

# Gemi Sevk Gücü ve Isı Transferinin Yapısal Gelişim Teorisi ile İlişkisi

Ümit Güneş<sup>1</sup>, Erdal Çetkin<sup>2</sup>, Bahri Şahin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi, İzmir, Türkiye

<sup>3</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(sorumlu yazar), [ugunes@yildiz.edu.tr](mailto:ugunes@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0001-6942-6403

<sup>2</sup>[erdalchetkin@iyte.edu.tr](mailto:erdalchetkin@iyte.edu.tr), 0000-0003-3686-0208

<sup>3</sup>[bsahin@gelisim.edu.tr](mailto:bsahin@gelisim.edu.tr), 0000-0002-3885-9588

## ÖZET

Yapısal Gelişim Teorisi 1996 yılında literatüre kazandırılmış olup tabiattaki ve mühendislikteki tasarım prensiplerini açıklar. Teori, yeryüzündeki akış sistemlerini bütüncül bir şekilde ele alır. Akışın (hareketin) olmadığı yerde çoğu zaman canlılıktan bahsetmemiz dahi mümkün olmamaktadır. Akış sistemlerinin çözümünde anahtar davranış biçimi bu sistemlerin minimum dirençli yol ile hareketini sürdürmesidir. Belli bir zaman dilimi için minimum direnç ile hareket eden sistem zaman geçtikçe kendine yeni yollar (kanallar) bulmakta ya da bazı yolları hiç kullanmayarak yönünü değiştirmektedir. Yapısal Gelişim Teorisi ise hayati öneme sahip olan akış sistemlerinin fiziksel arka planını ortaya koymaktadır. Bu makalede özellikle mühendislik çözümlerinin başında gelen akış sistemlerinin yapısı (gemilerde kurulu ana makine gücü ve ısı transferi örnekleri özelinde) ve Yapısal Gelişim Teorisi'ne göre ilişkisi araştırılmıştır. Bunun için 1085 adet petrol tankeri için DWT ile bu tankerler için gerekli olan güç ilişkisi nonlineer regresyon ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak gemilerdeki genel gelişimin ve ısı transferinin yapısal gelişim prensiplerine uygun şekilde gerçekleştiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapısal gelişim teorisi, gemi, verim, akış sistemleri, ısı transferi

**Makale geçmişi:** Geliş 14/11/2022 – Kabul 06/01/2023

<https://doi.org/10.54926/gdt.1204378>

# The Relationship Between Marine Propulsion Power and Heat Transfer with Constructal Law

Ümit Güneş<sup>1</sup>, Erdal Çetkin<sup>2</sup>, Bahri Şahin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Gelisim University, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(corresponding author), [ugunes@yildiz.edu.tr](mailto:ugunes@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0001-6942-6403

<sup>2</sup>[erdalacetkin@iyte.edu.tr](mailto:erdalacetkin@iyte.edu.tr), 0000-0003-3686-0208

<sup>3</sup>[bsahin@gelisim.edu.tr](mailto:bsahin@gelisim.edu.tr), 0000-0002-3885-9588

## ABSTRACT

Constructal Law was introduced by Adrian Bejan to the literature in 1996 as a theory that explain the principles of design in nature and engineering. If there is no flow (movement) then the potential of a system to do work cannot be considered. One of the most important criteria to uncover solutions for flow systems is that these systems maintain their movement by using the path of the least resistance. A system that moves with the least resistance path for a certain period of time finds new paths (channels) for itself as time goes by or changes its direction by not using some possible paths. Constructal Law reveals the physics of these flow systems are in prime importance. This article provides a physical insight and analysis of flow systems that are at the core of many engineering problems (specifically installed main engine power and heat transfer) in accordance with Constructal Law. In addition, the relationship between DWT and installed main engine power for 1085 oil tankers was analyzed by nonlinear regression. As a result, the evolution of ships and heat transfer are compatible with Constructal Law.

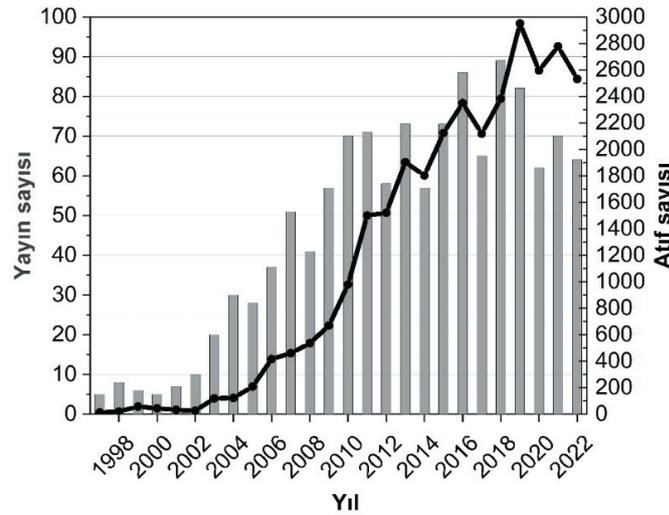
**Keywords:** Constructal law, ships, efficiency, flow systems, heat transfer

**Article history:** Received 14/11/2022 – Accepted 06/01/2023

## 1. Yapısal Gelişim Teorisi

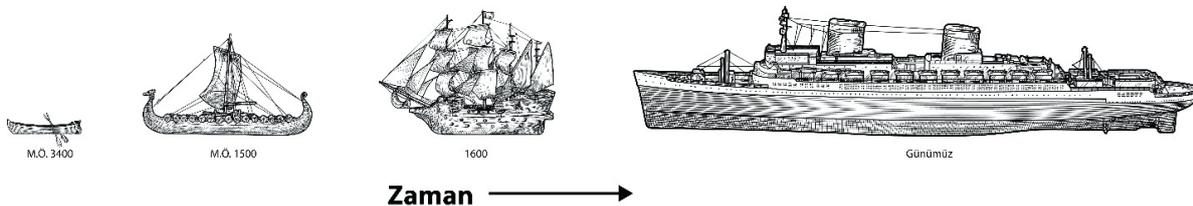
Yapısal Gelişim Teorisi (*Constructal Law*) ile sonlu boyutlu bir sistemin zaman içinde akışın daha az dirençli yollardan akmasıyla gelişebileceği fikri ilk kez Adrian Bejan (Bejan, 1996) tarafından ifade edilmiştir (Güneş, 2019). Her ne kadar bünyesinde minimum direnç ve buna bağlı olarak maksimum verim gibi yaklaşımları bulundursa da Yapısal Gelişim Teorisi'nin tam olarak bir optimizasyon yöntemi olduğunu söylenemez. Yapısal Gelişim Teorisi ile optimizasyon yöntemlerini ayıran en önemli faktör, Yapısal Gelişim Teorisi'nde bulunan sonuçların tek noktada değil belli bir zaman için geçerli olduğudur. Optimizasyon yöntemleri ile sadece bir değer bulunup optimum (minimum ya da maksimum) nokta tespit edilirken Yapısal Gelişim Teorisi'nde bu optimum nokta zaman içinde değişecektir. Çünkü zaman içinde daha az dirençli yollar/kollar gelişecektir. Bu şekilde düşünüldüğünde Yapısal Gelişim Teorisi'nin çoklu optimum noktaları barındırdığı söylenebilir.

Yapısal Gelişim Teorisi ortaya çıkışının akabinde bir çok sisteme adapte edilerek fiziksel ve sosyolojik bir çok problem bu teori ile açıklanmıştır (Basak, 2011; Bejan, 2013, 2015, 2017; Bejan & Errera, 2014; Bejan & Lorente, 2006, 2010, 2011, 2013; Chen, 2012; Kakac, 2016; Reis, 2006). Şekil 1'de Yapısal Gelişim Teorisi üzerine yayınlanmış çalışmalar ve bu yayınların aldığı atıflar görülmektedir (Scopus, 2022). Yayınların ve atıfların trendi incelendiğinde 1996 yılından günümüze yayın ve atıf sayılarında genel olarak bir artış olduğu görülmektedir.



**Şekil 1.** Yapısal Gelişim Teorisi alanında yayınlanmış çalışmalar ve bu yayınların aldığı atıflar (Scopus, 2022)

Yapısal Gelişim Teorisi tabiattaki ve mühendislikteki değişim ve bu değişimin hangi yönde olacağı hakkında fikir vermektedir. Şekil 2'de gemilerin zamanla değişimi görülmektedir. Bu tasarımlar zamanının en iyi tasarımlarıyken malzeme teknolojisi, üretim teknikleri ve ihtiyaçların farklılaşması ile ilerleyen yıllarda zamanın ihtiyaçlarına daha çok uyan ve daha gelişmiş tasarımlar ortaya çıkmıştır.



**Şekil 2.** Gemi tasarımının zaman içindeki değişimi (Bejan (2016b) kaynağından esinlenerek üretilmiştir)

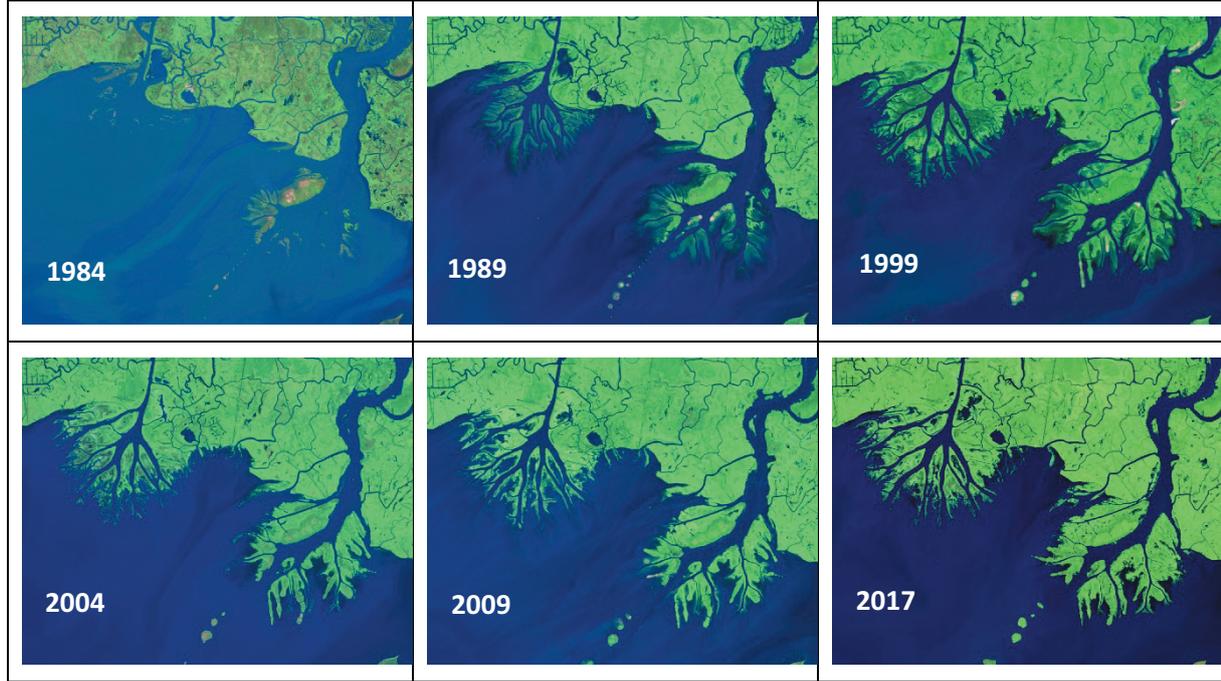
Zaman içinde gelişim kaçınılmazdır. Gelişime ayak uyduramayan bazı büyük firmalar (Yahoo, Nokia gibi) ile imparatorlukların tarihten silinmesi, gelişime direnmek yerine onunla ilerlemenin en iyi seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Gelişim için hareketin gerçekleşeceği doğrultuda özgürlüğe (serbestliğe) ihtiyaç vardır. Özgürlük ise yeni tasarımların ortaya çıkmasının altında yatan en önemli unsurdur. Tek serbestlik dereceli bir denklemin çözümü tektir. Dolayısıyla böyle denklemlerin sonucunda özgün tasarımların çıkması da beklenemez. Serbestlik derecesi arttıkça çözümler de artar. Doğaya ve karmaşık mühendislik uygulamalarına baktığımızda serbestlik derecesi ile sistemi etkileyen parametrelerin çokluğu göze çarpar. Bu nedendir ki doğadaki tasarımlar birbirinden farklı gibi görünseler de benzer performansı gösterebilirler. Örneğin; doğada akışkanın aktığı sistemlerde dairesel veya heksagondan daha fazla köşe sayısına ait kesitlerin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise bu kesitlere ait tasarımların akış direnci üzerindeki etkilerinin yaklaşık aynı oranda kalması ve sistemlerin dış etkiler nedeniyle üzerlerinde hissettikleri kuvvetlerin bu kesit farklılıklarında etkili olmasıdır (Bejan & Lorente, 2006).

Bu çalışmada, Yapısal Gelişim Teorisi ile tabiattaki tasarım arasındaki ilişki örneklerle açıklanmıştır. Yapısal Gelişim Teorisi ile güç başına kurulu ana makinelerin ağırlığının ve ana makinelerin özgül yakıt tüketiminin yıllara göre değişimi veriler ışığında gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada 1085 adet petrol tankeri için DWT ile bu tankerler için gerekli olan güç ilişkisi nonlineer regresyon ile analiz edilmiştir.

## 2. Tabiattaki Tasarım

Yapısal Gelişim Teorisi mühendislik ve tabiattaki tasarımların prensiplerini göstermektedir. İnsan yapımı olan tasarımlar ve tabiatta doğal olarak ortaya çıkan tasarımlar zaman içerisinde ortam şart ve koşullarına göre gelişim göstermektedir (Bejan, 1996, 2016b). Aslında her akış kendisi için en uygun minimum dirençli yolu takip etme eğilimindedir. Örneğin; trafikte iken bizi hedefe ulaştıracak en kısa, en az yakıt harcayacağımız ya da en az trafiğin olduğu yolu tercih etmek isteriz.

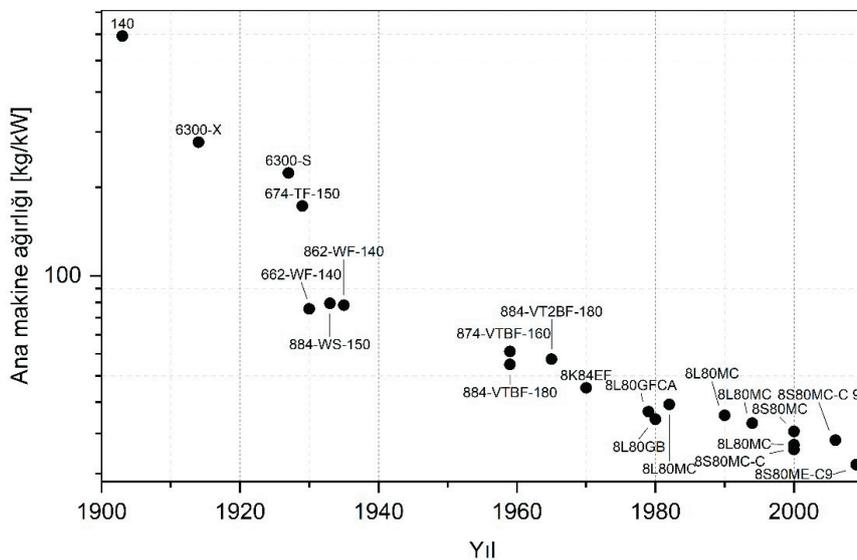
Şekil 3'te ABD'nin Louisiana eyaletinde bulunan Wax Lake deltasında 1984 ile 2017 yılları arasında meydana gelen değişim gösterilmiştir. NASA'dan (2022) alınan görsellerden de anlaşılacağı üzere yıllar içerisinde deltanın yapısı değişmektedir. Deltaya nehir akışı sırasında akış tıpkı yaprak tasarımında olduğu gibi dallanarak değişmekte ve yıllar geçtikçe kendine daha kolay yolları bulacak şekilde gelişmektedir. Bu noktada sabit bir tasarımdan bahsetmek mümkün değildir. Örneğin; belirli bir zaman dilimi için nehir akışının kaç kollu olacağı söylenebilirken zaman ilerledikçe bu kol sayısı da değişecektir. Yapısal Gelişim Teorisi bu yüzden sabit bir tasarımı değil zaman geçtikçe değişen bir tasarımı ve tasarımın prensiplerini vurgulamaktadır.



Şekil 3. Wax Lake deltasının 1984'ten 2017 yılına kadar oluşumu (NASA, 2022)

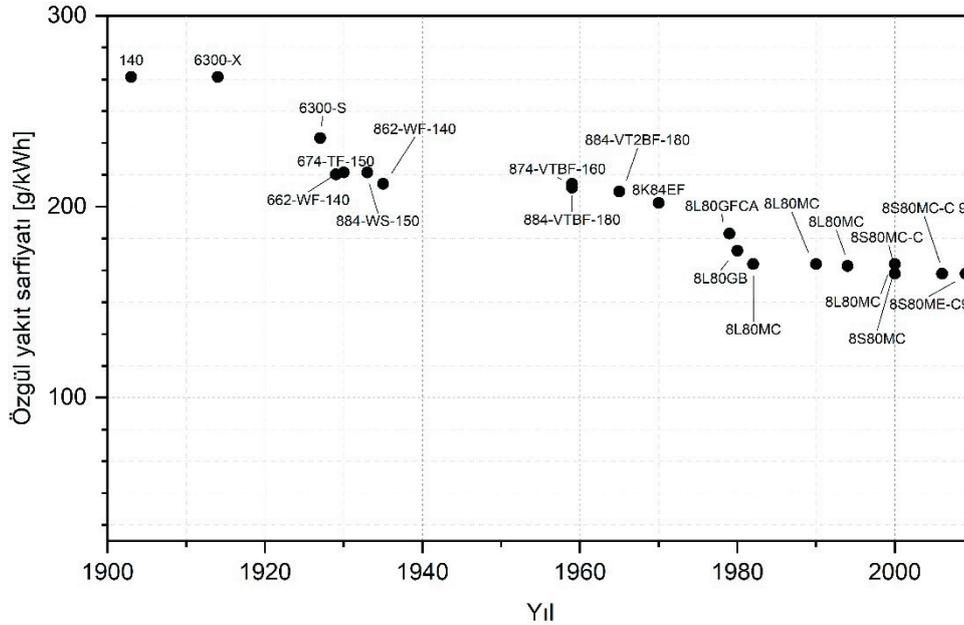
### 3. Gemilerde Yapısal Gelişim Teorisi

Deniz taşımacılığı, hareket etme özgürlüğü ve ticaret yapma imkânı sağlayarak her zaman çok büyük bir öneme sahip olmuştur. Eski medeniyetlerin deniz/nehir kenarına yerleşmeleri deniz ulaşımı ile yakından ilgilidir (Bejan, 2016b). Benzer durum insan yapımı olan makineler için de geçerlidir. Zamana bağlı olarak daha iyi tasarımlar ve buna bağlı olarak da daha verimli makineler ortaya çıkmaktadır. Bu ise makinelerin performansını ve verimini arttırmakta, makinelerin aynı güç gereksinimi için daha küçük boyutlarda üretilmesini sağlamaktadır. Şekil 4'de kW başına kurulu ana makine ağırlığı görülmektedir. 1900'lerden günümüze aynı gücün elde edildiği ana makine ağırlığı ciddi oranda azalmıştır (Bejan vd., 2019; MAN-ES, 2019). Bunun nedenleri arasında ise malzeme ve üretim gibi alanlardaki teknolojik gelişmeler gelmektedir.



Şekil 4. kW başına MAN ana makinelerin ağırlığının yıllara göre değişimi (Veri Kaynağı: (MAN Diesel, 2008)).

Zamana bağlı değişimde ana makinelerde birim güç için özgül yakıt sarfiyatı üzerinden incelendiğinde yakıt sarfiyatının ciddi anlamda azaldığı görülür. Çünkü gelişen teknoloji ve sistemler hareketin daha kolay yapılmasını sağlamaktadır. Şekil 5'te kurulu ana makine özgül yakıt sarfiyatı görülmektedir. Zamanla birim kW için harcanması gereken özgül yakıt sarfiyatı düşmektedir. Özgül yakıt sarfiyatının verim ile ters orantılı olduğu göz önünde bulundurulduğunda özgül yakıt sarfiyatının azalması motor veriminin artması anlamına gelmektedir. Şekil 5'te 22 adet tarihsel MAN gemi verisi kullanılarak motorların yakıt sarfiyatının karakteristiği sunulmuştur. Gemi ana makinelerinin gelişimi gibi yelkenli gemiler de Yapısal Gelişim Teorisi'nin prensiplerine uymaktadır (Bejan vd., 2020).



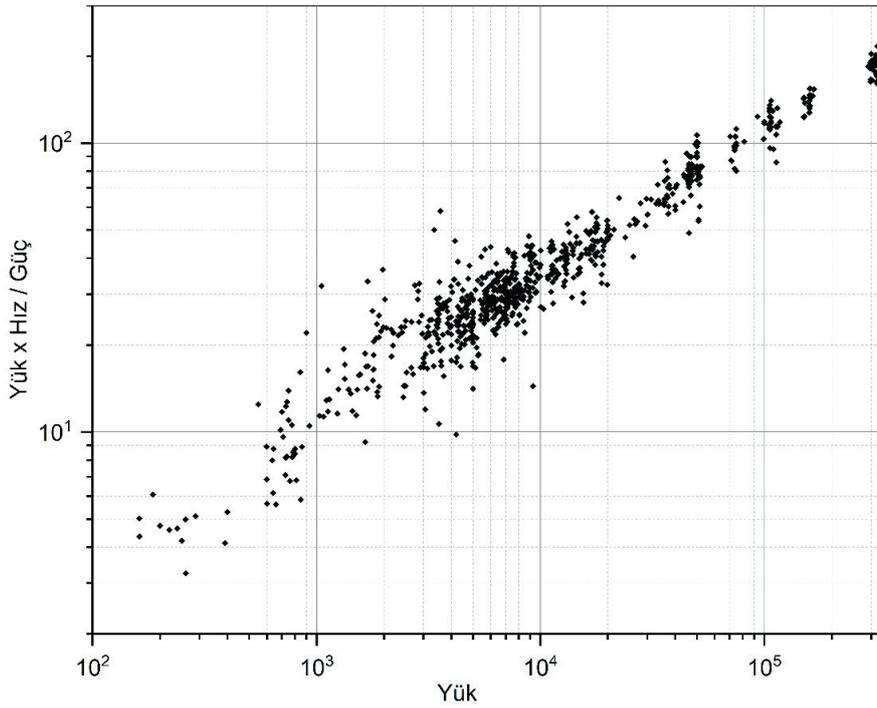
Şekil 5. Yıllara göre MAN ana makinelerin özgül yakıt tüketimi (Veri Kaynağı: (MAN-ES, 2019))

Deniz taşımacılığında amaç yükleri bir yerden başka bir yere taşımaktır. Tüm taşıma ağında bir noktadan başka bir noktaya taşıma işlemi, aynı boyuttaki gemiler ile yapılamaz. Çünkü uzak mesafelere büyük boyutlu araçlar ya da hayvanlar hareket edebilirken kısa mesafelere daha küçükleri hareket edebilmektedir (Bejan vd., 2018). Bu durum sadece deniz taşımacılığında değil hava taşımacılığında ve raylı taşımacılıkta da geçerlidir. Bir noktadan başka noktalara taşınım ve hareket Yapısal Gelişim Teorisi'nin çıkış noktasıdır (Bejan, 1996, 1997). Taşınma ve hareket minimum dirençli yol eğilimindedir çünkü minimum direnç aynı anlamda minimum enerji sarfiyatı anlamına gelmektedir. Tabiattaki hareket için bu minimum direnç prensibi deniz taşımacılığında da geçerlidir. Deniz taşımacılığında iç denizlerde taşıma yapan birçok geminin yükünü bir gemi daha uzak mesafelere götürebilmektedir. Bir noktadan başka noktalara taşınım ve hareket dallı ağları/yolları ortaya çıkarmaktadır. Nehir akışında olduğu gibi küçük kollar (gemiler) büyük kollarla birleşerek hareketine dallı yapıda devam etmektedir.

Bu hareket sürecinde büyük araçlar ve canlılar da küçüklere göre hem daha verimlidir hem de daha uzun mesafelere gidebilirler (Bejan, 2016a). Daha uzak mesafelere gidenlerin sayısı daha kısa mesafelere gidenlerin sayısına göre çok azdır. Örneğin; İstanbul'dan ABD'nin Durham şehrine seyahat etmek isteyen birisi önce uçuşunun 11 saatlik süresini haftalık yaklaşık 220 uçuş yapan İstanbul-New York hattında geçirirken (Skyscanner, 2022a) kalan 1.5 saatlik bölümünü ise New York'tan Durham'a haftalık yaklaşık 850 uçuşu bulunan hatta geçirmektedir (Skyscanner, 2022b).

Yapısal Gelişim Teorisi'nde açıklandığı gibi büyük boyutlu gemiler birim yük başına daha az enerji harcadığı için küçük boyutlu gemilere göre daha ekonomiktir. Şekil 6'da gemi büyüklüğü DWT ilişkili

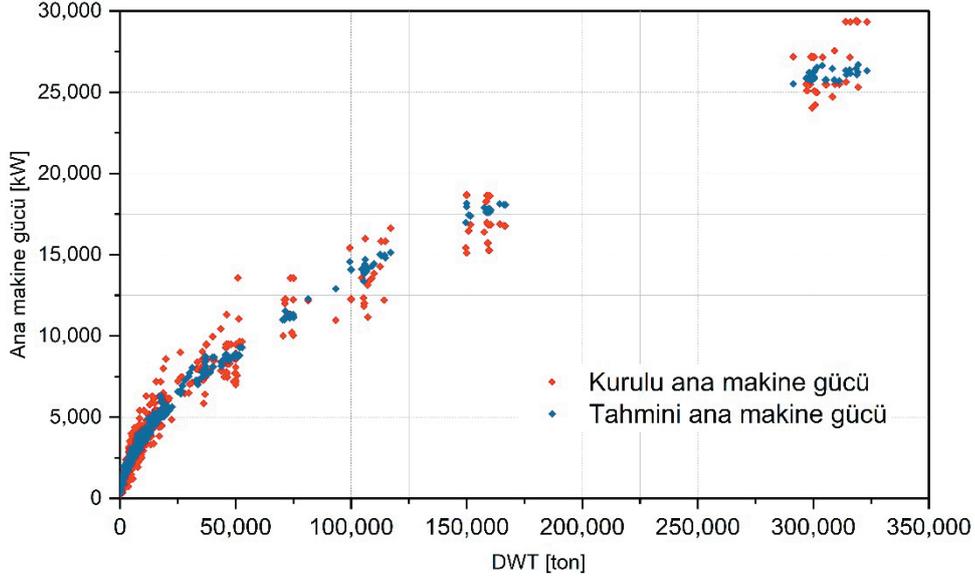
olarak gösterilmiştir. DWT, sadece taşınan yükün ağırlığı olmayıp yağlama yağı, balast suyu, kullanım suyu, yolcu ve mürettebatı ilgilendiren ağırlıkları da içermektedir. Gemilerde yük taşımacılığında geminin boyutuna bağlı olarak yükün momentumuna karşı sarfedilen gücün kurulu güce oranı ( $DWT \times V / P_{mak}$ ) Bureau Veritas (2020) klas kuruluşundan alınan 1085 petrol tankeri verisi için Şekil 6'da gösterilmiştir. Gemi DWT kapasitesi sadece kurulu ana makine gücüne bağlı olmayıp hız ve tekne-makine-pervane etkileşimini ilgilendiren değerlere de bağlıdır. Burada DWT'nin sadece kurulu ana makine gücüyle olan ilişkisi dikkate alınmıştır.



**Şekil 6.** 1085 adet petrol tankeri için boyuta bağlı olarak yükün momentumuna karşı sarfedilen gücün kurulu güce oranı ( (Veri Kaynağı: (Veritas, 2020))

Şekil 6'da verilen gemiler için boyuta bağlı olarak kurulu ana makine gücünün analizi Şekil 7'de logaritmik grafik olarak sunulmuştur. Yapılan analiz sadece bir değişkene göre olmayıp 1085 geminin DWT, GT, L ve B değerleri de dikkate alınarak nonlineer regresyon yöntemiyle analiz edilmiştir. Geliştiren nonlineer yöntemde Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmış olup ağırlıklandırma ~ yfit yöntemine göre yapılmıştır. (Press vd., 2007). Nonlineer regresyon için 4 adet regresyon katsayısı ( $c_1, c_2, c_3$  ve  $c_4$ ) ve 4 adet üst katsayısı ( $a_1, a_2, a_3$  ve  $a_4$ ) hesaplanmıştır. Verilerden elde edilen değerler ile nonlineer regresyon ile analiz edilen değerler Şekil 7'de verilmiştir. Geliştirilen nonlineer model ile ana makine gücünün tahminindeki  $R^2$  ise 0.958'lik çok yüksek yaklaşıma sahiptir. Analiz sonucunda Denklem 1 aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$\text{Ana Makine Gücü}^* = 4.89 \times 10^{-4} \times DWT^{*0.715} + 0.332 \times 10^{-2} \times GT^{*0.728} + 0.306 \times L^{*1.678} + 0.218 \times B^{*1.619} \quad (1)$$



**Şekil 7.** 1085 adet petrol tankeri için DWT ile gerekli olan güç ilişkisi (Veri Kaynağı: (Veritas, 2020))

Denklem 1’de verilen ifade yer alan Ana Makine Gücü\*, DWT\*, GT\*, L\* ve B\* değerleri her biri kendi kategorisindeki maksimum değer bulunup normalleştirilerek tüm değerler 0 ile 1 arasına getirilmiştir. Böylece regresyondaki her değişkenin etkisinin anlamlı olması sağlanmıştır. Her bir değişkene ait maksimum, minimum ve ortalama değerler Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** 1085 adet petrol tankeri için Ana makine gücü, DWT, GT, L ve B değerlerine ait maksimum, minimum ve ortalama değerler (Veri Kaynağı: (Veritas, 2020))

	Ana makine gücü [kW]	DWT [ton]	GT	L [m]	B [m]
Maksimum	29400	323183	165965	330	60
Minimum	258	162	116	20	6.5
Ortalama	5750	34001	19371	132	23

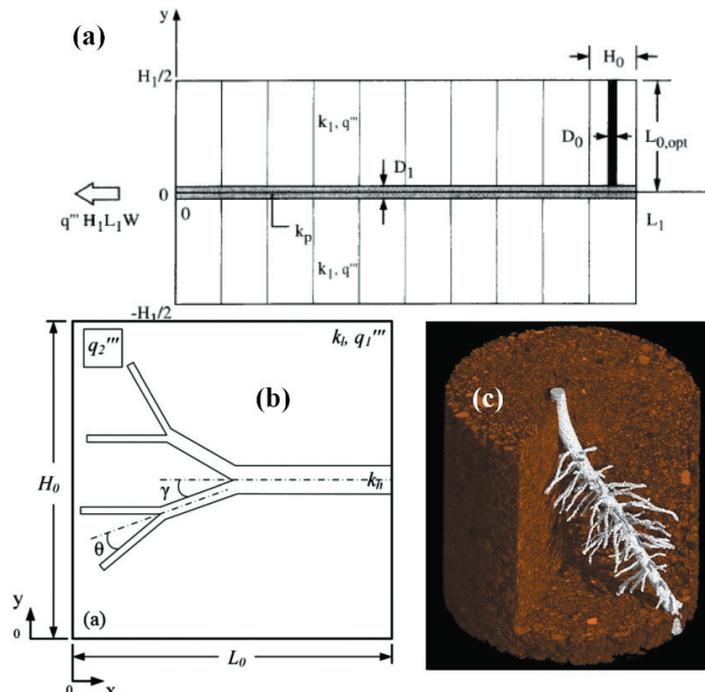
#### 4. Isı Transferi

Isının transfer edilmesi de enerjinin akışını içerdiğinden bir akış mekanizması oluşturmaktadır. Bu nedenle ısı transferi de enerjinin aktığı bir akış sistemi olarak düşünülebilir. Böylece Yapısal Gelişim Teorisi ile minimum dirençli bir ısı değiştirgecinin tasarımı ve akışkanı dağıtan bir yapının tasarımsal özelliklerinin benzer olduğu söylenebilir (Bejan & Lorente, 2008). Ancak ısı transferinde, akışkanlar mekaniğinden farklı olarak enerjinin akışı iletim, taşınım ve ışınım alt mekanizmaları sayesinde gerçekleştiğinden tasarımların boyutları ve yapılar arasındaki geometrik çap/boy gibi özellik oranları farklılık göstermektedir. Isı transferi artırımı için Yapısal Gelişim Teorisi batarya ısı yönetimi, elektronik soğutma, merkezî ısınma, türbin soğutma, iklimlendirme ve kendini soğutan akıllı malzemeler gibi birçok alanda uygulama bulmuştur. İletim ve taşınım mekanizmaları ile soğutma üzerine odaklanmış tasarımların farklı kullanım amaçları için (batarya ısı yönetimi, elektronik soğutma, ısı transfer artırımı gibi) yakın zamanda yapılmış çok sayıda yayın bulunmaktadır (Demirkıran vd., 2022; Feng vd., 2022; Gungor vd., 2022).

İletimin ısı direnci taşınımına kıyasla küçük olduğundan genelde ihmal edilmektedir. Ancak iletim ile ısı transferinin taşınım mekanizmasından ayrı düşünülmemeyeceğini ve ekipman boyutları küçüldükçe iletim dirençlerinin etkisinin ihmal edilemez seviyelere çıkacağını Bejan ve Lorente (2008) göstermiştir.

Birim hacim için üretilen ısı miktarının karakteristik cihaz boyutuna bağlı olarak hangi ısı transfer mekanizmasında nasıl bir performans gösterdiği Bejan ve Lorente (2008) tarafından ortaya konulmuştur. Karakteristik cihaz boyutunun en yüksek olduğu mertebeye doğal taşınım ve boyut düştükçe zorlanmış taşınımın daha yüksek ısı akışını sağladığını ortaya koymuşlardır. Cihaz boyutu küçüldüğünde ise iletim mekanizmasının daha yüksek ısı akışına karşılık geleceği belirtilmiştir. Bu sonuçlara ek olarak, bazı boyutların geçiş karakteristikleri göstereceği de aşikârdır. Örneğin; doğal taşınımdan zorlanmış taşınıma geçerken bu geçiş ani bir şekilde olmak yerine karışık taşınım olan bir bölge ile olmaktadır. Nano-akışkanlar üzerine literatürde birçok yayın olmasının arkasında da aslında zorlanmış taşınım ile iletim arasındaki geçiş bölgesinde nano-akışkanların bulunması olabilir. Ayrıca, bu geçiş bölgesinin dışında ısı geçiş oranında fark edilir bir artış olmaması da nano-akışkan literatüründe farklı sonuçların belgelenmesinin nedeni olarak görülebilir. Özetle, soğutulması gereken ısı üreten cihaz boyutları küçüldükçe, iletim ile ısı transfer edilmesine yönelik olan yüksek ısı iletim katsayısına sahip yapılara olan ihtiyaç da elektronik soğutmada kullanılan ısı köprüleri gibi artmaktadır.

Isı üreten bir yüzeye yüksek ısı iletim katsayılı malzeme ile kanallar yapma fikri Almogbel ve Bejan (1999) tarafından gösterilmiştir. Şekil 8a yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemenin  $D_0$  ve  $L_{0,opt}$  boyutlarında,  $H_0$  boyutundaki her birim alana yerleştirildiğini göstermektedir. Ayrıca çalışma, ısı transferi için farklı tasarım parametrelerinin en yüksek ısı iletimi sağlamak üzere nasıl değiştirilmesi gerektiğini tartışmaktadır. Fikrin temeli ise ısının akması için üretildiği yere yakın tali yollar (ısı direnci nispeten yüksek ısı akım çizgileri) bulunuyorsa bu tali yolların birleşeceği ana yolların olması ve bu ana yolların birleşeceği daha geniş yolların olmasıdır. Böylece belirli sayıda ısı akım çizgisinin birleştiği yere yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemeler yerleştirilmiş ve bu yolların bulunduğu birim alanlar yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin olduğu bölgelerde birleştirilmiştir. Yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemenin homojen olarak dağıtılması yerine belirli bir tasarımla yerleştirilmesinin ne kadar önemli sonuçları olacağını ilk defa Cetkin (2014) ortaya koymuştur. Cetkin %1 hacim oranında yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemenin belirli bir tasarımla yerleştirilmesinin homojen olarak dağıtılmasına kıyasla tüm ısı direnci 3 kat azalttığını göstermiştir.



**Şekil 8.** (a) Yüksek ısı iletim katsayılı eklentilerin şematik çizimi (Almogbel & Bejan, 1999) (b) Homojen olmayan ısı üretimi olduğunda dallı yapının oluşumu ve ısının yoğunlaştığı yere yönelmesi (Cetkin & Oliani, 2015) (c) Bitki kökünün suyun olduğu yöne doğru yönelmesi (Bao vd., 2014)

Yapısal Gelişim Teorisi ile ortaya çıkan tasarımların dallı yapılar içermesi ve geometrik olarak ağaçlara, akciğere, yıldırıma benzemesi nedeniyle bir bio-benzeşim modeli olduğu zannedilebilir. Ancak bio-benzeşimde, doğadaki bir yapının çalışma prensibi anlaşıldıktan sonra boyutsal özellikleri kopyalanarak mühendislik uygulamalarında kullanımına geçilir. Gözlemi yapılan doğadaki canlının işlevleri doğru bir şekilde anlaşılıp uygulanırsa mühendislik uygulamalarında avantajlar sağlar. Yapısal Gelişim Teorisi ise bir yapının belirli sınır şartlarında optimum olacağı ve zamanla bu şartların değişmesiyle yapının da değişmesi gerektiğini tartışır. Bu nedenle aslında doğadan bir kopyalama yapılmamaktadır. İletim özelinde bir örnek ile bu husus açıklanabilir (Cetkin & Oliani, 2015). Homojen olmayan ısı üretimi olan bir plakanın soğutulması için ısı iletim katsayısı yüksek malzemenin yüzeye nasıl dağıtılması gerektiği sayısal parametrik analizler ile ortaya çıkarılmıştır. Simülasyonlarda enerjinin korunumu denklemi, ısı üretimi olan ve olmayan bölgeler için çözülmüştür. Denklem (2) ısı üretimi olan ve nispeten düşük ısı iletim katsayısına sahip hacimde, Denklem (3) ise ısı üretimi olmayan ve yüksek ısı iletkenliğe sahip köprüsü hacmi için geçerli olan enerjinin korunumu denklemlerini göstermektedir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q'''}{k_1} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

Bu denklemlerde T sıcaklığı,  $q'''$  hacimsel ısı üretimini,  $k_1$  ısı üreten hacmin ısı iletkenliğini ve x ile y de koordinatları göstermektedir. Yüksek ısı iletkenliğe sahip olan ısı köprüleri ısı üreten hacmin içerisinde olduğu için ısı geçişi yalnızca onu çevreleyen hacimden olmaktadır. Bu nedenle Denklemler (2) ve (3) sayısal olarak çözülürken iki malzemenin ara yüzeyinde termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu denkleminin uygulanması gerekmektedir.

Birinci yasa genel haliyle Denklem (4)' te verilmiştir.

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} = \frac{dE_{sistem}}{dt} \quad (4)$$

Ara yüzeyin kütlesi olmayan bir sınır ayrımı olması nedeniyle burada enerjinin depolanması söz konusu olmamaktadır. Bu nedenle  $dE_{sistem}/dt$  terimi sıfır olmaktadır. Ayrıca enerji geçişinin yalnızca ısının geçişi nedeniyle olması da değerlendirildiğinde ara yüzey için birinci yasa Denklem (5)'te görüldüğü üzere yazılabilir.

$$k_l \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_l = k_h \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_h \quad (5)$$

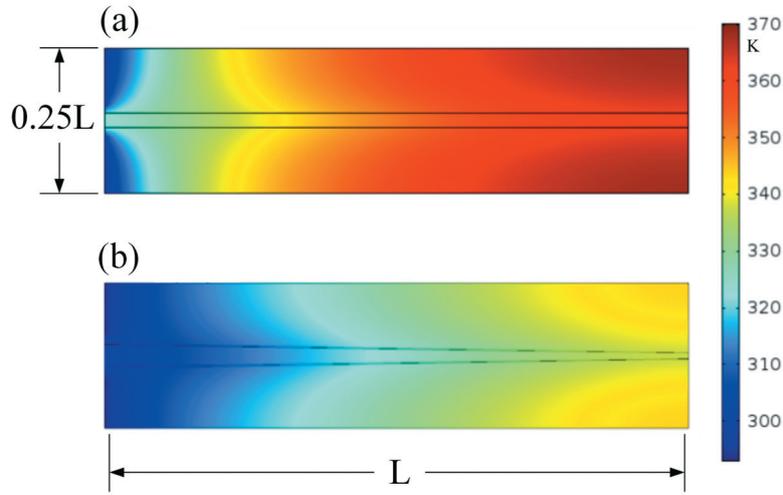
Bu denklemde l ve h sırasıyla düşük ve yüksek iletim katsayılı hacimlerin buldukları bölgeyi,  $k_h$  ve  $k_l$  yüksek ısı iletim katsayılı ısı köprüsünün ve düşük ısı iletim katsayılı hacmin iletim katsayısını ve n ise normal vektörü göstermektedir. Bu denklemlerin boyutsuz hâlde çözümleri sırasında boyutsuz ısı üretim değerlerinin sabit  $q''' = 1$ 'e pozisyona bağlı ( $q''' = 2(1-x)$  ve  $q''' = 2x$ ) durumlar için sabit bir ısı kuyusu tanımlanmış olup kanalların tasarımı ile değişen ısı geçişi oranları ortaya çıkarılmıştır. Yapılan çözümler sonucunda simetrik ve asimetric ağaç yapılı ısı köprülerinin hangi ısı üretim karakteristiklerinde akış direncini minimize ettiği ortaya koyulmuştur. Elde edilen sonuçlar ise aynı türden ağaçların ortama uyum sağlayarak akış dirençlerini minimize etmek için tasarimsal olarak simetrik ve/veya asimetric şekilde neden büyüdüğünü, elektronik soğutma için ısı köprüsü optimizasyonu sırasında ortaya çıkarmıştır. ısı iletimi ile ağaçların akış karakteristiğinin yakın olması ise

ağaçların köklerinin büyüdüğü toprağın gözenekli bir yapıya sahip olması nedeniyle kullanılan akış denkleminin ( $q = -K/\mu \cdot \nabla P$ ) ısı iletimi ( $q = -kdT / dn$ ) denklemi ile aynı olmasındandır (Bejan & Lorente, 2008).

Bu çalışma dallı yapı kullanılırsa bu dallar, ısı üretiminin nispeten yüksek olduğu bölgeye doğru büyürler (Şekil 8b). Tüm hesaplamalar bittikten sonra ise Bao vd. (2014)'nin deneysel çalışmalarında bitki köklerinin suya doğru büyüdüğü (Şekil 8c) ve kök yapısının Cetkin ve Oliani'nin çalışmasındaki (2015) ile aynı olduğunu gözlemlenmiştir. Cetkin ve Oliani (2015) parametrik olarak gerçekleştirdikleri simülasyonlar ile ısı dirençleri minimize etmek için çok sayıda parametreyi optimize etmiş ve buldukları tasarım aynı sınır şartları için bitki kökünün geometrisi olmuştur. İlk başta alakasız gibi görünen iki durum aslında dikkatlice düşünüldüğünde aynı diferansiyel denklem ile karakterize edilmektedir. Özetle, bitki kökü tasarımı dirençleri en aza düşürerek suyu ve mineralleri toplayacak şekildedir. Cetkin ve Oliani (2015)'nin amacı dirençleri minimize etmek olduğundan ortaya çıkan tasarım da bitki kökü tasarımı ile aynı olmuş yani bitki kökü tasarımı kopyalamadan ve gözlemlenmeden analizler ile bitki kökü tasarımının nasıl olması gerektiğini ortaya çıkarmışlardır.

Literatürde her ne kadar yüksek ısı iletime sahip malzemelerin dallı yapılardan oluştuğu bilinse de ısı dirençlerin istenen homojenliğe gelmesi sağlanarak en yüksek sıcaklık değeri düşürülmüş olsa da her dalın kesitinin sabit kaldığı en büyük kabulü oluşturmaktadır. Ancak doğada hiçbir dallı yapının sabit kesitli olmadığı bilinmekte ve farklı örnekler üzerinden Yapısal Gelişim Teorisi değerlendirildiğinde Bejan ve Lorente (2006) kesitin akış fiziğine göre değişmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle kesit değişiminin ısı dirençleri ve sıcaklık dağılımını nasıl etkilediğini ortaya çıkarmak önem arz etmektedir.

Uzunluğu L ve yüksekliği 0.25L olan bir elemansal yüzey alanı içerisinde ısı iletim katsayısı ısı üretimi olmayan bölge için 100 kat daha fazla olarak tanımlanmıştır. Isı üretimi olan bölgedeki boyutsuz ısı üretimi oranı 1000 olarak tanımlanmıştır. Isı üretimi olmayan bölge elemansal hacmin tam ortasından geçen boydan boya bir kanatçık olarak tanımlanmıştır. Sabit kesite sahip olduğu durumda yüksekliği 0.025L ve uzunluğu L olup, toplam hacmin %10'una karşılık gelmektedir. Kanatçık için ayrılan alan her iki durumda da aynı olmakla birlikte lineer olarak değişen durumda en yüksek kanatçık yüksekliği 0.04L ve en düşük de 0.01L'dir. Yüzeyin sol tarafında taşınım ile ısı transferi tanımlanmış olup  $\overline{Nu} = 500$  ve akışkan sıcaklığı 293K'dir. Diğer tüm yüzeyler ise simetri sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Böylece elemansal yüzey alanının çok büyük bir yüzeyin devam eden küçük bir parçası olduğu yaklaşımına uygun seçimler yapılmıştır. Sabit kesitli kanatçık için sıcaklık dağılımı Şekil 9a'da verilmiştir. Şekil 9b ise kesitin lineer bir şekilde azalması durumunda aynı yüzey alanı için sıcaklık dağılımını göstermektedir. Yüksek ısı iletime sahip malzemenin kesitinin uzunluğa bağlı olarak tanımlanması ile ısı akışına karşı olan direncin azaldığı ve bundan dolayı hem en yüksek sıcaklığın düştüğü hem de sıcaklık dağılımının homojenliğinin arttığı görülmektedir. Her malzemenin yüzey alanı her iki durumda da sabit kaldığından Yapısal Gelişim Teorisi ile ortaya çıkarıldığı üzere malzemelerin yerleşimi yani tasarımın sistemin hayatta kalması için belirli bir şekilde oluşumu, kesit alanının sabit olmaması gerektiğini göstermektedir.



**Şekil 9.** Yüksek ısı iletim katsayılı eklentiye sahip ısı üreten elemansal yüzey alanının sıcaklık dağılımı (a) eklenti kesit alanı sabit olduğunda, (b) eklenti kesit alanı lineer olarak değiştiğinde.

Isı değiştiricilerinde ısı transfer artırımını için Yapısal Gelişim Teorisi'nden faydalanan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin; Asadi vd. (2018) ısı geçişine olan direnci en düşük seviyeye çekmek için kanatçık boyutları ve kanatçıkların aralarındaki mesafeyi optimize etmişlerdir. Bejan vd. (2016) karşıt akışlı bir ısı değiştirgecinde ısı ve akış dirençlerini en düşük seviyeye düşürmek için tasarımsal değişiklikler yapmıştır. Ayrıca ortaya çıkardıkları tasarımın laminar ve türbülanslı akış için geçerli olduğunu hesaplarında göstermişlerdir. Rodrigues vd. (2015) Yapısal Gelişim Teorisi'nden faydalanarak toprak kaynaklı bir ısı pompasında toprağa gömülmüş olan ısı değiştirgeci borularının yerleşimini optimize etmişlerdir. Toprak yüzey sıcaklığını zamana bağlı bir fonksiyon olarak tanımlamış ve deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların doğruluğunu da ortaya koymuşlardır. Mirzaei vd. (2017) ise borulu ısı değiştiricilerinde Yapısal Gelişim Teorisi'nden faydalanarak aynı üretim maliyeti için ısı değiştirgeci etkinliğinin artırılabilceğini göstermişlerdir.

## 5. Sonuç

Yapısal Gelişim Teorisi tabiattaki hareketin prensiplerini en kapsamlı şekilde sunan yaklaşımlardan birisidir. Tabiattaki akış sistemleri ile mühendislikteki sistemlerin ve süreçlerin aynı prensiplere dayandığını göstermektedir. Benzer yaklaşımlar hareketin olduğu her alanı, sosyal bilimlere de kapsayacak şekilde açıklama imkânı sunmaktadır.

Tabiatta akış her zaman mevcut şartlar içerisinde en az dirençli yol ile gerçekleşme eğilimindedir çünkü minimum direnç aynı zamanda hareket için harcanması gereken minimum enerji anlamına gelir. Bu durum ısı transferinde de geçerlidir. Çünkü ısı transferi de tıpkı diğer akış sistemlerinde olduğu gibi akış minimum dirence doğru olacak şekildedir. Aynı prensip araçlar için de geçerlidir. Araçlardaki tasarımların yapısı zamanla hareket esnasında minimum direnç oluşturacak şekilde değişmektedir. Aynı zaman diliminde ise araçlarda boyut büyüdükçe hareket için gerekli olan birim kütle başına güç azalmaktadır. Bu çalışmada bu olgu gemiler üzerinden gösterilmiştir. Gemilerde boyut (DWT) arttıkça taşınacak birim yük başına gerekli olan güç azalmaktadır. Hem gemi boyutu ile gereksinim olan güç ilişkisi hem de ısı transferi örneğiyle Yapısal Gelişim Teorisi'nin bu iki alandaki ilişkisi bu çalışmada gösterilmiştir.

## Referanslar

Almogbel, M., & Bejan, A. (1999). Conduction trees with spacings at the tips. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(20), 3739-3756. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00051-4)

Asadi, M., Sunden, B., & Xie, G. (2018). Constructal Optimization of Louver Fin Channels Subjected to Heat Transfer Rate Maximization and Pressure Loss Minimization. *Heat Transfer Engineering*, 39(5), 436-448. <https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1312881>

Bao, Y., Aggarwal, P., Robbins, N. E., Sturrock, C. J., Thompson, M. C., Tan, H. Q., Tham, C., Duan, L., Rodriguez, P. L., Vernoux, T., Mooney, S. J., Bennett, M. J., & Dinneny, J. R. (2014). Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9319-9324. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400966111>

Basak, T. (2011). The law of life: The bridge between physics and biology. *Physics of Life Reviews*, 8(3), 249-252. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2011.07.003>

Bejan, A. (1996). Street network theory of organization in nature. *Journal of Advanced Transportation*, 30(2), 85-107. <https://doi.org/10.1002/atr.5670300207>

Bejan, A. (1997). Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(4), 799-816. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00175-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00175-5)

Bejan, A. (2013). Technology Evolution, from the Constructal Law. İçinde *Advances in Heat Transfer* (C. 45, ss. 183-207). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407819-2.00003-7>

Bejan, A. (2015). Constructal Law: Optimization as Design Evolution. *Journal of Heat Transfer*, 137(6), 061003. <https://doi.org/10.1115/1.4029850>

Bejan, A. (2016a). Rolling stones and turbulent eddies: Why the bigger live longer and travel farther. *Scientific Reports*, 6, 21445. <https://doi.org/10.1038/srep21445>

Bejan, A. (2016b). *The Physics of Life: The Evolution of Everything*. St. Martin's Press.

Bejan, A. (2017). Evolution in thermodynamics. *Applied Physics Reviews*, 4(1), 011305. <https://doi.org/10.1063/1.4978611>

Bejan, A., Alalaimi, M., Lorente, S., Sabau, A. S., & Klett, J. W. (2016). Counterflow heat exchanger with core and plenums at both ends. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 622-629. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.117>

Bejan, A., & Errera, M. R. (2014). Technology evolution, from the constructal law: Heat transfer designs. *International Journal of Energy Research*, 39(7), 919-928. <https://doi.org/10.1002/er.3262>

Bejan, A., Ferber, L., & Lorente, S. (2020). Convergent Evolution of Boats with Sails. *Scientific Reports*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58940-5>

Bejan, A., Gunes, U., Charles, J. D., & Sahin, B. (2018). The fastest animals and vehicles are neither the biggest nor the fastest over lifetime. *Scientific Reports*, 8(1), 12925. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30303-1>

Bejan, A., Gunes, U., & Sahin, B. (2019). The evolution of air and maritime transport. *Applied Physics Reviews*, 6(2), 021319. <https://doi.org/10.1063/1.5099626>

- Bejan, A., & Lorente, S. (2006). Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering. *Journal of Applied Physics*, 100(4), 041301. <https://doi.org/10.1063/1.2221896>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2008). *Design with Constructal Theory*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bejan, A., & Lorente, S. (2010). The constructal law of design and evolution in nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1545), 1335-1347. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0302>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2011). The constructal law and the evolution of design in nature. *Physics of Life Reviews*, 8(3), 209-240. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2011.05.010>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2013). Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *Journal of Applied Physics*, 113(15), 151301. <https://doi.org/10.1063/1.4798429>
- Cetkin, E. (2014). Three-dimensional high-conductivity trees for volumetric cooling. *International Journal of Energy Research*, 38(12), 1571-1577. <https://doi.org/10.1002/er.3176>
- Cetkin, E., & Oliani, A. (2015). The natural emergence of asymmetric tree-shaped pathways for cooling of a non-uniformly heated domain. *Journal of Applied Physics*, 118(2), 024902. <https://doi.org/10.1063/1.4926620>
- Chen, L. (2012). Progress in study on constructal theory and its applications. *Science China Technological Sciences*, 55(3), 802-820. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4701-9>
- Demirkiran, İ. G., Rocha, L. A. O., & Cetkin, E. (2022). Emergence of asymmetric straight and branched fins in horizontally oriented latent heat thermal energy storage units. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 189, 122726. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122726>
- Feng, H., Chen, L., Zhang, F., & Ge, Y. (2022). Constructal design of a fan-shaped high thermal conductivity path in a square heat generation body. *Case Studies in Thermal Engineering*, 102565. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102565>
- Gungor, S., Cetkin, E., & Lorente, S. (2022). Canopy-to-canopy liquid cooling for the thermal management of lithium-ion batteries, a constructal approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121918. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121918>
- Güneş, Ü. (2019). *Hareketli Sistemlerin Performans ve Boyut İlişkisi: Yapısal Gelişim Teorisi* [Doktora Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Kakac, S. (2016). Evolution of the science of thermodynamics: The history. *Journal of Thermal Science & Technology*, 36(2), 1-6.
- MAN Diesel. (2008). *B&W-dieselmotorens historie 1898 – 2008*. MAN Diesel, DieselHouse.
- MAN-ES. (2019). *DieselHouse by MAN-ES*.
- Mirzaei, M., Hajabdollahi, H., & Fadakar, H. (2017). Multi-objective optimization of shell-and-tube heat exchanger by constructal theory. *Applied Thermal Engineering*, 125, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.137>
- NASA. (2022, Mart 10). *World of Change: Growing Deltas in Atchafalaya Bay*. World of Change: Growing Deltas in Atchafalaya Bay; NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/WaxLake>

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). 15.5 Nonlinear Models. İçinde *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.

Reis, A. H. (2006). Constructal theory: From engineering to physics, and how flow systems develop shape and structure. *Applied Mechanics Reviews*, 59(5), 269-282. <https://doi.org/10.1115/1.2204075>

Rodrigues, M. K., da Silva Brum, R., Vaz, J., Oliveira Rocha, L. A., Domingues dos Santos, E., & Isoldi, L. A. (2015). Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. *Renewable Energy*, 80, 538-551. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.041>

Scopus. (2022, Eylül 9). *Scopus—Constructal law search*. <https://www.scopus.com/>

Skyscanner. (2022a). Flights from New York to Raleigh/Durham. <https://www.skyscanner.net/routes/nyca/rdu/new-york-to-rayleigh--durham.html>

Skyscanner. (2022b). *Skyscannerskyscanner*. <https://www.skyscanner.net/routes/ista/nyca/istanbul-to-new-york.html>

Veritas, B. (2020). Bureau Veritas VeriSTAR. <https://www.veristar.com/portal/veristarinfo/generalinfo/registers/seaGoingShips>