

Kafes Yapıda Etkin Soğutmalı Fren Diskinin Eklemeli İmalat için Tasarımı ve Analizi

Abdülcelil BAYAR^{1,*} , Ümit AY TAR¹ , Abdullah DURAN² 

¹Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 17.10.2023

Kabul: 19.11.2023

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat

Kafes yapılar

Fren disk

Etkin soğutma

Fren mesafesi

ÖZET

Otomotiv, havacılık ve raylı sistemlerde şüphesiz en önemli parçalarından biri fren diskleridir. İlk olarak 1950'li yıllarda kullanılmaya başlanılan diskli fren sistemleri günümüz teknolojisine gelene kadar birçok gelişme gösterse de hala geliştirilmesi devam eden sistemlerdir. Sürtünmeli fren sistemlerinde ısı açığa çıkar. Bu sıcaklık belli bir düzeyin üzerine çıktığında sürtünme elemanı olan balataların özellikleri sebebi ile sürtünme katsayıları azalır. Uzun frenleme (ağır tonajlı araçlarda yokuş aşağı ya da spor araçlarında zorlu parkurlarda) taşıtın durma mesafesini arttırmakta, fren ve teker grubu ekipmanlarının kullanım ömürlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebepten hem sürüş emniyeti hem de taşıt güvenliği açısından fren soğutma yapısı önem arz etmektedir. Bu çalışmada, bir spor arabada kullanılmak üzere geleneksel imalat metotlarına göre tasarlanmış örnek bir fren diskinin soğutma performansının artırılması ve ağırlık olarak hafifletilmesi için kafes yapı modelleme yaklaşımı uygulanmıştır. Tüm tasarım yaklaşımları, eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu yenilikçi imkân ve kabiliyetler göz önünde bulundurularak ele alınmıştır. İterasyonlar sonucu elde edilen model eklemeli imalat metotlarından seçici lazer ergitme yöntemi ile imal edilecek şekilde ele alındığında kütlece %20 daha hafif, Von-mises gerilmeleri bakımından da %35 daha düşük gerilmeye sahip bir model ortaya çıkmıştır. Ele alınan standart ve kafes yapıda disklerle eşit ısı yüklemesinde standart disk yüzeyinde 440 °C sıcaklık bulunurken yapılan optimum tasarımda 213 °C sıcaklık belirlenmiştir.

Design and Analysis of Active Cooled Brake Disc in Lattice Structure for Additive Manufacturing

ARTICLE INFO

Received: 17.10.2023

Accepted: 19.11.2023

Keywords:

Additive manufacturing

Lattice structures

Brake disc

Effective cooling

Braking distance

ABSTRACT

One of the most important parts in automotive, aviation, and rail systems are brake discs. Disc brake systems, which were first introduced in the 1950s, have undergone much advancement to reach the current technology, but they are still systems that continue to be developed. In frictional braking systems, heat is generated. When this temperature exceeds a certain level, the friction coefficient decreases due to the properties of the frictional element, which is the brake pads. This situation increases the stopping distance of the vehicle in long braking situations (such as downhill for heavy-tonnage vehicles or challenging tracks for sports cars) and reduces the service life of the braking and wheel group equipment. Therefore, the cooling structure of the brakes is crucial for both driving safety and vehicle security. This study aims to reduce the heating of the brake disc during prolonged use in sports cars and heavy-tonnage vehicles, improve the brake performance, achieve shorter stopping distances, and ensure driving and vehicle safety. In this study, a cage structure modeling approach was applied to enhance the cooling performance and reduce the weight of a sample brake disc designed for use in a sports car compared to traditional manufacturing methods. All design approaches were considered in light of the innovative possibilities and capabilities offered by additive manufacturing technologies. As a result of iterations, a model was obtained that would be manufactured using the selective laser melting method, resulting in a 20% lighter mass and 35% lower Von-Mises stresses. For the standard and cage structure discs subjected to equal heat loading, the standard disc surface had a temperature of 440 °C, while the optimized design resulted in a temperature of 213 °C.

*Sorumlu yazar, e-posta: celilbayar@gmail.com

To cite this article: A. Bayar, Ü. Aytar, A. Duran, Kafes Yapıda Etkin Soğutmalı Fren Diskinin Eklemeli İmalat için Tasarımı ve Analizi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(32),120-128, 2023.

https://doi.org/10.52795/mateca.1376655, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv, havacılık ve raylı sistemlerdeki en önemli parçalardan biri de fren diskleridir. İlk olarak 1950’de kullanılmaya başlanılan disk frenlerindeki gelişmeler de teknolojik gelişmelere bağlı olarak günümüz kadar birçok gelişme göstermiştir. Sürtünmeli fren sistemlerinde frenleme esnasında ısı açığa çıkar. Bu durum sürtünme elemanı olan balataların özellikleri sebebi ile belli bir sıcaklıktan sonra sürtünme katsayısını azaltır. Bu da uzun frenlemeli yerlerde (ağır tonajlı araçlarda yokuş aşağı ya da spor araçlarında zorlu parkurlarda) taşıtın durma mesafesini artırmaktadır. Hatta fazla ısınmada balataların alev almasına neden olabilir ki; bu durum fren ve teker grubu ekipmanların kullanım ömrünün azaltmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı hem sürüş emniyeti hem de taşıt güvenliği için fren soğutma önem arz etmektedir.

Otomotiv fren sistemleri, araç tasarımı ve işletmesinde büyük önem taşır [1]. Bu, yeni araç geliştirmede önemli bir öncelik olarak kabul edilen güvenlik yönüyle ilgilidir. Otomotiv fren sisteminin temel parçalarından biri, dönen fren disk rotorudur. Bu parça, sabit fren pedi ile birlikte optimal fren performansına ulaşmada temel öneme sahiptir. Bir araçta fren disk rotoru, araç fren kapasitesini elde etmede büyük bir rol oynar. Frenleme sırasında, mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesi yoluyla bir retardar torku oluşur. Bu, frenleme sırasında meydana gelen göreceli kayma sonucu rotor-ped arayüzünde yapılan sürtünme çalışmasından kaynaklanır [2]. Son zamanlarda, hafif araçlarda fren rotorlarının önemli uygulamaları olmuş ve bu, hafif fren disk rotorları geliştirme ihtiyacını zorunlu hale getirmiştir [3,4]. Bir aracın gücü ve niteliği, fren sisteminin performansına dayanarak ölçülebilir. Uzun süre tekrarlayan frenleme ile birçok aracın fren bileşenleri önemli bir sıcaklık artışı yaşayabilir ve bu, araç fren performansının azalmasına neden olabilir. Yüksek sıcaklık, fren kaybına, fren sıvısı buharlaşmasına, rulman arızasına, erken aşınmaya, termal olarak uyarılmış titreşime ve termal çatlaklara neden olabilir [5]. Bu nedenle, bir fren sisteminin sıcaklık artışını tahmin etmek ve tasarımın erken aşamalarında verilen bir fren sisteminin termal performansını değerlendirmek son derece önemlidir.

Frenlerin etkin bir şekilde soğutulması için de çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Örneğin, fren disklerinin içine yerleştirilen kanallar, disklerin yüzeyine hava akışını artırarak frenlerin soğumasını hızlandırır. Ayrıca, bazı fren sistemleri, fren sıvısını soğutmak için özel bir soğutma sistemi kullanır. Bu sistemler, yüksek sıcaklıkta çalışan frenlerin aşınmasını azaltır ve fren performansını artırır [6].

Disk frenler üzerine geliştirmeler devam etmektedir. Özellikle otomobil sporlarında yüksek hızlar, kısa duruş mesafesi ve uzun turlardan dolayı diskler daha fazla ısınmakta ve soğumak için yeterli zamanı bulamamaktadır. Otomobil sporlarında diskler geliştirilmeye çalışılsa da geleneksel imalat yöntemlerinin limitlerinden yeterli soğutma sağlanamamaktadır. Eklemeli imalatta yapılan son gelişmeler ile eklemeli imalat tezgahlarındaki üretim boyutları, lazer güçleri ve proses kontrol entegrasyonu sayesinde güvenilir ve tekrarlanabilir kalitede ürünler elde edilmeye başlandı. Eklemeli imalatın sağladığı tasarım özgürlüğü sayesinde de özellikle ısı değiştiricilerde kullanılan yüzey alanı çok fazla ve karmaşık yapıda ürünlerin yanında yapısal parçaların kafes yapıda üretimi sayesinde konvansiyonel üretim metotları ile üretilebilen yapısal parçalara nazaran çok daha hafif olarak daha fazla yükler taşıyabilmektedir. Parçanın hafifletilmesi sayesinde otomobil sporlarında ayrıca araçta performans artışı sağlanacaktır. Eklemeli imalatın diğer bir avantaj ise üretim adetleri maliyeti dramatik olarak düşürmediğinden stok tutma ihtiyacı olmadan talebe göre üretim yapılabilmesidir. Otomobil sporlarında farklı ve özel otomobiller için en iyi performansı sağlayacak konfigürasyonlar oluşturularak üretimler yapılabilmektedir [7].

Literatürdeki fren diskleri üzerine yapılan araştırma çalışmaları genellikle termomekanik ve titreşimle ilgili konulara odaklanmaktadır. Belhocine ve Bouchetara, bir akışkan analizi olan ANSYS/CFX kullanarak katı bir fren rotorunun ve havalandırılmalı bir rotorun termal davranışını analiz etmiştir ve fren rotorlarının yüzeylerindeki ısı transfer katsayılarını çıkarmak için bunları sınırlayıcı koşul olarak rotora uygulamıştır. Bunun ardından geçici termal iletim simülasyonunda bu katsayıları kullanmıştır [8,9]. Kim [10], bir fren diskinin sıcaklık dağılımını ve termal

deformasyonunu tahmin etmek için sonlu eleman analizi gerçekleştirmiştir. Jung ve diğerleri [11,12], çeşitli frenleme koşulları ve disk ve pabuçların özelliklerini dikkate alarak havalandırmalı disklerin sıcaklık artışını ve termal deformasyonunu tahmin etmek için bir analiz tekniği önermiştir. Frenleme sırasında oluşan frenleme gücünün analitik süreci matematiksel olarak türetilmiştir. Thilak ve arkadaşları [13], sert frenleme koşulları altında bir fren rotorunda geçici termal ve yapısal analiz yapmıştır ve disk rotor tasarımına yardımcı olmak için performansını değerlendirmiştir. Güteryüz ve Karadeniz [14], çeşitli havalandırma açıklıklı fren rotorları üzerine bir dizi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve geçici termal analiz gerçekleştirmiştir. CFD analizleri, rotor-pabuç ve rotor-pabuç-tekerlek montajları için konvektif ısı transfer katsayılarını çıkarmak için yapılmıştır. Çıkarılan konvektif ısı transfer katsayıları daha sonra termal iletkenlik ve radyasyon etkileriyle birlikte sonlu eleman modellerine sınırlayıcı koşul olarak eklenmiş ve geçici termal analiz yapılmıştır. CFD sonuçlarının doğruluğunu sağlamak ve hesaplama maliyetini düşük tutmak için 14 farklı ağ oluşturularak bir ağ bağımsızlık çalışması da gerçekleştirilmiştir. Yeni entegre tasarımın temel model üzerinde ortalama konvektif ısı transfer katsayılarında, soğuma süresinde ve maksimum tekerlek rulmanı sıcaklığında önemli iyileştirmeler gözlemlendiği belirtilmiştir. Son bir çalışmada, Zhang ve diğerleri [15], mega-watt ölçekli rüzgar türbini frenleri için fren diskleri ve pabuçlarının termal ve yapısal etkileşimlerini frenleme sürecinde incelemiştir.

Yapısal optimizasyon, fren disklerinin analizi ve tasarımının doğal bir uzantısıdır. Literatürde, geometrik karmaşıklıkları nedeniyle fren disklerinin yapısal optimizasyonu genellikle ticari yazılımları içerir ve tekrarlanan analizleri gerektirir. Bu analizler genellikle ya sonlu eleman yöntemini kullanarak statik, dinamik veya model problemleri çözmekte ya da CFD problemlerini çözmek için sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır. Galindo-Lopez ve Tirovic [16], demiryolu araçlarına monte edilen fren disklerinin konvektif ısı transferini maksimize etmeyi amaçlamışlardır ve çeşitli fren disk tasarımları için konvektif soğutmadaki etkinliği ölçmek için ortalama konvektif ısı transfer katsayısı ile disk ıslak alanın çarpımı olan özgül güç dağılımını önermişlerdir. Yazarlar, disk modellerinin performansını değerlendirmek için akışkan dinamik yazılımı ANSYS CFX'i benimsemişlerdir ve mevcut diskle karşılaştırıldığında konvektif soğutma gücünde %10'dan fazla artış sağlayan yeni bir disk tasarımı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Roy ve Bharatish [17], havalandırmalı bir fren diskinin beş geometrik parametresini kullanarak modelin maksimum toplam deformasyonunu ve eşdeğer stresini minimize etmek için ANSYS yazılımını ve yanıt yüzeyi metodolojisini kullanmışlardır ve yaklaşık %10'luk bir deformasyon ve stres azalması elde ettiklerini belirtmişlerdir. Topouris ve Tirovic [18], dökme demir bir fren diskinin parmak yapılarındaki maksimum ana gerilmeleri minimize etmek için şekil optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir ve ardından disk kütlesini azaltmak için topoloji optimizasyonu yapmışlardır. Sonlu eleman analizi ve optimizasyon paketleri olan Abaqus ve OptiStruct kullanmışlardır. Başka bir yakın zamandaki çalışmada, bir fren rotorunun sürtünme yüzeyindeki deliklerin ve yarıkların şekli ve deseni, rotor modelindeki maksimum stresi ve sıcaklığı minimize etmek için optimize edilmiştir [19].

Bu çalışma, fren sistemlerinin güvenliği, performansı ve dayanıklılığı açısından kritik olan fren diskine odaklanarak, otomotiv endüstrisindeki teknolojik gelişmelerin ve özellikle eklemeli imalatın ürüne entegre edilebilmesi için önemli bir örnektir. Bu gelişmeler, sürücü güvenliği ve taşıt performansı açısından önemli bir ilerleme sağlamaktadır.

2. EKLEMELİ İMALAT İÇİN TASARIM (DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING)

Tasarım sürecinin ilk adımı, kullanıcıların ihtiyaçlarını ve taleplerini belirlemektir. Bu, frenin kullanım amacı, aracın türü, hızı, ağırlığı, vb. faktörleri içerir. İhtiyaçların belirlenmesinden sonra, tasarımcılar genellikle bir dizi farklı konsept tasarımı oluştururlar. Bu konseptler, bir araya getirilerek en iyi performansı sağlayacak olanı seçmek için değerlendirilir [20].

Konsept tasarımından sonra, seçilen konsept detaylı tasarıma dönüştürülür. Bu aşamada, disk frenin boyutları, malzemeleri, bileşenleri ve diğer detaylar belirlenir. Detaylı tasarımdan sonra, bir

prototip üretilir ve test edilir. Test sonuçlarına göre tasarım revize edilebilir. Prototip başarıyla test edildikten sonra, seri üretim için üretim süreci başlar.

Disk fren tasarımı, birçok mühendislik disiplini içeren karmaşık bir süreçtir. Tasarımın doğru yapılması, fren sisteminin güvenliği ve performansı açısından önemlidir [21].

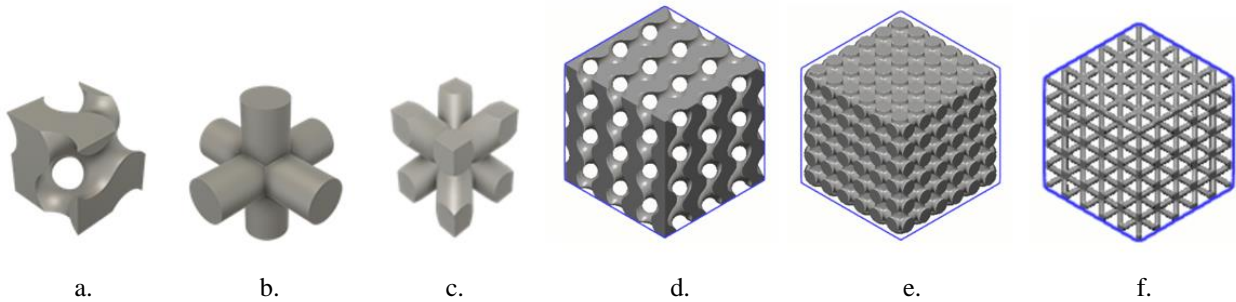
Disk frenler, bir rotor (disk) ve sabit bir kaliperden oluşur. Rotor, dönen tekerlek üzerinde monte edilirken, kaliper tekerleğin üst kısmında yer alır ve frenleme işlemini gerçekleştirir. Disk fren tasarımı, rotorun çapı, kaliperin boyutu ve malzemesi, fren balatasının malzemesi ve diğer faktörlerin belirlenmesi gibi unsurları içerir.

316L çelik, krom ve nikel içeriği sayesinde yüksek düzeyde korozyon direncine sahiptir. Bu özellik, fren disklerinin su, tuzlu su, nem ve diğer aşındırıcı ortamlarda kullanılabilmesini sağlar. 316L çelik, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır. Bu, fren disklerinin aşırı ısınma durumunda bile şeklini korumasını sağlar ve performansını etkilemez [22]. 316L çeliğin mükemmel mekanik özellikleri vardır. Yüksek tokluk, mukavemet ve sertlik sağlar. Bu, fren disklerinin yüksek sıcaklıkta bile dayanıklı olmasını ve yoğun kullanımda deformasyon riskini azaltır. 316L çelik, paslanmaz bir malzemedir ve fren disklerinin paslanma veya korozyona uğramasını engeller. Bu özellik, fren disklerinin uzun ömürlü olmasını sağlar [23, 24].

Tablo 1. 316L Çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of 316L Steel)

	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	N
Minimum	Denge	16.00	10.00	2.00	-	-	-	-	-	-
Maksimum		18.00	14.00	3.00	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	-

Fren diski çekirdek kısmı tasarımı için kafes yapı kullanılarak etkin soğutma avantajları hedeflenerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Etkin soğutma sağlama amacı ile Cross, Gyroid ve Xcell olarak üç farklı kafes yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Diskin çekirdek kısmı kafes yapı ile tasarlanırken eklemeli imalat ile yapılacak üretim kısıtının 1 mm olmasından dolayı her bir kafes yanın kiriş kalınlığı 1 mm olarak seçilmiştir. Kafes yapı tipleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kafes yapı tipleri a) Gyroid kafes hücresi b) Cross kafes hücresi c) Xcell kafes hücresi a) Gyroid kafes birimi b) Cross kafes birimi c) Xcell kafes birimi

Kafes yapıli çekirdek tamamlandıktan sonra frenleme bölgesi ile birleştirilmesi ile oluşturulan nihai tasarım Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Tasarım renderi (Design rendering)

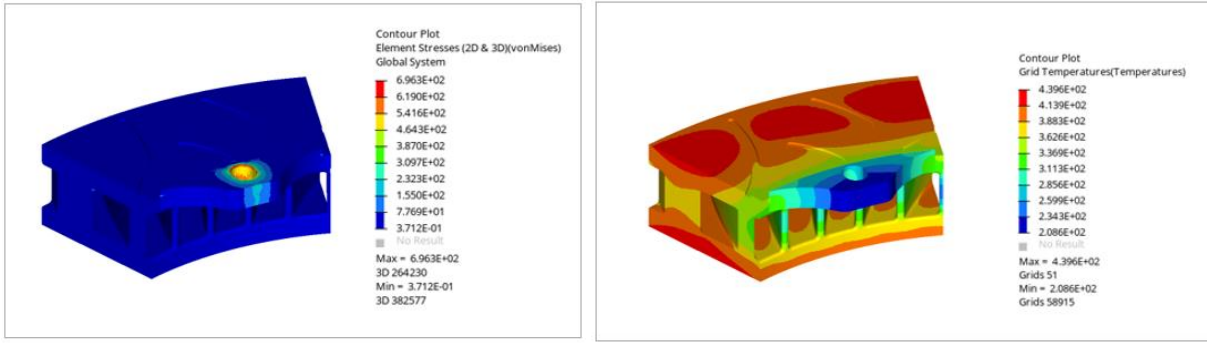
3. TERMAL VE STRES ANALİZLERİ (THERMAL AND STRESS ANALYSIS)

Yapılan konvansiyonel tasarım ile üç farklı kafes yapıdaki tasarım analiz koşturularak karşılaştırma yapılmıştır. Model analizleri için Hypermesh ve Optistruct yazılımları kullanılmıştır. Analiz girdileri ve eleman değerleri tüm tasarımlar için aynı olup değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

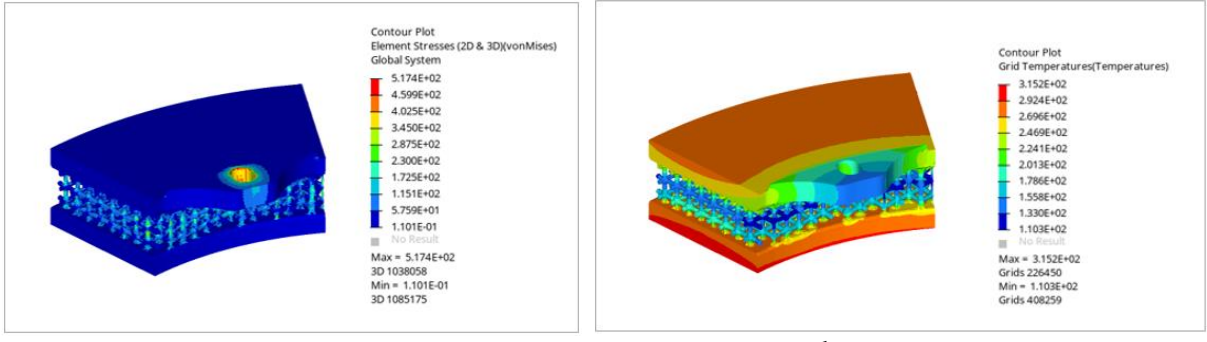
Tablo 2. Analiz girdileri (Analysis inputs)

Kararlı Hal Isı Aktarımı		Malzeme Özellikleri	
<i>İletim</i>	0.4 W/mm ²	<i>Elastiklik Modülü</i>	115000 MPa
<i>Konveksiyon</i>	Tüm serbest yüzeylerde serbest konveksiyon	<i>Poisson Oranı</i>	0.26
<i>Eleman Tipi</i>	1st Order Tetrahedral Element	<i>Termal Genleşme Katsayısı</i>	0.000009
<i>Eleman Sayısı</i>	2282538	<i>Termal İletkenlik</i>	0.071 W/mm*K
<i>Node Sayısı</i>	454595	<i>Serbest Konveksiyon Isı İletim Katsayısı</i>	0.0005
<i>Yük Tipi</i>	Heat Flux		

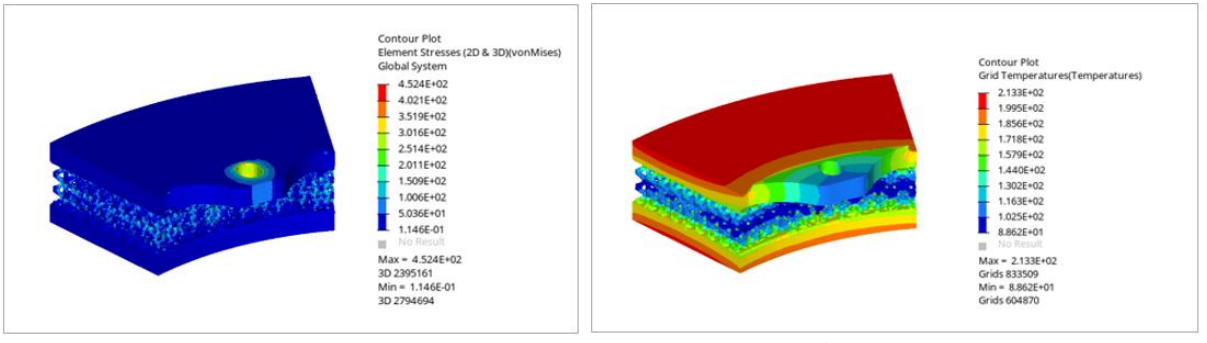
Tüm tasarımların gerilme ve ısıl analizleri tamamlanarak Tablo 3’te eşit ısı yüklemesi sonucu oluşan maksimum sıcaklık ve Von-Mises gerilme değerleri karşılaştırılmıştır.



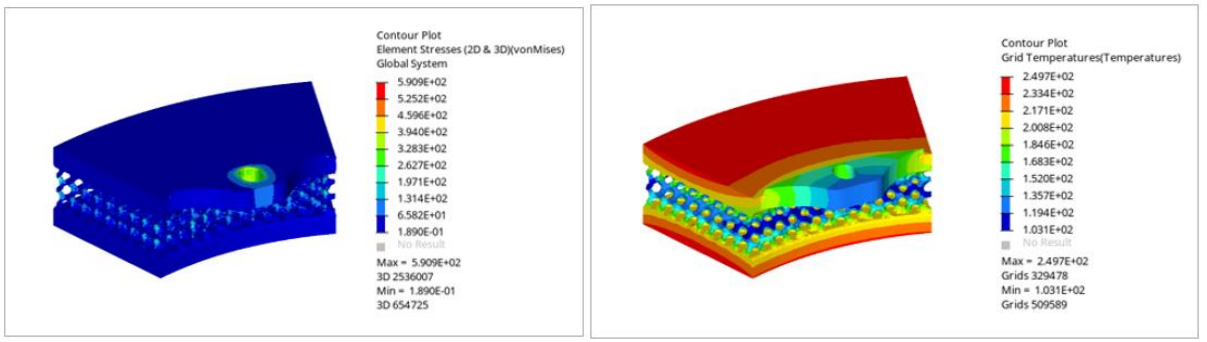
Şekil 3.Geleneksel üretime uygun tasarımın a) ısıl yükler altındaki stres durumu, b) ısıl analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the design suitable for conventional production)



Şekil 4.Cross kafes yapıli disk tasarımının a) ısıl yükler altındaki stres durumu, b) ısıl analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the cross lattice structured disc design)



Şekil 5.Xcell kafes yapıli disk tasarımının a) ısıl yükler altındaki stres durumu b) ısıl analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the Xcell lattice structured disc design)



Şekil 6.Gyroid kafes yapıli disk tasarımının a) ısıl yükler altındaki stres durumu b) ısıl analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the gyroid lattice structured disc design)

Tablo 3. Maksimum sıcaklık ve gerilme değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of maximum temperature and stress values)

	Standart	Cross	Xcell	Gyroid
Maksimum Sıcaklık (°C)	439	315	213	249
Von-Mises Gerilmesi (MPa)	696	517	452	590

Standart tasarımdaki fren diskinde eşit ısı yüklemesinde 439 °C ve 696 MPa gerilme ile en yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Gyroid ve Cross yapıdaki kafes yapı tasarımları standart tasarımdan daha iyi sonuçlar verirken Xcell kafes yapısındaki tasarıma göre daha kötü sonuçlar vermiştir. Tüm tasarımların gerilme ve ısı analizi değerlendirildiğinde en iyi sonuç Xcell kafes yapılı tasarım olarak değerlendirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Yapılan çalışma sonucunda eklemeli imalat için tasarlanan disk ile geleneksel döküm yöntemiyle üretilen diskler arasında çeşitli avantajlar elde edilmiştir. Detaylandırılmış sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Eklemeli imalat yöntemi için tasarlanan disk, geleneksel döküm yöntemiyle üretilen disklerden kütlece %20 daha hafif olarak tasarlanmıştır. Bu hafiflik, özellikle hareketli sistemlerde, uçak ve otomobil parçalarında, makinelerde ve diğer ağırlık odaklı uygulamalarda enerji verimliliği açısından büyük bir avantaj sağlayacaktır.
- Standart disk yüzeyinde 440 °C sıcaklık, eklemeli imalata uygun tasarım yapılan Gyroid, Cross, Xcell kafes yapıdaki diskin yüzeyindeki bu değer sırası ile 249 °C, 315 °C ve 213 °C olarak hesaplanmıştır. Daha düşük sıcaklık, disk malzemesinin mekanik özelliklerini korumasına ve termal yorgunluğun azaltılmasına yardımcı olacaktır.
- Standart diskte ısı yüklemeyen kaynaklı 696 MPa gerilme hesaplanmıştır. Eklemeli imalata uygun tasarım yapılan Gyroid, Cross, Xcell kafes yapıdaki diskte bu değer sırası ile 590 MPa, 517 MPa, ve 452 MPa olarak hesaplanmıştır. Von-Mises gerilmeleri, malzemenin dayanma sınırının ne kadar yakınında olduğunu gösteren bir parametredir. Düşük gerilmeler, disk malzemesinin daha uzun ömürlü olmasını ve yorulma süreçlerinin etkilerini azaltmasını sağlayacaktır.
- Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak kompleks şekillerin veya kişiselleştirilmiş parçaların üretiminde büyük bir avantajdır. Ayrıca tasarım değişikliklerini daha kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir, bu da üretim sürecinde esneklik sağlayacaktır.
- Eklemeli imalat prosesi, özel takımların kullanımını gerektirmez ve kalıp veya döküm kalıpları gibi maliyetli araçlara ihtiyaç duymaz. Bu, farklı boyut ve şekillerde disklerin seri üretiminin yapılabilmesini ve küçük ölçekte üretimin ekonomik olmasını sağlar. Aynı zamanda, yeni bir tasarımın üretimine geçmek için ek maliyetleri azaltır ve üretim sürecini hızlandıracaktır.
- Eklemeli imalat yöntemleri, döküm gibi diğer geleneksel yöntemlere göre üretim sürelerini önemli ölçüde kısaltacaktır. Tek adımda katman katman üretim yapıldığı için ara aşamalara gerek yoktur. Bu, hızlı prototipleme ve seri üretimde zaman tasarrufu sağlar. Daha kısa üretim süreleri, talebe göre üretimi ve acil durumlar için hızlı tepki verebilme yeteneğini arttıracaktır.
- Eklemeli imalat yöntemleri, kafes yapılarının üretilmesine olanak tanır. Kafes yapı tasarımı, malzemenin kullanımını optimize ederek daha hafif ve güçlü disklerin üretilmesini sağlar. Aynı zamanda bu yapı, daha etkin bir soğutma sağlar. Disklerin fren esnasında ısınmasını önlemek için etkin bir ısı dağılımı gereklidir. Kafes yapı, diskin soğutma yüzeyini artırarak daha iyi bir ısı dağılımı sağlar, böylece fren mesafesini kısaltabilir ve disklerin kullanım ömrünü uzatacaktır.

Bu sonuçlar, eklemeli imalatın geleneksel döküm yöntemine göre bir dizi avantaj sunduğunu göstermektedir. Daha hafif, daha düşük sıcaklık ve düşük gerilmelere sahip olan eklemeli imalat diskleri, endüstride daha verimli ve dayanıklı parçaların üretilmesine olanak tanır. Ancak bu sonuçlar, her uygulama için geçerli olmayabilir ve tasarım aşamasında dikkatli bir analiz ve optimizasyon gerektirebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J.Y. Wong, Theory of ground vehicles, John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
2. Y. Li, D.S. Crombez, Automotive braking system, Sunderland: World Journal of Modelling and Simulation, 31-32, 2015.
3. G.W. Smolen, G. Martino, Lightweight brake rotor with a thin, heat resistant ceramic coating, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 65-67, 1993.
4. A.A. Adebisi, M.A. Maleque, M.M. Rahman, Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 4: 471–480, 2011.
5. T. Valvano, K. Lee, An analytical method to predict thermal distortion of a brake rotor, New York: SAE Technical, 566-571, 2000.
6. F. Bagnoli, F. Dolce, M. Bernabei, Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs, Engineering Failure Analysis, 16(1): 152-163, 2009.
7. T. Wohler, Additive manufacturing and 3D printing-state of the industry annual worldwide progress report, Wohler's Associates, Fort Collins, 27-28, 2013.
8. A. Belhocine, M. Bouchetara, Thermomechanical behaviour of dry contacts in disc brake rotor with a grey cast iron composition, Transactions of the Indian Institute of Metals, 65: 231–238, 2012.
9. A. Belhocine, M. Bouchetara, Thermo-mechanical coupled analysis of automotive brake disc, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 14: 1591–1600, 2013.
10. S.M. Kim, A study on thermal analysis in ventilated brake by FEM, J. Korean Soc. Mach. Tool Eng., 18: 544–549, 2009.
11. S.P. Jung, T.W. Park, J.B. Chai, W.S. Chung, Thermo-mechanical finite element analysis of hot judder phenomenon of a ventilated disc brake system, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12:821–828, 2011.
12. S.P. Jung, Y.G. Kim, T.W. Park, A Study on thermal characteristic analysis and shape optimization of a ventilated disc, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13, 57–63, 2012.
13. V.M.M. Thilak, R. Krishnaraj, M. Sakthivel, K. Kanthavel, M.G. Deepan Marudachalam, R. Palani, Transient thermal and structural analysis of the rotor disc of disc brake, International Journal of Scientific and Engineering Research, 2(8): 1-4, 2011.
14. I.C. Güteryüz, Z.H. Karadeniz, Transient thermal analyses of an integrated brake rotor and wheel hub for heavy duty vehicles, Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Auto Eng., 236(5):971-986, 2022.
15. S. Zhang, J. Yin, Y. Liu, N. Liu, Z. Sha, Y. Wang, B. Rolfe, Thermal–structural coupling analysis of brake friction pair based on the displacement gradient circulation method, Advances in Mechanical Engineering, 10, 1–13, 2018.
16. C.H. Galindo-Lopez, M. Tirovic, Maximising heat dissipation from ventilated wheel-hub-mounted railway brake discs, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, 227, 269–285, 2013.
17. I. Roy, A. Bharatish, Optimization of ventilated brake disc rotor geometry for enhanced structural characteristics, Journal of Measurements in Engineering, 8(3): 98–106, 2020.
18. S. Topouris, M. Tirovic, Design synthesis and structural optimization of a lightweight, monobloc cast iron brake disc with fingered hub, Engineering Optimization, 51, 1710–1726, 2019.
19. S. Park, K. Lee, S. Kim, J. Kim, Brake-disc holes and slit shape design to improve heat dissipation performance and structural stability, Appl. Sci., 12, 1171, 2022.
20. S.R. Abhang, D.P. Bhaskar, Design and analysis of disc brake, International Journal of Engineering Trends and Technology, 8(4): 165-167, 2014.
21. F. Bagnoli, F. Dolce, M. Bernabei, Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs, Engineering Failure Analysis, 16(1): 152-163, 2009.
22. A.E. Sisson, Thermal analysis of vented brake rotors, Society of Automobile Engineers Transactions, 87: 1685-1694, 1978.

23. M.D. Hudson, R.L. Ruhl, Ventilated brake rotor air flow investigation, Society of Automobile Engineers Transactions, 106, 1862-1871, 1997.
24. C.B. Saiz, T. Ingrassia, V. Nigrelli, V. Ricotta, Thermal stress analysis of different full and ventilated disc brakes, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 9(34): 608–621, 2015.