'Büyük boyutlardaki' nesnelerin varlığının fiziksel temeli, genellikle ekonomi alanında kullanılan, üretim tesislerinin büyüklüğünün ve sistematığının etkisiyle bir şey üretmek için birim maliyetinin azaltılması anlamına gelmektedir. Bir birim kütleyi (çok sayıdaki diğer birimlerle birlikte; büyük bir nehir, canlı, kamyon ya da uçak ile) bir yığının bir parçası olarak taşımak, tek başına taşımaktan daha kolaydır. Kalabalık bir alanın dışına çıkmak için yolunuzu bulmaya çalışırken önünüzdeki insanlarla birlikte sıralı ve düzenli bir şekilde hareket etmek, sizi ite kaka geçmeye çalışan diğer insanları dirsek vurarak kendinize yol açmaya çalışmaktan daha kolaydır. Canlılar kendi yaşam alanlarının her yerinde sıralı ve düzenli bir şekilde hareket etmektedirler (ör. Şekil 4.5). Canlılar tarafından oluşturulan keçi yolları, toprak yollar, taş döşeli yollar ve otobanlar gibi hatlar da aynı fiziksel kökene sahiptir.



Şekil 4.5 Zambiya, Busanga Plains'teki hayvan yolları (Fotoğraf: Adrian Bejan)

Boyut ile verim arasındaki ilişkiyi en temel şekilde ifade etmek için Şekil 4.6a'da gösterilen bir boru sistemi oluşturulmuştur. Sistemde içlerinden geçen suyun aynı akış oranına sahip, giriş çıkışlarındaki basınç düşüşü aynı olan, aynı pompalama gücünde olan, birbirinin tıpa tıp aynısı iki boru bulunmaktadır. Bu iki borudan akan sular, boyu bu iki borunun aynısı ve hacmi ikisinin hacimlerinin toplamına eşit olan büyük çaplı bir borudan birlikte akacak olursa, borunun basınç düşüşü ve gerekli olan pompalama gücü azalacaktır.



(a)



(b)

Şekil 4.6 (a) küçük çaplı iki borudaki akışın büyük çaplı bir boru ile taşınması, (b) küçük çaplı bir küre yerine büyük çaplı bir kürenin kullanılması

Denklem (1.3) akış direncinin vermektedir. Akış direnci de aynı zamanda basınç düşüşü ile Denklem (1.2)'deki gibi doğru orantılıdır. Denklem (1.3) kullanılarak büyük çaplı bir boru akışı ile toplamda aynı kütleli debiyi taşıyan küçük çaplı bir boru için çap oranı $(D_1/D_2)^{2^{1/2}}$ dir. 2 küçük borudaki akışın 1 büyük boru ile taşınması durumunda Laminer akışta % 50 ve Türbülanslı akışta % 28 daha az basınç düşüşü gerçekleşmektedir.

Bir diğer örnek ise, Şekil 4.6b'de gösterilen bir kanalda düzenli bir su akışının ya da rüzgâr tüneline hava akışının olduğu iki küredir. Bu küreler birbirinin tıpa tıpa aynıdır ve dolayısıyla üzerlerindeki sürüklenme kuvvetleri de aynıdır. Bu iki küre, ikisinin hacimlerinin toplamı kadar bir hacme sahip olan daha büyük bir küre ile değiştirilecek olursa, ortaya çıkacak sürüklenme kuvveti, iki kuvvetin toplamından daha az olacaktır. Su kanalındaki akışı sürdürmek için gerekli olan kuvvet de belirli bir oranda azalacaktır.

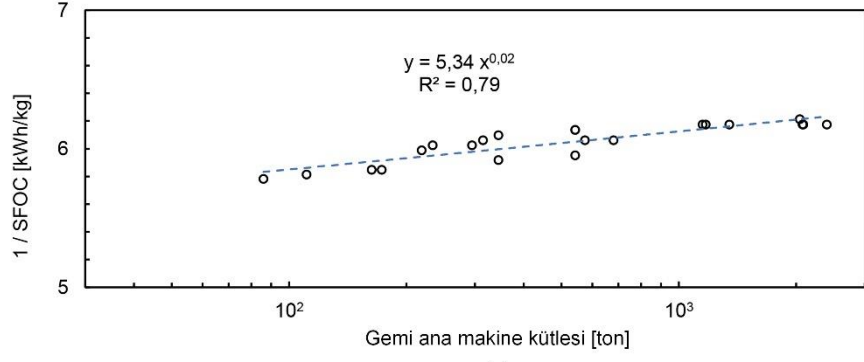
Aynı durum iki kürenin kütlelerinin tek bir kürede birleştirilmesi durumunda çap oranı $(D_1/D_2)^{2^{1/3}}$ tür. Bu oran sürüklenme kuvveti ifadesinde $(1/2\rho V^2 A)$ yerine yazıldığında laminer akış için % 37, türbülanslı akış için ise % 21 oranında sürüklenme kuvveti azalacaktır.

Bu değişiklikler yapısal gelişim teorisiyle uyumludur. Akış düzenlemeleri zaman

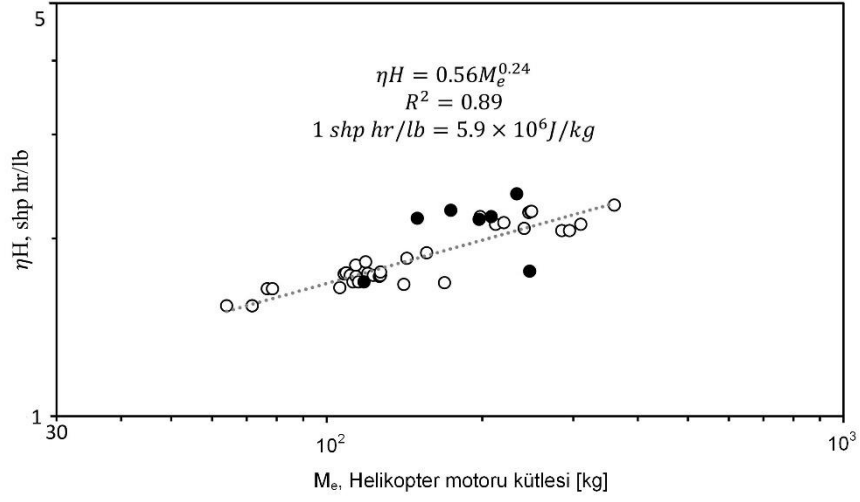
içerisinde şekil değiştirerek daha geniş bir erişime olanak sağlamaktadır. Tabiatta akış halinde olan şeyler birlikte ya da tek başına akma özgürlüğüne sahiptir. Buradaki kilit nokta; değişme ve biçim değiştirme özgürlüğüdür. Bu evrensel eğilim, yapısal gelişim teorisi tarafından temsil edilen yeni bir fizik alanıdır.

Boyut, tüm sistemlerde büyük bir öneme sahiptir [52], [75]–[83]. Örneğin M canlının vücut kütlesini ifade ediyorsa, söz konusu canlının yiyecek tüketim hızı, ya da metabolizma hızı $M^{3/4}$ 'tür [75]. Bundan yola çıkarak, birim vücut kütlesi için harcanan yiyeceğin, M 'nin büyüklüğü arttıkça $M^{-1/4}$ kadar azaldığı sonucuna varılabilir. Canlı ne kadar büyükse birim başına verimlilik o kadar yüksek olacaktır.

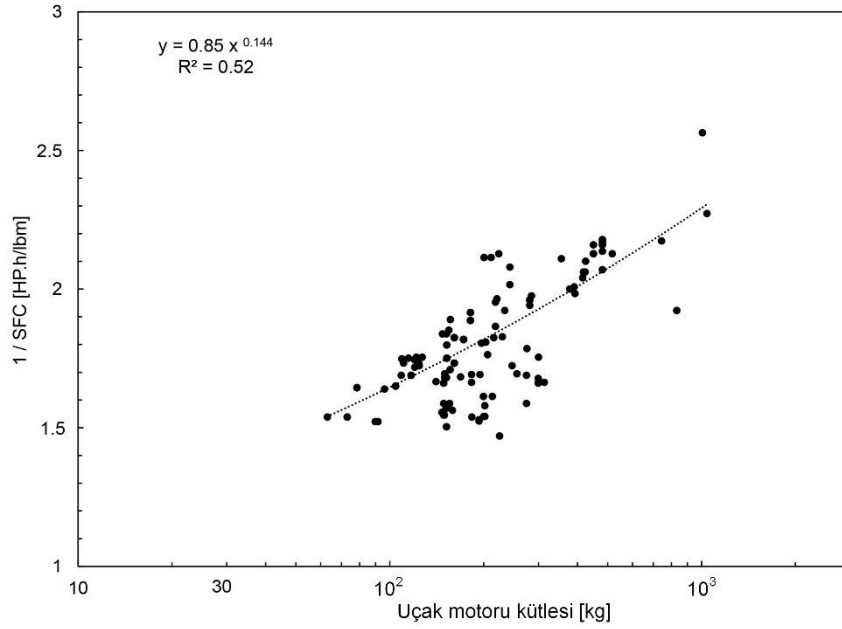
Yakıt da bir taşıtta aynı şekilde harcanmaktadır: Büyük motorlar daha verimlidir. Şekil 4.7'de bu iki zamanlı dizel gemi motorlarda [110] ve hava taşıtları için üretilen jet motorlarında [57] motor kütlesinin verim ile ilişkisi üzerinden görülmektedir.



(a)



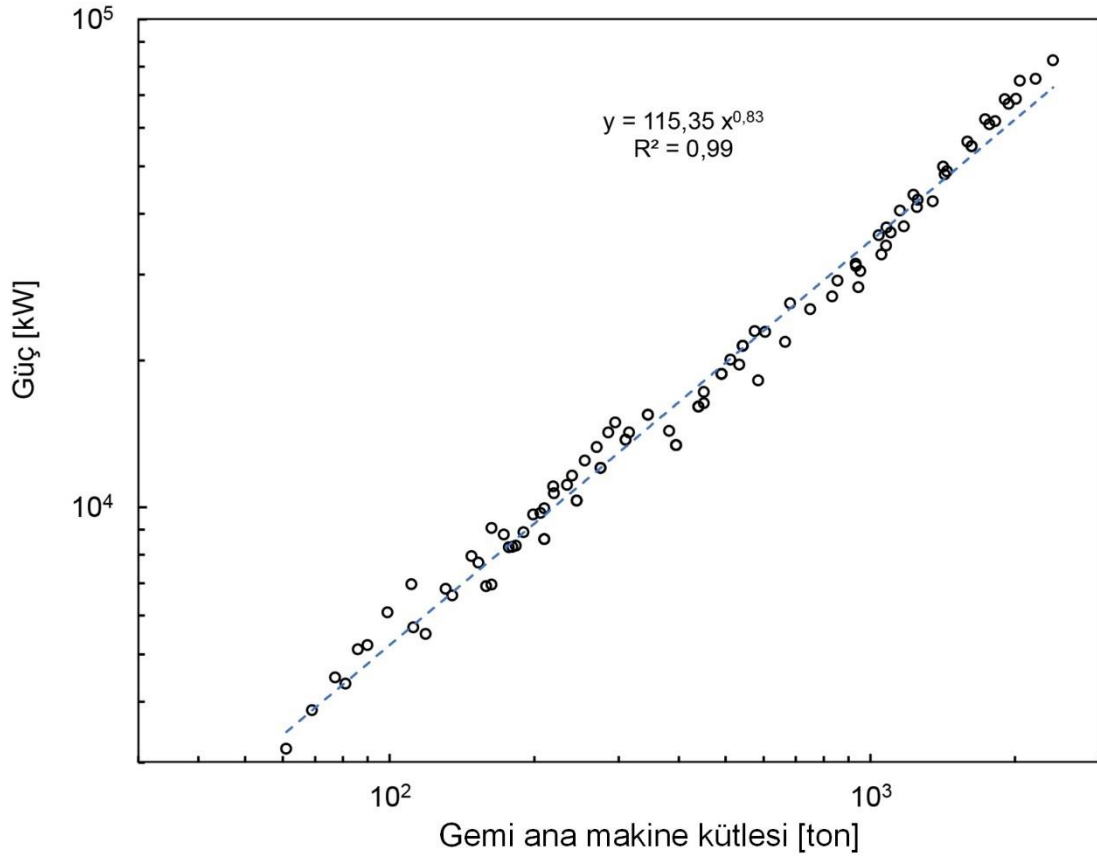
(b)



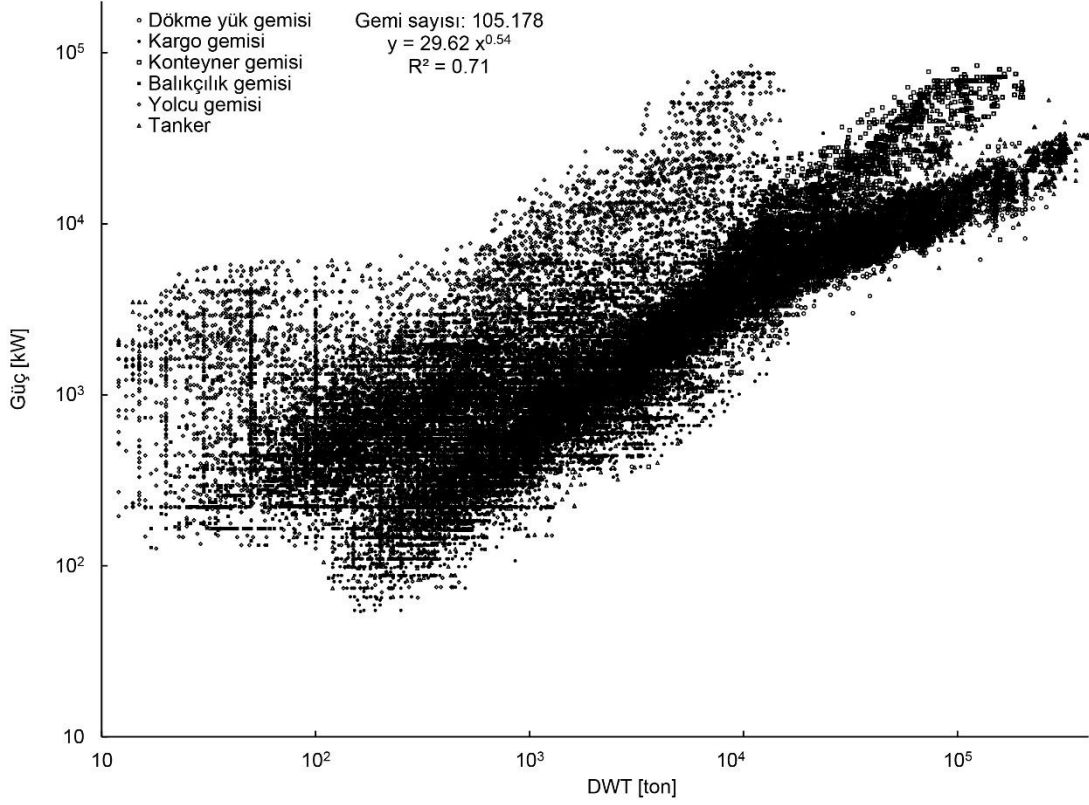
(c)

Şekil 4.7 Büyüklüğün, kullanılan birim yakıt başına motor iş çıktısı üzerindeki etkisi: a) gemi ana makineleri [110], b) helikopter motorları [53] c) uçak jet motorları [57].

Boyutun etkisi aynı zamanda kuvvet (itme kuvveti) ve güç açısından da ölçülebilir. Şekil 4.8 deniz taşımacılığında kullanılan motorların gücü ile büyüklüğü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gemi ana makine boyutları büyüdükçe birim boyut başına harcanması gereken güç azalacağı için büyük ana makineler küçüklerine göre daha verimlidir.

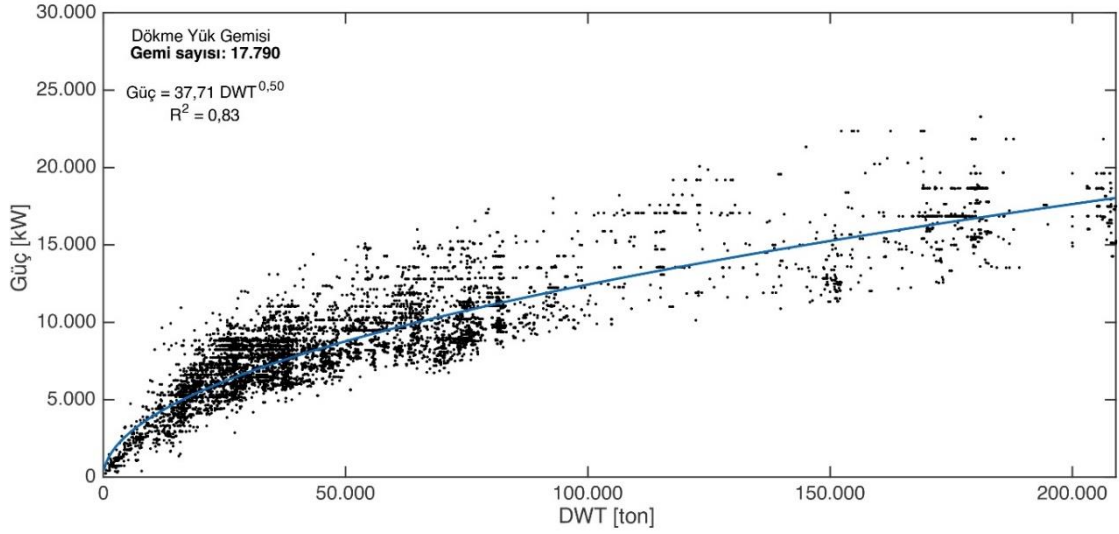


Şekil 4.8 2 zamanlı MAN gemi ana makinelerinde kütle - güç ilişkisi [110].



Şekil 4.9 Tüm gemi türleri için yük taşıma kapasitesi (DWT) - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

Şekil 4.9’da gemi tasarımlarına bağlı olarak 6 kategoriye ayrılmış olan gemi modeli (Dökme yük gemisi, Kargo, Konteyner, Balıkçı gemisi Yolcu Gemisi ve Tanker) verileri [107] ile gösterildiği üzere gemi büyüklüğü arttıkça verimin daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.9’da bir arada gösterilen gemiler Şekil 4.10’dan Şekil 4.19’a kadar gemi türlerine göre ayrı ayrı verilmiştir. Bu şekillerde gösterilen gemi sayısı, yük taşıma kapasitesi (DWT) - Güç ilişkisi ve R^2 değerleri Tablo 4.1’de topluca verilmiştir.



Şekil 4.10 Dökme yük gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

Dökme yük gemileri için bulunan bu yeni korelasyonun literatürdeki Harvald formülü [109] ile Şekil 4.11’de mukayesesi gösterilmiştir. Şekil 4.10 toplam 17.790 gemi için çizilirken Şekil 4.11 ise toplam 2.385 gemi için çizilmiştir. Şekil 4.10’da gösterilen tüm gemilerin deplasman, hız, boy değerleri mevcut olmadığı için sadece bu değerli olan gemiler mukayese için kullanılmıştır.

Harvald formülüne göre güç Denklem (4.3)’de göre tanımlanmıştır.

$$P_B = \frac{\Delta^{\left(\frac{2}{3}\right)} \cdot V^3}{c} \quad (4.3)$$

Burada hızın birimi (m/s) olup c katsayısı Denklem (4.4)’e göre hesaplanmaktadır.

$$c = 3,7x \left(\sqrt{L} + \frac{75}{V} \right) \quad (4.4)$$

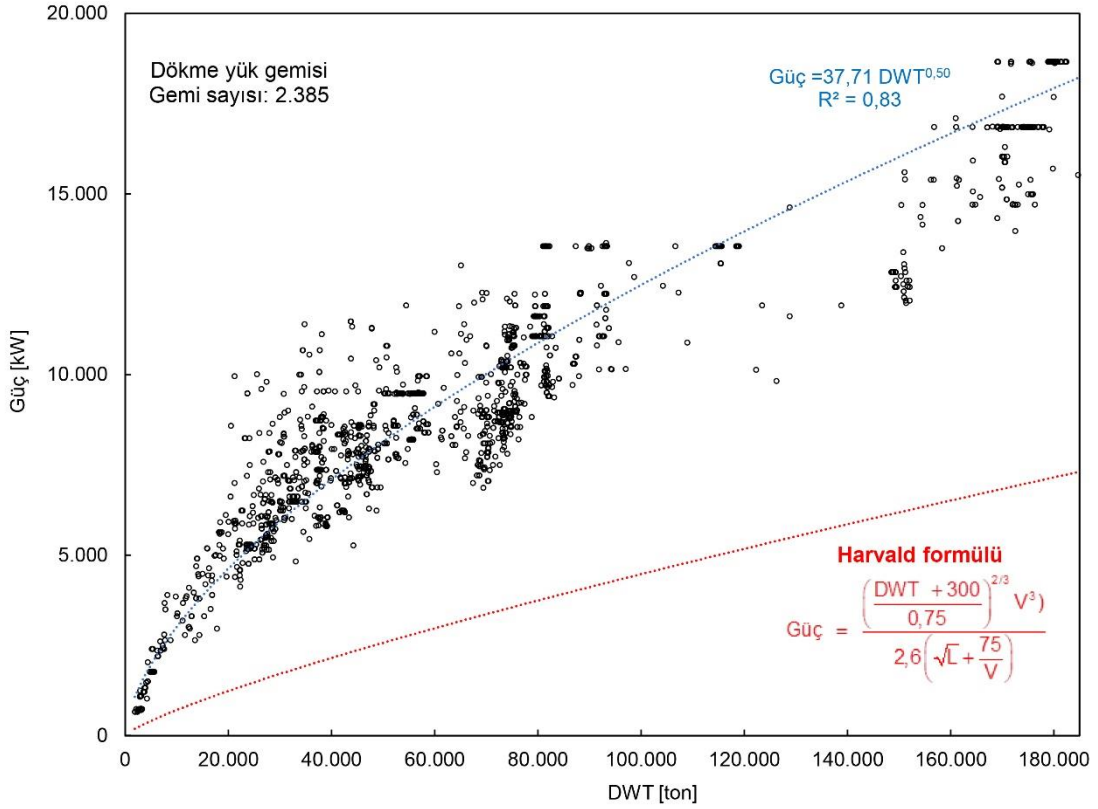
Burada hızın birimi (m/s) ve boyun (L) birim (m)’dir. Denklem (4.4)’deki 3,7 katsayısı Turan [109] tarafından 2,6 olarak güncellenmiştir.

Bu yaklaşıma göre deplasman ile DWT arasındaki ilişki de Denklem (4.5)’de gibi bulunmaktadır.

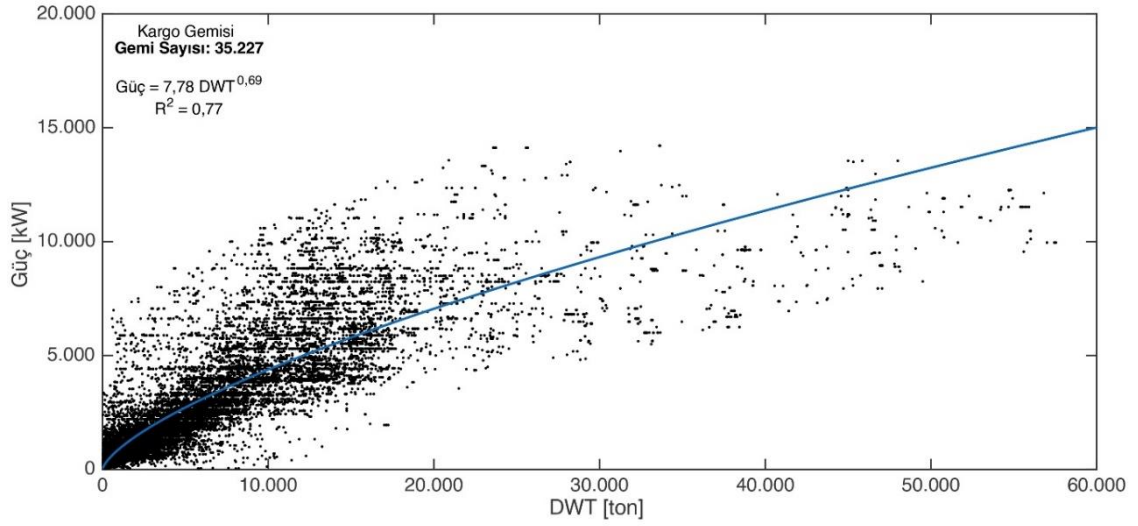
$$\Delta = \frac{DWT + 300}{0,75} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'te DWT'ye bağı olarak bulunan deplasman değerleri Şekil 4.21'de mukayese edilmiştir.

Bu tez kapsamında 6 farklı gemi türü için geliştirilen DWT ile güç (Şekil 4.11) ve DWT ile deplasman (Şekil 4.21) arasındaki ilişkilerin istatistiksel olarak yüksek olduğu görülmektedir. Yeni geliştirilen bu denklemler literatürdeki Harvald formülünden çok daha iyi sonuçlar vermektedir.

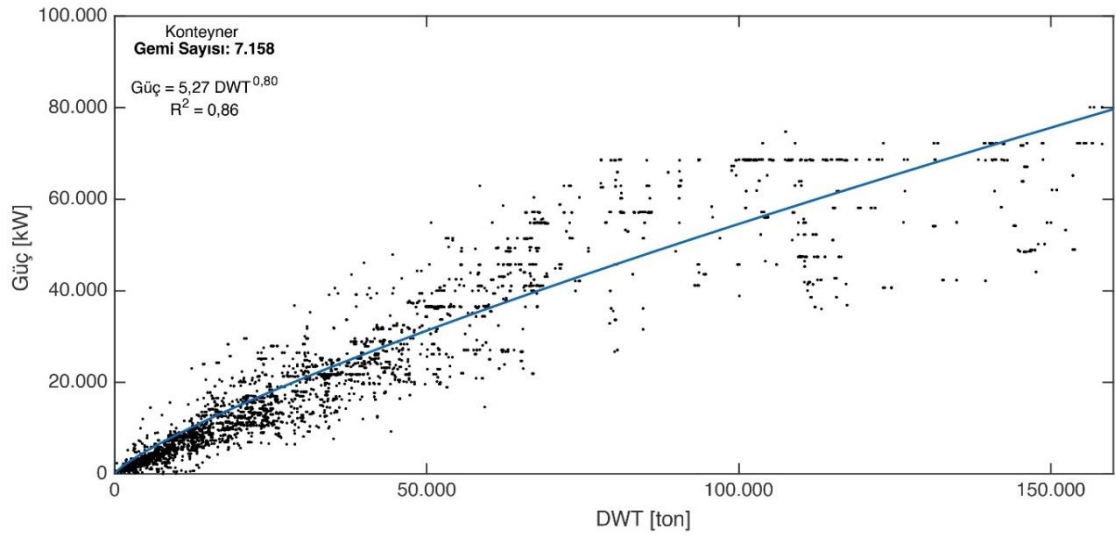


Şekil 4.11 Dökme yük gemileri için DWT - güç ilişkisi ile Harvald korelasyonunun mukayesesi (Veri kaynağı: [107]).

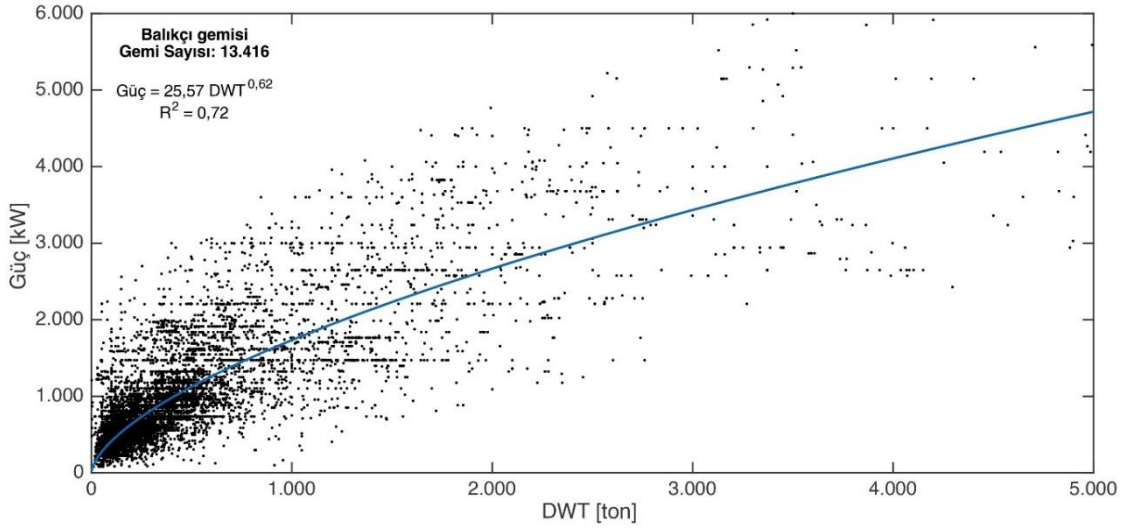


Şekil 4.12 Kargo gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

Şekil 4.12 kargo gemileri için, Şekil 4.13 konteyner gemileri için DWT – güç ilişkisini göstermektedir. Her iki şekilde taşınan yük kapasitesi arttıkça birim yük başına harcanması gereken gücün azaldığı görülmektedir.

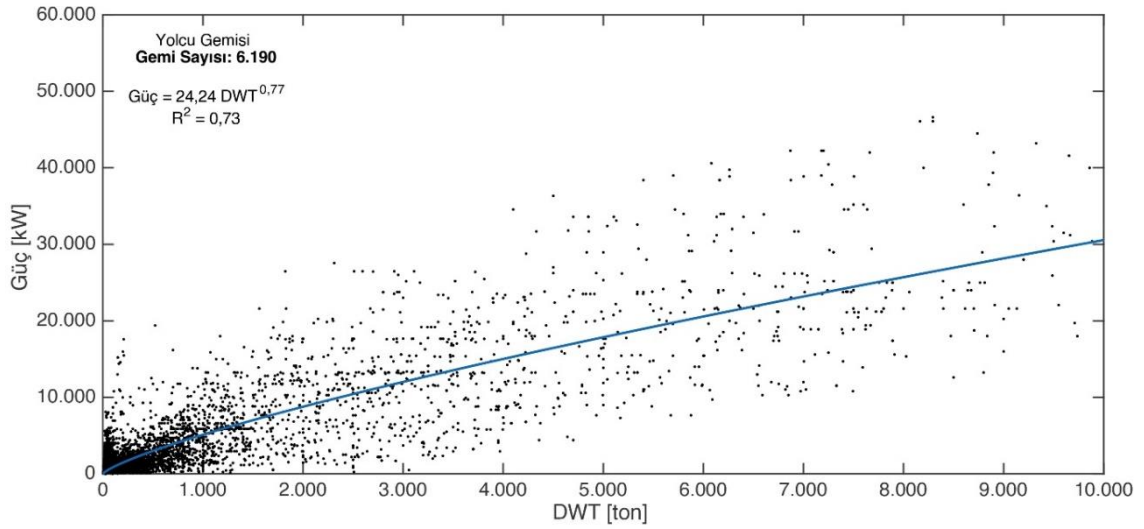


Şekil 4.13 Konteyner gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

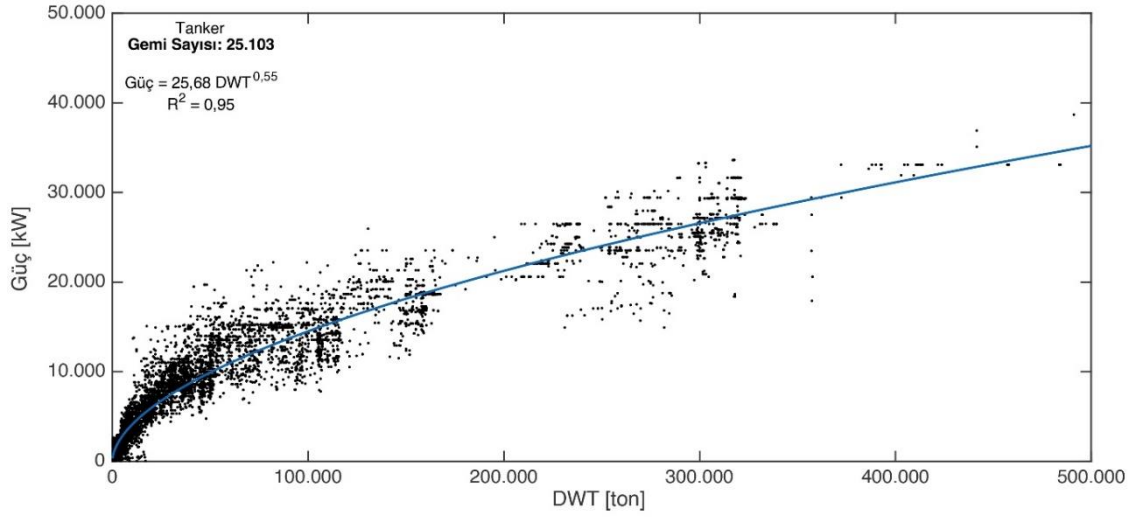


Şekil 4.14 Balıkçı gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

Şekil 4.14 balıkçı gemileri için, Şekil 4.15 yolcu gemileri için DWT - güç ilişkisini göstermektedir. Yine her iki şekilde taşınan yük kapasitesi arttıkça birim yük başına harcanması gereken gücün azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.15 Yolcu gemileri için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

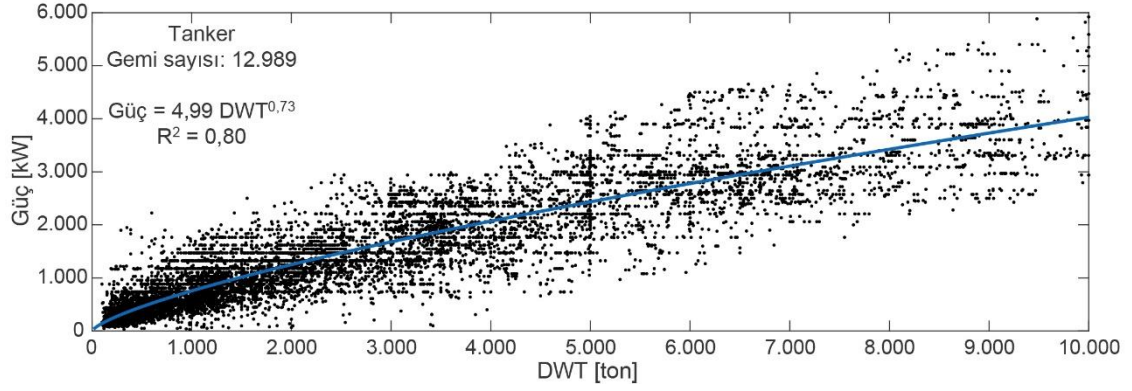


Şekil 4.16 Tankerler için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

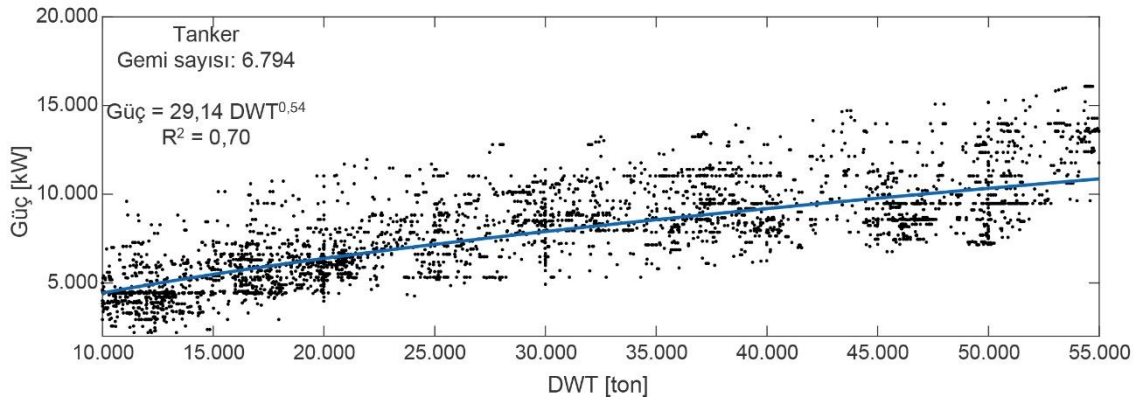
Şekil 4.16 tankerler için DWT – güç ilişkisini göstermektedir. Şekilde görüleceği üzere tankerler için 3 alt grup bulunmaktadır. Küçük, orta ve büyük tankerler olarak sınıflandırmak mümkündür:

- Küçük boyutta tankerler: taşıma kapasiteleri 10.000 DWT'dan küçük olanlar.
- Orta boyutta tankerler: taşıma kapasiteleri 10.000 DWT ile 55.000 DWT arasında olanlar. Bu grup içinde Handysize ve Handymax türü tankerler yer almaktadır.
- Büyük boyutta tankerler: taşıma kapasiteleri 55.000 DWT ile 550.000 DWT arasında olanlar. Bu grup içinde Panamax, Aframax, Suezmax, Very Large Crude Carrier (VLCC) ve Ultra Large Crude Carrier (ULCC) türü tankerler yer almaktadır.

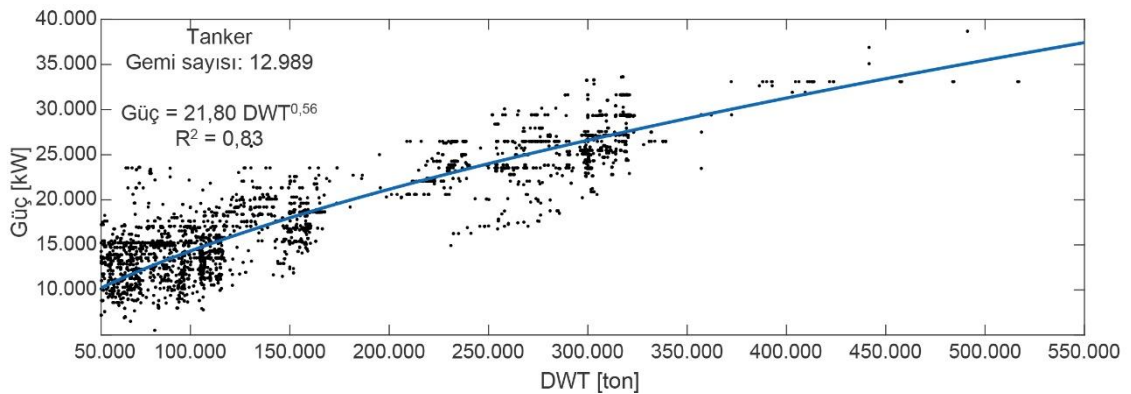
Şekil 4.17 küçük boyutta tanker için, Şekil 4.18 orta boyutta tanker için ve Şekil 4.19 büyük boyutta tanker için DWT – Güç ilişkisini göstermektedir.



Şekil 4.17 Küçük boyutta tankerlerki (Small, < 10.000 DWT) için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107]).



Şekil 4.18 Orta boyutta tankerlerki (Handysize + Handymax: 10.000 - 55.000 DWT) için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107]).



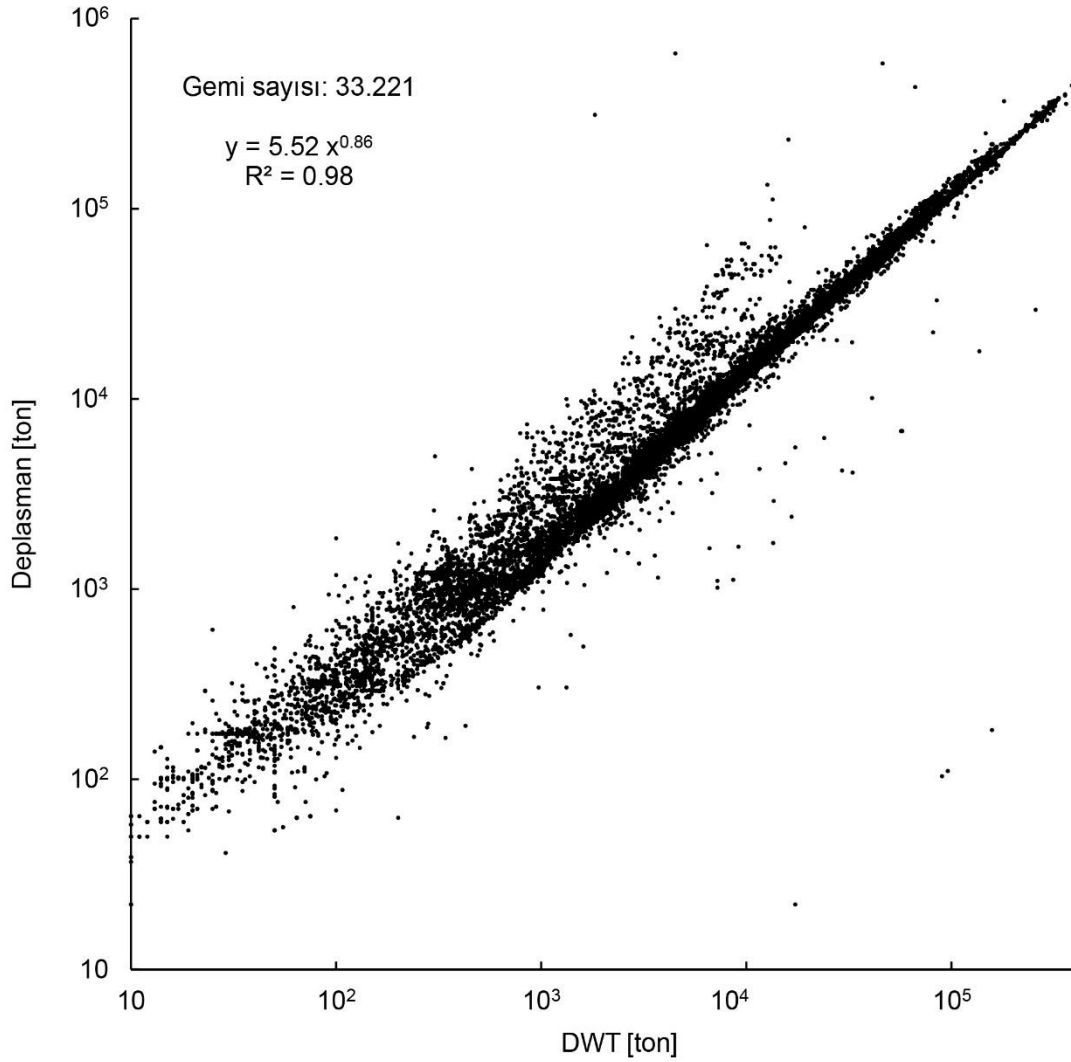
Şekil 4.19 Büyük boyuttaki tankerler (Panamax + Aframax + Suezmax + VLCC + ULCC: 55.000-550.00 DWT) için DWT - güç ilişkisi (Veri kaynağı: [107])

Gemiler için bulunan DWT – güç arasındaki ($Güç = a \cdot DWT^b$) bağıntılar Tablo 4.1’de verilmiştir. Benzer bir çalışma literatürde en fazla 1710 tanker, 1248 dökme yük gemisi ve 442 konteyner gemisi ile olmak üzere toplamda 3.400 gemi ile yapılmıştır [111]. Bu tez kapsamında yapılan çalışma kapsamında ise toplam 105.178 adet gemi bilgisi kullanılmıştır.

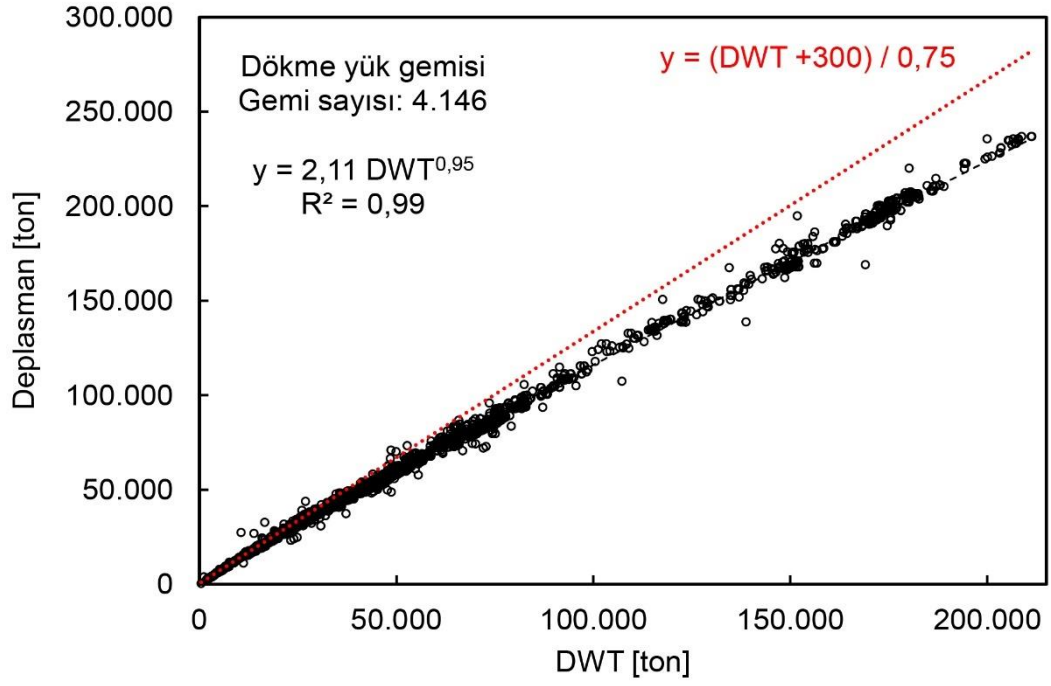
Tablo 4.1 Gemiler için DWT – güç bağıntıları

	a	b	R ²	Gemi sayısı
Tüm gemi türleri	29,62	0,54	0,71	105.178
Dökme yük gemisi	37,71	0,50	0,83	17.790
Kargo	7,78	0,69	0,77	35.227
Konteyner	5,27	0,80	0,86	7.158
Balıkçı gemisi	25,57	0,62	0,72	13.416
Yolcu gemisi	24,24	0,77	0,73	6.190
Tanker (Tümü)	25,68	0,55	0,95	25.103
< 10.000 DWT	4,99	0,73	0,80	12.989
Handysize + Handymax 10.000 DWT-55.000 DWT	29,14	0,54	0,70	6.794
Panamax + Aframax + Suezmax + VLCC + ULCC 55.000-550.00 DWT	21,80	0,56	0,83	5.246

Şekil 4.20 tüm gemi türleri için DWT ile geminin toplam ağırlığı olan deplasman arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Geminin toplam ağırlığı DWT ile boş gemi kütlesi (lightship) toplamına eşittir. Geminin toplam kütlesi ile taşıma kapasitesi (DWT) arasındaki güç yasası ilişkisini göstermektedir. Şekil 4.21’den Şekil 4.26’ya kadar Şekil 4.20’de beraber sunulan tüm gemi türleri için ayrı ayrı DWT – deplasman ilişkisi sunulmuş olup ilişkiler ise Tablo 4.2’de bir arada verilmiştir.

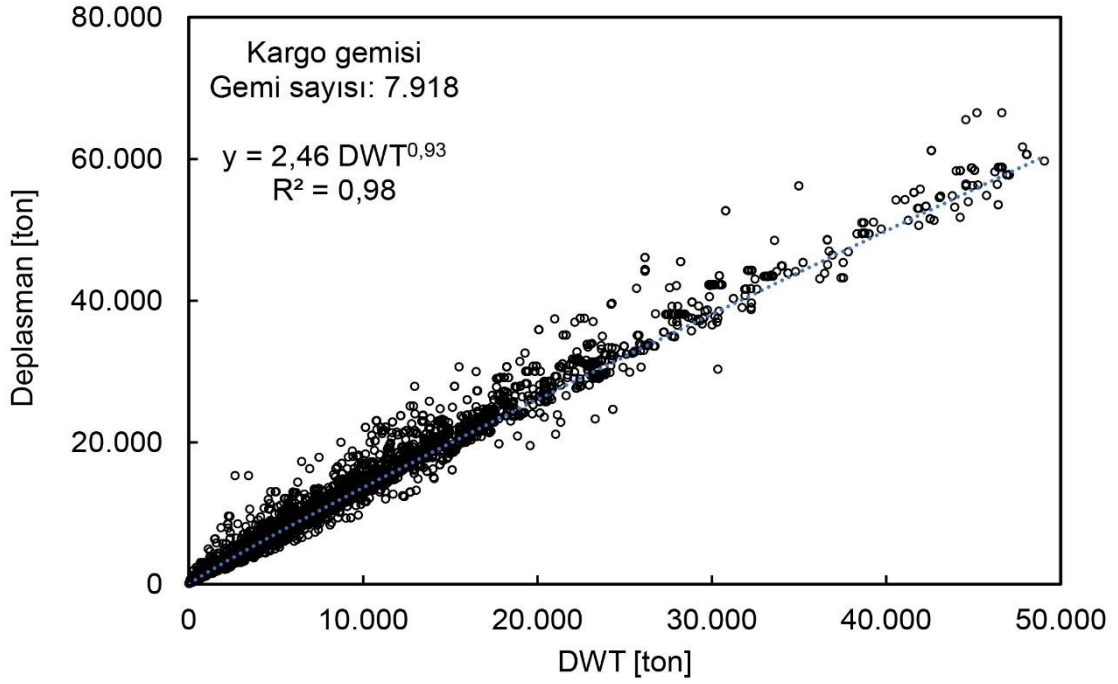


Şekil 4.20 Gemilerde taşınan yük kapasitesi (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).



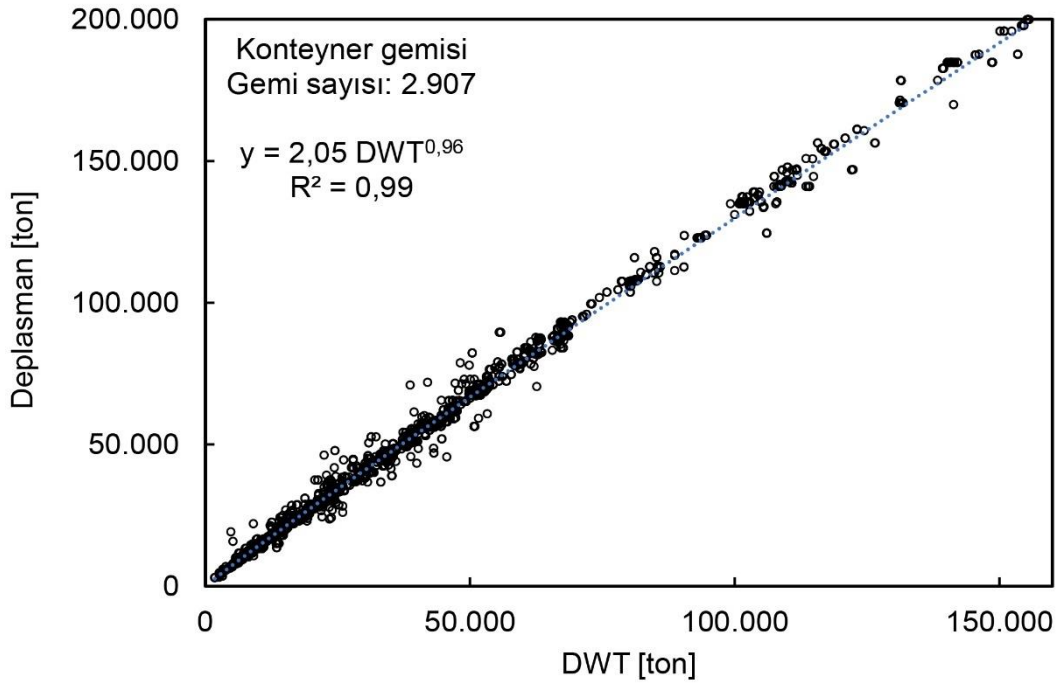
Şekil 4.21 Dökme yük gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

Şekil 4.21’de dökme yük gemileri için DWT – deplasman arasındaki ilişki sunulmuş olup literatürdeki [109] çalışmasında kullanılan yöntem ile de kıyaslanmıştır.

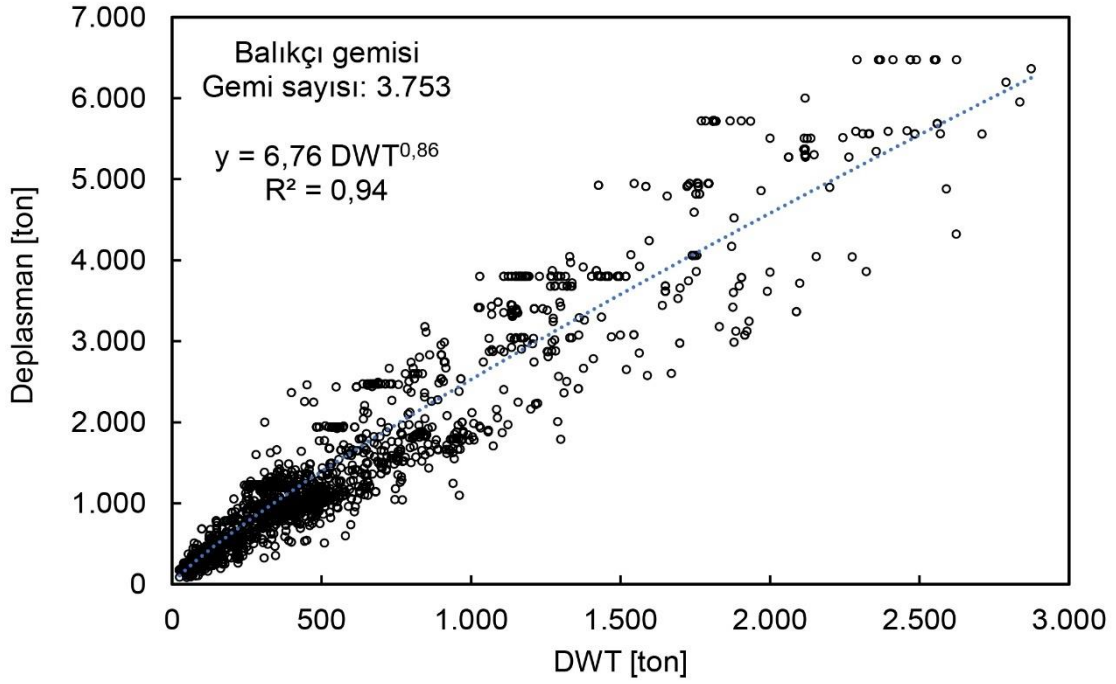


Şekil 4.22 Kargo gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

Şekil 4.22 kargo gemileri için, Şekil 4.23 ise konteyner gemileri için DWT – deplasman ilişkisini göstermektedir.

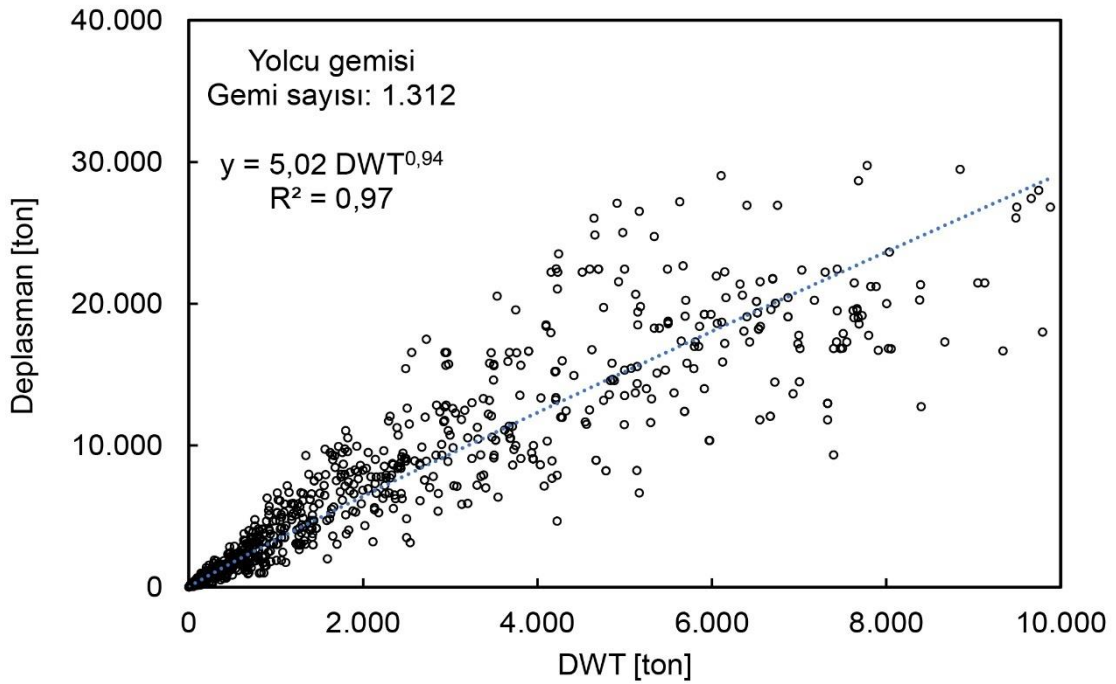


Şekil 4.23 Konteyner gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

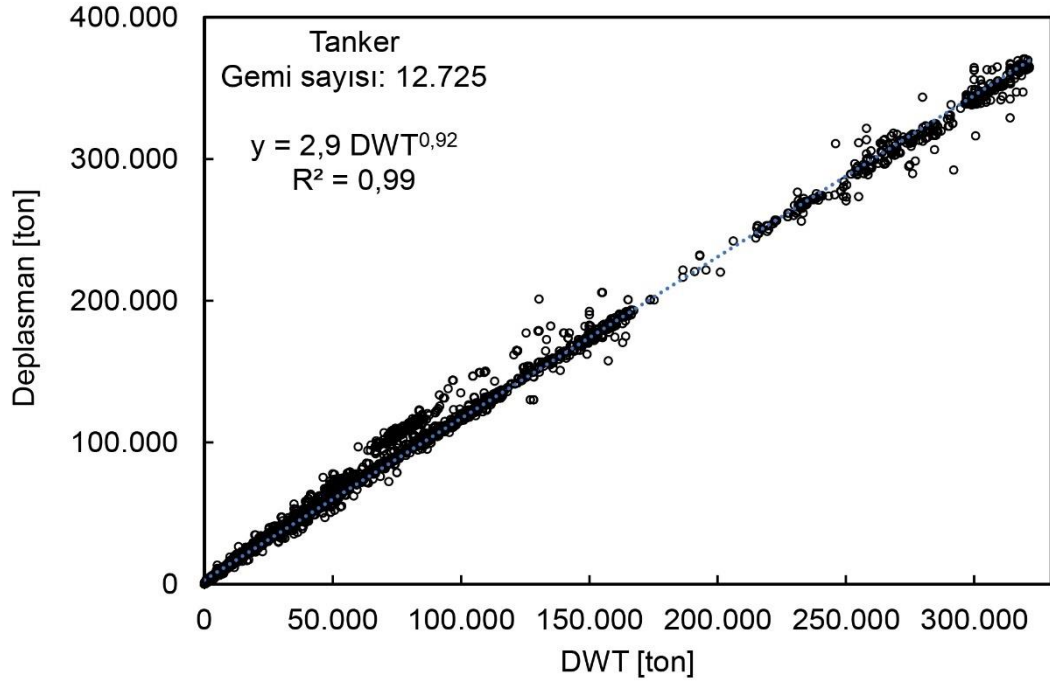


Şekil 4.24 Balıkçı gemilerinde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

Şekil 4.24 balıkçı gemileri için, Şekil 4.25 ise yolcu gemileri için ve Şekil 4.26 ise tankerler için DWT – deplasman ilişkisini göstermektedir.



Şekil 4.25 Yolcu gemilerin (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

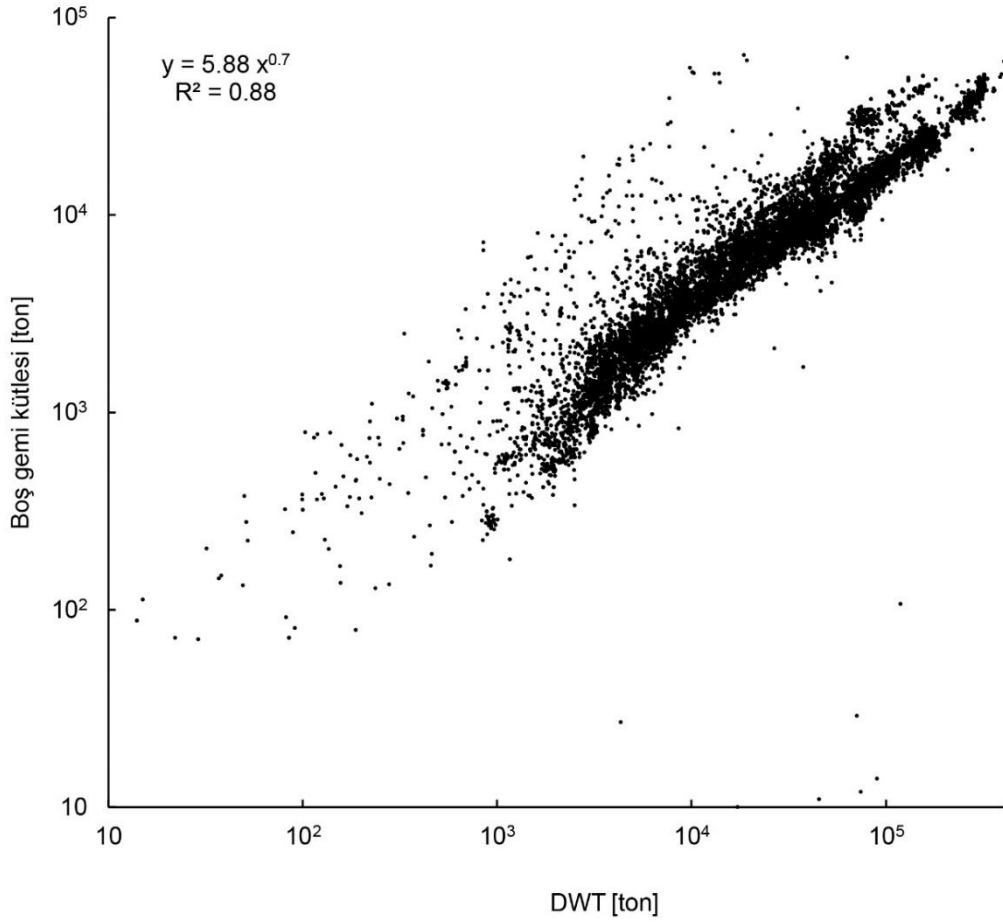


Şekil 4.26 Tankerlerde (DWT) ile deplasman arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

Gemiler için bulunan DWT – deplasman arasındaki (Deplasman = $a \cdot DWT^b$) bağıntılar Tablo 4.2’de verilmiştir.

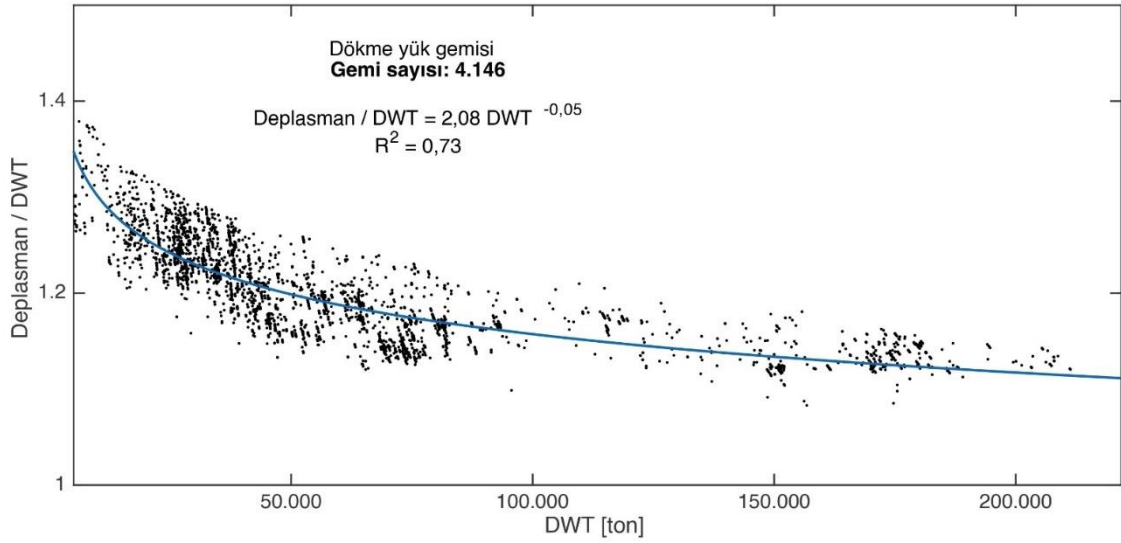
Tablo 4.2 Gemiler için DWT – deplasman bağıntıları

	a	b	R ²	Gemi sayısı
Tüm gemi türleri	5,52	0,86	0,98	28.615
Dökme yük gemisi	2,11	0,95	0,99	4.116
Kargo	2,46	0,93	0,98	7.918
Konteyner	2,05	0,96	0,99	2.907
Balıkçı gemisi	6,76	0,86	0,94	3.753
Yolcu gemisi	5,02	0,94	0,97	1.312
Tanker	2,9	0,92	0,99	12.725



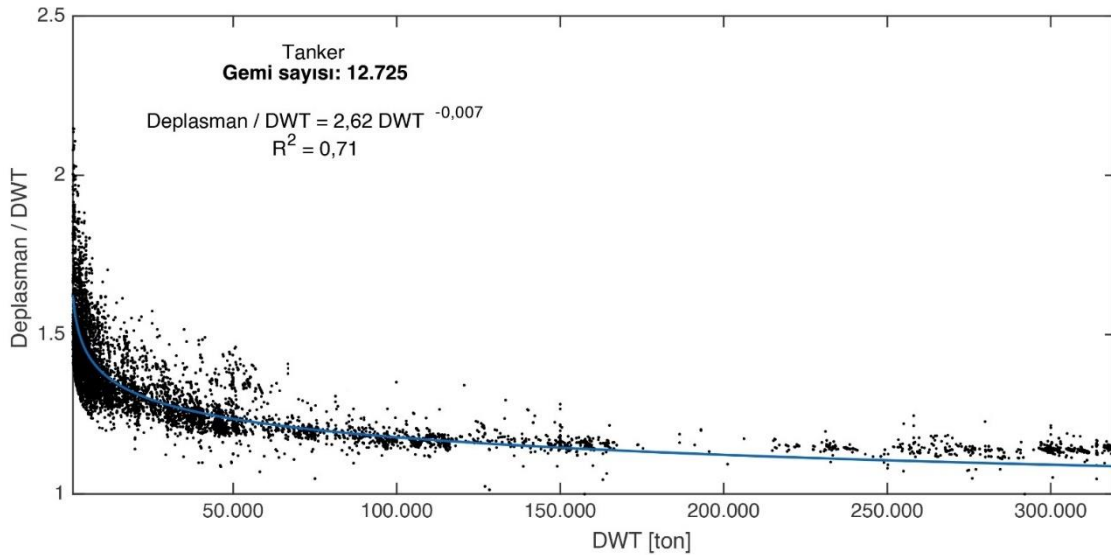
Şekil 4.27 Gemilerde (DWT) ile boş gemi kütlesi (lightship) arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).

Hem Şekil 4.20 hem de Şekil 4.27'deki korelasyonların eğiminin 1'den az olması da dikkate değer bir durumdur. Şekil 4.27'de eksenlerin yeri değiştirilip DWT dikey eksene yerleştirilirse, taşıma kapasitesinin gemi büyüklüğünün birden daha büyük bir üstel sayı ile orantılı olacağı anlamına gelir. Eğer gemi büyüklüğü 2 katına çıkarsa, taşıma kapasitesi Şekil 4.20'de 2,24 veya Şekil 4.27'de 2,7 katına çıkacaktır. Gemilerin güç tüketiminin taşıdığı yükün 0,51 ile 0,90 arasında bir kuvvetiyle orantılı olduğu gözlemi dikkate alınarak Şekil 4.9'dan Şekil 4.19'a kadar olan şekillere bakıldığında, gemilerin güç tüketimi DWT'nin ortalama 0,54'üncü kuvvetiyle orantılı olduğu görülebilir. Bu şekillerin R^2 değerleri yüksektir ve istatistiksel olarak anlamlı korelasyonlara işaret etmektedir [56], [112]. Daha büyük yükleri daha büyük gemiler ile taşımak birim yük başına gerekli olan gücü azalttığı için daha avantajlı olmaktadır.



Şekil 4.28 Dökme yük gemileri için DWT - Deplasman/DWT ilişkisi

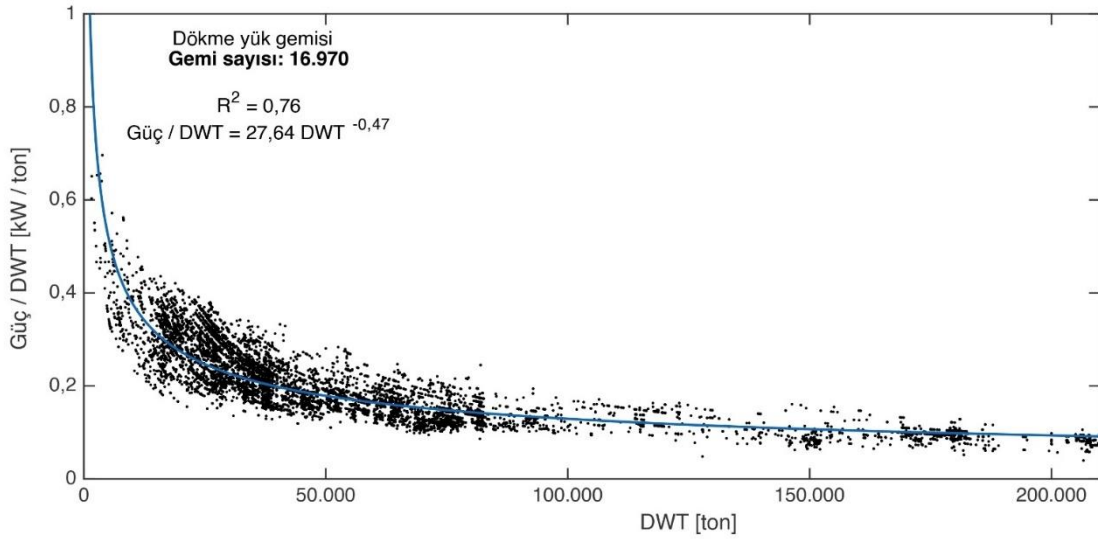
Dökme yük gemileri için DWT ile deplasman/DWT arasındaki ilişki 4.146 gemi için Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Tankerler için DWT ile deplasman/DWT arasındaki ilişki 12.725 gemi için Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Her iki grafikte de DWT arttıkça birim deplasmandaki taşınan yük oranı da artmaktadır. Bu sonuç büyük gemilerin yük taşıma kapasitesi açısından daha verimli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.29 Tankerler için DWT-Deplasman/DWT ilişkisi

Dökme yük gemileri için DWT ile Güç/DWT arasındaki ilişki 16.970 gemi için Şekil 4.30’da gösterilmiştir. Şekil 4.30’da DWT arttıkça birim yük başına harcanan

güç azalmaktadır. Gemi boyutu büyüdükçe birim yük başına harcanan gücün daha az olması büyük gemilerin daha verimli olduğunu göstermektedir.



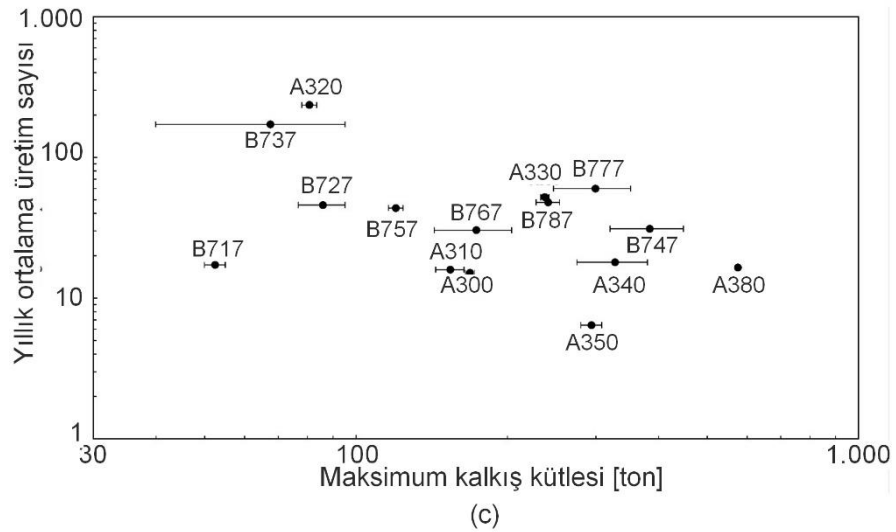
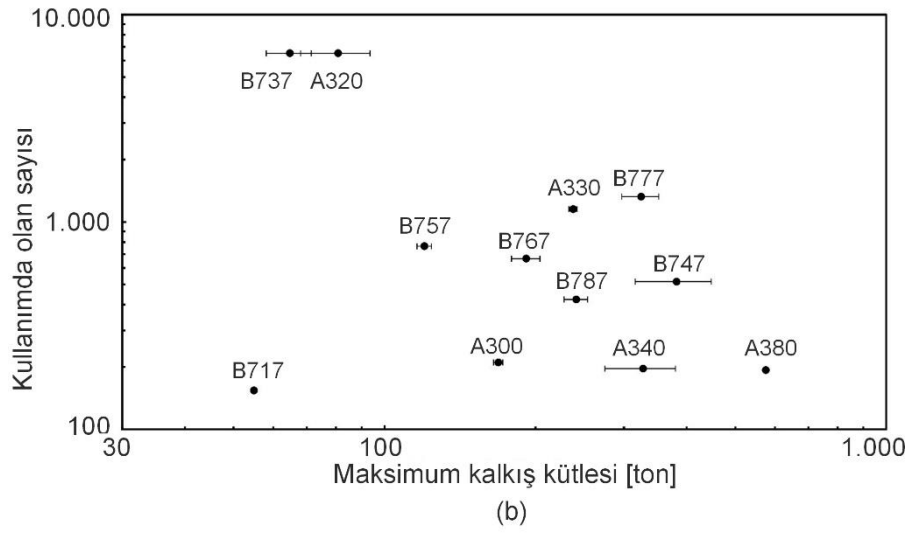
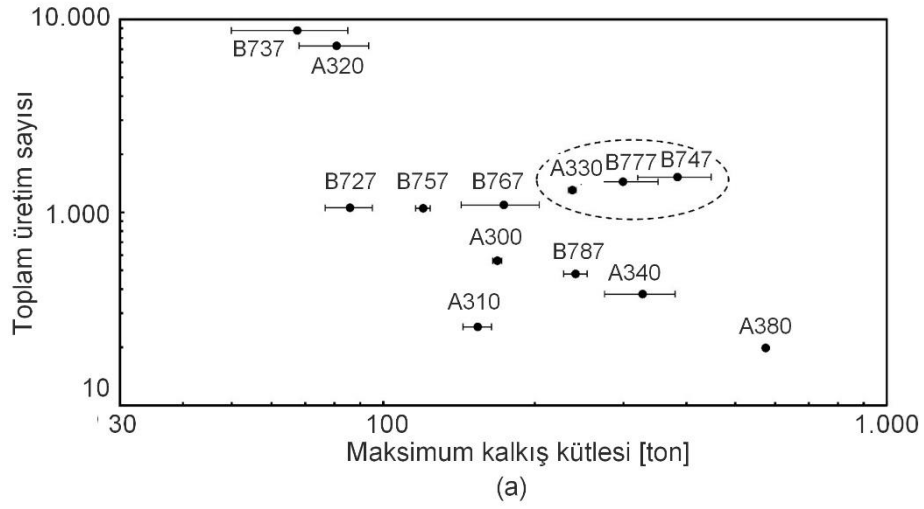
Şekil 4.30 Dökme yük gemileri için DWT - Güç/DWT ilişkisi

Büyükliğin elektrik santrallerinin, soğutma tesislerinin performansı üzerindeki etkisine dair çalışmalar yapılmıştır [113], [114]. Büyükliğin verimlilik, kuvvet ve güç üzerindeki etkisi, burada hava ve deniz taşımacılığı üzerinden gösterilen araçlar ve canlılarda da aynıdır. Canlı vücutları ve organları da [76]–[82] tıpkı nehir kanalları, havzaları ve deltaları gibi, aynı eğilimi göstermektedir [48], [115]. Eğer büyük kütleler küçük kütlelerden daha iyi hareket ediyorsa, neden tüm hareket eden varlıklar büyük bir varlığa dönüşmemektedir? Bunun nedeni, küçük boyutlardaki varlıkların büyük boyutlarda olanlarla birlikte var olmasının gerekliliğidir. Bir yerden başka bir yere doğru gerçekleştirilen hareket, fiziksel bir alan (noktadan alana) ya da hacmin (noktadan hacme) sınırları içerisinde gerçekleşir. Eğer akış bir noktadan diğer bir noktaya olsaydı o zaman tek bir kanal bulunması yeterli olacaktı. Ama noktadan alana ya da noktadan hacme olan akışlarda çok sayıda kademeli bir kanal yapısı gerekli olmaktadır. Hareket eden varlıkların hepsi büyük olursa, belirli bir alanı ya da hacme akış tam olarak iletilemez. Alandaki ya da hacimdeki her bir noktaya akışın ulaşabilmesi için az sayıdaki büyük kanallar ve aralarında kalan alan ya da hacme akışın ulaşması için daha fazla sayıdaki küçük kanallar bulunması gerekir. Küçük kanallar arasındaki alan ya da hacimde ise daha da küçük ve daha da fazla sayıdaki kanallar

bulunması gerekir.

Ortaya çıkan bu yapı doğal ve kaçınılmaz olarak kademeli yapıya dayalı bir sistemi doğurmaktadır. Bu durum jeofiziksel hareketlerde (akarsu havzaları), canlıların hareketlerinde (gıda zinciri), insanların toplumsal hareketlerinde (şehir trafiği, küresel hava trafiği), kısacası birçok yerde görülmektedir.

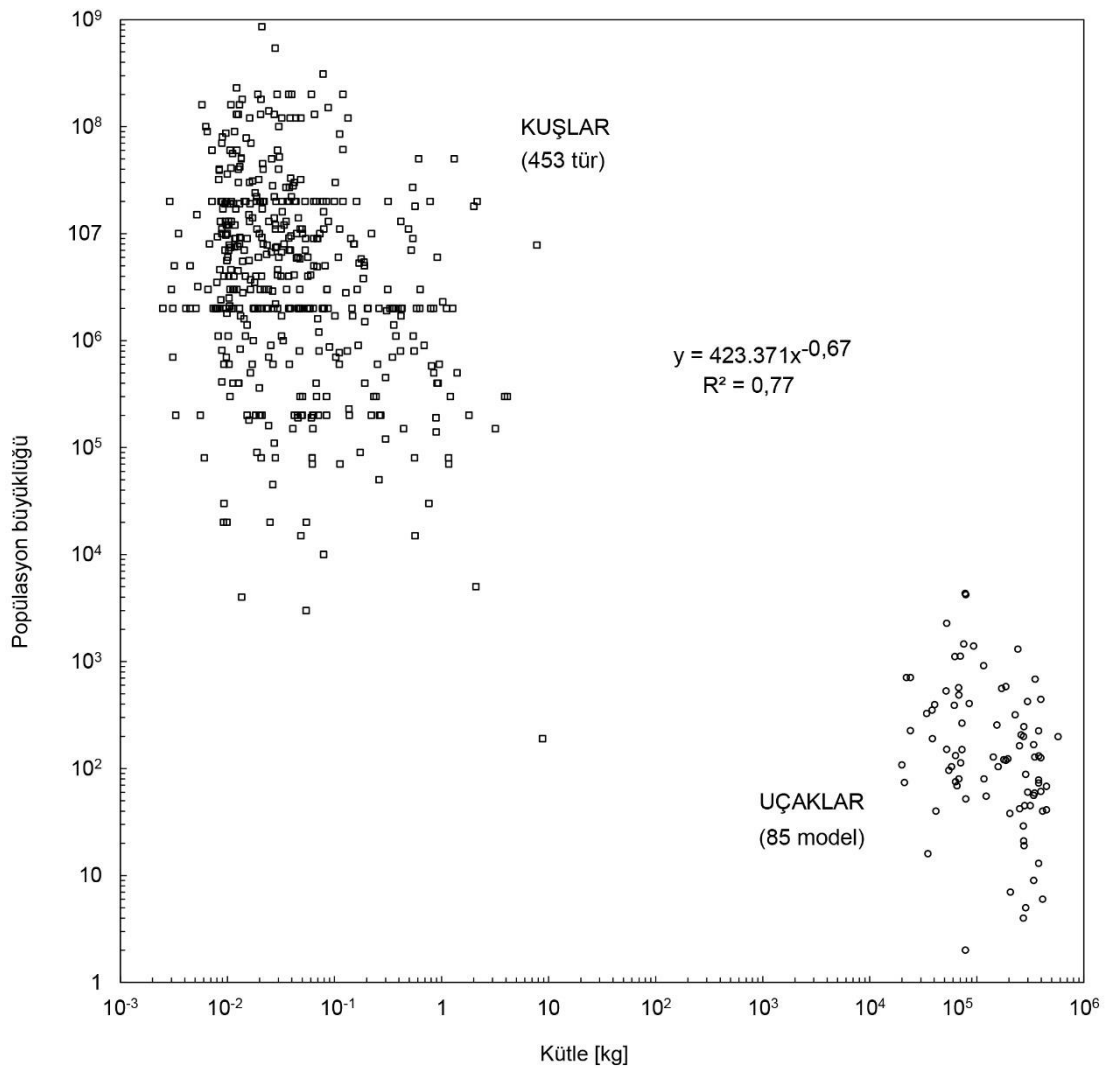
Yine de kendi kısa yaşam süremiz içerisinde bile insanları her gün dünyanın bir ucundan diğer ucuna taşıyan hava taşıtları tabiattaki kademeli sistemi sergilemektedir. Bunlarda büyük olanlar az sayıdayken küçük olanları ise çok sayıdadır. Şekil 4.31 ticari hava taşıtlarının kademeli yapısını göstermektedir. İnşa edilmiş olan hava taşıtlarının sayısı, şu an uçmakta olan hava taşıtlarının sayısı ve yıllık hava taşıtı üretimini apsisine yerleştirilmiş olan hava taşıtı boyutlarına göre göstermektedir [90]. Şekil 4.31'in dayandığı veriler [116]–[125] kaynaklarından derlenmiştir.



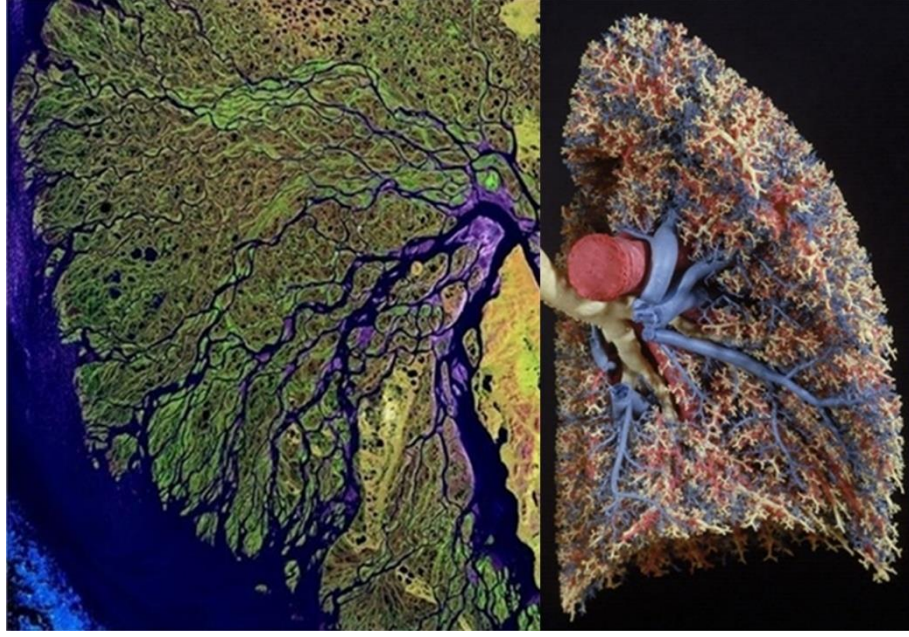
Şekil 4.31 Ticari uçaklarda maksimum kalkış kütlesinin a) toplam üretim sayısı ile b) kullanımda olan sayı ile c) yıllık ortalama üretim sayısı ile ilişkisi [90].

Hava taşıtlarından çok daha fazla sayıda olan uçan canlıların büyüklüğü ile

sayıları arasındaki ilişki hava taşıtlarıyla beraber Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Bu şekildeki iki veri seti [90], [126]–[129]’den elde edilmiştir. Şekil 4.32’de, 85 uçak çeşidi ve 453 kuş türü yer almaktadır. Burada görülen kademeli yapı iki veri bulutunun aşağı doğru eğimli bir çizgi üzerinde sıralanmalarıyla görünür hale gelmiştir. Veriler, eğimi -1’e yakın, $R^2 = 0,77$ olan ve eksenleri logaritmik olarak çizilmiş bir grafik ile gösterilmiştir. Bu grafik Şekil 4.4’te verilen niceliksel ilişkiyi teyit etmektedir. Tüm uçan böcekler için karşılaştırılabilir bir veri setine ulaşılamamasına rağmen bu tür bir veri setinin de kuşların veri setinin sol üstünde olacağı beklenmektedir.



Şekil 4.32 Kuşlar ve uçaklar için popülasyon ve gövde büyüklüğü arasındaki ilişki (Kaynaklar: uçaklar için [90], kuşlar için [126], [127]).

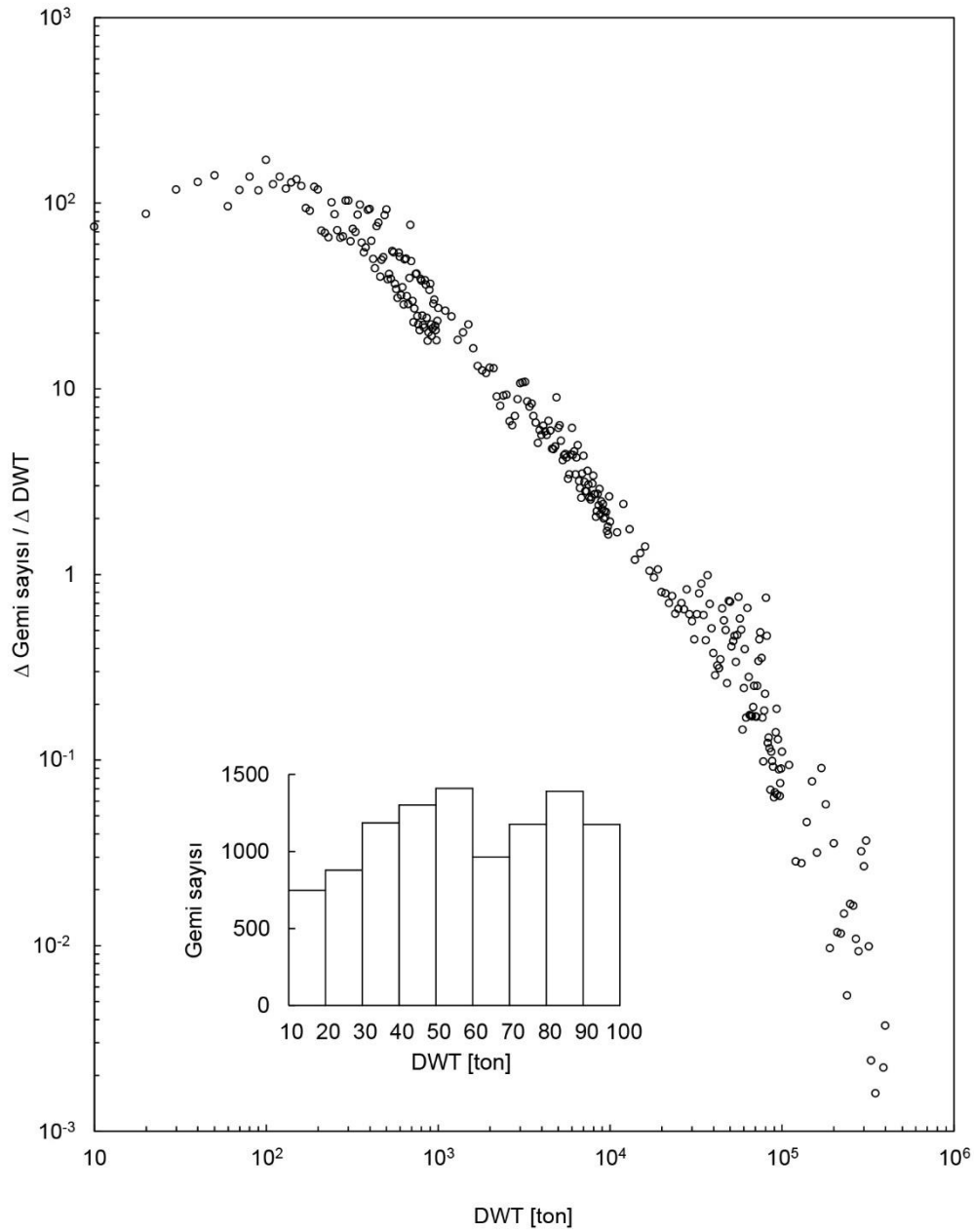


Şekil 4.33 Tabiattaki kademeli yapı: Sibiryada bulunan Lena nehri deltası (solda), insan akciğer modeli (sağda) [83]

Benzer durumları canlı ve cansız, tabiatın diğer tüm yerlerinde de görmek mümkündür. Şekil 4.33'te görüldüğü gibi Lena nehri deltasında büyük olan ana kol sayısı az sayıda olmasına rağmen küçük olan diğer kolların sayısı daha fazladır. Aynı şekilde akciğerimizde bulunan nefes borusu sadece bir tane iken akciğerin içindeki tüm hücrelere gaz transferini sağlayan bronşların ve bronşçukların sayısı çok daha fazladır.

Geçmişten günümüze kadar inşa edilen ve günümüzde faaliyet göstermekte olan gemiler ile ilgili çok fazla veri mevcuttur [107]. Bu çalışma için 100.000 gemiye ait veri toplanmış ve bu veriler Şekil 4.34'te gösterilmektedir. Sol alt köşedeki detaylar ordinatın (Δ Popülasyon/ Δ Boyut) nasıl hesaplandığını göstermektedir. Gemilerin boyut birimi olarak bir geminin büyüklüğünü en iyi gösterebileceğimiz DWT birimi dikkate alınmıştır. Kaynak [107]'e göre bugün dünyada 942.000 gemi mevcut olduğu görülmektedir. Gemi boyutu aralığı (yatay eksen), 310 alt aralığa bölünmüştür: 0 tondan 1.000 tona kadar alt aralık da çizimde detaylı olarak gösterildiği üzere 10 tonluk kesitlere bölünerek her bir aralıkta kaç adet geminin bulunduğunu göstermektedir. 100 ton 1.000 tondan 10.000'a kadar aralık 100 ton, 10.000 tondan 100.000 tona kadar aralık 1.000 ton ve 100.000 tondan 400.000 tona kadar aralık 10.000 ton alınmıştır. Böylece tüm boyut aralıkları için

her bir aralıkta bulunan gemilerin sayıları belirlenmiştir. Bu sayı Şekil 4.34'te verilen Δ Popülasyon değeridir.

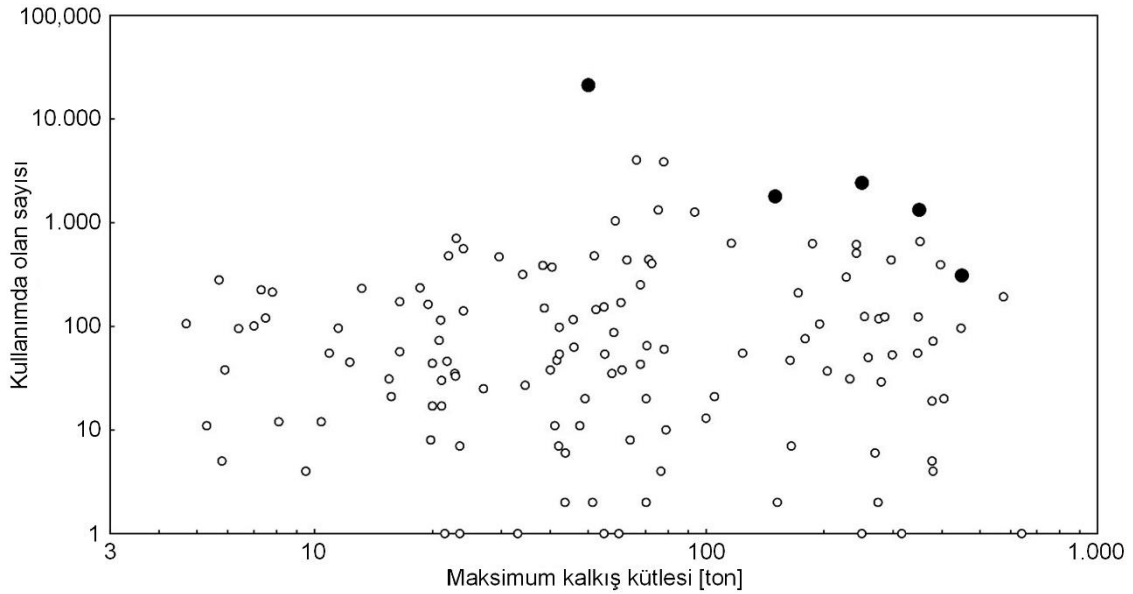


Şekil 4.34 Bugün var olan gemiler: popülasyon yoğunluğu ve gövde büyüklüğü (Veri kaynağı: [107]).

Şekil 4.34 popülasyon yoğunluğu ile gemi boyutu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gemilerin sayıları boyutlarının ne kadar büyük olduğuna bağlıdır. Daha küçük gemiler sayıca daha fazladır çünkü boyut aralığındaki yoğunlukları daha büyük gemilerin yoğunluğundan daha fazladır. Veri bulutunun neredeyse düz olan kısmının eğimi -1 ve $R^2 = 0.85$ olan bir çizgi halinde korelasyon

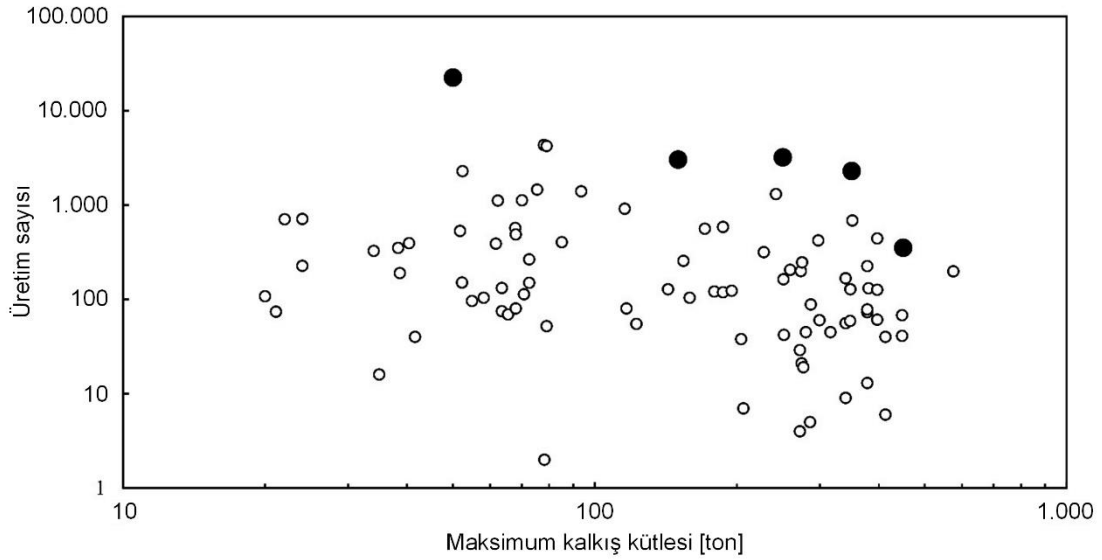
göstermektedir.

Sayılar ile boyutlar arasındaki kademeli dağılım, aynı zamanda ticari hava taşıtlarının popülasyonu için de geçerlidir. Şekil 4.35 bu durumu tüm uçan taşıtlarda inşa edilen modeller için ve hava taşıtı modellerinin yıllık üretimini göstermektedir.



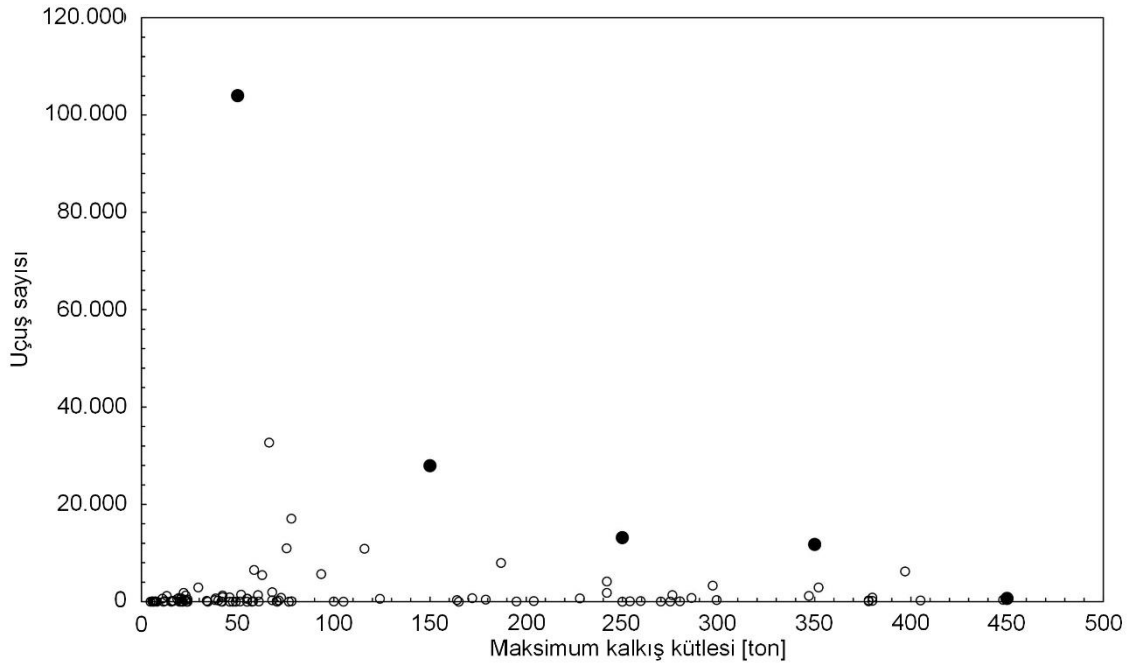
Şekil 4.35 Temmuz 2016'da uçan hava taşıtlarının sayısı [90]

Şekil 4.35'te maksimum kalkış kütlesi ile o modelin kullanımda olan sayısı görülmektedir. Küçük uçakların sayısı büyük uçaklardakinden çok daha fazla olup boyut büyüdükçe sayının azaldığı görülmektedir. Şekildeki kademeli yapı siyah semboller ile gösterilmiştir. Siyah noktalar tanımlanmış aralıklardaki (1-100 ton, 101-200 ton, 201-300 ton, 301-400 ton ve 400 ton ve üzeri) hava taşıtlarının toplam sayısını göstermektedir.



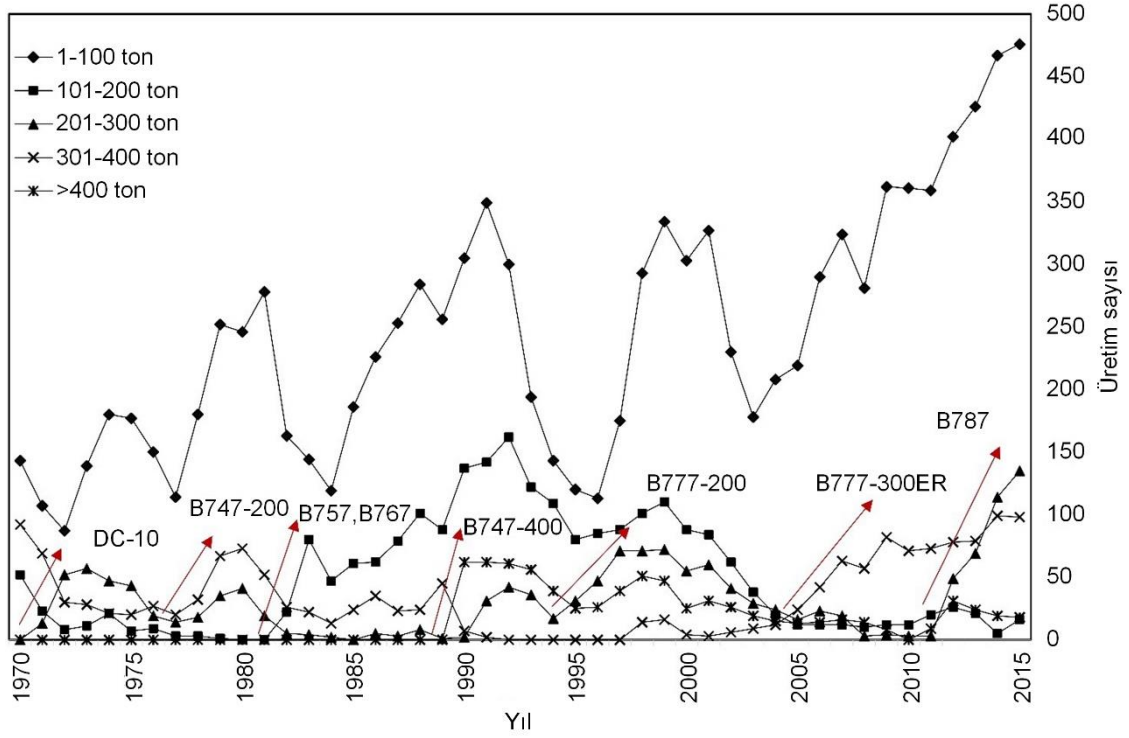
Şekil 4.36 1970'ten sonra Boeing, Airbus, Bombardier ve Embraer tarafından inşa edilen hava taşıtlarının sayısı [90]

Şekil 4.36'da maksimum kalkış kütlesine bağlı olarak üretim sayıları görülmektedir. Yine kademeli yapıya uygun olarak tanımlanmış aralıktaki toplam üretim sayıları (1-100 ton, 101-200 ton, 201-300 ton, 301-400 ton ve 400 ton ve üzeri) siyah noktalar ile gösterilmektedir. Uçak boyutları büyüdükçe o boyutun bulunduğu aralıktaki toplam uçak üretim sayısı azalmaktadır.



Şekil 4.37 Uçuş sayıları ve maksimum kalkış kütlesi [90] (Kademeli yapılar siyah semboller ile gösterilmiştir)

Şekil 4.37’de 2016 yılında yapılan toplam 150.000 uçuşa ait maksimum kalkış kütlesi ile uçuş sayıları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Burada yine bir gruplandırma (1-100 ton, 101-200 ton, 201-300 ton, 301-400 ton ve 400 ton ve üzeri) yapılmış olup küçüklerin çok sayıda, büyüklerin ise az sayıda olduğu benzer bir kademeli yapı görülmektedir.



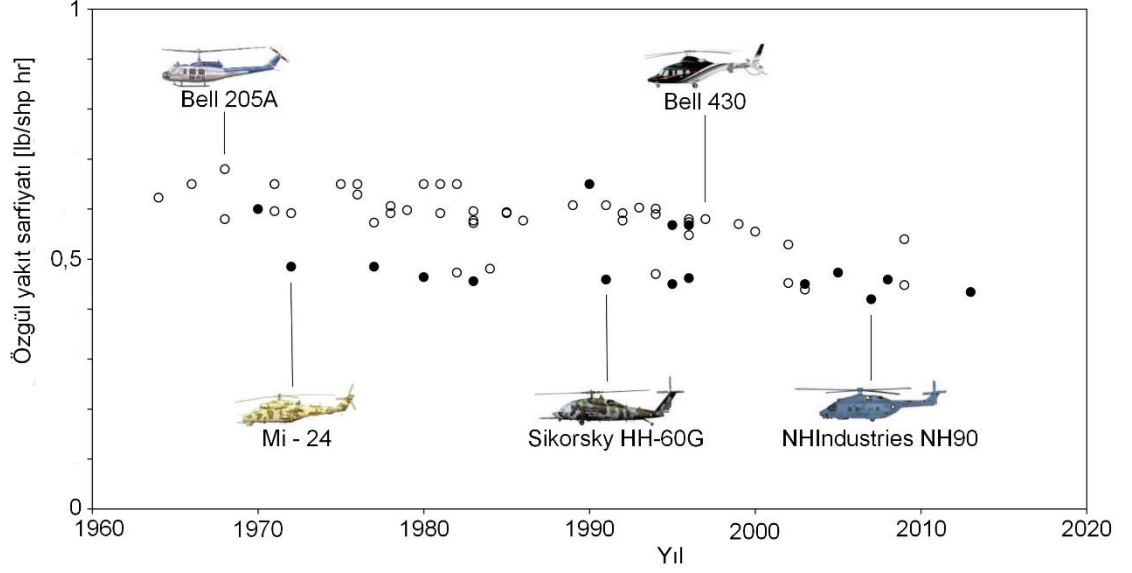
Şekil 4.38 1970’ten beri Boeing hava taşıtı modellerinin yıllık üretimi [90].

Şekil 4.38’de Boeing firmasının 1970’ten 2015 yılına kadar üretmiş olduğu modellerin üretim sayısı görülmektedir. Boyutları 5 farklı aralıkta gruplandığımızda (1-100 ton, 101-200 ton, 201-300 ton, 301-400 ton ve 400 ton ve üzeri) o aralıktaki toplam sayılarda boyut büyüdükçe toplam sayı düşmektedir.

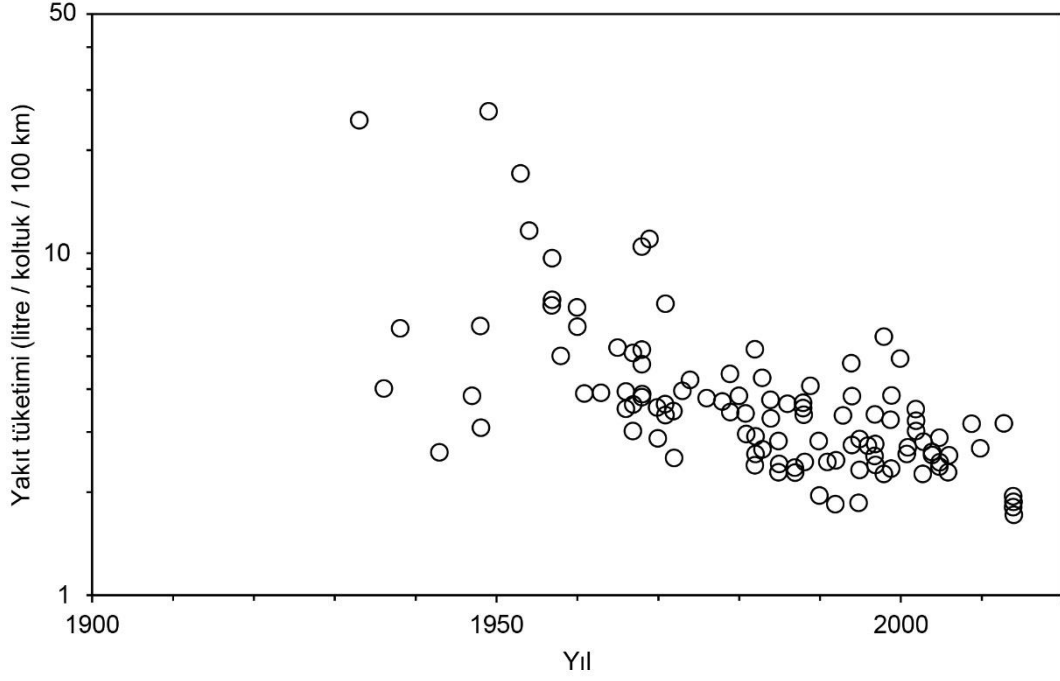
4.2 Gelişim

Zaman içindeki gelişim olgusu tabiatta tam teşekküllü olarak sergilenmekte olup bu gelişim insan hareketini de içermektedir. Büyük ya da küçük olsun, hava taşıtları ve gemiler, kendi ortamları içerisinde daha kolay erişimi mümkün kılacak şekilde gelişmektedir. Bu da aynı zamanda yolcu ve gidilen kilometre başına daha az yakıt harcamak ve daha ekonomik, daha serbest ve daha verimli hale gelmek

demektir. Örneğin, son elli yıl boyunca helikopterlerin gelişimi belirli yakıt tüketimleri açısından istikrarlı bir azalmaya işaret etmektedir (Şekil 4.39) [53]. Ticari jetlerin gelişimi de özgül yakıt sarfiyatının azalması yönünde olmuştur (Şekil 4.40). Kaynak [93]'te gösterildiği üzere, koltuk başına ve uçulan her 100 km için tüketilen yakıtta yıllık olarak % 1,2'lik bir azalma söz konusudur.

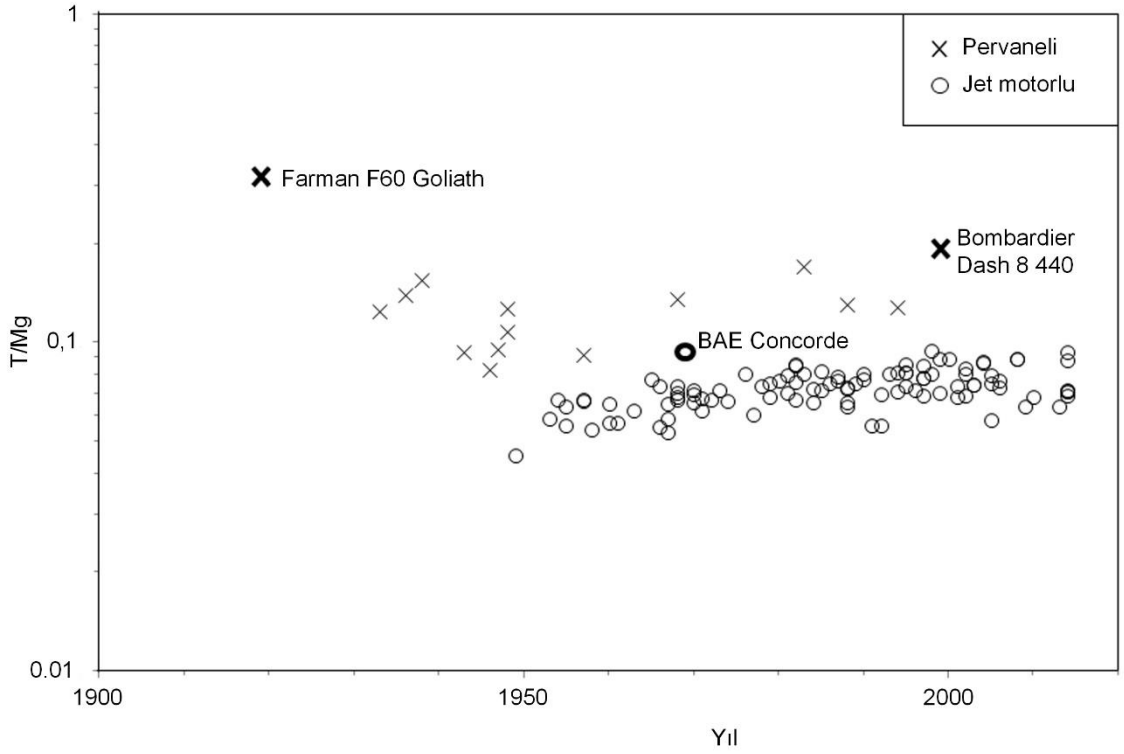


Şekil 4.39 Helikopterlerdeki özgül yakıt tüketimindeki azalış [53] (Siyah noktalar askeri helikopterleri göstermektedir)



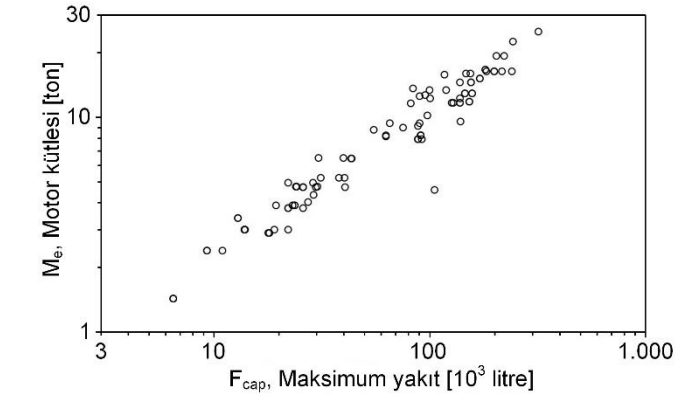
Şekil 4.40 Uçaklardaki özgül yakıt tüketimindeki azalış [57], [93].

Şekil 4.41’de gösterildiği üzere, birim motor ağırlığı (Mg) başına hava taşıtı motorunun itme kuvvetinde (T) yıllar içinde bir azalma meydana gelmiştir. Bu azalmanın en büyük nedenlerinden birisi uçaklarda pervanenin değil de jet motorlarının kullanılmaya başlaması olmuştur [84].

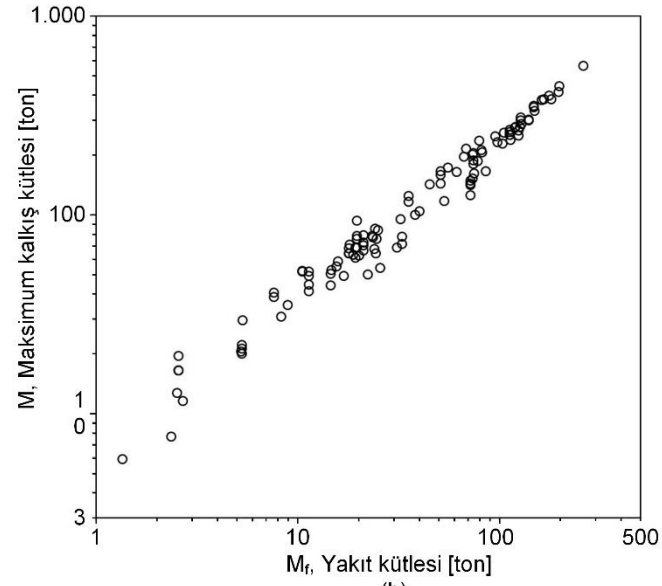


Şekil 4.41 Ticari uçakların spesifik yakıt tüketimlerinin pervaneden jet motoruna geçişyle yıllara göre azalması [84].

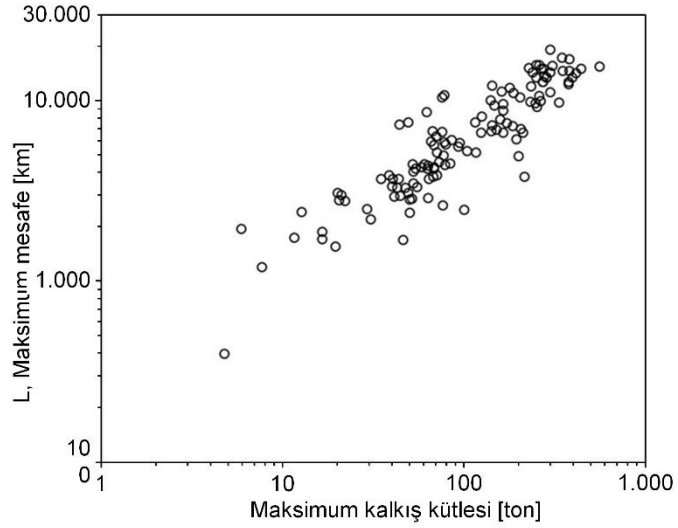
Gelişim ile ekonomiklik ve verimlilikte değişmektedir. Büyük uçaklar boyutları ile orantılı miktarda yakıt yüküyle çalışırken (Şekil 4.42a) büyük kuşlar beslenme sezonu boyunca kendi boyutları ile orantılı olarak kazandıkları ağırlıkları sayesinde daha uzun mesafelere göç ederler. Büyük uçaklar boyutları ile orantılı büyük motorlara sahipken (Şekil 4.42a) büyük kuşlar boyutları ile orantılı kas kütlelerine sahiptir (Şekil 4.3). Bu oran, yapısal gelişim teorisinde bulunabilir. L uzunluğunda bir yol boyunca giden ve M_f kadar yakıt tüketen bir taşıtı ele alalım. M kütlelerine sahip olan taşıtın bu kütlelerinin iki bileşeni vardır: Bunlar, yakıt kütlesi (M_f) ve motorlu taşıt kütlesidir (M_m).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.42 Uçaklarda a) maksimum yakıt miktarı ile motor kütlesi arasındaki ilişki, b) yakıt kütlesi ile maksimum kalkış kütlesi arasındaki ilişki, c) maksimum kalkış kütlesi ile maksimum mesafe arasındaki ilişki [57].

M_f 'nin yakılması ile motora $Q = M_f H$ kadar ısı iletilmektedir; burada H yakıtın ısıl değeridir. Q ile elde edilen iş, L uzunluğundaki yol boyunca tüketilmektedir. Buradaki eşitlik $W = \mu MgL$ şeklinde olup μ etkin sürtünme katsayısını verirken Mg dolu taşıtın ağırlığını göstermektedir. Buradaki iş ifadesi (W), hava kara ve deniz ulaşım biçimleri için geçerlidir [23], [79].

Aracın enerji dönüşümü verimi ($\eta = W/Q$), güç üretenler ve tüketenler için belirli bir hacim etkisi gösterir: Daha büyük makineler daha küçük olanlardan daha verimlidir çünkü daha az sürtünme (sıvı akışı için daha geniş geçitler) ve daha az ısı transferi tersinmezliği (ısı transferi için daha büyük yüzeyler) ile çalışırlar. Bu etki Denklem (4.6)'de tanımlanmıştır [52].

$$\eta = C_1 M_m^\alpha \quad (4.6)$$

Burada C_1 ve α katsayılarıdır ve $\alpha < 1$ 'dir. Q , W ve μ ifadeleri birleştirildiğinde, kütle alan (ML) üzerindeki toplam hareketi Denklem (4.7)'de tanımlanmıştır.

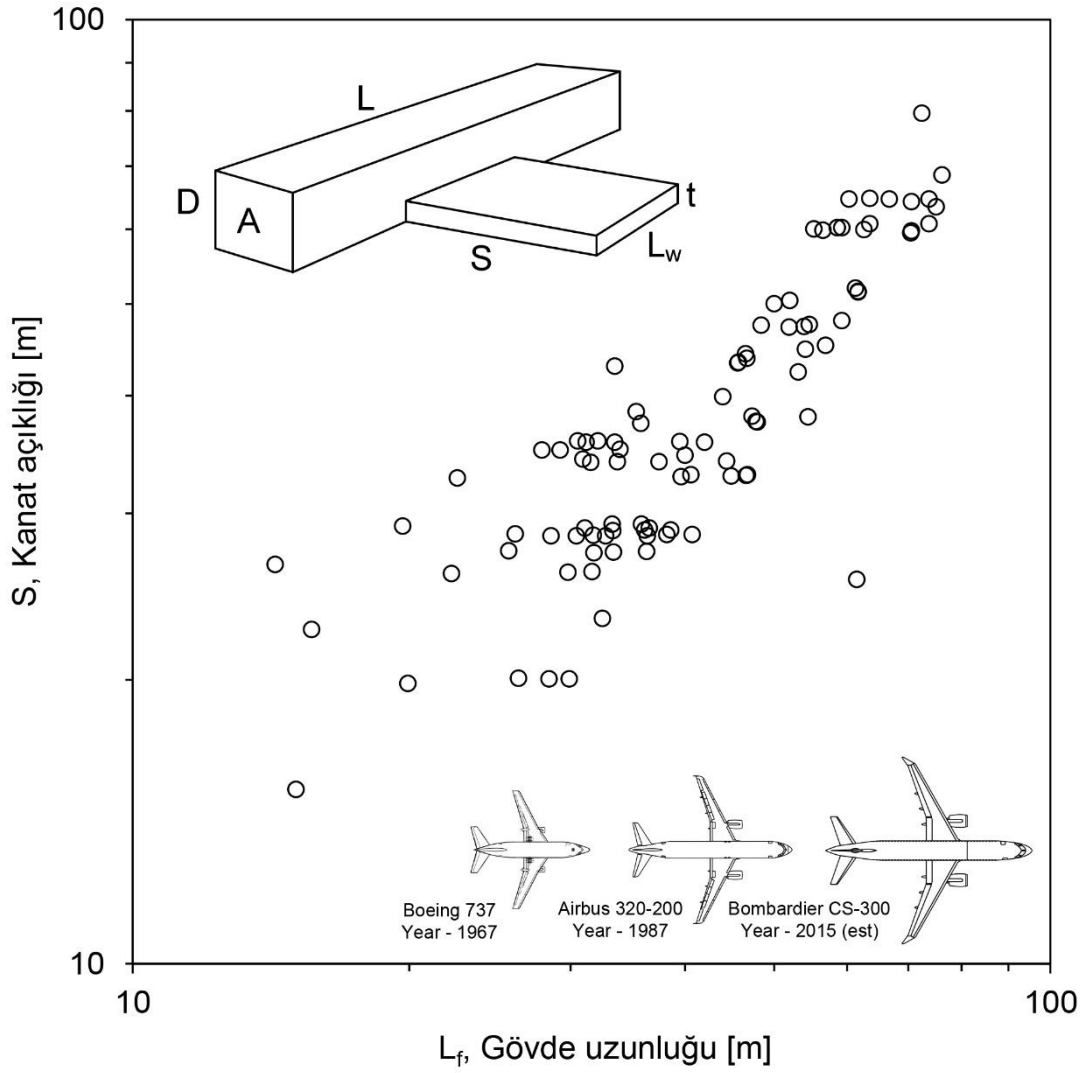
$$ML \sim \frac{C_1}{\mu g} M_m^\alpha M_f \quad (4.7)$$

Toplam kütle miktarı ($M = M_m + M_f$) sabittir ve ML değeri, M_f ve M_m değeri sabit olduğu zaman ($M_f / M_m \sim 1 / \alpha$) en büyük değerine ulaşır. Motorlu taşıtın boyutu ile taşıt tarafından kullanılan yakıtın miktarı arasında bir oran olması gerekir. Bu tahmin, daha büyük taşıtların daha fazla yakıt yüküne sahip olacak şekilde geliştiği tüm ulaşım sistemleri (ve canlı tasarımları) tarafından da desteklenmektedir. Hem M_m hem de M_f toplamalarının yani M 'nin bir ölçüsü olarak Denklem (4.8)'deki şekilde gösterilir [52].

$$L \sim \frac{C_1}{\mu g} \frac{\alpha^\alpha}{(1+\alpha)^{1+\alpha}} M^\alpha \quad (4.8)$$

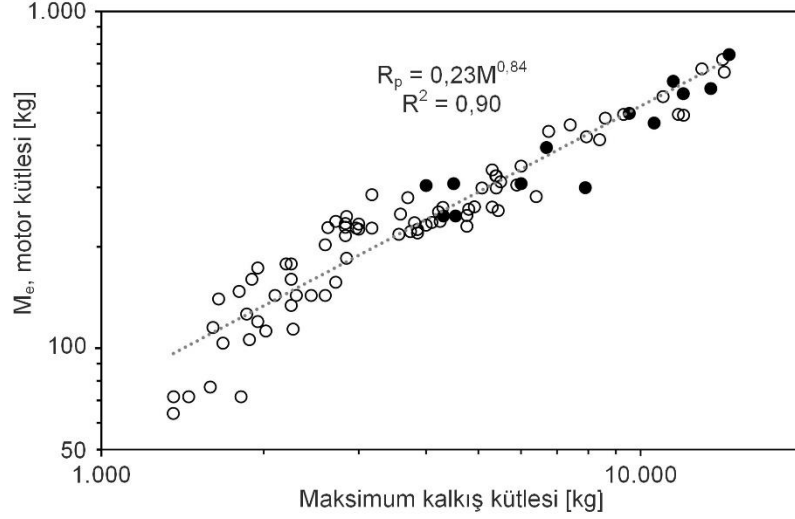
Burada bulunan α değeri 1'den daha küçük bir sabittir. Taşıtın gideceği mesafe (L), M^α ile orantılı bir şekilde değişmektedir: Daha büyük taşıtlar daha uzağa seyahat ederler.

Tüm uçaklarda tıpkı kuşlarda olduğu gibi kanat açıklığı ile gövde uzunluğu arasında bir orantı söz konusudur (Şekil 4.43) [57], [59].

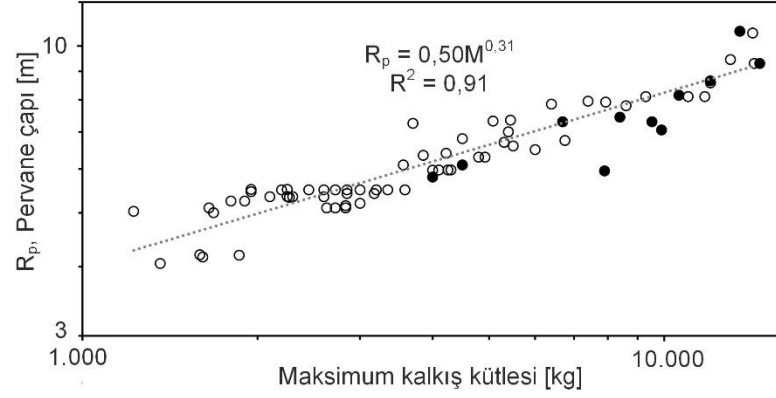


Şekil 4.43 Uçaklarda kanat açıklığı ve gövde uzunluğu arasındaki ilişki [57].

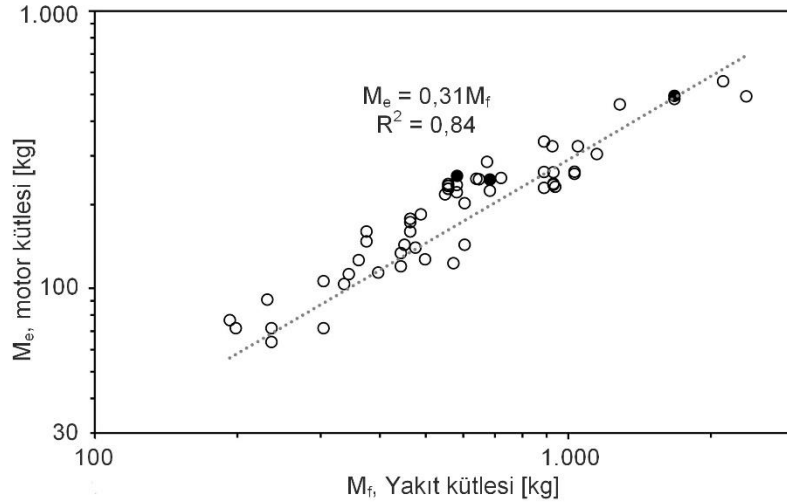
Helikopterlerde yukarıdaki yaklaşıma benzer bir karşılaştırma yapılabilmektedir. Bunun bir örneği helikopterlerin gövde büyüklüğü ile motor büyüklüğü arasındaki orantıdır [53] (Şekil. 4.44a). Ticari jet uçakları ile aynı görünüme sahiptir (Şekil 4.42a). Bir diğer örnek de helikopter pervanesi uzunluğu ve gövde uzunluğu arasındaki ilişkidir (Şekil 4.44b). Helikopter yakıt yükü uçaklarda olduğu gibi (Şekil 4.42b) gövde büyüklüğü ile orantılıdır (Şekil 4.44c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.44 Helikopterlerde (a) Gövde büyüklüğü ve motor büyüklüğü arasındaki ilişki. (b) Pervane çalı ile gövde büyüklüğü arasındaki ilişki (c) Yakıt yükü ile motor büyüklüğü arasındaki ilişki [53] (Siyah noktalar askeri helikopterleri göstermektedir)

Daha büyük pervaneler, pervane uzunluğu ile helikopter boyunun ya da gövde kütlelerinin (M) 1/3'inci kuvveti arasındaki orandan dolayı daha büyük helikopterlere aittir. Şekilde gösterilen korelasyona, askerî helikopter verileri (siyah noktalar) dâhil edilmemiştir. Askerî veriler de dâhil edilecek olursa, aradaki korelasyon $R_p = 0.47 M^{0.31}$ ve $R^2 = 0,88$ değerlerine sahip olacaktır.

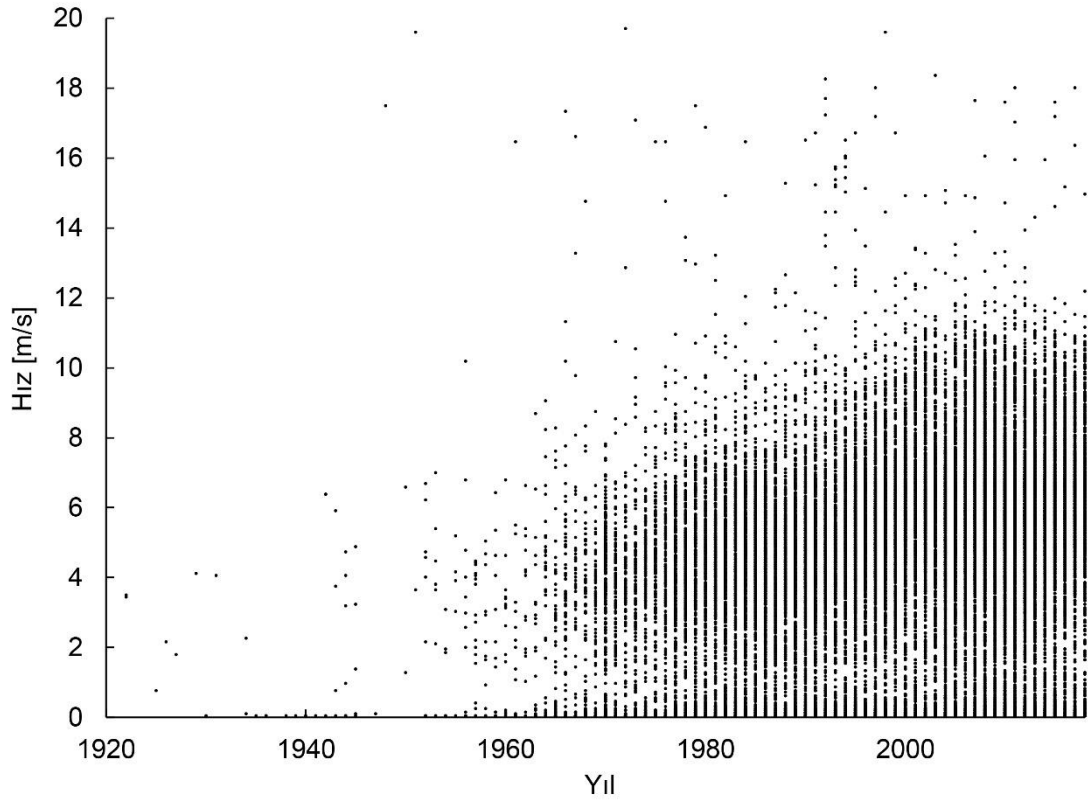
Zamana bağlı olarak bu tasarım gelişimi hava taşıtları ile deniz taşıtlarını ortak bir noktada topladığı Şekil 4.7a, Şekil 3.9 ve Şekil 4.9'da görülebilir. Daha büyük motorlar daha güçlüdür. Şekil 3.9'de gösterilen verilerin eğimi tıpkı Şekil 4.42a'daki ve Şekil 4.44a'daki verilerinki gibi 1'dir. Şekil 4.9 daha büyük gemilerin de daha fazla güç kullandığını göstermektedir [107]. Tüm gemi türleri için güç $\dot{W}$ [kW] ve gövde büyüklüğü M [ton] arasındaki ilişki Denklem (4.9)'de verilmiştir.

$$\dot{W} = 21,5 M^{0,55} \quad (4.9)$$

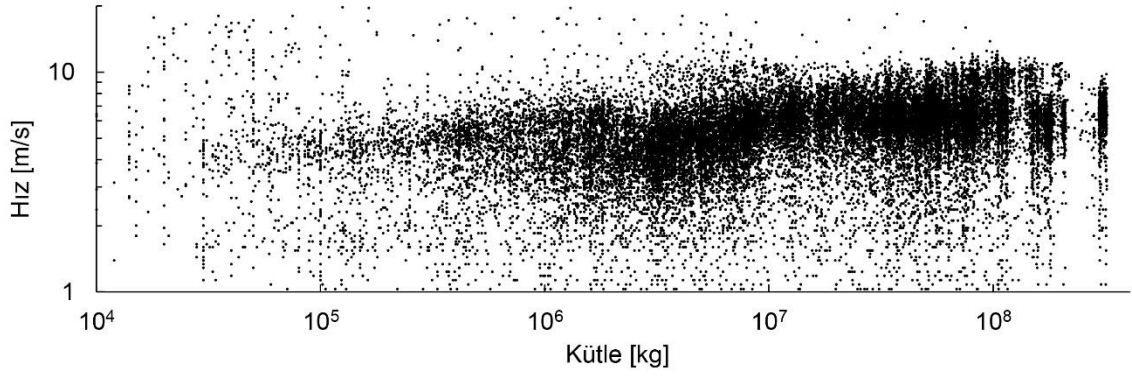
Burada $R^2 = 0,95$ olacak şekilde korelasyon göstermektedir. Yolcu gemilerinde, yolcuların bir otelle kıyaslanabilecek ihtiyaçlarının (ısınma, havalandırma, aydınlatma vs.) karşılanması için güvertede de daha fazla enerji harcanmasından ve daha hızlı olmasından dolayı aynı DWT'daki tankerlere göre daha fazla enerji harcamaktadır.

4.3 Hız

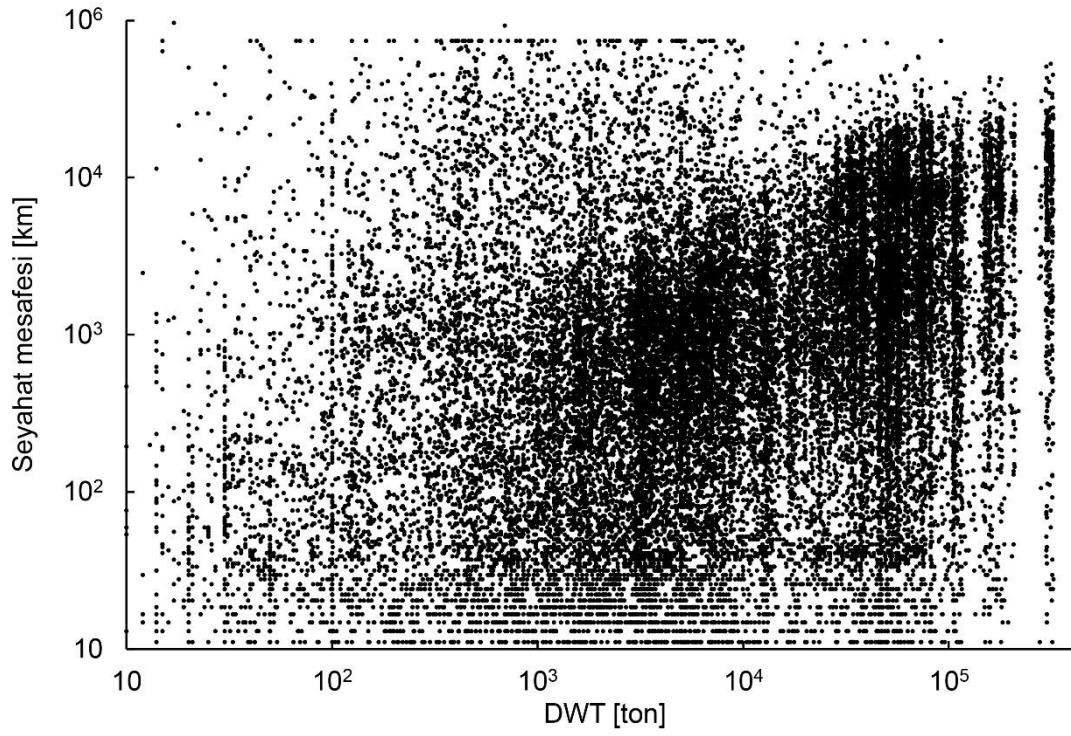
Gelişim dinamik olup her an değişim gösterir. Gelişim en iyi şekilde modern taşıtların hız ve yakıt verimliliklerinin tarihi üzerinden gösterilebilir. Daha önce sunulan grafiklerde görülen sıkı korelasyonlar çok büyük miktarda verilerden oluşan veri bulutlarının yoğunlaştırılmış versiyonlarıdır. Burada gelişim, Şekil 4.2 ve Şekil 4.45'te gemilere ait verilerden yola çıkarak örneklendirilmiştir. Gemilere ait veri bulutundaki her bir nokta tekil olarak birer gemiyi temsil etmektedir [107].



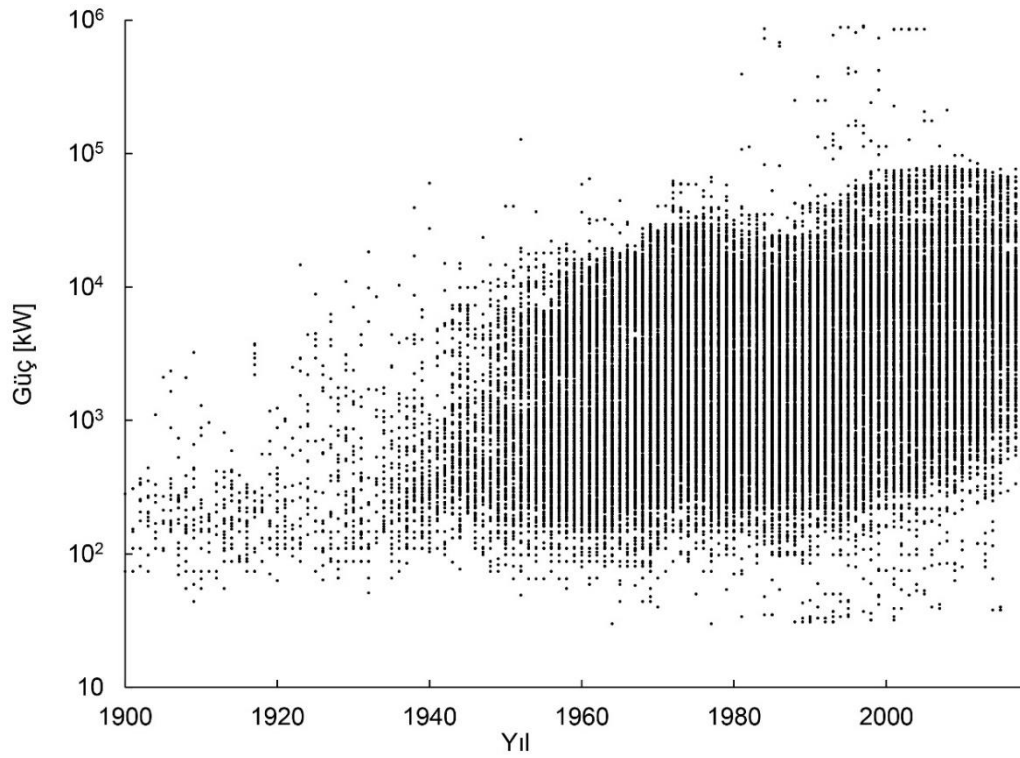
Şekil 4.45 Son yüzyıl boyunca gemicilik hızının gelişimi (Veri kaynağı: [107]).



Şekil 4.46 Gövde büyüklüğünün günümüzde çalışmakta olan gemilerin hızı üzerindeki etkisi (Veri kaynağı: [107]).



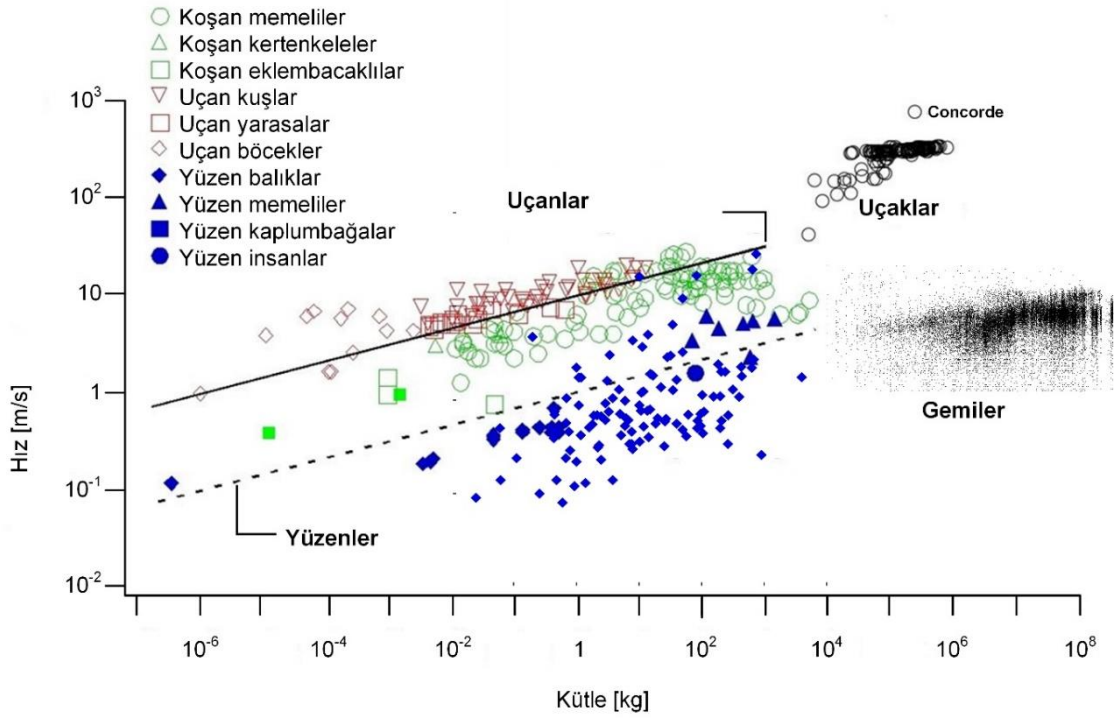
Şekil 4.47 Gemilerde gövde büyüklüğü ile seyahat mesafesi arasındaki ilişki (Veri kaynağı: [107]).



Şekil 4.48 Gemilerde gücün gelişimi (Veri kaynağı: [107]).

Geçtiğimiz 140 yıl boyunca gemi sayıları ve üretilen gemilerin boyutları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Büyüklere daha da büyükleri eklenirken diğer yandan küçükler de üretilmeye devam etmiş ve sayıları da giderek artmıştır. Zamanda herhangi bir noktada apsisi dik kesen bir şerit incelendiğinde Şekil 4.2 bugünkü denizde hareket eden varlıkların çeşitliliğinin sürekliliğini nasıl koruduğunu göstermektedir. Az sayıdaki büyük varlıklar çok sayıdaki küçük varlıklarla birlikte denize açılmaktadır. En yeni ve en büyük olanlar daha eski ve daha küçük olanları bertaraf etmemektedir.

Gemilerin büyüklüğü ve çeşitliliği ile hareketin hızı ve verimliliği de gelişmektedir. Şekil 4.45’te sergilenen hız verileri Şekil 4.46’da gövde büyüklüğü ile karşılaştırılarak verilmiştir. Bu karşılaştırmalarda eğilim yukarı yönlüdür: Taşımacılık son 50 yılda daha hızlı bir hal almıştır. Bu eğilimin bir kısmı gemilerin hızlarının gövde büyüklükleri ile artış sergilediğini göstermektedir. Veri bulutunun köşegende yoğunlaştığı Şekil 4.47’de de gösterildiği gibi daha büyük gemiler daha uzun mesafeleri alabilmektedir. Daha büyük uçaklar daha uzun mesafeler boyunca uçabilmektedir (Şekil 4.42c). Bu, hareket eden daha büyük varlıkların (canlıların, taşıtların, nehirlerin, atmosfer ve okyanus akımlarının, yuvarlanan taşların ve türbülans hortumlarının) daha uzağa seyahat ettiklerini gösteren evrensel eğilime destek verir niteliktedir [107], [130]. Gemilerin gücü boyutlarıyla (Şekil 4.2) birlikte artmıştır (Şekil 4.48).



Şekil 4.49 Dünya üzerindeki tüm ortamlarda hareket eden tüm varlıklara yönelik bir genel bir bakış. (Gemi verileri kaynak: [49], Balık verileri kaynak: [131], [132])

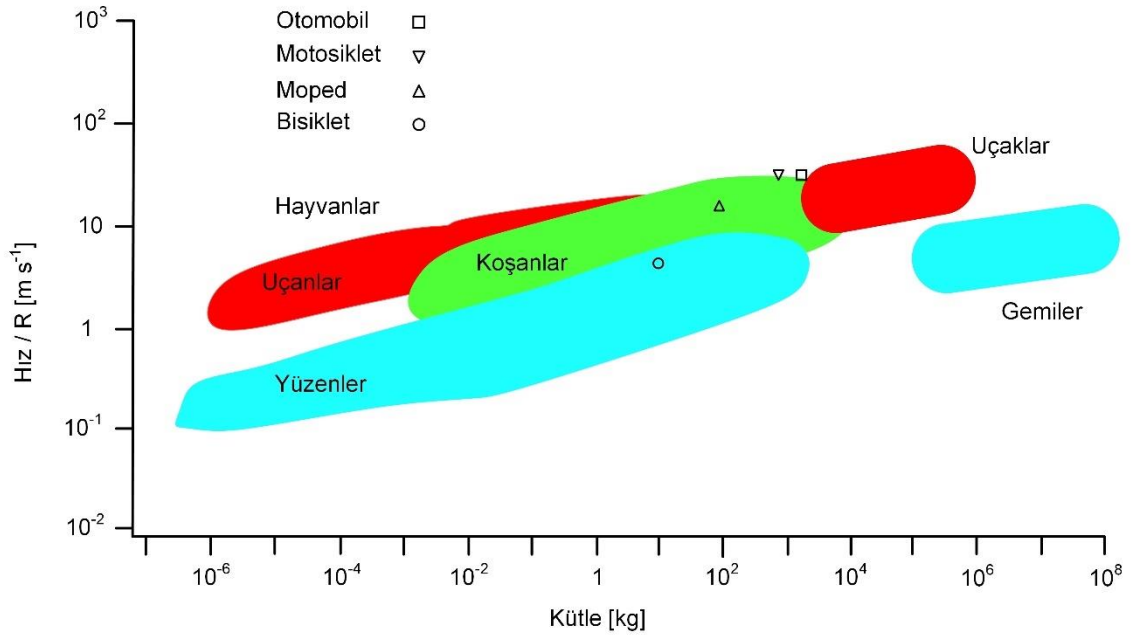
Canlı hareketi kuramına göre [49], [79], hız (V) ile gövde büyüklüğünün (M) $1/6$ 'ıncı kuvveti arasında kabaca bir orantı olmalıdır. Hız - boyut veri bulutu bilinen tüm hareket türlerinin hız - boyut alanına yansıtıldığında (Şekil 4.49) gemilerin tüm yüzücüler ile aynı doğrultuda oldukları görülmektedir. Ayrıca balık verileri Şekil 4.49'a [131], [132] kaynaklarından eklenmiştir. İki çizgi arasındaki 10 katlık fark, hareketin içerisinde gerçekleştiği ortamların farklılığından, yani sudaki hareket ile havadaki hareket ve ortalarında olan karasal hareket arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Teorik olarak hızın büyüklüğü Denklem (4.10) ile gösterilmektedir.

$$V \sim \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^{1/3} g^{1/2} \rho^{-1/6} M^{1/6} \quad (4.10)$$

Burada ρ , ρ_m ve g gövde yoğunluğu, ortam yoğunluğu ve yer çekimi ivmesidir. Sudaki hareket söz konusu olduğunda başat faktör $(\rho/\rho_m)^{1/3}$ 'tür. Havadaki

hareket söz konusu olduğunda, baş katsayı 10'dur. Karasal hareket söz konusu olduğunda ise baş katsayı 1 ila 10 arasındaki boşluğu doldurmaktadır.

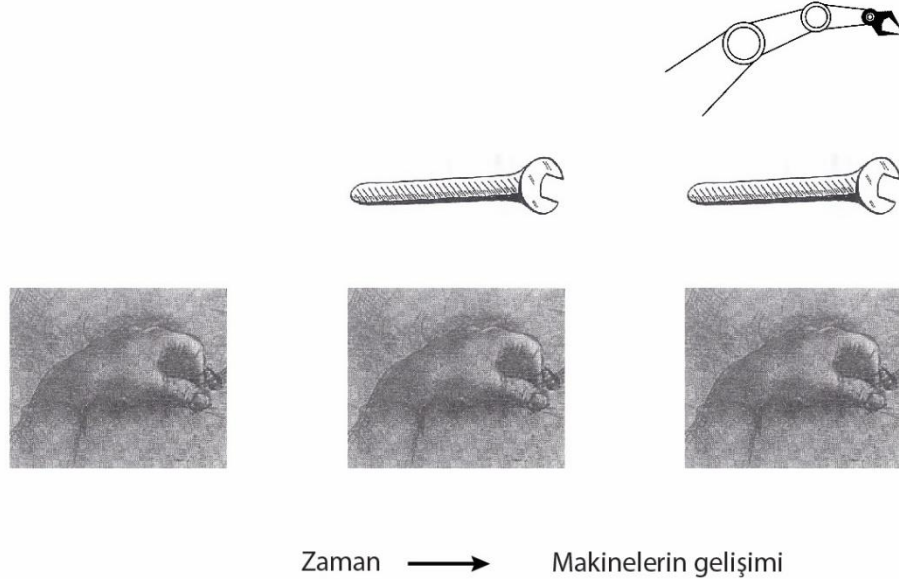
Şekil 4.49, uçaklara ait verilerin uçan varlıkların diğerlerinin oluşturduğu çizgiden daha yüksek bir eğilim gösterdiğini ortaya koymakta ve insan yapımı araçlar türlerinin canlı tasarımlarından ayrılmakta olduğu izlenimini vermektedir. Bu izlenimin düzeltilmesi Bölüm 3'te ayrıntılı bir şekilde izah edilmiştir [55]. Bunun nedeninin daha yüksek hızlarla uçan uç uçuğu irtifada hava yoğunluğunun ve sürüklenmenin daha az olmasından kaynaklandığı gösterilmiştir. İster ticari olsun ister askerî (Şekil 3.7) hava taşıtlarının gelişim tarihi incelendiğinde uçuşların yapıldığı irtifa arttıkça uçuş hızlarının da arttığı görülmektedir. Boyut ile optimum hız arasındaki ilişkiyi gösteren teori irtifa etkisini de kapsayacak şekilde yeniden güncellenmiştir. Şekil 4.49'nin gözden geçirilmiş versiyonu Şekil 4.50'de beş veri bulutu halinde sunulmuştur. Ordinatta hız $R = (\rho_{\text{yer seviyesi}} / \rho_{\text{irtifa}})^{1/3}$ ile çarpılmıştır. Şekil 4.50 aynı zamanda insan hareketi için hız - boyut verilerini de temsil etmektedir.



Şekil 4.50 Şekil 4.49'da sunulan genel bakış açısının, hava yoğunluğu ile uçuş yüksekliği arasındaki ilişki de göz önünde bulundurularak güncellemesi

4.4 Sonuç

Ateş, insanlar tarafından 1,5 milyon yıl önce kullanılmaya başlanmıştır. Denizcilik ise 150.000 yıl önce keşfedilmiştir. İnsanların yaptığı uçaklar yalnızca yüz yıldır uçabilmektedir ve bu da insan ile makinenin, *homo* ile insan eserinin bir bütün oluşturabilmesiyle mümkün olmuştur (Şekil 4.51). Denizde yolculuk eden ve uçan *homo*, makinenin içerisinde yer almaktadır. Bir makine olmadan, bir *homo* ya yürüyen ya da koşan bir varlık olarak kalır. *Homo* olmadan ise, makine var olamaz. Mevcut fizik ve biyoloji literatürü uçan “insan ve makine” modellerinin (pek çok boyutta ve çeşitteki uçaklar, pervaneli araçlar ve jet motorlular), hayvanların, kuşların, böceklerin ve yarasaların aynı hız - boyut teorisine göre ve enerji kullanımı-boyut ilişkisine göre hareket ettiklerini göstermektedir.



Şekil 4.51 Tasarımların zamana bağlı olarak gelişimi (Kaynak [79]).

Taşıtlarda olduğu gibi canlılarında ait olduğu bir konum vardır. Dolayısıyla her bir canlı dünya üzerinde az sayıda büyük, çok sayıda küçük olarak kademeli bir şekilde bulunmaktadır. Büyük olanlar daha hızlı olup küçük olanlardan daha fazla mesafe kat ederler. Kendilerini besleyen aynı topraklar üzerinde uyum içerisinde yaşarlar. Tıpkı birçok havalimanında seyahat eden insanlar gibidirler. Buralarda hareket eden büyük varlık hızlı olup daha uzak mesafelere giden trendir. Hareket eden küçük varlıklar ise tren yoluna erişmeye çalışan yayalardır.

Bu bölümde ikinci olarak küçük hava araçlarının büyük hava araçlarından çok daha fazla sayıda olduğu gösterilmiştir (Şekil 4.36 - Şekil 4.37). Aynı şey büyük hava araçlarının günlük uçuş sayıları ile karşılaştırıldığında küçük araçların uçuş sayıları için de geçerlidir (Şekil 4.49). Serçeler büyük baykuştan çok daha fazla uçuşa geçerler. Serçeler bir daldan bir dala uçarken baykuş ağaçtan ağaca uçar.

Bir araya getirildiklerinde uçan varlıklar ve hareket eden diğer varlıklar tarafından doldurulan tüm bu hareketler bir kademeli yapı teşkil eder, bu da az sayıda büyük varlık ile çok sayıda küçük varlığın birlikte uçtuğu anlamına gelir. Kademeli yapı doğal bir olgudur ve işte bu nedenle gelecekte tüm hareket eden bireyler, gruplar ve popülasyonlar; tıpkı bir nehir havzasının kanallarındaki su akışları gibi, akciğerin hava borularındaki hava akışları gibi, kademeli bir düzene doğru aynı doğal eğilimi sergileyecektir. Bu kademeli akışların ulaşımdaki muadilleri, küresel

enerji sistemini ve dünya ekonomisini teşkil eden akışlardır. Büyük nehirler, hareket eden daha büyük varlıkların yer aldığı daha uzun su koridorlarıdır. Dereler ve nehir kolları daha kısa, daha yavaş ve daha yoğun koridorlardır ve çok daha fazla sayıdaki küçük varlıklar içlerinden daha sık bir şekilde geçer.

Dünya üzerinde yeni bir kademeli hareket deseninin ortaya çıkışı, hâlihazırda mevcut olan kademeli hareket desenlerini ortadan kaldırmaz. Yeni kademeli yapı eskilerine katılarak işleyen sistemler işlemeye devam eder.

Bazı hareket eden varlıklar tarafından yeni bir hareket kabiliyet türü geliştirilse bile bu eski hareket kabiliyet türlerinin yerini almayacaktır. Bu dinamiğin fiziğini bilmek önemlidir çünkü ortaya çıkan kademeli yapı bize daha büyük modellerin doğal olarak ne kadar az sayıda olacağını ve daha küçük modellerin ne kadar fazla sayıda olacağını öngörme imkânı sağlayacaktır. Tek bir yolcuyu taşıyan yeni taşıtlar (örneğin kişisel hava aracı) eski taşıtları (örneğin otomobili, bisikleti, koşan ya da yürüyen varlıkları) ortadan kaldırmayacaktır.

Her boyuttaki aracın kendine has bir tasarımı vardır. Büyük taşıtlar, daha küçük olanların büyütülmüş versiyonlarından ibaret değildir. Bu durum Şekil 4.3'teki çizimlerden görülebilir. Taşıyıcı organların taşıtın gövdesi içerisinde kapsadığı hacim oranı, taşıtın boyutları arttıkça artar. Büyük tasarımlar küçük tasarımların büyütülmüş kopyaları değildir. Büyük boyutların kendine ait bir mimarisi vardır.

Gemilerin ve uçakların gelişimi dünya üzerinde hareket halinde olan insan-makine türünün gelişimsel tasarımını, daha hızlı, daha uzağa, daha verimli ve daha uzun süre devam edecek şekilde gözler önüne sermektedir. Bu bölümde taşıtların gelişiminin canlıların hareket kabiliyetiyle benzer bir çizgide olduğunu ve tabiattaki tasarım ve yapısal gelişim teorisi ile öngörülebileceğini göstermektedir [23], [79], [83]. Ayrıca bu bölüm bilgi endüstrisinde bazen altından kalkması oldukça zor, yoğun bir bilgi akışı altında kaybolmaya müsait olduğumuzu hatırlatmayı da amaçlamaktadır. Zaman zaman bu yoğunluğun içerisinden çıkıp bu gelişimsel akışa bir de kuşbakışı bakmak oldukça faydalı olabilmektedir. Akış ne kadar iyi görülürse, bu akışı yöneten ilkelere yönelik anlayışımız da o kadar gelişecek ve gelecek nesillere verilecek dersler de o kadar değerli olacaktır.

Uçan varlıklar söz konusu olduğunda (Şekil 4.1) bu genel değerlendirme; böceklerin, kuşların ve uçakların (bunların gövdelerinin, motorlarının ve hareketlerinin), temel olarak aynı şekilde, zaman geçtikçe gezegen üzerinde yüklerini daha kolay bir biçimde, taşıdıkları birim ağırlık başına giderek daha da az gıda ve yakıt tüketerek hareket edecek şekilde tasarlandıkları anlamına gelmektedir.

Dünya üzerindeki tüm hareket tasarımları gelişmektedir. Taşıtlar ise kendi başlarına gelişemezler; kendilerini tasarlayan ve kullanan insanların çabaları sayesinde gelişmektedirler. Uçan canlılarla birlikte gelişen diğer tür, “insan ve makine türü”dür (Şekil 4.18).

Tasarımlardaki faydalı değişiklikleri ve çok büyük sayılardaki tasarımcılar tarafından yapılacak olan seçimleri öngören Yapısal Gelişim Teorisi bilinirse tasarımların daha iyi, daha hızlı ve daha ekonomik hale getirilmesi konusunda büyük katkı sağlanacaktır. Performansın ulaşabileceği en üst sınır en başından bilinebilir ve bu da beklentilerin yönetilmesine yardımcı olabilir.

Tabiatta hareket edilmediği takdirde ne bir akış gerçekleşir ne de fikirler bir yerden bir yere taşınabilir. Bu akışların yapısı ise yapısal gelişim teorisiyle matematiksel olarak açıklanmaktadır. Her akış kendine en kolay kolu seçecek şekilde hareket etmektedir. Tüm akışlarda sistem boyutları da büyük bir öneme sahiptir. Yapılan analizler sistem boyutu ile sistem verimi arasında sıkı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bununla beraber verimin sadece boyutun artması ile değil boyuta uygun optimum tasarımların yapılmasıyla da artacağı gösterilmiştir.

Sosyal organizasyonlarda büyüklüğe bağlı olarak performans incelendiğinde bireysel sıcak su kullanımının toplu su kullanımına göre daha fazla israfa neden olduğu, bir araya gelmenin sonucunda daha verimli sistemlerin oluşacağı görülmüştür. Sosyal organizasyonlarda bir araya gelme şeklinin de israfları önlemek için büyük öneme sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun için herkesin ortak kaynağa ulaştığı dairesel yapılardan, tüm bireylerin bir sistem ile kaynaktan faydalandığı dallı yapılara geçiş verimde gözle görülür bir artış sağlamaktadır. Dallı yapılar sistematik bir yapının diğer adı olan kademeli yapıyı doğurmaktadır. Dallı yapı, Bölüm 1’de anlatıldığı üzere tabiatın bir yerden bir yere akış transfer ederken kullandığı metottur. Bunun sonucu olarak ise az sayıda büyük kanal ve kol, çok sayıda küçük kanal ve koldan oluşmaktadır. Bu homojen olmayan dağılımın daha homojen yapılara dönüşmesinin akış kanallarındaki iyileştirme ile sağlanacağı gösterilmiştir.

Boyutun tabiattaki canlıların hareketinde de büyük bir önemi vardır. Her canlının kendi kütlesi ile ilişkisine bağlı olarak bir hızı vardır. Boyuta bağlı bulunan bu optimum hız tüm canlılar (yüzen, koşan ve uçan) için geçerlidir. Uçakların boyut-hız ilişkisi canlıların boyut - hız ilişkisine uymadığı görülmüştür. Bu durumun kaynağında yapılan hesaplamalarda kütleye bağlı olarak bulunan optimum hız değerinden kaynaklandığı bulunmuştur. Çünkü yüzenler ve koşanlar için hareketin yapıldığı ortam yoğunluğu değişmezken uçanlar için hareketin yapıldığı ortam olan havanın yoğunluğu yükseklerle çıkıldıkça değişmektedir. Dolayısıyla bu durum için yükseklik faktörü etkisiz hale getirildiğinde uçaklarında diğer tüm

canlıların boyut - hız trendine uyduyu görülmüştür. Bununla beraber uçan canlıların yüzen canlılardan neden daha küçük olduğu sorusunun cevabı da yine ortam yoğunluğuna bağlı olarak yapılan bu düzeltme ile açığa çıkmıştır.

Diğer önemli sonuç ise tüm canlılardaki boyut - optimum hız arasındaki ilişkiden farklı olarak en hızlı canlıların ve araçların yaptığı hareketin modellenmiş olmasıdır. Canlı boyutları arttıkça buna bağlı olarak maksimum hız değerlerinin bir noktaya kadar artarken bir noktadan sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Bu durum fiziksel olarak modellenmiş olup hareketin iki bileşeni olan ivmelenme ve seyahat sürelerine bağlı olarak harcanılan güçler hesaplanmıştır. Bu modelden çıkan sonuçlar ise en hızlıların aslında ömür boyunca en düşük ortalama hızlara sahip olduğu; daha yavaş gibi görünen canlıların ve hayvanların yavaş ama hareketini sürekli yapmasından dolayı asıl ömürlerindeki hızları çok daha yüksek olduğudur. En hızlı canlılar (örneğin çita) ya da en hızlı uçaklar (örneğin savaş uçağı) ömürlerinin çoğunu dinlenerek hareketsiz halde geçirmektedirler. Bir fil ya da ticari bir uçak düşüldüğünde ise nispeten daha yavaş olmalarına rağmen hep hareket halindedirler. Ticari uçaklar doldur boşalt süreleri haricinde devamlı havada hareket halindedir.

Araçlar da tabiattaki tasarım ile uyum içerisinde hayatlarına devam ederler. Uyum içerisinde olmayan araçların zaman içinde kullanım süresi biter. Bunun en iyi örneğini Concorde yolcu uçağında görebiliriz. Concorde, 1976 yılından 2003 yılına kadar ses hızının iki katına çıkan yüksek hızlarda çalışmasına rağmen tabiattaki boyut - hız eğilimine uymadığı için sürdürülebilir bir proje olmaktan çıkmış ve projeye son verilmiştir.

Hava ve deniz taşımacılığında da boyutun büyük bir önemi vardır. Çünkü boyut arttıkça birim yük başına karşılaşılan ve aşılması gereken dirençler için harcanması gereken güç de azalmaktadır. Bu teorik yaklaşım Marine Traffic sitesinden alınan 100.000 adet gemi verisiyle mukayese edilmiştir. Sonuçlar teorik yaklaşımın ampirik veriler ile korelasyonunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca canlıların ve uçakların boyutlarıyla sayıları arasında bir ilişki bulunduğu görülmektedir. Çünkü boyut arttıkça o boyuttaki canlıların sayısı azalmaktadır. Bu durum tekrar kademeli yapı kavramını karşımıza çıkartmaktadır. Tabiatı çok

sayıda küçük ve az sayıda büyük varlık beraber hareket etmektedir. Bunu en belirgin şekilde nehir akışında gözlemleyebiliriz. Nehir akışında tüm akışı taşıyan sadece bir ana kol varken bu ana kola gelen daha küçük kanallar ve bu küçük kanallara gelen daha da küçük kanallar bulunmaktadır.

- [1] A. Bejan, "Evolution in thermodynamics", *Appl. Phys. Rev.*, c. 4, sy 1, s. 011305, Oca. 2017.
- [2] W. Thomson, "On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam", *Trans. R. Soc. Edinb.*, c. i, sy XLVIII, s. 174, Mar. 1851.
- [3] A. Bejan, *Entropy generation through heat and fluid flow*. New York: Wiley, 1982.
- [4] S. Kakac, "Evolution of the science of thermodynamics the history", *J. Therm. Sci. Technol.*, c. 36, sy 2, ss. 1-6, 2016.
- [5] A. Bejan, "Street network theory of organization in nature", *J. Adv. Transp.*, c. 30, sy 2, ss. 85-107, Haz. 1996.
- [6] A. Bejan, "Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume", *Int. J. Heat Mass Transf.*, c. 40, sy 4, ss. 799-816, Mar. 1997.
- [7] A. Bejan, "Technology Evolution, from the Constructal Law", içinde *Advances in Heat Transfer*, c. 45, Elsevier, 2013, ss. 183-207.
- [8] A. Bejan, *Advanced engineering thermodynamics*, 2. bs. Wiley, 1997.
- [9] G. A. Ledezma, A. Bejan, ve M. R. Errera, "Constructal tree networks for heat transfer", *J. Appl. Phys.*, c. 82, sy 1, ss. 89-100, Tem. 1997.
- [10] A. Bejan, "Constructal tree network for fluid flow between a finite-size volume and one source or sink", *Rev. Générale Therm.*, c. 36, sy 8, ss. 592-604, Eyl. 1997.
- [11] A. Bejan ve M. R. Errera, "Deterministic Tree Networks for Fluid Flow: Geometry for Minimal Flow Resistance Between a Volume and One Point", *Fractals*, c. 05, sy 04, ss. 685-695, Ara. 1997.
- [12] A. Bejan, "Theory of organization in nature: pulsating physiological processes", *Int. J. Heat Mass Transf.*, c. 40, sy 9, ss. 2097-2104, Şub. 1997.
- [13] A. Bejan, "How Nature Takes Shape", *Mech. Eng.*, ss. 90-92, Eki. 1997.
- [14] A. Bejan, "The constructal law of organization in nature: tree-shaped flows and body size", *J. Exp. Biol.*, c. 208, sy 9, ss. 1677-1686, May. 2005.
- [15] A. H. Reis, "Constructal theory: From engineering to physics, and how flow systems develop shape and structure", *Appl. Mech. Rev.*, c. 59, sy 5, s. 269, 2006.
- [16] A. Bejan ve S. Lorente, "Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering", *J. Appl. Phys.*, c. 100, sy 4, s. 041301, Ağu. 2006.
- [17] A. Bejan ve S. Lorente, "The constructal law of design and evolution in nature", *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, c. 365, sy 1545, ss. 1335-1347, May. 2010.
- [18] A. Bejan ve S. Lorente, "The constructal law and the evolution of design in nature", *Phys. Life Rev.*, c. 8, sy 3, ss. 209-240, Eki. 2011.
- [19] A. Bejan, "Constructal Law: Optimization as Design Evolution", *J. Heat Transf.*, c. 137, sy 6, s. 061003, Haz. 2015.
- [20] T. Basak, "The law of life: the bridge between physics and biology", *Phys. Life Rev.*, c. 8, sy 3, ss. 249-252, Eki. 2011.

- [21] L. Chen, "Progress in study on constructal theory and its applications", *Sci. China Technol. Sci.*, c. 55, sy 3, ss. 802-820, Oca. 2012.
- [22] A. Bejan ve S. Lorente, "Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society", *J. Appl. Phys.*, c. 113, sy 15, s. 151301, Nis. 2013.
- [23] A. Bejan, *The Physics of Life: The Evolution of Everything*. New York: St. Martin's Press, 2016.
- [24] R. S. Parker, "Experimental study of drainage basin evolution and its hydrologic implications", Colorado State University. Libraries, Report 50, Haz. 1977.
- [25] A. Bejan, "Every Snowflake Is Not Unique", *Duke Pratt Sch. Eng.*, c. 137, sy 1, ss. 40-41, Oca. 2015.
- [26] K. Libbrecht, "Snow Crystals". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.snowcrystals.com/>. [Erişim: 21-Mar-2019].
- [27] *Earth From Space - National Geographic Channel*. 2014.
- [28] Q. Xiushu, Z. Yijun, ve Z. Qilin, "Characteristics of Lightning Discharges and Electric Structure of Thunderstorm", *Acta Meteorol. Sin.*, s. 14.
- [29] C. McGrath, *Dramatic Weather Over, Getty Images News*. 2017.
- [30] A. Bejan ve S. Lorente, *Design with Constructal Theory*. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [31] A. F. Miguel, "Constructal branching design for fluid flow and heat transfer", *Int. J. Heat Mass Transf.*, c. 122, ss. 204-211, Tem. 2018.
- [32] A. Bejan, *Convection heat transfer*, 4. bs. New York: Wiley, 2013.
- [33] M. Bahrami, J. R. Culham, ve M. M. Yovanovich, "Modeling Thermal Contact Resistance: A Scale Analysis Approach", *J. Heat Transf.*, c. 126, sy 6, s. 896, 2004.
- [34] E. H. Dowell, "Transonic Unsteady Potential Flow: Scaling Analysis of Linear and Nonlinear Dynamics", *AIAA J.*, c. 48, sy 5, ss. 1017-1020, May. 2010.
- [35] M. Capobianchi ve A. Aziz, "A scale analysis for natural convective flows over vertical surfaces", *Int. J. Therm. Sci.*, c. 54, ss. 82-88, Nis. 2012.
- [36] A. Bejan, *Advanced engineering thermodynamics*, 4. bs. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2016.
- [37] G. Lorenzini ve C. Biserni, "The Constructal law: from design in nature to social dynamics and wealth as physics", *Phys. Life Rev.*, c. 8, sy 3, ss. 259-260, Eki. 2011.
- [38] M. Moussaïd, D. Helbing, ve G. Theraulaz, "How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, c. 108, sy 17, ss. 6884-6888, Nis. 2011.
- [39] W. M. Saslow, "An economic analogy to thermodynamics", *Am. J. Phys.*, c. 67, sy 12, ss. 1239-1247, Kas. 1999.
- [40] G. Weisbuch ve S. Battiston, "From production networks to geographical economics", *J. Econ. Behav. Organ.*, c. 64, sy 3, ss. 448-469, Oca. 2007.
- [41] H. Temple, *Théorie générale de la nation: L'architecture du monde*. Paris: L'Harmattan, 2014.
- [42] W. C. Frederick, *Natural corporate management: From the Big Bang to Wall Street*. Sheffield, UK: Greenleaf Publishing, 2012.

- [43] A. Bejan, "Culture and the Constructal-Law evolution of the human and machine species Comment on 'An evolutionary framework for cultural change: Selectionism versus communal exchange' by L. Gabora", *Phys. Life Rev.*, c. 10, sy 2, ss. 117-145, Haz. 2013.
- [44] A. Bejan ve M. R. Errera, "Wealth inequality: The physics basis", *J. Appl. Phys.*, c. 121, sy 12, s. 124903, Mar. 2017.
- [45] R. E. Horton, "Drainage-basin characteristics", *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, c. 13, sy 1, ss. 350-361, Oca. 1932.
- [46] M. A. Melton, "Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents", *J. Geol.*, c. 66, sy 4, ss. 442-460, Oca. 1958.
- [47] J. T. Hack, "Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland", Washington DC, USGS Numbered Series 294-B, 1957.
- [48] A. Bejan, S. Lorente, A. F. Miguel, ve A. H. Reis, "Constructal theory of distribution of river sizes, section 13.5", içinde *Advanced Engineering Thermodynamics*, 3. bs, Hoboken: Wiley, 2006.
- [49] A. Bejan ve J. H. Marden, "Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying", *J. Exp. Biol.*, c. 209, sy 2, ss. 238-248, Oca. 2006.
- [50] M. R. Hirt, W. Jetz, B. C. Rall, ve U. Brose, "A general scaling law reveals why the largest animals are not the fastest", *Nat. Ecol. Evol.*, c. 1, sy 8, ss. 1116-1122, Ağu. 2017.
- [51] A. Bejan, "Interviewed in S. Devos, "Sa vitesse cache une théorie de la masse", *Science & Vie*, ss. 75-77, Eki-2017.
- [52] A. Bejan, "Why the bigger live longer and travel farther: animals, vehicles, rivers and the winds", *Sci. Rep.*, c. 2, s. 594, Ağu. 2012.
- [53] R. Chen, C. Y. Wen, S. Lorente, ve A. Bejan, "The evolution of helicopters", *J. Appl. Phys.*, c. 120, sy 1, s. 014901, Tem. 2016.
- [54] N. Meier, "Jet Engine Specification Database". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://jet-engine.net/>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [55] A. Bejan, U. Gunes, J. D. Charles, ve B. Sahin, "The fastest animals and vehicles are neither the biggest nor the fastest over lifetime", *Sci. Rep.*, c. 8, sy 1, s. 12925, Ağu. 2018.
- [56] W. P. Vogt ve B. Johnson, *Dictionary of Statistics & Methodology: A Nontechnical Guide for the Social Sciences*, 4. bs. SAGE Publications, 2011.
- [57] A. Bejan, J. D. Charles, ve S. Lorente, "The evolution of airplanes", *J. Appl. Phys.*, c. 116, sy 4, s. 044901, Tem. 2014.
- [58] "Fighter Planes", 16-Oca-2011. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.fighter-planes.com/>. [Erişim: 21-May-2018].
- [59] M. C. Chambers, M. D. Ardema, A. P. Patron, A. S. Hahn, H. Miura, ve M. D. Moore, "Analytical Fuselage and Wing Weight Estimation of Transport Aircraft", *NASA Tech. Memo. 110392*, May. 1996.
- [60] "U.S. Standard Atmosphere Supplements", NASA, Technical Report NASA-CR-88870, 1966.
- [61] "Boeing 777-300ER", *GE Aviation*, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.swiss.com/CMSContent/web/SiteCollectionDocuments/777/SWISS_Factsheet_B777-300ER_EN.pdf. [Erişim: 28-Şub-2018].

- [62] “Boeing 747-400”, May-2010. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/startup/pdf/historical/747-400-passenger.pdf. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [63] “B-52 Stratofortress”, *U.S. Air Force*, 2015. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104465/b-52-stratofortress/>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [64] J. Connors ve N. Allen, *The Engines of Pratt & Whitney: A Technical History*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [65] “The CF6 Engine”, *GE Aviation*, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.geaviation.com/commercial/engines/cf6-engine>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [66] “The GE90 Engine”, *GE Aviation*, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.geaviation.com/commercial/engines/ge90-engine>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [67] “F/A-18 Hornet strike fighter”, *The US Navy Fact File*, 26-May-2009. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.navy.mil/navydata/fact_display.asp?cid=1100&tid=1200&ct=1. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [68] “Boeing 737-800”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.airliners.net/aircraft-data/boeing-737-800900/96>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [69] “Airbus A320-200”, *GE Aviation*, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a320neo.html>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [70] “Airbus A330-300”, *GE Aviation*, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a330-family/a330-300.html>. [Erişim: 28-Şub-2018].
- [71] C. Cooper, “Bridging the Gap: Extending the Life of the F18 Hornet”, Master of Military Studies United States Marine Corps Command and Staff College Marine Corps University, 2011.
- [72] “Aircraft and Related Datasets”, *MIT Global Airline Industry Program – Airline Data Project*, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://web.mit.edu/airlinedata/www/Aircraft&Related.html>. [Erişim: 21-May-2018].
- [73] F.-K. Chang, *Structural Health Monitoring 2000*. CRC Press, 1999.
- [74] H. Jiang, “Key Findings on Airplane Economic Life”, *Boeing White Pap.*, s. 9, Mar. 2013.
- [75] H. Hoppeler ve E. R. Weibel, “Scaling functions to body size: theories and facts”, *J. Exp. Biol.*, c. 208, sy 9, ss. 1573-1574, May. 2005.
- [76] K. Schmidt-Nielsen, *Scaling: Why is Animal Size So Important?* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1984.
- [77] S. Vogel, *Life’s Devices: The Physical World of Animals and Plants*. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1988.
- [78] K. Schmidt-Nielsen, *How Animals Work*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1972.
- [79] A. Bejan, *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

- [80] R. H. Peters, *The Ecological Implications of Body Size*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [81] E. R. Weibel, *Symmorphosis: On Form and Function in Shaping Life*. Cambridge, UK: Harvard University Press, 2000.
- [82] B. K. Ahlborn, *Zoological Physics: Quantitative Models of Body Design, Actions, and Physical Limitations of Animals*. Berlin: Springer, 2004.
- [83] A. Bejan ve J. P. Zane, *Design in Nature: How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization*. New York: Doubleday, 2012.
- [84] A. Bejan, J. D. Charles, S. Lorente, ve E. H. Dowell, "Evolution of Airplanes, and What Price Speed?", *AIAA J.*, c. 54, sy 3, ss. 1120-1123, Mar. 2016.
- [85] Messrs. G. Gabrielli ve Th. von Kármán, "What price speed?", *Mech. Eng.*, c. 72, sy 10, ss. 775-781, Eki. 1950.
- [86] M. Trancossi, "What price of speed? A critical revision through constructal optimization of transport modes", *Int. J. Energy Environ. Eng.*, c. 7, sy 4, ss. 425-448, Ara. 2016.
- [87] J. Yong, R. Smith, L. Hatano, ve S. Hillmansen, "What price speed – revisited", *Ingenia*, sy 22, ss. 46-51, Mar. 2005.
- [88] S. Teitler ve R. E. Proodian, "What price speed?", revisited", *J. Energy*, c. 4, sy 1, ss. 46-48, Oca. 1980.
- [89] B. H. Carson, "Fuel Efficiency of Small Aircraft", *J. Aircr.*, c. 19, sy 6, ss. 473-479, Haz. 1982.
- [90] A. Bejan, R. Chen, S. Lorente, ve C. Y. Wen, "Hierarchy in air travel: Few large and many small", *J. Appl. Phys.*, c. 122, sy 2, s. 024904, Tem. 2017.
- [91] V. A. Tucker, "The energetic cost of moving about: Walking and running are extremely inefficient forms of locomotion. Much greater efficiency is achieved by birds, fish—and bicyclists", *Am. Sci.*, c. 63, sy 4, ss. 413-419, 1975.
- [92] A. S. Lebedev ve S. V. Kostennikov, "Trends in increasing gas-turbine units efficiency", *Therm. Eng.*, c. 55, sy 6, ss. 461-468, Haz. 2008.
- [93] P. M. Peeters, J. Middel, ve A. Hoolhorst, "Fuel efficiency of commercial aircraft: an overview of historical and future trends", National Aerospace Laboratory NLR, 2005.
- [94] D. Paul, L. Kelly, V. Venkayya, ve T. Hess, "Evolution of U.S. Military Aircraft Structures Technology", *J. Aircr.*, c. 39, sy 1, ss. 18-29, Oca. 2002.
- [95] P. Jackson, *Jane's all the worlds aircraft, 1995-96*, 86 edition. London: Janes Information Group, 1995.
- [96] J. Brandt ve M. Selig, "Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers", içinde *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, 2011.
- [97] Y. S. Ong, P. B. Nair, ve A. J. Keane, "Evolutionary Optimization of Computationally Expensive Problems via Surrogate Modeling", *AIAA J.*, c. 41, sy 4, ss. 687-696, Nis. 2003.
- [98] K. Chiba, Y. Makino, ve T. Takatoya, "Evolutionary-Based Multidisciplinary Design Exploration for Silent Supersonic Technology Demonstrator Wing", *J. Aircr.*, c. 45, sy 5, ss. 1481-1494, Eyl. 2008.

- [99] S. A. Brandt, J. J. Bertin, R. J. Stiles, ve R. Whitford, *Introduction to Aeronautics: A Design Perspective*. Reston ,VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [100] M. S. Francis, “Unmanned Air Systems: Challenge and Opportunity”, *J. Aircr.*, c. 49, sy 6, ss. 1652-1665, Kas. 2012.
- [101] M. Francis, “Design of Next Generation Unmanned Air Systems - Issues and Opportunities”, içinde *The 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO*, Anchorage, Alaska, 2008.
- [102] K. Nonami, “Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV”, *J. Syst. Des. Dyn.*, c. 1, sy 2, ss. 120-128, 2007.
- [103] W. Johnson, *Helicopter Theory*. New York: Dover Publications, 1994.
- [104] W. Johnson, *Rotorcraft Aeromechanics*. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [105] Y. Ozdemir, H. Basligil, ve M. Karaca, “Aircraft Selection Using Analytic Network Process: A Case for Turkish Airlines”, içinde *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011*, 2011, c. 2, s. 5.
- [106] D. L. Greene, “Energy-efficiency improvement potential of commercial aircraft”, *Annu. Rev. Energy Environ.*, c. 17, sy 1, ss. 537-573, 1992.
- [107] “Marine traffic: Global ship tracking intelligence”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.marinetraffic.com/en/data/?asset_type=vessels. [Erişim: 22-Eki-2018].
- [108] “Bureau Veritas VeriSTAR - Sea-going ships”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.veristar.com/portal/veristarinfo/generalinfo/registers/seaGoingShips>. [Erişim: 02-Eki-2018].
- [109] E. Turan, “Deniz taşımacılığının çok modlu taşımacılıktaki optimal yerinin türkiye koşulları için araştırılması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [110] “Marine Engine IMO Tier II and Tier III Programme”, Man Diesel & Turbo, 2015.
- [111] T. Cepowski, “Regression Formulas for the Estimation of Engine Total Power for Tankers, Container Ships and Bulk Carriers on the Basis of Cargo Capacity and Design Speed”, *Pol. Marit. Res.*, sy 1, ss. 82-94, 2019.
- [112] T. T. Soong, *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
- [113] Y. S. Kim, S. Lorente, ve A. Bejan, “Distribution of size in steam turbine power plants”, *Int. J. Energy Res.*, c. 33, sy 11, ss. 989-998, Eyl. 2009.
- [114] A. Bejan, A. Almerbati, ve S. Lorente, “Economies of scale: The physics basis”, *J. Appl. Phys.*, c. 121, sy 4, s. 044907, Oca. 2017.
- [115] R. N. Rosa, “River basins: geomorphology and dynamics”, içinde *Bejan’s Constructal Theory of Shape and Structure*, R. N. Rosa, A. H. Reis, ve A. F. Miguel, Ed. Portugal: Évora Geophysics Center, University of Évora, 2004, s. 33.
- [116] “Boeing Commercial Orders & Deliveries”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries>. [Erişim: 18-Oca-2019].

- [117]“Airbus Orders and Deliveries”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.airbus.com/aircraft/market/orders-deliveries.html>. [Erişim: 18-Oca-2019].
- [118]P. A. Jackson, K. Munson, ve L. Peacock, Ed., *Jane’s All the World’s Aircraft 2011-2012*. Jane’s Information Group, 2011.
- [119]D. Thisdell ve A. Fafard, “Flight International World Airliner Census”, *Flight Glob. Pioneering Aviat. Insight*, ss. 9-15, 2016.
- [120]D. A. Irwin ve N. Pavcnik, “Airbus versus Boeing revisited: international competition in the aircraft market”, *J. Int. Econ.*, c. 64, sy 2, ss. 223-245, Ara. 2004.
- [121]A. Goldstein, “EMBRAER: from national champion to global player”, *Cepal Rev.*, c. 77, Ağu. 2002.
- [122]L. MacDonald, “The Bombardier story”, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, c. 75, sy 2, s. 215, 2003.
- [123]G. Warwick, “Boeing 777 The inside story”, *Flight Int.*, c. 140, sy 4299, s. 33, Ara. 1991.
- [124]D. J. Ingells, *747: Story of the Boeing super jet*. Aero Publishers, 1970.
- [125]M. Wagner ve G. Norris, *Boeing 787 Dreamliner*. Voyageur Press, 2009.
- [126]“Partners in flight avian conservation assessment database”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://pif.birdconservancy.org/ACAD/Database.aspx>. [Erişim: 03-Tem-2018].
- [127]J. B. Dunning Jr, *CRC Handbook of Avian Body Masses*. CRC Press, 2008.
- [128]C. W. Sabrosky, “How Many Insects Are There?”, *Syst. Zool.*, c. 2, sy 1, s. 31, Mar. 1953.
- [129]P. Berthold, E. Gwinner, ve E. Sonnenschein, *Avian Migration*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [130]A. Bejan, “Rolling stones and turbulent eddies: why the bigger live longer and travel farther”, *Sci. Rep.*, c. 6, s. 21445, Şub. 2016.
- [131]Y. Y. Watanabe, K. J. Goldman, J. E. Caselle, D. D. Chapman, ve Y. P. Papastamatiou, “Comparative analyses of animal-tracking data reveal ecological significance of endothermy in fishes”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, c. 112, sy 19, ss. 6104-6109, May. 2015.
- [132]“FishBase”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://fishbase.org/search.php>. [Erişim: 30-Ara-2018].

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: umitgunes87@gmail.com

Makaleler

1. A. Bejan, U. Gunes, ve B. Sahin, “The evolution of air and maritime transport”, Applied Physics Reviews, c. 6, sy 2, s. 021319, Haz. 2019.
2. A. Bejan, U. Gunes, J. D. Charles, ve B. Sahin, “The fastest animals and vehicles are neither the biggest nor the fastest over lifetime”, Scientific Reports, c. 8, sy 1, s. 12925, Ağu. 2018.
3. A. Bejan, U. Gunes, M. R. Errera, ve B. Sahin, “Social organization: The thermodynamic basis”, International Journal of Energy Research, c. 42, sy 12, ss. 3770-3779, Haz. 2018.

Konferans Bildirileri

1. U. Gunes ve B. Sahin, “Constructal Timeline”, program adı: Constructal Law & Second Law Conference 2019, Porto Alegre, Brazil, 2019, ss. 151-154.