
Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Yüzey Geometrilili Gofret Kalıp Sistemlerinin Termal ve Mekanik Yükler Altında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Anıl KORKMAZ^{1*} 

¹ Tüfekçioğulları Mak. Gıda İml. San. ve Tic. Ltd. Şti. Ar-Ge Merkezi, Karaman, Türkiye
anilkorkmaz1508@gmail.com

Received/Geliş Tarihi: 29.09.2025

Accepted/Kabul Tarihi: 17.11.2025

Özet: Bu çalışmada gıda endüstrisinde kullanılan gofret kalıp sistemlerinde üç farklı yüzey geometri konfigürasyonunun termal ve mekanik yükler altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bütünsel olarak incelemiştir. Analizler, SolidWorks Simulation platformu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan kalıp tasarım konfigürasyonları: (1) boyuna kanal desenli kalıp, (2) lamalı boyuna kanal desenli kalıp ve (3) merkezi dairesel delikli boyuna kanal desenli kalıptır. Bu konfigürasyonlar, genel olarak maksimum von Mises gerilmesi ve maksimum toplam yer değiştirme kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Bu kriterlere göre, lamalı boyuna kanal desenli kalıp özellikle en az maksimum yer değiştirmeye sahip olduğu ve kabul edilebilir emniyet faktörü değerinde yer aldığı için en iyi tasarım olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; takip edilen bu kalıp değerlendirme yaklaşımı, mevcut döküm kalıp teknolojisinin gıda sektöründeki problemlerin çözümüne yönelik geliştirilebilmesi, üretim verimliliğinin artırılabilmesi ve kalıp ömrünün uzatılabilmesine doğrudan katkı sağlayarak endüstriyel rekabet ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Gıda, Gofret kalıbı, Sonlu elemanlar analizi, Termal ve mekanik yük, Yüzey geometrisi

Analysis of Wafer Mold Systems with Different Surface Geometries Under Thermal and Mechanical Loads Using the Finite Element Method

Abstract: In this study, three different surface geometry configurations in wafer mold systems used in the food industry were comprehensively analyzed using the finite element method under thermal and mechanical loads. The analyses were performed using the SolidWorks Simulation platform. The mold design configurations used here are: (1) mold with longitudinal channel pattern, (2) mold with laminated longitudinal channel pattern, and (3) mold with central circular hole longitudinal channel pattern. These configurations were evaluated based on the maximum von Mises stress and maximum total displacement criteria. According to these criteria, the laminated longitudinal channel patterned mold was evaluated as the best design, particularly because it had the least maximum displacement and was within an acceptable safety factor value. In conclusion, this mold evaluation approach directly contributes to the development of existing casting mold technology for solving problems in the food industry, increasing production efficiency, and extending mold life, thereby supporting industrial competitiveness and sustainability goals.

Keywords: Food, Wafer baking plate, Finite element analysis, Thermal and mechanical load, Surface geometry.

1. Giriş

Metal işleme teknolojilerinin tarihsel gelişimi, Bronz Çağı'ndan günümüze uzanan bir süreci kapsamaktadır. Bronz Çağı'nda kullanılan döküm teknolojileri, döküm kalıplarının incelenmesi ve görselleştirilmesi yoluyla yeniden yapılandırılabilen ve bu dönemin metal işleme yetenekleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Garbacz-Klempka vd., 2017). Bu tarihsel temelden günümüze geline süreçte, modern imalat endüstrisinde farklı teknolojiler gelişmiştir. Özellikle, eklemeli imalat, metal işleme teknolojilerinin evriminde yeni bir dönem başlatmış ve günümüz imalat endüstrisinde giderek daha fazla uygulama alanı bulmaktadır (Armstrong vd., 2022). Ancak, geleneksel yöntemlerden biri olan basınçlı döküm sürecinde, döküm kalitesini belirleyen üretim parametrelerinin

analizi ve optimizasyonu kritik öneme sahiptir; döküm kalıpları ve proses parametreleri, nihai ürünün kalitesini, boyutsal hassasiyetini ve rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir (Ružbarský ve Gašpár, 2023). Bu gelişmiş metal işleme teknolojilerinin endüstriyel uygulamalarına bakıldığında, günümüzde otomotiv endüstrisinde, hafif ve yüksek mukavemetli kompozit malzemeler gövde panellerinden iç komponentlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır (Khan vd., 2025).

Basınçlı döküm kalitesini etkileyen üretim parametreleri arasında kalıp sıcaklığı, döküm hızı ve uygulanan basınç gibi faktörler kritik öneme sahiptir ve bu parametrelerin optimizasyonu, döküm kalitesinin ve rekabet gücünün artırılmasında belirleyici rol oynamaktadır (Ružbarský ve Gašpár, 2023). Bu proses parametrelerinin önemi, yalnızca basınçlı döküm ile sınırlı kalmayıp, diğer döküm proseslerinde de benzer şekilde gözlemlenmektedir. Örneğin, yüksek hızlı sürekli kütük dökümünde kalıp yapısı ve soğutma parametrelerinin ısı transferi üzerindeki etkisi, döküm prosesinin kontrolü ve optimizasyonu açısından belirleyici rol oynamaktadır (Wang vd., 2023). Bu genel ilkeler ışığında, kalıp tasarımının geometrik özellikleri de üretim performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle orta ve büyük ölçekli döküm parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılan 41 mm kalınlığındaki üst kalıp sistemlerinde, yüzey geometrisinin optimizasyonu, üretim verimliliği ve ürün kalitesi açısından kritik bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Döküm kalıplarının tasarımında, yapısal gereksinimler ve üretim kısıtlamaları arasındaki dengenin sağlanması, imalat edilebilirlik açısından kritik öneme sahiptir (Zhang vd., 2022). Bu bağlamda, basınçlı döküm kalıplarının optimizasyonunda termal performans ve mekanik dayanıklılık gereksinimleri arasında denge sağlanması gerekmektedir; topoloji optimizasyonu ve sayısal simülasyonlar bu dengeli tasarımın gerçekleştirilmesinde kritik rol oynamaktadır (Djabraian vd., 2024). Bu tasarım optimizasyonlarının nihai amacı, kusursuz döküm parçalarının üretilmesidir. Ancak, üretim sürecinde karşılaşılan en yaygın kalite sorunlarından biri gözeneklilik kusurlarıdır. Döküm parçalarında görülen gözeneklilik kusurları, hidrojen gibi gazların ergiyikte çözünmesi ve katılaşma sırasında çıkması sonucu oluşmaktadır; bu kusurların modellenmesi ve önlenmesi döküm kalitesinin artırılmasında temel rol oynamaktadır (Jolly ve Katgerman, 2022). Tüm bu karmaşık gereksinimler ve kalite hedefleri göz önüne alındığında, mühendisleri farklı yüzey geometri konfigürasyonları geliştirmeye yönlendirmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yüzey geometri konfigürasyonlarından biri olan boyuna kanal deseni, dikey doğrultuda eşit aralıklı oluklardan oluşan bir yapıya sahiptir. Mikro-yapılı yüzeylerin üretim yöntemleri arasında oluk desenleri, geleneksel imalat teknikleriyle kolayca üretilebilmeleri ve düşük maliyetleri nedeniyle öne çıkmaktadır (Ma vd., 2023). Bu oluk desenlerinin endüstriyel bir uygulaması, kalıplama proseslerinde kullanılan soğutma kanallarında görülmektedir. Geleneksel imalat süreçlerinde soğutma kanalları düz hatlar boyunca işlenmekte, ancak bu yöntem kalıp boşluğu boyunca güvenilir soğutma sağlayamamaktadır (Shinde ve Ashtankar, 2017). Bu sınırlamaya rağmen, konvansiyonel soğutma kanalları delme ile üretilen düz yollar şeklindedir ve basit geometrilere sahip kalıplanmış parçalar için tatmin edici soğutma performansı ve çevrim süreleri sunmaktadır; bu yöntemin kolay uygulanabilir ve maliyet etkin olması, enjeksiyon kalıplama endüstrisinde yaygın kullanımının devam etmesine katkıda bulunmaktadır (Feng vd., 2021). Bu konvansiyonel yaklaşımda, tipik olarak 8 mm derinlik, 12 mm genişlik ve 15 mm kanallar arası mesafe ile tasarlanan bu geometri, ısı transferi ve mekanik dayanım arasında denge kurmayı hedeflemektedir.

Modern kalıp teknolojilerinde görülen bir diğer yaklaşım, düz delikli kanallarla konformal soğutma kanallarının birleştirildiği hibrit tasarımlardır; bu hibrit kalıplar lokal olarak karmaşık parçalar için uygundur (Feng vd., 2021). Bu tür ileri kalıp tasarımlarında olduğu gibi, diğer mühendislik uygulamalarında da malzeme seçimi ve yapısal optimizasyon kritik öneme sahiptir. Örneğin,

otomotiv uygulamalarında yüksek mukavemetli çeliklerin yüksek elastisite modülü ve mukavemet özellikleri, yapısal bileşenlerde hafiflik ve performans arasında denge sağlayarak ağırlık azaltımına katkıda bulunmaktadır (Zhang ve Xu, 2022). Ancak, malzeme seçimi ve optimizasyonunun ötesinde, farklı malzemelerin bir arada kullanıldığı sistemlerde termal uyumluluk göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı termal genleşme katsayılarına sahip fazlardan oluşan kompozit sistemlerde, sıcaklık değişimi sırasında oluşan gerilmeler malzeme hasarına yol açabilmektedir; ara yüzey bölgesinde çatlak başlangıcı ve yayılması, bu termal uyumsuzluğun doğrudan sonucudur (Zago vd., 2024).

Döküm kalıplarında, ergiyeğin çekirdekler etrafındaki akışı kritik öneme sahiptir; merkezi yollama sisteminde, ergiyik jetinin çekirdeklere çarpmadan yönlendirilmesi, soğuk kaynak ve büzülme kusurlarının oluşumunu önlemektedir. Giriş ağzı yüksekliği, ergiyik akış hızını ve kalıp boşluğu dolum karakteristiğini doğrudan etkileyerek, döküm parçasının mekanik özelliklerini ve iç homojenliğini belirleyen anahtar bir parametredir; simülasyon çalışmalarında 0.82 mm giriş ağzı yüksekliğinin, türbülanslı ve dispersif akış kombinasyonu oluşturarak en düşük kalıcı deformasyon değerlerini sağladığı tespit edilmiştir (Gašpár vd., 2021).

Kalıp sistemlerinin termal davranışı, döküm parçasının kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Özellikle 3D baskı ile üretilen kum kalıplarda, ısı kapasitesi, termal iletkenlik ve termal difüzivite gibi termofiziksel özellikler geleneksel kalıplara göre farklılık göstermekte; silika, seraboncuk ve kromit gibi farklı agrega malzemelerinin termal özellikleri, döküm ve katılaşma sırasındaki ısı akışını doğrudan etkileyerek kritik gerilmeli parçaların kalitesini belirlemektedir (Kleinhans vd., 2025). Bu termal özellikler, kalıptan döküm parçasına gerçekleşen ısı transferini kontrol ederek soğuma hızını düzenlemektedir. Döküm sırasında, eritilmiş metalden kalıba doğru gerçekleşen ısı transferi, soğuma hızını ve dolayısıyla döküm parçasının mikro yapısını belirler; bu bağlamda, farklı termal iletkenliğe sahip malzemelerden oluşturulan kademeli soğutma özellikli kalıplar, dökümün farklı noktalarında değişken soğuma hızları uygulayarak mikro yapının aktif kontrolünü sağlamakta, bu yaklaşım mikro-döküm parçalarının fiziksel özelliklerinin konumsal olarak tasarlanabilmesine olanak tanımaktadır (Dohda vd., 2024). Soğuma hızının mikro yapı üzerindeki etkisi açısından, hızlı soğuma ince taneli yapı oluşumuna ve yüksek mekanik özelliklere yol açarken, yavaş soğuma daha kaba taneli yapı ve düşük mekanik özellikler ile sonuçlanabilir. Örneğin, kum kalıp dökümünde yavaş soğuma hızı (1.65 K/s) ile elde edilen Al-Cu alaşımında tane boyutu onlarca ila yüzlerce mikron arasında değişirken, su soğutmalı bakır kalıp kullanımında artan soğuma hızı (5.7 K/s) ile mikro yapıda belirgin bir incelmeye ve dendritik kol aralığında (SDAS) önemli azalma gözlenmektedir (Rahman vd., 2025). Ancak, soğuma hızının düzgün kontrol edilememesi ciddi kalite sorunlarına yol açabilir. Döküm parçasının farklı bölgelerinde meydana gelen düzensiz soğuma, döküm içinde farklı sıcaklıklara neden olarak termal gerilmeler oluşturmakta; bu artık gerilmelerin olumsuz sonuçları arasında şekil bozulmaları, boyutsal değişiklikler, süreklilik arızaları gibi döküm kusurları yer almaktadır (Futas vd., 2024). Bu nedenle, basınçlı döküm kalıplarında termal performansın optimizasyonu hem üretim hızı hem de ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkiye sahip olması nedeniyle yüksek kaliteli döküm parçaları üretmek için kritik öneme sahiptir. Bu optimizasyon sürecinde, topoloji optimizasyonu ile tasarlanan soğutma yapıları geleneksel soğutma kanallarına kıyasla üstün termal performans göstermekte; özellikle Ayrık ve Gaussian sınır koşulları altında dökümde sıcaklık gradyanlarını minimize ederek konformal soğutma sağlamakta ve büzülme porozitesi gibi döküm kusurlarını azaltmaktadır (Djabraian vd., 2024).

Mekanik performans açısından değerlendirildiğinde, Al-Mg-Si alaşımından üretilen döküm parçalarının özellikleri, kalıp malzemesi türü ve soğuma hızı gibi döküm parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Çelik kalıp ve grafit kalıplar kullanılarak Al_2O_3 ve SiC partikülleri ile güçlendirilmiş Al-Mg-Si alaşımının basma mukavemeti, Vickers sertliği ve aşınma direncinde önemli farklılıklar gözlemlenmekte; örneğin, %8 ağırlık oranında Al_2O_3 ilavesi ile çelik kalıpta dökülen numunelerde maksimum basma mukavemeti 623.53 MPa'ya ulaşırken, %8 SiC ilavesi ile grafit

kalıpta dökülen numunelerde Vickers sertliği %29 artışla 66 kg/mm² değerine yükselmektedir (Abdellah vd., 2023). Kalıp malzemesi seçiminin yanı sıra, döküm sürecinde kalıp-metal etkileşimleri de kritik öneme sahiptir. Kum kalıplarda döküm sırasında çeşitli mekanizmalar kusur oluşumuna yol açmaktadır. Bunlar arasında eritilmiş metalin metalostatic basıncı ve dinamik basıncı kalıp yüzeyinde metal penetrasyonuna ve kalıp göçmesine neden olabilmekte; silika kumunun termal genişmesi kalıplarda ve özlerde gerilmeler oluşturarak çatlama ve sonrasında sıvı metal ile etkileşime yol açabilmekte; ayrıca grafit genişmesi ile birleşen bu basınçlar şişme kusuru oluşumunda etkili olmaktadır (Sertucha ve Lacaze, 2022). Döküm süreç parametrelerinin optimizasyonu açısından, özellikle yüksek basınçlı döküm uygulamalarında termal kontrol önem kazanmaktadır. Yüksek basınçlı döküm (HPDC) süreçlerinde, öz kalıbın sıcaklığı döküm parçanın iç kalitesi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Al-Si-Cu alaşımı kullanılarak üretilen döküm parçalarda, öz sıcaklığının porozite dağılımı ve mikroyapı üzerindeki etkisi iki farklı geometrik varyant için incelenmiştir (Matejka vd., 2024). Bu bağlamda, yüksek basınçlı döküm kalıplarında termal yük ve sıcaklık gradyanları kalıp ömrünü belirleyen birincil faktörler olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak, bu termal gerilmeler, mekanik yüklerle birleştiğinde, kalıp sisteminde kritik gerilme durumları oluşturabilmektedir.

Son yıllarda, bilgisayar destekli mühendislik (CAE) teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte, enjeksiyon kalıplama süreçlerini analiz etmek ve optimize etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Teorik algoritmalar ile sonlu eleman simülasyonu (CAE) yöntemlerinin birleştirilmesi, karmaşık enjeksiyon kalıplama süreçlerinin optimizasyonuna olanak sağlamaktadır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) gibi gelişmiş teknolojilerin entegrasyonu, akıllı üretim için temel oluşturmuştur (Zhao ve Tang, 2025).

Bu teknolojik gelişmelerin yanı sıra, sonlu eleman prosedürlerine dayalı sayısal formülasyon farklı mühendislik alanlarında da yaygın olarak uygulanmaktadır. Özellikle, yangına maruz düzlemsel çelik yapıların doğrusal olmayan termo-mekanik analizlerinde uygulanmak üzere sonlu eleman prosedürlerine dayalı sayısal formülasyon geliştirilmiştir. Yapısal elemanların mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında bozularak mukavemet ve rijitlikte önemli azalmalara yol açmaktadır. Bu koşullarda yapılar, doğrusal olmayan modellerle ilişkili karmaşık davranışlar sergileyerek ileri düzey matematiksel analiz gerektirmektedir. Bu amaçla, geometrik ve malzeme doğrusalsızlığının etkilerini ve kesit üzerinde etkileyen termal gradyanları dikkate alarak yangına maruz çelik yapıların davranışını incelemek için NASEN adlı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir (Neves vd., 2022).

Benzer şekilde, tasarım optimizasyonu alanında da entegre yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemi, Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) ve Deney Tasarımı (DoE) tekniğinin CAD/CAE/DfC entegrasyonu ile birleştirilmesiyle geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın amacı, tasarım özellikleri ile ürün yanıtı arasındaki ilişkileri ampirik olarak belirlemektir. Yöntem, üç farklı analiz seviyesini entegre etmektedir: optimizasyon problemi tanımı, sanal prototipleme ve tasarım optimizasyonu. Entegre yazılımlar SolidWorks gibi mevcut olmasına rağmen, tasarımcılar ürün modellemesi için CAD araçlarını ve spesifik analizler için ticari CAE ve DfC araçlarını kullanma eğilimindedir. Parametreleştirilmiş CAD modelleriyle çalışabilen optimizasyon modülleri ile CAE yazılım araçları yaygın olarak kullanılmaktadır (Castorani vd., 2017).

Literatürde kalıp yüzey geometrilerinin analizine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte, bu çalışmaların çoğu tek bir geometrik konfigürasyona odaklanmakta veya sadece termal ya da mekanik analizlerle sınırlı kalmaktadır. Farklı konfigürasyonların aynı yükleme koşulları altında sistematik olarak karşılaştırıldığı hem termal hem de mekanik performansların birlikte değerlendirildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca, geometrik süreksizliklerin gerilme konsantrasyon faktörleri

üzerindeki etkisinin sayısal olarak belirlenmesi ve farklı malzemelerin kullanımında oluşan ara yüzey problemlerinin analizi konularında literatürde önemli boşluklar bulunmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, gıda endüstrisinde kullanılan kalıp sistemlerinde farklı yüzey geometri konfigürasyonlarının termal ve mekanik performanslarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak bütünsel olarak incelemek ve karşılaştırmaktır. Analiz edilen 41 mm kalınlığındaki üst kalıp parçasının üç geometrik konfigürasyonu; (1) boyuna kanal desenli, (2) lama takviyeli boyuna kanal desenli ve (3) merkezi dairesel delikli boyuna kanal desenli tasarımları kapsamaktadır. Her bir konfigürasyon için maksimum von Mises gerilmeleri, toplam yer değiştirmeler ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Analizler, SolidWorks simulation platformu kullanılarak, 165°C uygulama sıcaklığı, 9.81 m/s² yerçekimi ivmesi ve döküm prosesine özgü basınç yüklemeleri altında gerçekleştirilmiştir.

Bu araştırmanın literatüre ve mevcut gıda sektörüne sunduğu en önemli katkı, farklı yüzey geometri konfigürasyonlarının mekanik ve termal performanslarını aynı koşullar altında karşılaştırmalı olarak değerlendirmesidir. Bu yaklaşım, mevcut döküm kalıp teknolojisinin gıda sektöründeki problemlerin çözümüne yönelik geliştirilebilmesi, üretim verimliliğinin artırılabilmesi ve kalıp ömrünün uzatılabilmesine doğrudan katkı sağlayarak, endüstriyel rekabet ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir.

Makalenin 2. Bölümünde çalışmada kullanılan kalıp sisteminin malzemeleri ve yöntem hakkında bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde sonlu elemanlar analizi sonuçları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları tartışılmış ve gelecek çalışmalara yön verecek öneriler sunulmuştur.

2. Malzeme ve Yöntem

Geleneksel gofret fırınlarında kullanılan kalıp sistemi; üst ve alt kalıp, kalıbı sabitleyen üst ve alt iskelet ile diğer bağlantı ve montaj elemanlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada, hesaplama etkinliği ve verimliliği açısından sadece üst iskelet ve kalıptan oluşan bir kalıp sistemi esas alınmıştır.

2.1. Analiz Edilen Kalıp Yüzey Geometri Konfigürasyonları

Endüstriyel döküm proseslerinde kullanılan 41 mm kalınlığındaki kalıpların dış yüzeylerinin üç farklı yüzey geometri konfigürasyonu ve bunların görsel temsilleri Tablo 1’de detaylı olarak sunulmuştur. Bu şekilde yer alan yüzey desen tipleri, endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan tasarım varyasyonlarını temsil etmekte olup, her birinin kendine özgü fonksiyonel özellikleri ve uygulama alanları bulunmaktadır. Bu konfigürasyonların çoğunluğu, gıda sektöründe ulusal ve uluslararası firmaların pratikte kullandığı yaygın konfigürasyonlardır.

Birinci konfigürasyon boyuna kanal deseni, dikey doğrultuda eşit aralıklı oluklardan oluşan bir yüzey geometrisine sahiptir. Bu tasarımda, 41 mm kalınlığındaki kalıp yüzeyinde boyuna doğrultuda uzanan paralel kanallar bulunmaktadır. Kanal derinliği 8 mm, kanal genişliği 12 mm ve kanallar arası mesafe 15 mm olarak tasarlanmıştır. Bu geometrik parametreler, ısı transferi ve mekanik dayanım dengesini sağlamak için literatürdeki çalışmalar ve endüstriyel deneyimler doğrultusunda belirlenmiştir. Görsel incelendiğinde, kanalların düzenli ve simetrik bir desen oluşturduğu, kırmızı renkli montaj noktalarının kalıp köşelerinde ve orta bölgelerde konumlandırıldığı görülmektedir.

Bu konfigürasyonun temel avantajı, üretim kolaylığı ve düşük maliyetidir. Kanalların tek yönde uzaması, kalıp işleme sürecini basitleştirmekte ve üretim toleransının kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, boyuna kanallar döküm sırasında oluşan gazların tahliyesi için doğal kaçış yolları oluşturmaktadır.

Tablo 1. Üst Kalıp – Yüzey Desen Tipleri ve Uygulamaları

Kalıp Dış Yüzey Desen Tanımı	Kalıp Dış Yüzey Geometrisi
(1) Boyuna Kanal Deseni	
(2) Boyuna Kanal Deseni – Lamalı	
(3) Boyuna Kanal Deseni – Merkezi Dairesel Delikli	

İkinci konfigürasyon, boyuna kanal deseninin üzerine gri renkli çelik lamaların entegre edilmesiyle modifiye edilmiş bir yüzey geometrisine sahiptir. Bu tasarımda, standart boyuna kanal desenine ek olarak, kalıp yüzeyine dik olarak yerleştirilen ve görsel olarak belirgin şekilde gösterilen çelik lamalar bulunmaktadır. Lamalar, kanal aralarına yerleştirilerek hem yapısal takviye sağlamakta hem de montaj ve yönlendirme işlevlerini yerine getirmektedir.

Lamalı tasarımın temel amacı, kanal geometrisinin neden olduğu rijitlik kaybını telafi etmek ve kalıbın yük taşıma kapasitesini artırmaktır. Çelik lamaların yüksek elastisite modülü (210 GPa), dökme demir kalıp malzemesine (113 GPa) kıyasla önemli bir rijitlik artışı sağlamaktadır. Ancak, farklı malzemelerin termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk, ara yüzeylerde ek gerilmeler oluşturabilmektedir.

Üçüncü konfigürasyonda, boyuna kanal deseninin merkezine Ø150 mm çapında ve 7 mm derinliğinde bir dairesel delik işlemi uygulanmıştır. Bu özel tasarım, merkezi montaj elemanlarının geçişi veya döküm sırasında özel geçirgenlik gerektiren uygulamalar için geliştirilmiştir. Dairesel delik, kalıp merkezinde simetrik olarak konumlandırılmış ve kenarları 10 mm kavisli yuvarlatmalarla işlenmiştir.

Merkezî dairesel delikli tasarımın en kritik özelliği, büyük açıklığın neden olduğu gerilme konsantrasyonlarının yönetilmesidir. Dairesel geometri, köşeli açıklıklara kıyasla daha düşük gerilme faktörü sağlamakla birlikte, 150 mm'lik çap kalıp kesit alanında önemli bir azalmaya neden olmaktadır.

2.2. Malzeme Özellikleri ve Karakterizasyonu

Tüm konfigürasyonlarda ana kalıp malzemesi olarak GG 26 dökme demir kullanılmıştır. Ayrıca iskelet malzemesi olarak GGG 45 dökme demir kullanılmıştır. Bu iki malzemenin detaylı mekanik ve termal özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. GG 26 ve GGG 45 Malzemelerinin Mekanik Özellikleri (URL-1, (2025), URL-2, (2025))

Malzeme Özelliği	Sembol	Birim	Değer	
			GG 26	GGG 45
Akma Mukavemeti	σ_y	MPa	250	310
Çekme Mukavemeti	σ_u	MPa	400	450
Elastite Modülü	E	GPa	113	170
Poisson Oranı	ν	-	0.26	0.29
Yoğunluk	ρ	g/cm ³	7.25	7.25
Kayma Modülü	G	GPa	65	67
Termal Genleşme Katsayısı	α	10 ⁻⁶ /K	11.5	11.5
Termal İletkenlik	k	W/m.K	48	34
Özgül Isı Kapasitesi	c	J/kg.K	460	490

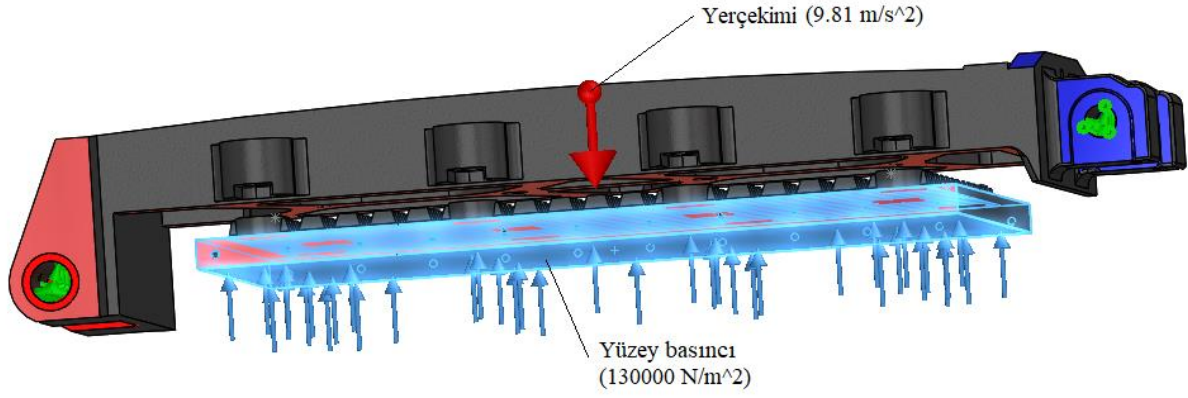
2.3. Sonlu Elemanlar Analiz Parametreleri

Sonlu elemanlar modelinin doğruluğu ve hesaplama verimliliği açısından mesh kalitesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, SolidWorks Simulation platformunun gelişmiş mesh algoritmaları kullanılarak her bir konfigürasyon için optimize edilmiş mesh yapıları oluşturulmuştur.

Boyuna kanal desenli kalıp modelinde toplam 92,856 düğüm noktası ve 423,674 tetrahedral eleman kullanılmıştır. Maksimum eleman boyutu 65.2 mm, minimum eleman boyutu ise 3.26 mm olarak belirlenmiştir.

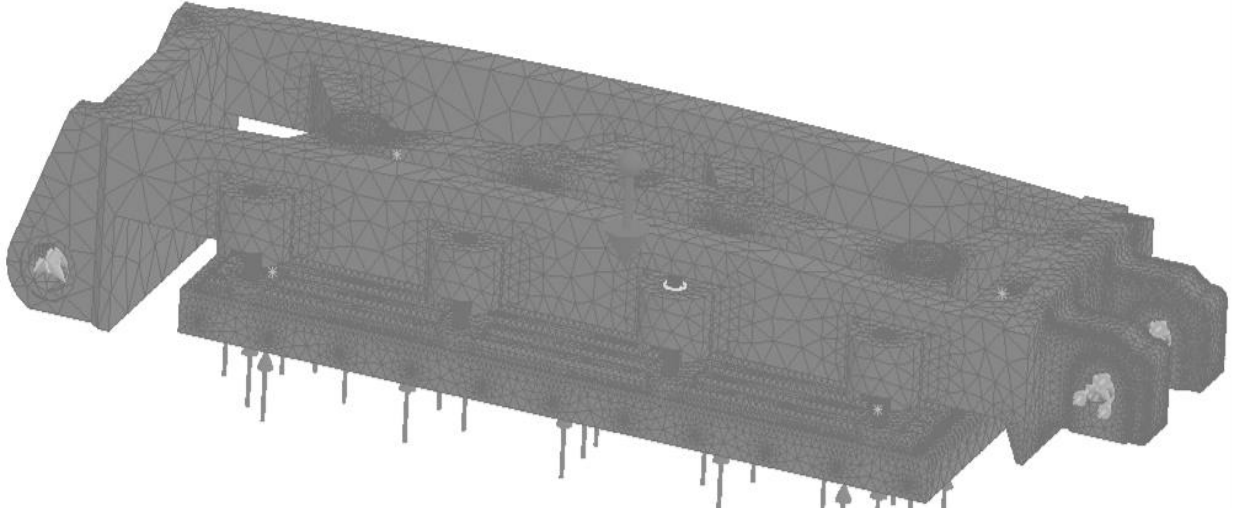
Kalıp sistemlerinin maruz kaldığı termal yükler, uygulama koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, gofret kalıplarında pişme sürecinde sıcaklık dağılımı tipik olarak 120°C ile 185°C arasında değişmektedir. Bu çalışmada, gofret fırını uygulamalarına göre kalıp sisteminin dış ve iç yüzey sıcaklıkları 180°C ile 130°C arasında değişen uniform sıcaklar varsayılarak kararlı hal şartlarında termal ve statik analizler uygulanmıştır. Referans ortam sıcaklığı 25°C (298 K) olarak alınmış, böylece 155°C'lik efektif sıcaklık farkı oluşturulmuştur.

Gofret kalıpları arasındaki hamurun pişme esnasında buhar gelişimi, kalıp içerisinde basıncın 2 kg/cm² (yaklaşık 2 bar) seviyesine kadar yükselmesine neden olmaktadır. Statik yapısal analiz işleminde, termal yüklere ek olarak bu kalıp sistemine yerçekimi ve kalıp iç yüzeyine yayılan 130,000 N/m² (1.3 bar)'lık bir basınç uygulanmıştır. Bu statik yükleme koşulları Şekil 1'de gösterilmiştir.

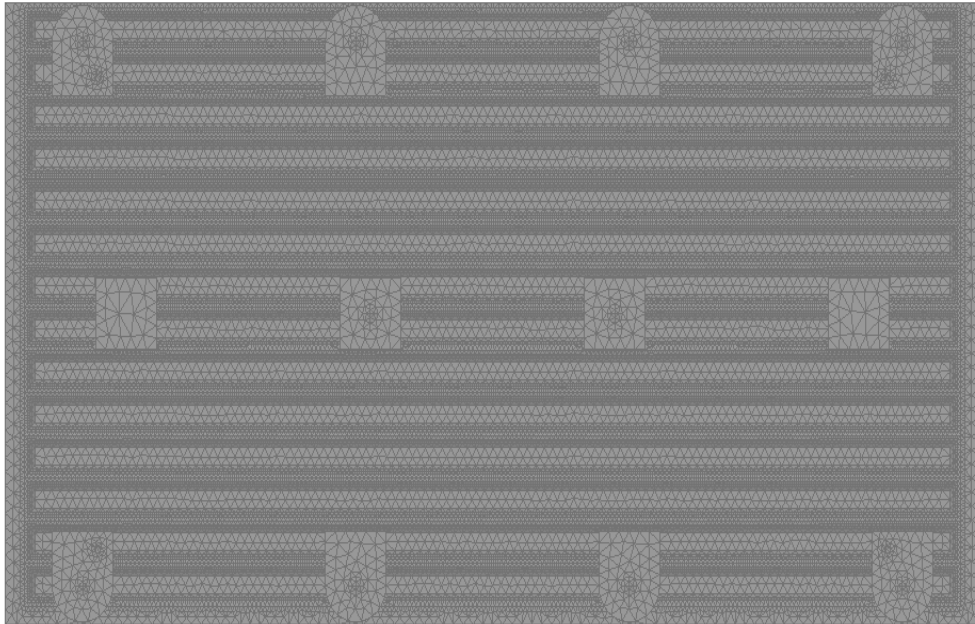


Şekil 1. Kalıp sistemi üzerindeki yerçekimi ve yüzey basıncından oluşan statik yükleme koşulları

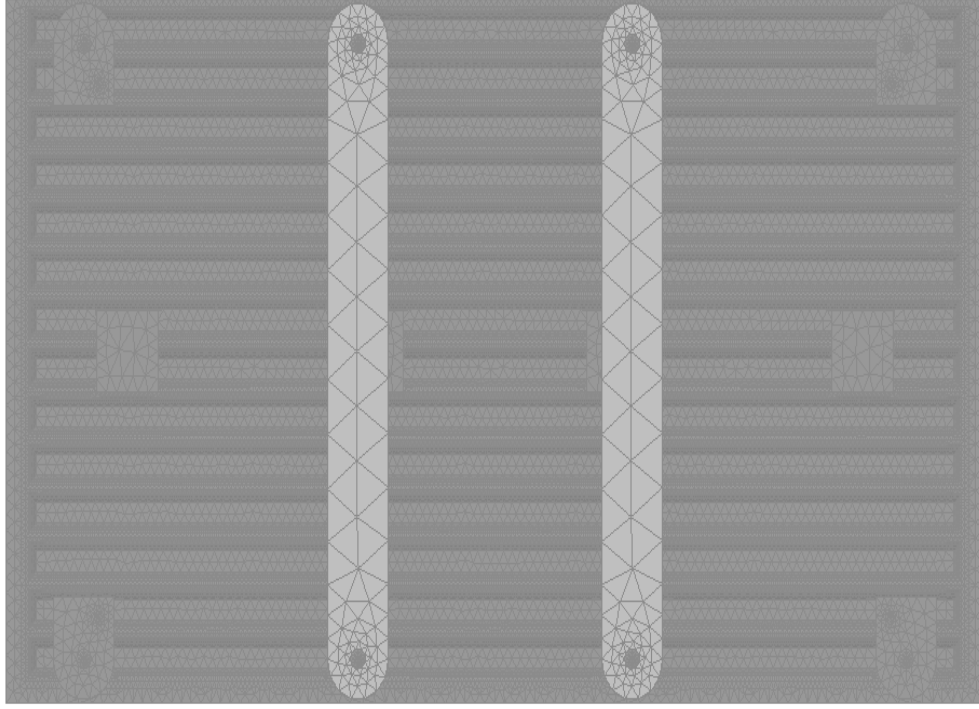
Kalıp sisteminin ve üç farklı kalıp konfigürasyonunun mesh modelleri sırasıyla Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’te verilmiştir.



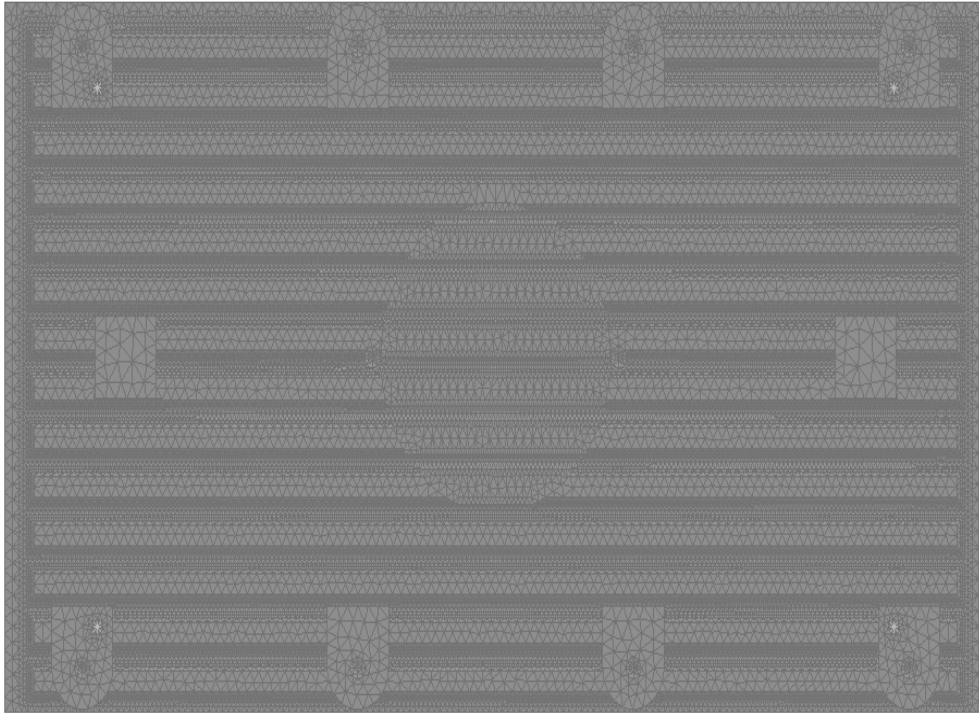
Şekil 2. Kalıp sisteminin mesh modeli



Şekil 3. Boyuna kanal desenli kalıbın mesh modeli



Şekil 4. Boyuna kanal desenli-lamalı kalıbın mesh modeli



Şekil 5. Boyuna kanal deseni – merkezi dairesel delikli kalıbın mesh modeli

3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

3.1. Sonlu Elemanlar Analiz Parametreleri

Üç farklı yüzey geometri konfigürasyonunun maksimum von Mises gerilme dağılımları ve konsantrasyon bölgeleri, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur. Bu tabloda görüldüğü üzere, her bir konfigürasyonun gerilme

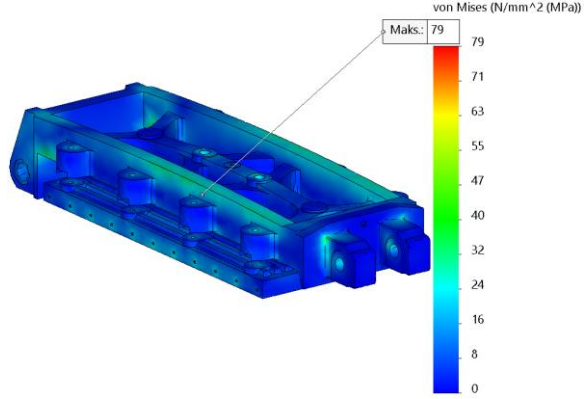
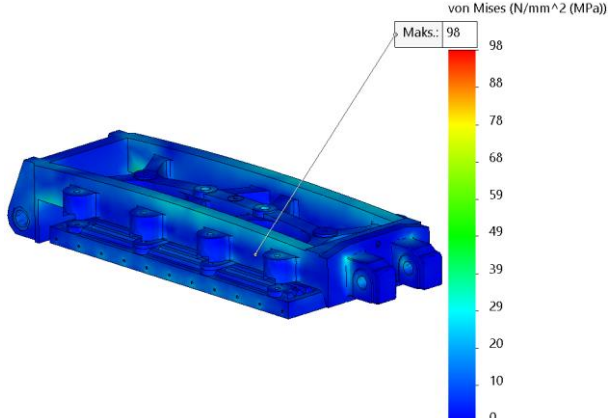
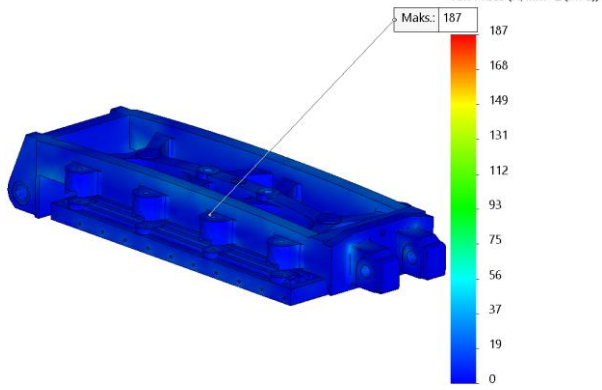
dağılım haritaları, kritik bölgelerin lokalizasyonunu ve gerilme konsantrasyon faktörlerinin büyüklüğünü net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Birinci konfigürasyonda yapılan gerilme analizleri, maksimum von Mises gerilmesinin 79 MPa değerinde olduğunu göstermiştir. Bu değer, düğüm noktası 24,891'de tespit edilmiş olup, minimum gerilme değeri ise düğüm noktası 312'de 0 MPa olarak belirlenmiştir. Maksimum gerilme değerinin GG 26 malzemesinin 250 MPa akma mukavemetinin sadece %28'ine karşılık gelmesi, tasarımın yüksek emniyet faktörüne ($SF = 3.16$) sahip olduğunu göstermektedir. Gerilme dağılım haritası incelendiğinde, gerilmelerin kanal tabanlarında yoğunlaştığı ancak kritik seviyelere ulaşmadığı görülmektedir. Kanal duvarlarında ölçülen ortalama gerilme değeri 35-45 MPa aralığında olup, bu değerler malzemenin elastik bölge sınırları içinde güvenli bir çalışma rejimini işaret etmektedir. Özellikle kanal köşelerinde beklenen gerilme konsantrasyonları, radyuslu geçişler sayesinde azaltılmıştır.

İkinci konfigürasyonda, maksimum von Mises gerilmesi 98 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer, lama-kalıp ara yüzeyine yakın bir bölgede tespit edilmiştir. Çelik lamaların eklenmesine rağmen beklenen gerilme azalması sağlanamamış, aksine malzeme uyumsuzluğundan kaynaklanan ek gerilmeler oluşmuştur. ST37 çelik lamaların elastisite modülünün GG 26 kalıp malzemesinden %86 daha yüksek olması, yük altında farklı yer değiştirme karakteristikleri sergilemelerine neden olmaktadır. Bu durum, ara yüzeyde kayma gerilmeleri oluşturmakta ve potansiyel ayrılma riski oluşturmaktadır. Lama kenarlarında ölçülen lokal gerilme değerleri 85-95 MPa aralığında değişmekte olup, bu değerler malzemenin elastik sınırları içinde kalmasına rağmen, ara yüzeylerde gerilme konsantrasyonları oluşturmaktadır. 98 MPa maksimum değeri, GG 26 malzemesinin 250 MPa akma mukavemetinin %39.2'sine karşılık gelmekte ve 2.55 emniyet faktörü sağlamaktadır. Bu durum, lamalı tasarımın güvenli çalışma sınırları içinde olduğunu ancak standart tasarıma (70 MPa) kıyasla %40 daha yüksek gerilme seviyeleri sergilediğini göstermektedir.

Üçüncü konfigürasyonda, maksimum von Mises gerilmesi 187 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, dairesel deliğin kenarında, özellikle boyuna kanalların delik kenarıyla kesiştiği bölgelerde tespit edilmiştir. 187 MPa'lık maksimum gerilme, GG 26 malzemesinin 250 MPa akma mukavemetinin %74.8'ine karşılık gelmekte ve 1.34 emniyet faktörü sağlamaktadır. Dairesel geometrinin teorik olarak daha düşük gerilme konsantrasyonu sağlaması beklenirken, 150 mm'lik büyük çap ve kanal kesişimleri kombinasyonu yüksek gerilme seviyeleri oluşturmıştır. Dairesel delik çevresindeki gerilme dağılımı incelendiğinde, kanal kesişim noktalarında gerilmelerin 160-187 MPa aralığında, diğer konumlarında ise 120-150 MPa aralığında olduğu görülmüştür. Bu asimetrik dağılım, kanal geometrilerinin dairesel delikle etkileşiminin karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Tüm bu değerler malzemenin elastik sınırları içinde kalmakla birlikte, standart tasarıma (70 MPa) kıyasla %167 daha yüksek gerilme seviyeleri oluştuğunu ve tasarım optimizasyonu gerektirdiğini göstermektedir.

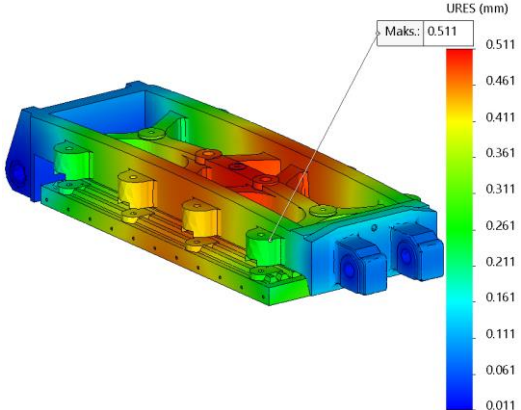
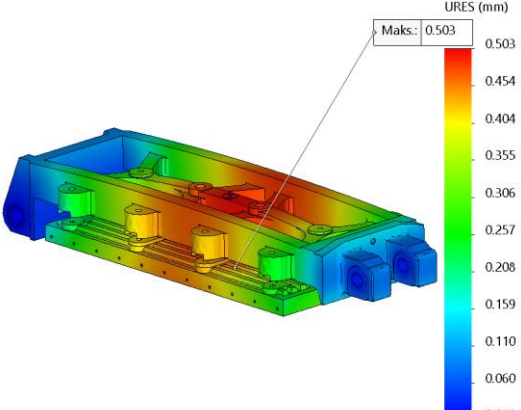
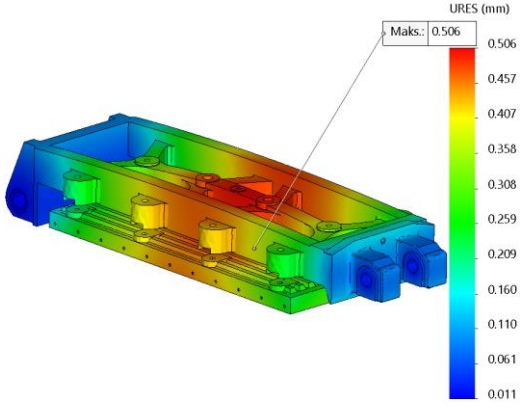
Tablo 3. Farklı yüzey geometri konfigürasyonlarına sahip döküm kalıplarının von Mises gerilme dağılımlarının sonlu elemanlar analizi sonuçları

Konfigürasyon	Maksimum Gerilmesi (MPa)
(1)	
(2)	
(3)	

3.2. Maksimum Yer değiştirme Karakteristikleri

Dört farklı yüzey geometri konfigürasyonunun yer değiştirme davranışları ve maksimum yer değiştirme karakteristikleri, sonlu elemanlar analizi ile detaylı olarak incelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Bu tablo, her bir konfigürasyonun yükler altındaki boyutsal kararlılığını ve rijitlik özelliklerini genel olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Farklı yüzey geometri konfigürasyonlarının maksimum yer değiştirme karakteristikleri ve toplam yer değiştirme dağılımları

Konfigürasyon	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
(1)	
(2)	
(3)	

Birinci konfigürasyonda, boyuna kanal desenli kalıp konfigürasyonunda maksimum toplam yer değiştirme 0.511 mm olarak ölçülmüştür. Bu değer, kalıbın serbest kenarına yakın bir bölgede tespit edilmiştir. Minimum yer değiştirme değeri ise ankastre sınır koşullarına yakın düğüm noktasında 0.011 mm olarak belirlenmiştir. Yer değiştirme dağılımı incelendiğinde, yer değiştirmelerin kalıp yüzeyi boyunca gradyanlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Kanal tabanlarında ölçülen lokal yer değiştirme değerleri 0.15-0.22 mm aralığında olup, kanal duvarlarında 0.33-0.40 mm değerlerine ulaşmaktadır. Bu yer değiştirme, kanalların kalıp rijitliği üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ve yapısal bütünlüğün korunduğunu göstermektedir. 0.511 mm'lik maksimum yer değiştirme değeri, tipik döküm toleransları olan ± 1.0 mm sınırının oldukça altında kalmaktadır. Bu durum, kalıbın yükler altında boyutsal kararlılığını koruyabildiğini ve döküm parça kalitesini olumsuz etkilemeyeceğini doğrulamaktadır.

İkinci konfigürasyonda, maksimum yer değiştirme 0.503 mm olarak hesaplanmıştır. Çelik lamaların eklenmesi, yer değiştirme kontrolünde iyileşme sağlamıştır. Maksimum yer değiştirme, lama-kalıp ara yüzeyinden uzak bir bölgede tespit edilmiştir. Yer değiştirme dağılımı analizi, lamaların rijitlik artışı sağladığını ve yer değiştirme davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Lama bölgelerinde yer değiştirme 0.15-0.25 mm seviyelerinde kalırken, lamalar arası bölgelerde 0.35-0.45 mm değerlerine ulaşmaktadır. Bu dağılım, lamaların yapısal takviye sağladığını ancak optimize edilebilir olduğunu işaret etmektedir. Lama-kalıp ara yüzeylerinde ölçülen yer değiştirmeler, maksimum 0.08 mm seviyesinde olup, bu değer kabul edilebilir sınırlar içindedir.

Üçüncü konfigürasyonda, maksimum yer değiştirme 0.506 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer, dairesel deliğin karşı kenarında tespit edilmiştir. 150 mm çapındaki merkezi açıklık, kalıp kesit alanında %18.3 oranında azalmaya neden olmasına rağmen, yer değiştirme kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Dairesel delik çevresinde radyal yer değiştirme gözlenmiş, delik kenarından uzaklaştıkça yer değiştirme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Delik kenarında 0.45-0.50 mm, 50 mm uzaklıkta 0.30-0.35 mm, 100 mm uzaklıkta ise 0.15-0.20 mm yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Bu dağılım, merkezi açıklığın etkisinin lokal olduğunu ve toplam yer değiştirme üzerinde kontrol edilebilir bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3.3. Termal Analiz Sonuçları

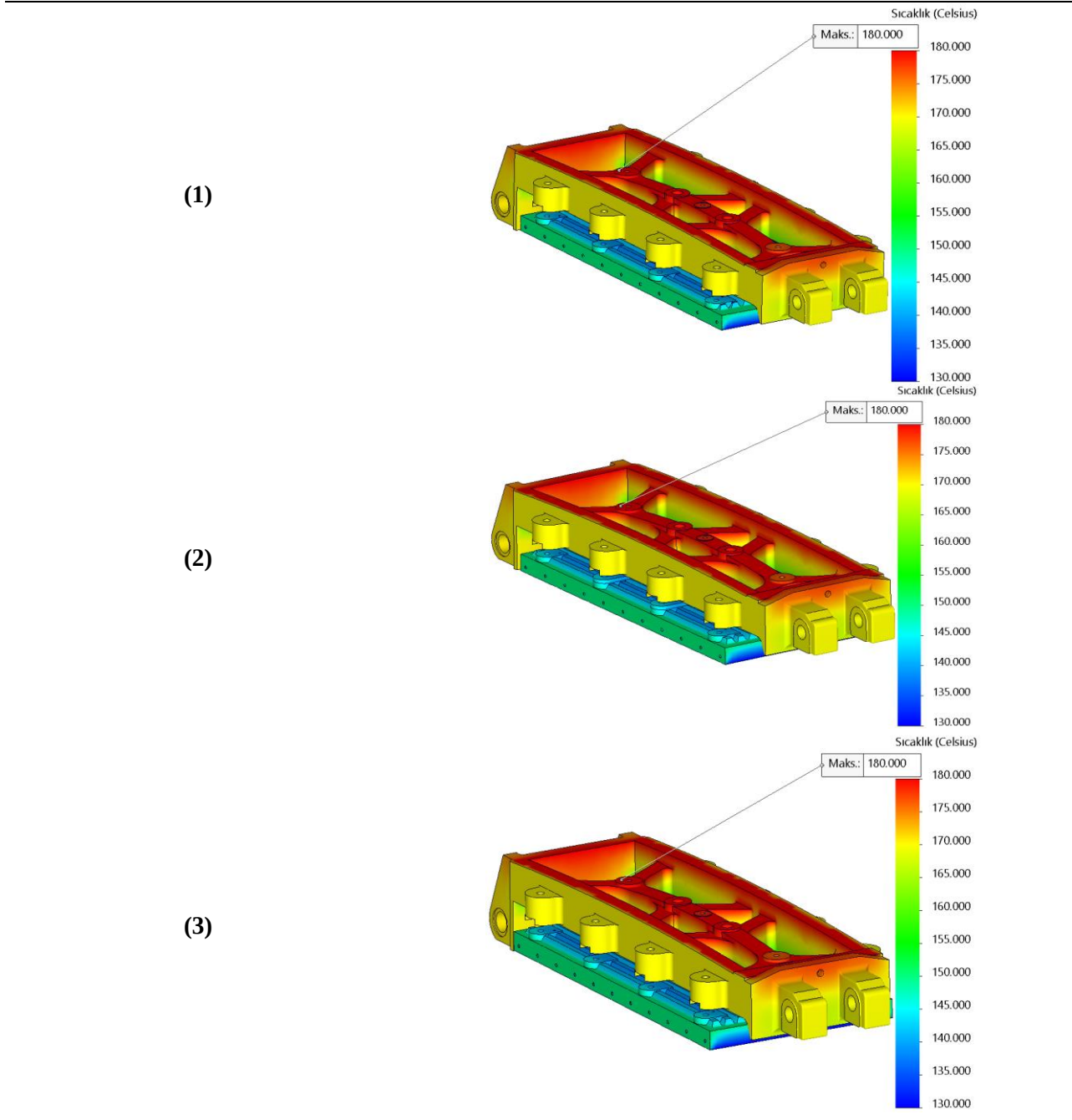
Üç farklı konfigürasyonunun termal davranışları ve sıcaklık dağılım karakteristikleri, 180°C uygulama sıcaklığında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ile detaylı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Bu tabloda yer alan termal dağılım haritaları, her bir konfigürasyonun ısı transfer mekanizmalarını ve sıcaklık gradyanlarını görsel olarak ortaya koymaktadır.

Birinci konfigürasyonda, boyuna kanal desenli kalıp konfigürasyonunun termal analizinde maksimum sıcaklık 180°C olarak varsayılmıştır. Kalıp yüzeyinde minimum 130°C sıcaklık değeri varsayılmış olup, 50°C'lik sıcaklık farkı boyuna kanalların belirgin termal gradyanlar oluşturduğunu göstermektedir. Renk dağılımında kırmızı bölgeler (175-180°C) kanal üst yüzeylerinde, mavi bölgeler (130-140°C) ise kalıp alt kısımlarında yoğunlaşmıştır. Kanal tabanlarında ölçülen sıcaklık değerleri 145-155°C aralığında olup, kanal duvarlarında 165-175°C değerlerine yükselmektedir. Bu dağılım, kanalların etkili ısı tahliyesi sağladığını göstermektedir.

İkinci konfigürasyonda, çelik lamaların termal davranış üzerindeki etkisi Tablo 6'da net olarak görülmektedir. Maksimum sıcaklık 180°C, minimum 130°C olarak varsayılmış, toplam sıcaklık farkı diğer konfigürasyonlarla aynı seviyededir. Ancak lama bölgelerinde farklı termal karakteristikler gözlenmiştir. Lama bölgelerinde 165-170°C, lamalar arası bölgelerde ise 155-160°C sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu 10°C'lik fark, lamaların ısı dağılımında heterojenlik oluşturduğunu göstermektedir.

Üçüncü konfigürasyonda, 150 mm çapındaki açıklığın termal davranış üzerindeki etkisi Tablo 6'da açıkça görülmektedir. Maksimum 180°C sıcaklık delik kenarı yakınında varsayılırken, minimum 130°C değeri kalıp alt bölgelerinde varsayılmıştır. Dairesel delik çevresinde belirgin sıcaklık konsantrasyonları oluşmuştur. Dairesel delik, radyal sıcaklık gradyanları oluşturarak kalıp merkezinde karakteristik bir termal desen oluşturmuştur. Delik kenarında 175-180°C, delikten 50 mm uzaklıkta 165-170°C, 100 mm uzaklıkta ise 155-160°C sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Tablo 5. Farklı yüzey geometri konfigürasyonlarının sıcaklık dağılım haritaları



4. Sonuç ve Tartışma

Bu sonlu elemanlar analizi çalışmasında gofret kalıplarında yüzey geometrisinin termal ve mekanik performans üzerindeki kritik etkisi incelenmiştir. Üç farklı yüzey geometrine sahip döküm tasarımlar, maksimum von Mises gerilmesi ve yer değiştirme açısından detaylı analiz edildiğinde aşağıdaki temel bulgular elde edilmiştir:

- Boyuna kanal desenli kalıp konfigürasyonu, 79 MPa maksimum von Mises gerilmesi kalıp malzemesinin akma dayanımı altında olup 3.16 değerinde yüksek bir emniyet faktörüne sahiptir. Ayrıca 0.511 mm maksimum yer değiştirme değeri bulunmuştur.

- Lamalı kalıp konfigürasyonu, 98 MPa maksimum gerilme ile 2.55 değerinde kabul edilebilir bir emniyet faktörüne sahiptir. Maksimum yer değiştirme ise 0.503 mm bulunmuştur.
- Merkezî dairesel delikli kalıp konfigürasyonu, 187 MPa maksimum gerilme ve 0.506 mm yer değiştirme değerleri ile sonuçlanmıştır. 1.34 emniyet faktörü, 150 mm çapındaki merkezi açıklığın kesit alanını %18.3 oranında azaltması ve kanal-delik kesişimlerinde oluşan geometrik süreksizliklerle birleşerek yapısal bütünlüğü önemli ölçüde zayıflatmıştır.

Mekanik analiz sonuçlarına göre kıyaslama yapıldığında; emniyet faktörü açısından Boyuna kanal desenli kalıp konfigürasyonu en mukavemetli tasarım olarak ortaya çıkmaktadır. Maksimum yer değiştirme açısından ise Lamalı kalıp tasarımı, en öne çıkmaktadır. Öte yandan, gıda sektöründe gofret blokunun herhangi bir konumunda kalınlığının mümkün olduğunca eşit dağılması ürün kalitesi ve müşteri beklentisi açısından oldukça önemlidir. Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda, kalıbın maksimum yer değiştirmesi ne kadar yüksek ise kalıplardan çıkacak gofret bloklarının kalınlıkları da dolaylı olarak yüksek olabilecek veya heterojen dağılım gösterebilecektir. Bu durumda, bir gofret kalıp sisteminin hem yüksek mukavemetli hem de statik ve termal yükler altında en az yer değiştirmeye sahip olması istenmektedir. Burada, bir kalıp sisteminin emniyet faktörünün en az 2 değerine ve en düşük maksimum yer değiştirmeye sahip olması gerektirdiği varsayıldığında lamalı kalıp konfigürasyonu veya tasarımı bu sektörde tercih edilebilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada analizlerde statik yükleme koşulları varsayılmış, döküm prosesinin dinamik karakteri ve döngüsel termal-mekanik yüklemeler dikkate alınmamıştır. Gerçek uygulama koşullarında, yorulma hasarı oluşma potansiyeli de bulunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, döngüsel yükler altında yorulma dayanımının incelenmesi, gradyanlı veya hibrit yüzey geometrilerinin geliştirilmesi ve akıllı malzeme sistemlerinin entegrasyonu planlanmaktadır. Bu kapsamda yapılacak araştırmaların, döküm kalıp teknolojisinin daha da geliştirilmesine ve endüstriyel verimliliğin artırılmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Teşekkür

Yazar, çalışmayı destekleyen Tüfekçioğulları (Nefamak) Makine Gıda İmalat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi Ar-Ge Merkezi, Karaman/Türkiye yetkililerine teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Abdellah, M. Y., Fadhl, B. M., Abu El-Ainin, H. M., Hassan, M. K. & Mohamed, A. F. (2023). Experimental evaluation of mechanical and tribological properties of segregated Al-Mg-Si alloy filled with alumina and silicon carbide through different types of casting molds. *Metals*, 13(2), 316.

Armstrong, M., Mehrabi, H. & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001-1029.

Castorani, V., Vita, A., Mandolini, M. & Germani, M. (2017). A CAD-based method for multi-objectives optimization of mechanical products. *Computer-Aided Design and Applications*, 14(5), 1–9.

Djabraian, S., Teichmann, F. & Müller, S. (2024). Thermo-mechanical optimization of die casting molds using topology optimization and numerical simulations. *Materials*, 17(9), 2114.

- Dohda, K., Aravind, V., Yoshioka, H., Ehmann, K. & Funazuka, T. (2024). Micro-casting using molds with gradient cooling characteristics. *Manufacturing Letters*, 41, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.05.006>
- Feng, S., Kamat, A. M. & Pei, Y. (2021). Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 171, 121082.
- Futas, P., Pástor, M. & Pribulova, A. (2024). Analysis of the possibilities of reducing the levels of residual Gerilmeses in casting produced from synthetic cast iron. *Heliyon*, 10(13), e33623.
- Garbacz-Klempka, A., Kwak, Z., Zak, P., Szucki, M., Ścibior, D., Stolarczyk, T. & Nowak, K. (2017). Reconstruction of the casting technology in the Bronze Age on the basis of investigations and visualisation of casting moulds. *Archives of Foundry Engineering*, 17(3), 51-56.
- Gašpár, Š., Coranič, T., Majerník, J., Husár, J., Knapčíková, L., Gojdan, D., & Paško, J. (2021). Influence of gating system parameters of die-cast molds on properties of Al-Si castings. *Materials*, 14(13), Article 3755.
- Jolly, M. & Katgerman, L. (2022). Modelling of defects in aluminium cast products. *Progress in Materials Science*, 123, 100824.
- Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M. M., Iqbal, M. J., Billah, M. & Chowdhury, M. A. (2025). Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research*, 13(2), 1001-1023.
- Kleinhans, R., Pintore, M., Erhard, P., Renz, R. & Tesfu, J. (2025). Thermal properties of 3D-printed molds for light metal casting. *International Journal of Metalcasting*, 19, 1690–1699. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01411-8>
- Ma, Y., Zhang, G., Cao, S., Huo, Z., Han, J., Ma, S. & Huang, Z. (2023). A review of advances in fabrication methods and assistive technologies of micro-structured surfaces. *Processes*, 11(5), 1337.
- Matejka, M., Bolibruchová, D., Podprocká, R. & Oslanec, P. (2024). Effect of core temperature at HPDC on the internal quality of the casting. *Archives of Foundry Engineering*, 24(4), 151295.
- Neves, N. S., Camargo, R. S. & Azevedo, M. S. (2022). Finite element computational development for thermo-mechanical analysis of plane steel structures exposed to fire. *REM - International Engineering Journal*, 75(1), 9–18.
- Rahman, A., Isanaka, S. P. & Liou, F. (2025). A comprehensive study of cooling rate effects on diffusion, microstructural evolution, and characterization of aluminum alloys. *Machines*, 13(2), 160.
- Ružbarský, J. & Gašpár, Š. (2023). Analysis of selected production parameters for the quality of pressure castings as a tool to increase competitiveness. *Applied Sciences*, 13(14), 8098.
- Sertucha, J. & Lacaze, J. (2022). Casting defects in sand-mold cast irons—An illustrated review with emphasis on spheroidal graphite cast irons. *Metals*, 12(3), 504.
- Shinde, M. S., & Ashtankar, K. M. (2017). Additive manufacturing–assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(5), 1-14.
- Wang, S., Xu, P., Zhou, Y., Duan, H., Chen, D. & Long, M. (2023). The effect of mold structure and cooling parameters on heat transfer during billet high-speed continuous casting. *Materials*, 16(9), 3361.
- Zago, I. P., Vargas, R., Sciuti, V. F., Canto, R. B., & Angélico, R. A. (2024). DIC to evaluate a model composite system cracking due to CTE mismatch. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 131, 104330.

Zhang, J., Wang, S., Zhou, H., & Shu, C. (2022). Manufacturable casting parts design with topology optimization of structural assemblies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(4).

Zhang, W. & Xu, J. (2022). Advanced lightweight materials for automobiles: A review. *Materials & Design*, 221, 110994.

Zhao, M. & Tang, Z. (2025). Comprehensive analysis of the injection mold process for complex fiberglass reinforced plastics with conformal cooling channels using multiple optimization method models. *Processes*, 13(9), 2803.

(URL-1, (2025). <https://www.steel-grades.com/metals/85/218468/DIN-GG-26.html>, 12 Eylül 2025)

(URL-2, (2025). <https://www.makeitfrom.com>, 12 Eylül 2025)