



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

HAZIR MEYANE ÜRETİM SİSTEMİNDE ÜRÜNÜN SOĞUTULMA PROSESİNE GÖRE ÖZEL BİR GRANÜLASYON MAKİNESİNİN TASARIMI

**CEMİL GÜNHAN ERHUY
MEHMET GÖKÇEDAĞLIOĞLU
MAHMUT ESAT TANRIBİLİR
YILDIRIM KILIÇ
ERMETAL OTOMOTİV**

**MEHMET TEKE
ANOVA DANIŞMANLIK**

**A. ALPER ÖZALP
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ**

HAZIR MEYANE ÜRETİM SİSTEMİNDE ÜRÜNÜN SOĞUTULMA PROSESİNE GÖRE ÖZEL BİR GRANÜLASYON MAKİNESİNİN TASARIMI

Cemil Günhan ERHUY
Mehmet GÖKÇEDAĞLIOĞLU
Mahmut Esat TANRIBİLİR
Yıldırım KILIÇ
Mehmet TEKE
A. Alper ÖZALP

ÖZET

Hazır meyane üretiminin çok aşamalı yapısı, ürün geliştirme ve imalat süreçlerinde gıda mühendisliği ve teknolojinin yanında, makine mühendisliğinde ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve enerji bilim dallarına ait mekanizmaların da uygun bir şekilde kullanımını gerektirmektedir. Özellikle meyane ürünlerinin 140-150 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta kavurulması sonrasında donma sıcaklığının (~50 °C) altına düşürülerek granül formunda kesilebilmesi için gerekli olan soğutma sisteminin tasarımı, bütünü ile yukarıda belirtilen üç bilim dalını ilgilendiren teknik yöntemler üzerine kuruludur. İmalat sürecindeki soğutma ve kesme işlemlerinin aynı fiziksel sistem üzerinde kurgulanmasına dair sektörel beklentiler, dikkatin granülasyon makineleri üzerine çevrilmesi sonucunu doğurmuştur. Söz konusu makinenin tasarım şeması, soğutma sisteminin yapısal kısımlarının CAD ortamına şekillendirilmesinin ötesinde, soğutma sürecinin işlevsel unsurları olan soğutma tipi, soğutma suyu sıcaklığı, ürün hamuru sıcaklığı, soğutma tamburunun hızı ve meyane bileşimine bağlı termo-fiziksel özelliklerin de tasarım sürecinde göz önünde bulundurulmasını mecbur kılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Meyane, Granülasyon Makinesi, Soğutma Tipi, Soğutma Suyu, Tambur Hızı, Ürün Sıcaklığı.

ABSTRACT

The multi-stage nature of the instant roux production requires appropriate use of the mechanisms regarding the disciplines of heat transfer, fluid mechanics and energy in mechanical engineering in product development and manufacturing processes, besides food engineering and technology. In particular, design of the cooling system required to decrease the temperature of roux product under freezing point (~50 °C) after roasting the roux products at high temperatures as 140-150 °C and cut in granular form is totally based on the technical methods relating the three disciplines mentioned above. Industrial expectations for built of cooling and cutting processes on the same physical system during manufacturing process have raised the attention drawn on granulation machines in food industry. Design scheme of this machine forces to be taken in consideration of functional factors of cooling process, i.e. cooling system type, cooling water temperature, temperature of product dough, cooling drum speed, and the roux-composition dependent thermo-physical properties, beyond constructing structural components of cooling system in CAD medium.

Key Words: Roux, Granulation Machine, Cooling Type, Cooling Water, Drum Speed, Product Temperature.

1. GİRİŞ

Endüstrinin büyümesi, iş hayatına dahil olan insan sayısının artması ve kentleşmenin getirmiş olduğu koşullardan dolayı işyerlerinde toplu beslenme gereksinimi artmış ve toplu yemek üretimi önemli bir sektör haline gelmiştir [1]. Bu sektörde hazır yemek üretimi ve sunumu yapan firmalar için, bir girdi olarak temel gıda ürünlerindeki fiyat artışları ham madde maliyet baskısı doğurmaktadır [2]. Maliyeti azaltmanın en etkin yolu ise, yemek üretiminde fire oranını azaltmak, üretim sürelerini kısaltmak ve nakliye-depolama maliyetlerinde avantaj sağlayan kullanıma hazır ürünlere yönelmektir.

Meyane, en genel haliyle un ve yağ karışımından hazırlanmakta ve geleneksel Türk mutfağında çorba, sos ve sulu yemeklerde kıvam verici olarak kullanılmaktadır [3]. Sade ve salçalı tipte meyanelerin geleneksel yöntemle üretimi yerine, kullanıma hazır granül formunda üretilmesi partikül (granül) boyut dağılımını gerektiğinde değiştirme, akış özelliklerini geliştirme, dozaj kontrolünü kolaylaştırma, gıdanın çabuk hazırlama (instant) özelliğini geliştirme, topaklanma, toz oluşumu ve segresyonu azaltma gibi avantajlar sunacaktır [4]. Gıdalara granül formu kazandırılması için uygulanacak üretim teknolojisinin seçimi (sprey kurutma, akışkan yatakta kurutma, düşük basınçta ekstrüzyon veya şekilli kalıplara basım), kullanılan ham maddeye ve nihai ürüne kazandırılmak istenen özelliklere bağlı olmaktadır [4]. Bu açıdan değerlendirildiğinde üretimi düşünülen sade ve salçalı tipte meyanelerin un ve yağ ağırlıklı olması nedeniyle konvansiyonel üretim teknolojileri içinde ürüne uygun bir sisteme rastlanmamıştır. Ancak, meyane çeşitlerinin talep edilen kullanım şartlarını sağlaması için, ürünün granüle edilmeden önce soğutulması; yani ürün ısısının üründen tasarlanacak sisteme sürekli olarak transfer edecek bir sistemin gerekli olacağı tespit edilmiştir. Bunu sağlayacak sistemin, tambur kurutucu (drum drier) gibi, dönerken ince bir gıda katmanı ile kaplanan içi boş bir çelik silindir olacağı ve silindirin dış yüzeyine homojen yayılan gıdanın soğutulması ile [5] istenen üretimin yapılabileceği düşünülmüştür. Tamburun, üzerine sıvı katmanının katı faza geçmesini sağlayacak kadar devri gerçekleştikten sonra, tambur boyunca uzanan bir sıyırma bıçağı ürünün yüzeyden sıyırılması tasarlanmıştır. Ancak, tambur kurutucularda çelik silindirin yüzeyi, tambur içine 120-170 °C'lik sıcaklıkta verilen basınçlı kızgın buhar ile ısıtılmaktadır [6]. Oysa hazır meyane üretiminde gerekli olan termodinamik süreç soğutmadır. Bu nedenle, tambura kızgın buhar yerine soğuk su verilecek şekilde bir tasarım benimsenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında soğutma sürecinin işlevsel unsurları olan soğutma tipi ve soğutma suyu sıcaklığı, ürün hamurunun giriş (döküm) sıcaklığı ve tambur dönme hızı göz önünde bulundurulmuş olup; ürünlerin bileşimine ve sıcaklığına bağlı fiziksel özellikleri de hesaba katılmıştır.

Gıdaların dondurulması gibi gıda teknolojisi ile ilgili uygulamalarda gıda ısıl özelliklerinin belirlenmesi bir gereklilik olup; bu bilgilerin temini için doğrudan gözlemlere (deneysel yöntemlere), literatürdeki bilgilerinin kullanımına ve gıda bileşenlerinin tip ve oranını esas alan hesap yöntemlerine (tahminlere) başvurulabilir [7]. Cleland ve Valentas [7], deneysel yöntemler içerisinde en güvenilir olan ve yaygınca kullanılanların, entalpi ve görünür özgül ısı ölçümleri için kalorimetri; ısıl iletkenlik için de mahfazalı sıcak plaka (guarded hot-plate) ve çizgi-kaynak problemleri (line-source probes) olduğunu bildirmişlerdir.

Heldman ve Singh [5] çeşitli gıdaların özgül ısı, sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik, entalpi (dondurulmuş gıdalar için) ve donma başlangıç sıcaklığı (meyve suları için) değerlerini vermişlerdir. Cemeroğlu [6] ise, çeşitli meyve-sebze suları ile hayvansal gıdaların soğutma ve dondurma hesaplamaları için gerekli olan özgül ısı, entalpi, donma gizli ısısı gibi ısıl özelliklerini aktarmıştır. Açık literatürde sade ve salçalı hazır meyane veya bunlara muadil bir ürünün ısıl özelliklerine dair bilgiye rastlanmamıştır. Cleland ve Valentas [7], gıdaların ısıl özelliklerinin bileşen bilgilerinden basit denklemlerle öngörülmesinin yaygın kullanılan bir yöntem olduğunu bildirmişlerdir. Ancak, çoğu gıda maddesinin bileşim bakımından fazla heterojen olması ve aynı isimli gıda maddelerinin bileşiminde değişkenliler, ısıl özellik ölçüm ve tahmininde sorunlara yol açabileceği ifade edilmiş; öngörü/tahmin yöntemlerinin, geçerli ölçülmüş ısıl özellik bilgileri elde edilemediğinde kullanılması tavsiye edilmiştir [7]. Bu doğrultuda, Toledo [8], Onita ve Ivan [9] ile Fricke ve Becker [10] tarafından yapılan çalışmalar incelendiğinde, gıdaların protein, yağ, karbonhidrat, kül, lif ve su bileşenlerinin ısıl iletkenlik ve yayılım, yoğunluk ve özgül ısı değerlerini sıcaklığın fonksiyonu olarak veren eşitliklerin kullanılabileceği görülebilir. Söz konusu çalışmalarda, termo-fiziksel özellikleri incelenen gıda bileşenlerinin hacim veya kütle oranlarına göre ısıl iletkenlik, ısıl yayılım, yoğunluk ve özgül ısı değerleri veren eşitliklerin kullanımına dair Choi ve Okos [11] tarafından yapılan çalışmaya atıfta bulunulmuştur.

Sade ve salçalı meyane çeşitlerinin soğutma sürecindeki faz değişimi ile ürünler katı hale gelinceye kadar akışkan davranış göstereceğinden, bunların reolojik özelliklerinin de belirlenmesinin gerekli olacağı değerlendirilmiştir. Meyane ve muadil ürünler için yapılan literatür araştırmasında sınırlı sayıda kaynağa ulaşılmıştır. Merrit tarafından [12] yapılan çalışmada, farklı oranlarda karıştırılan buğday unu, tam buğday unu ve modifiye nişastanın, tereyağı ve tavuk suyuyla beraber pişirilmesi ile hazırlanan meyanelerin donma, çözündürme ve tekrar ısıtma işlemleri boyunca stabilite özellikleri, Brookfield rotasyonel viskozimetresi kullanılarak ölçülen viskozite değerleriyle incelenmiştir [12]. Kato tarafından [13] yapılan çalışmada ise, buğday unu ve tereyağı karışımının farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılması ile hazırlanan meyanelerin kimyasal ve duyu özellikleri incelenmiştir.

Hesaplama akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) analizlerinden gıda teknolojisi alanında, özellikle proses tasarımına yönelik uygulamalarda sıkça faydalanılmaktadır. Gıdaların ısı işlemleri için kullanılacak ekipman tasarımlarının doğrulanabilmesi için, gıdaların merkez sıcaklığının, birbirini takip eden proses aşamaları süresince iyi uygulanmış yöntemlerle, ısı işleminin mikrobiyolojik ve duyu özellikleri üzerindeki etkilerini ölçecek şekilde bilinmesi gerektiği Nicolai vd. [14] tarafından bildirilmiştir. Matematiksel proses modellerinin ve simülasyon yazılımlarının geleneksel, zaman alıcı sıcaklık ölçümleri ve mikrobiyolojik ve gıda kalitesi analizlere güçlü bir alternatif sunmaktadır [14]. Örneğin, Augusto ve Cristianini [15] tarafından yapılan çalışmada tuğla şeklinde bir ambalaj içindeki bir sıvı gıdanın ısı süreci, proses öldürücülüğü (process lethality) ile beraber, transfer denklemlerini (Navier-Stokes eşitlikleri ve durum denklemleri) açıklayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için ANSYS CFX 15.0 programı ile yapılan hesaplama akışkan dinamiği analizi ile incelenmiştir [15].

Sunulmakta olan çalışma; sade ve salçalı tipte hazır meyanelerin kavurma işlemi sonrasında soğutma prosesinin gerçekleştirileceği özel bir granülasyon makinesinin simülasyon tabanlı olarak geliştirilmesi sürecini konu almaktadır. Ürünlerin, tüketici tarafından talep edilen kullanım şartlarını karşılayabilmesi için, un ve bitkisel margarinin 140-150 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta kavurulması sonrası sıcaklığının ~50 °C'nin altına düşürülerek donmanın sağlanması ve granül formunda kesilmesinin gerekli olduğu, prosese dair gerçekleştirilen ön deneme çalışmalarında saptanmıştır.

2. TERMO-FİZİKSEL ÖZELLİKLERİN TAYİNİ

Sade ve Salçalı meyane çeşitlerinin hazırlanmasında kullanılan ham maddeler çeşitli gıda tedarikçi firmalardan temin edilmiştir. Deneme üretimi çalışmaları sonucunda duyu olarak en iyi sonuç veren ürün reçetesi kullanılarak meyane numuneleri hazırlanmıştır. Sade meyane bileşiminde buğday unu, margarin ve ayçiçek yağı yer alırken; salçalı tipte buğday unu, margarin, ayçiçek yağı, domates salçası, domates tozu, pancar kökü tozu ve paprika ekstraktı kullanılmıştır. Meyanelerin yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesinde literatürde [8-11] önerilmiş olan ve Tablo 1'de özetlenen eşitliklerden faydalanılmıştır. Söz konusu eşitliklerde gıda temel bileşenlerin ısı özellikleri, sıcaklığın (t, °C) fonksiyonu olarak ifade bulunmaktadır. Bu eşitlikler -40 °C ile 150 °C arası sıcaklıklar için ≤%6 düzeyinde bir hata oranı ile uygulanabilir [11].

Tablo 1. Gıda bileşenlerinin bazı termo-fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmasına yönelik önerilen eşitlikler [11].

Bileşenler	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kg.°C)	Isıl İletkenlik (W/m ² .°C)
Protein	$\rho_p=1329.89-0.51840t$	$C_{pp}=2.0082 \times 10^3 + 1.2089t - 1.3129 \times 10^{-3} t^2$	$k_p=0.1788 + 1.1958 \times 10^{-3} t - 2.7178 \times 10^{-6} t^2$
Yağ	$\rho_y=925.59-0.41757t$	$C_{py}=1.9842 \times 10^3 + 1.4733t - 4.8008 \times 10^{-3} t^2$	$k_y=0.1807 - 2.7604 \times 10^{-4} t - 1.7749 \times 10^{-7} t^2$
K.hidrat	$\rho_{kh}=1599.1-0.31046t$	$C_{pkh}=1.5488 \times 10^3 + 1.9625t - 5.9399 \times 10^{-3} t^2$	$k_{kh}=0.2014 + 1.3874 \times 10^{-3} t - 4.3312 \times 10^{-6} t^2$
Kül	$\rho_{ku}=2423.8-0.28063t$	$C_{pku}=1.0926 \times 10^3 + 1.8896t - 3.6817 \times 10^{-3} t^2$	$k_{ku}=0.3296 + 1.401 \times 10^{-3} t - 2.9069 \times 10^{-6} t^2$
Lif	$\rho_{li}=1311.5-0.36589t$	$C_{pli}=1.8459 \times 10^3 + 1.8306t - 4.6509 \times 10^{-3} t^2$	$k_{li}=0.18331 + 1.2497 \times 10^{-3} t - 3.1683 \times 10^{-6} t^2$
Su	$\rho_{su}=997.18 + 3.1439 \times 10^{-3} t - 3.7574 \times 10^{-3} t^2$	$C_{psu}=4176.2 - 9.0864 \times 10^{-2} t - 5473.1 \times 10^{-6} t^2$	$k_{su}=0.57109 + 1.7625 \times 10^{-3} t - 6.7306 \times 10^{-6} t^2$

Gıdaların ısı özelliklerinin hesaplanabilmesi için, gıdayı oluşturan bileşenlerin kütle fraksiyonlarının detaylı olarak bilinmesi gerekmektedir [9]. Bileşenlerin tekil olarak Tablo 1'de verilen denklemlerle

hesaplanan karakteristiklerinden sade ve salçalı meyane yoğunluklarının hesaplanması için (1); özgül ısılarının hesaplanması için (2) ve ısı iletkenlik katsayılarının hesaplanması için (3) ile verilen eşitlikler kullanılmıştır [9]. Bu denklemlerde ρ gıdanın bileşke yoğunluğu (kg/m^3); X_i gıda bileşeninin kütle fraksiyonu; ρ_i gıda bileşeninin (protein, yağ, karbonhidrat, kül, lif, su) bireysel yoğunluğu (kg/m^3), k gıdanın ısı iletkenliği ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$); k_i gıda bileşeninin bireysel ısı iletkenliği ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$); x_{vi} gıda bileşeninin hacim fraksiyonu; $C_{p(\text{ort})}$ gıdanın hesaplanan özgül ısı ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$); $C_{p(p, y, kh, kül, lif, su)}$ gıda bileşenlerinin bireysel özgül ısı ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$) olup; P, F, C, A, L ve Su ise sırasıyla gıda bileşimindeki protein, yağ, karbonhidrat, kül, lif ve su bileşenlerinin yüzdesini ifade etmektedir [8].

$$\rho = 1 / \sum (X_i \cdot \rho_i) \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

$$C_{p(\text{ort})} = (P \cdot C_{p(p)}) + (F \cdot C_{p(y)}) + (C \cdot C_{p(kh)}) + (A \cdot C_{p(kül)}) + (L \cdot C_{p(lif)}) + (Su \cdot C_{p(su)}) \quad (\text{J/kg } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

$$k = \sum k_i \cdot x_{vi} \quad (\text{W/m } ^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$x_{vi} = (X_i \cdot \rho) / \rho_i \quad (4)$$

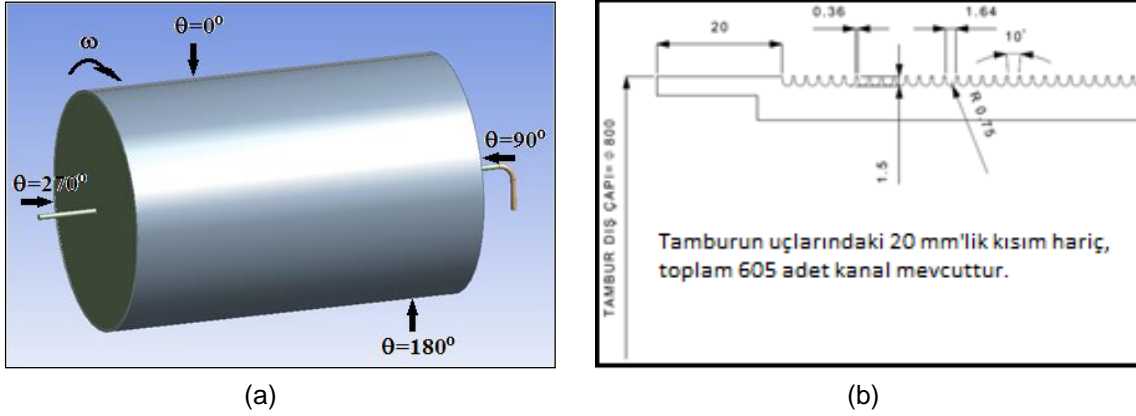
Sade ve salçalı meyane çeşitlerinin bileşen oranlarının belirlenmesi için, ideal bileşen ve oranlarını saptamaya yönelik deneme çalışmalarından elde edilen, ham maddelerin ürün reçetesindeki kütle oranların yüzde değerleri faydalanılmıştır. Buna ilaveten, kullanılan ham maddelerin literatürden ve spesifikasyonlarından elde edilen besin bileşenleri bilgileri de kullanılarak, sade ve salçalı meyane üretim proseslerine giren ve çıkan kütlenin eşit olması gerektiği prensibi doğrultusunda protein, karbonhidrat, kül, yağ gıda bileşenleri için kütle denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler çözülerek, sade ve salçalı meyanelerin protein, karbonhidrat, yağ ve kül değerlerine ulaşılmıştır. Meyane ürünleri için lif oranı sıfır olarak kabul edilmiştir. Su oranı ise, öngörülen protein, yağ, karbonhidrat ve kül kütle fraksiyonları toplamının 1'den çıkarılması ile hesaplanmıştır. Bu bilgilerin sade ve salçalı tipte meyane soğutma prosesinin simülasyon çalışmalarında kullanılmasına karar verilmiştir.

Meyanelerin viskozite ölçümleri Ege Chelab laboratuvarında, Brookfield RVDV-II + Pro EXTRA model viskozimetre ile gerçekleştirilmiştir. Sade ve salçalı meyane numuneleri için sırasıyla RV5 ve RV4 "spindle" tipleri kullanılarak viskozite ölçümleri yapılmıştır. Test verilerini hız etkisinden arındırma amacıyla türetilen matematiksel modellerle yapılan ekstrapolasyondan, 60-90 $^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında sade meyanelerin viskozitesinin 1.85 Pa.s ile 1.69 Pa.s arasında; salçalı meyanelerin viskozitesinin ise 1.33 Pa.s ile 1.26 Pa.s arasında, üstel bağıntıya uyarak azalma eğilimi gösterdiği değerlendirilmiştir. Test verilerini sıcaklık etkisinden arındırma amacıyla türetilen matematiksel modellerle kayma hızı ile kayma gerilmesi arasında elde edilen bağıntılar ise, her iki meyane tipinin "pseudoplastik" karakterde olduğu yorumuna zemin sağlamıştır.

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARARI

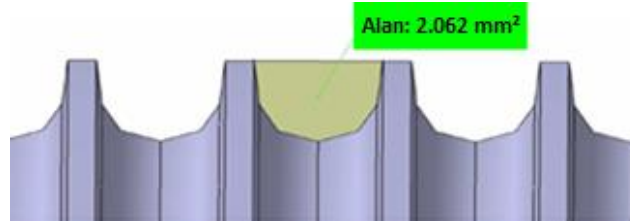
3.1 Modellemeler

Hesaplamalı akışkan dinamiği analizleri ANSYS CFX yazılımının 15.0 sürümü ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların amacının meyanelerin kavurma prosesi sonrasında soğutulma işlevine yönelik olması nedeniyle, granülasyon makinesinin ilgili kısımları dikkate alınmıştır. Makinenin dönen tamburunun (Şekil 1.a) meyane ile etkileşim içinde bulunacak olan silindirik dış yüzeyi Şekil 1.b'deki gibidir. Tasarımın hedefinde ısı transfer yüzey alanını artırmak ve meyanelerin tambur yüzeyinde olası akışını yavaşlatmak şeklinde iki beklenti bulunmaktadır. Öte yandan Şekil 1.b'de ki kanallı yapının simülasyon ortamında modellenmesi ve sonrasında sayısal ağ uygulanması kendi içinde zorluklar içermektedir.



Şekil 1. Meyane granülasyon makinesi soğutma tamburunun genel görünümü (a) ve meyanenin birim zamanda tambur yüzeyine sevk edilen miktarında herhangi bir farklılığa neden olmadan, tambur yüzeyi ile meyanenin ısıl çevredekide etkileşimini doğru tanımlayabilecek bir yaklaşım geliştirilmesi mecburiyeti ortaya çıkmıştır.

Şekil 2'de detayı verilen tambur üzerindeki 605 adet kanalın her birinin kesit alanı 2.062 mm²'dir. Bu derece küçük bir kesitin bağımsız 605 adet kanal için ve 800 mm çapındaki tambur yüzeyinde açısal yönde 0-270° aralığında modellenerek sayısal ağ uygulanmasının pratik olmayacağı ve ortaya çıkacak yüksek/yoğun sayısal ağ nedeniyle simülasyon süresinin çok uzayacağı değerlendirilmiştir. Bu tespitler neticesinde, simülasyon ortamında meyanenin birim zamanda tambur yüzeyine sevk edilen miktarında herhangi bir farklılığa neden olmadan, tambur yüzeyi ile meyanenin ısıl çevredekide etkileşimini doğru tanımlayabilecek bir yaklaşım geliştirilmesi mecburiyeti ortaya çıkmıştır.



Şekil 2. Tambur yüzeyi kanal detayı.

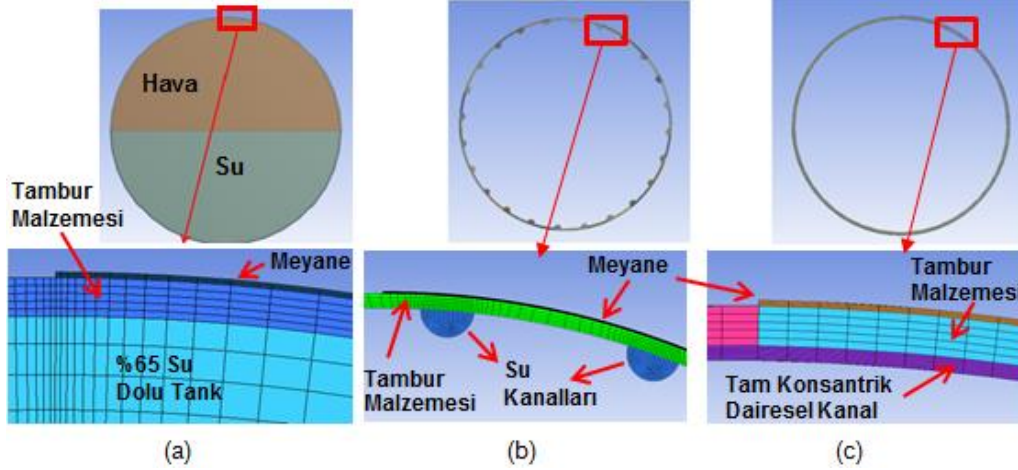
Sayısal ağa ilişkin mecburiyetlere cevap verebilecek; ayrıca bilgisayar ortamında modellenerek analiz edilebilecek yaklaşımın, meyanenin tambur yüzeyinde bir film tabakası olarak tanımlanması olduğuna karar verilmiştir. Buradan hareketle, tambur uzunluğu (L_T), kanal sayısı (N_k) ve kanal kesit alanı (A_k) değerleri sırasıyla 1210 mm, 605 ve 2.062 mm² olarak alındığında, (5) ile verilen eşitlikten meyanen kalınlığı (k_{Mey}) değeri 1.031 mm olarak hesaplanmıştır.

$$L_T k_{Mey} = N_k A_k \quad (5)$$

Meyane kalınlığının tamburun $n = 0.5, 1.0$ ve 1.5 rpm devir sayılarında tambur yüzeyindeki akış debileri (Q_{Mey}) ise, tambur çapı $D_T = 786$ mm olarak alınarak (6) ile hesaplanmıştır.

$$Q_{Mey} = N_k A_k n (2\pi/60) D_T / 2 \quad (m^3/s) \quad (6)$$

Kalınlığı k_{Mey} olarak hesaplanan meyanen filminin simülasyon ortamında tambur yüzeyine uygulanma biçimleri, seçilen üç farklı soğutma tipi için Şekil 3'te gösterilmiştir. Tambur yüzeyinin soğutulmasındaki ana uygulama, tambur içinden soğuk su geçirilmesidir. Bu noktada soğutma sistemi için, havuz tipi, kanallı tip ve konsantrik tip olmak üzere, operatif anlamda sonuçları karşılaştırılabilir üç farklı fiziksel tasarım üzerinde durulmuştur.



Şekil 3. Tambur soğutma sistemleri ve meyane filmi kalınlık tanımları: (a) İçi %65 suyla dolu (0.65) havuz tipi soğutma; (b) yarım borudan oluşan ve tambur yüzeyinin %25'i ile su teması sağlayan (0.25) kanal tipi soğutma (b) ve iç içe geçmiş olan iki silindirik yüzey arasında tambur iç yüzeyinin %100'ünde su teması sağlayan (1.00) konsantrik tip soğutma.

Soğutma sistemlerinden ilki (Şekil 3.a), tambur yüzeyinin %65'i suyla temas edecek şekilde, soğutma suyunun tamburun iç haznesine uygulanmasıdır (havuz tipi). İkinci uygulama (Şekil 3.b), tambur iç yüzeyine yarım boruların düzenlenmesi ve soğutma suyunun boruların içinden uygulanmasıdır (kanallı tip). Buradaki tasarımın ilkesi, soğutma suyunun tambur yüzeyinin %25'i ile temas etmesi olup; çapı 26 mm ve et kalınlığı 1.5 mm olan 24 adet boru düşünülmüştür. Üçüncü uygulamada ise (Şekil 3.c), tambur yüzeyinin tamamı (%100) soğutma suyu ile etkileşimdedir. Bu da tambur iç yüzeyinden radyal yönde 1.32 mm'lik bir mesafe kalacak şekilde, ikinci bir eş merkezli silindirik yüzeyin adaptasyonu ile konsantrik bir kanalın oluşturulmasına (konsantrik tip) dayanmaktadır.

Simülasyon çalışmalarında, içerdiği çok sayıda bileşen nedeniyle imalat süreci daha kritik olarak değerlendirilen salçalı meyane öncelik verilmiş ve optimize edilen sistemin sade meyane için de işlevselliği doğrulanması hedeflenmiştir. Salçalı meyane için hesaplanan termo-fiziksel özellikleri, farklı sıcaklıklar için Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca, tamburun imal edileceği malzeme olan AISI 316 çeliği ile soğutucu akışkan olarak kullanılacak suyun özellikleri de aynı tabloda sunulmuştur.

Tablo 2. Salçalı meyane, tambur malzemesi ve suyun CFD analizlerinde kullanılan fiziksel özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Viskozite (Pa.s)	Özgül Isı (kJ/kg K)	Isı İletim Katsayısı (W/m K)
Salçalı Meyane – 90 °C	1151	1.3	2015	0.252
Salçalı Meyane – 100 °C	1146	1.3	2035	0.252
Salçalı Meyane – 110 °C	1142	1.3	2041	0.254
AISI316	8000	-	500	16.3
Su	997	0.0008899	4181.7	0.6069

Granülasyon makinesinin soğutma performansında tambur dönme hızı, meyane sıcaklığı ve soğutma suyu sıcaklığı olmak üzere üç farklı proses parametresinin etkin rol oynayacağı bilinmektedir. Bu parametrelerin farklı seviyelerde uygulamasının soğutmada farklı sonuçlar vereceği açıktır. Dolayısıyla üç parametrenin, pratikte uygulanması mümkün olan üçer adet seviyesinin simülasyon çalışmalarına dahil edilmesi kararlaştırılmıştır. Bunlar şu şekilde belirlenmiştir:

Tambur Dönme Hızı, n = 0.5; 1.0; 1.5 rpm

Meyane Döküm Sıcaklığı, T_{Mey} = 90; 100; 110 °C

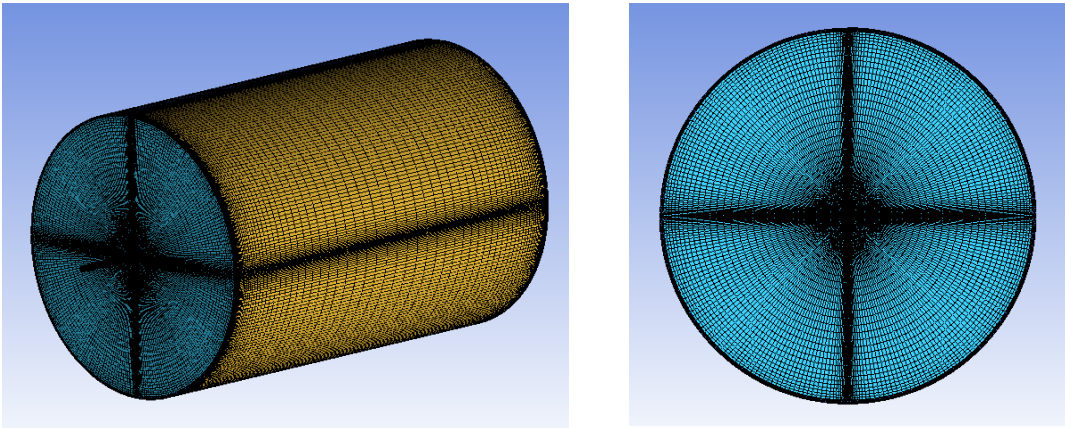
Soğutma Suyu Sıcaklığı, $T_{su} = 10; 15; 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Simülasyonlarda girdi olarak kullanılan meyane debisi, (5) ve (6) ile yapılan hesaplamalar sonucunda, $n = 0.5; 1; 1.5 \text{ rpm}$ 'lik tambur hızları için $Q_{Mey}=2.61 \times 10^{-5}; 5.22 \times 10^{-5}; 7.84 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ olarak alınmıştır.

Yukarıda belirtilen parametrelere ek olarak, Şekil 3'te tanımlanan soğutma suyu sevk sistemi yapısal tasarımının da bir parametre olarak analizlere dahil edilmesinin gerekliliği hissedilmiştir. Söz konusu parametrenin ise suyun tambur yüzeyine temas alanına göre tanımlanması uygun görülmüştür. Yüzey soğutma sistemi olarak da adlandırılacak bu parametrenin, suyun tambur yüzeyine temas ettiği kısmın yüzdesel tanımı ile aldığı değerler de şöyledir:

Yüzey Soğutma Sistemi= 0.25; 0.65; 1.00

Her bir soğutma sisteminin tasarımı için Şekil 4'te gösterilen sayısal ağda hexa elemanlar kullanılarak modelleme yapılmıştır. Modellerdeki sayısal ağlar 3,313,958 adet eleman ile oluşturulmuştur. Tambur et kalınlığı ve meyane film kalınlığı çok küçük olduğundan, normal yöndeki sıcaklık ve hız gradyanı çözümünün katmanlı elemanlar ile gerçekleştirilmesinin daha doğru olacağı düşünülmüştür. Katmanlı yapı ise hexa elemanlar ile oluşturulacağından, modelde bu eleman tipi tercih edilmiştir. Eleman sayısı serbest yüzeyi çözecek şekilde yoğun tutulmuştur.



Şekil 4. Meyane soğutma tamburunun sayısal modellemesi

Yukarıda açıklanan şekilde belirlenen parametrelerin uygulandığı soğutma sistemi ile ilgili olarak, ANSYS CFX 15.0 programı ile yürütülen CFD analizlerinde yapılan kabuller ve sınır şartları şöyle sıralanabilir:

- Tüm analizlerde termal denge sağlanmıştır.
- Ortam sıcaklığı sabit ve $T=25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'dir.
- Tambur ve meyane yüzeyinden doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşmekte olup; ısı transfer katsayısı $h=4 \text{ Watt / m}^2 \cdot \text{K}$ olarak ($25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'de) alınacaktır.
- Meyane dış yüzeyi ile tambur arasında serbest cidar kayması (free slip wall) olduğu kabul edilerek, cidar kayma gerilmesi (wall shear stress) ihmal edilmiştir.
- Belirtilen yapısal tasarım öngörülerinin hazırlanması aşamasında sistemde kullanılacak soğutma suyu pompasının basma debisinin sabit ve $Q_{su}=2 \text{ m}^3/\text{saat}$ olduğu kabul edilmiştir.
- Tambur üzerinde serbest olarak kayan meyanelerin giriş debileri, tamburun devrine bağlı olarak (5) ve (6) ile verilen denklemlerden ve ortalama olarak $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklıktaki meyanelerin Tablo 2'de verilen yoğunluğu kullanılarak yapılan hesaplamalar ($\rho_{Mey} \cdot Q_{Mey}$) doğrultusunda aşağıdaki şekilde kabul edilmiştir.

0.5 rpm tambur devri için meyane giriş debisi = 0.03 kg/s

1.0 rpm tambur devri için meyane giriş debisi = 0.06 kg/s

1.5 rpm tambur devri için meyane giriş debisi = 0.09 kg/s

- Türbülans modeli olarak standart-Epsilon modeli seçilmiştir.
- Yakınsama kriteri RMS olarak $1.E-5$ alınmıştır.

3.2 Taguchi Yöntemiyle Deney Tasarımı ve Simülasyon Çıktıları

Granülasyon makinesinin soğutma performansı üzerinde etkili olan 4 adet parametrenin 3'er seviye üzerinden incelenmesi kararı alınmıştır. Tam faktöriyel bir yaklaşımda kombinasyon çokluğu ($3^4=81$) istatistik biliminin desteğini gerekli kılmıştır. İstatistiksel deney tasarımında Taguchi yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem, parametre sayısı 4; her parametrenin seviye sayısı 3 ve parametrelerin toplam serbestlik derecesi $4 \times (3-1)=8$ olan bir problem için $L_9(3)^4$ ortogonal dizisini kullanılabilir kılmaktadır [16]. Böylece, 9 adet analizden elde edilen verilerin istatistiksel analiziyle, seçilen seviyelerde optimal kombinasyona ulaşılması hedeflenmiştir. Çalışılacak bu 9 senaryo, Tablo 3'te görülen deneysel tasarım matrisindeki gibi şekillenmiştir. Böylelikle, hem bütün parametrelerin istenen seviyelerde ele alınmasının önü açılmış; hem de yeterli sayıda kombinasyon ve makul bir analiz maliyeti ile soğutma performansının karşılaştırılabilir olarak irdelenip tartışılabilirliği bir zemin oluşturulmuştur.

Tablo 3. Minitab programı tarafından verilen Taguchi $L_9(3)^4$ ortogonal dizisine dayalı deneysel tasarım matrisi (a) ve bu diziye göre CFD simülasyonları için oluşturulan senaryolar (b) ile birlikte salçalı meyane için alınan simülasyon çıktıları ve hesaplanan Sinyal/Gürültü oranı değerleri.

(a)

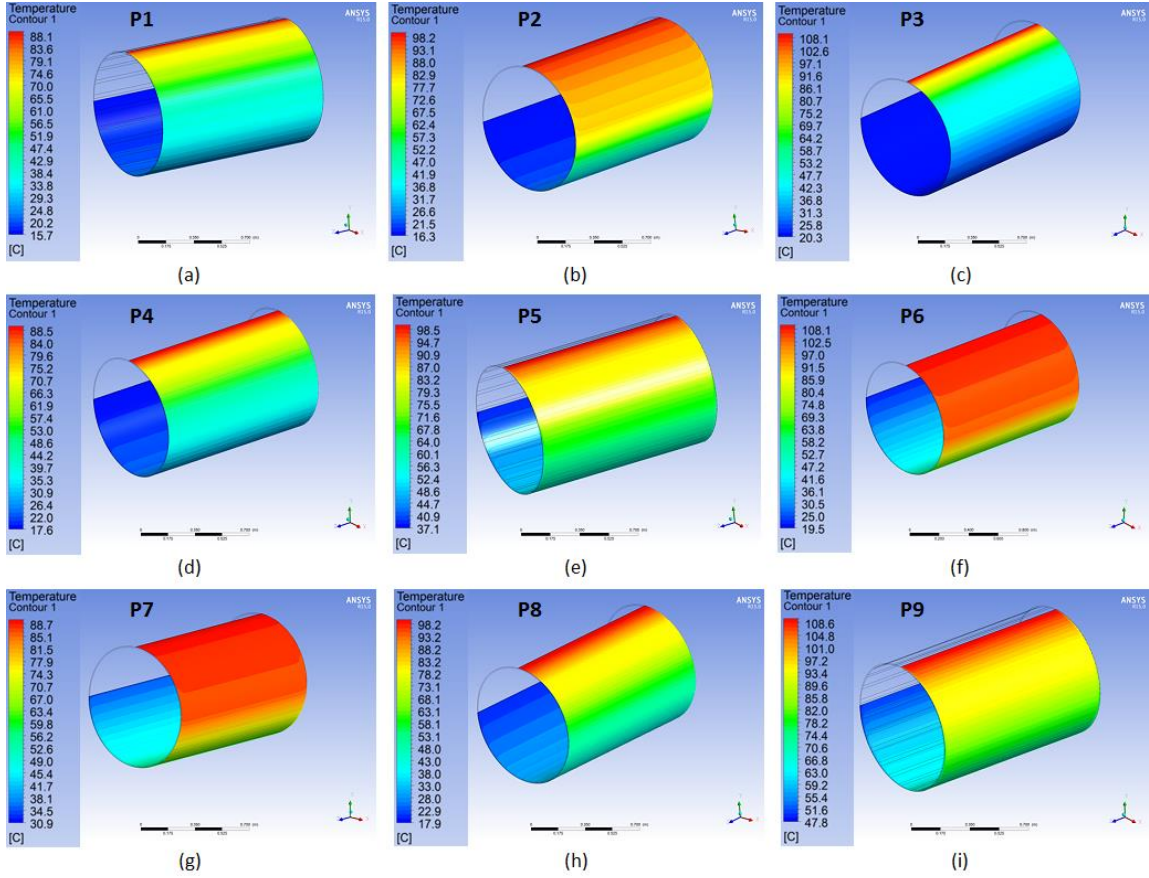
Deney	Parametreler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

(b)

No	Parametreler				50 °C'ye Ulaşılan Açısal Konum (Saat Yönünde °)	Sinyal/Gürültü Oranı S/G
	Tambur Hızı (rpm)	Meyane Sıcaklığı (°C)	Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C)	Yüzey Soğutma Tipi		
P1	0,5	90	10	0,25	53,72	-34,60
P2	0,5	100	15	0,65	122,91	-41,79
P3	0,5	110	20	1,00	47,56	-33,54
P4	1,0	90	15	1,00	67,26	-36,56
P5	1,0	100	20	0,25	180,37	-45,12
P6	1,0	110	10	0,65	167,56	-44,48
P7	1,5	90	20	0,65	188,26	-45,50
P8	1,5	100	10	1,00	103,80	-40,32
P9	1,5	110	15	0,25	272,87	-48,72

Salçalı meyane soğutma prosesinin CFD analizleri, Tablo 3'teki deney tasarımına göre yürütülmüş; simülasyonların çıktısı olarak, soğutma tamburunun 270°'lik dairesel hareketi süresince soğutulan meyane tabakasının sıcaklık değişimleri alınmıştır (Şekil 5).

Analizlerde, granülasyon makinesinin ana operasyonel hedefi, kavurma ve döküm süreci sonrasında meyane soğutulmuş donma sıcaklığı olan 50 °C düzeyine indirilmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda ANSYS CFX 15.0'dan bütün operasyonel senaryolar (P1-9) için meyane sıcaklığının tambur yüzeyindeki pozisyonuna bağlı değerleri çıktı dosyalarına yazdırılmış; daha sonra bu veriler üzerinde çalışarak tambur pozisyon koordinatlarından açısal pozisyonlar elde edilmiştir. Tambur üzerindeki meyane hangi açı değerinde 50 °C seviyesine ulaştığı Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Salçalı meyane üretimi için Tablo 3'te verilen süreç parametreleri varyasyonlarına göre ANSYS CFX 15.0 programında gerçekleştirilen soğutma proses simülasyonlarında sayısal olarak modellenen soğutma tamburu yüzeyinde öngörülen sıcaklık dağılımları.

4. SİMÜLASYON ÇIKTILARININ YORUMLANMASI

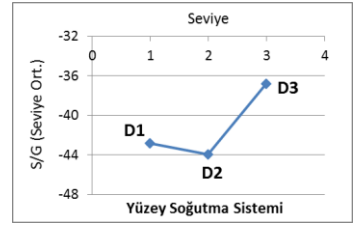
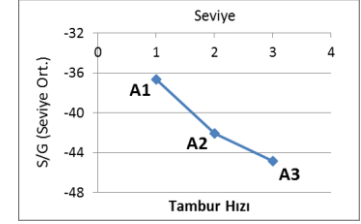
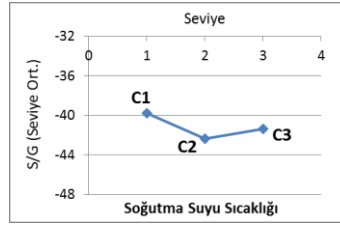
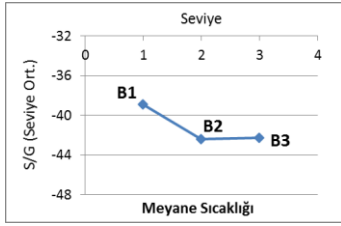
Deney tasarımında performans karakteristiği, bu nedenle “en küçük – en iyi” olarak seçilmiştir. Bu durumda, en düşük açılal pozisyonda 50 °C'ye ulaşma, en iyi sonuç anlamına gelecektir. Taguchi yönteminde “en küçük – en iyi” performans karakteristiğinde sinyal/gürültü (S/G) oranı (7) ile ifade bulunmaktadır [16], [17], [18]. Bu denklemde y_i , performans karakteristiğinin i . gözlem değeri; n ise bir denemede test sayısıdır.

$$S/G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (7)$$

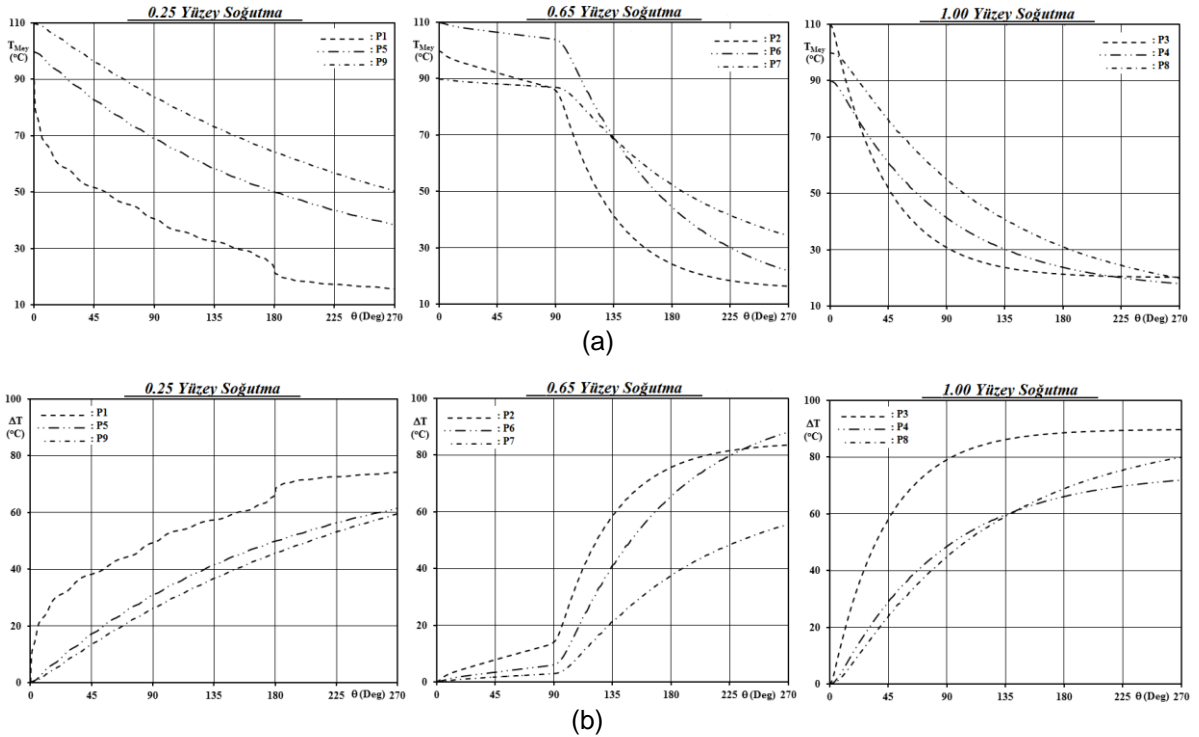
Parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/G değerleri Tablo 3'te; ortalamaları ise Şekil 6'da verilmiştir. Parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesi için, seviyelere karşılık gelen ortalama S/G değerleri grafik üzerine aktarılmıştır (Şekil 6).

Optimum meyane granülasyon prosesi koşullarının, tam konsantrik tambur soğutma sistemi tasarımı; 0.5 rpm'lik tambur hızı; 90 °C'lik meyane sıcaklığı ve 10 °C'lik soğutma suyu sıcaklığı ile sağlandığı Şekil 6'dan, parametrelerin her seviyesindeki S/G ortalamaları içerisinde maksimum değerlerin takibi ile anlaşılmaktadır. Bu kombinasyonun, salçalı meyaneyi 26,90°'lik açılal pozisyonda 50 °C sıcaklığa soğutabileceği tahmin edilmiştir. Ele alınan parametrelerin soğutma performansına etki dereceleri ise, Şekil 6'da görülen ortalama S/G değerleri arasındaki fark ile orantılı olacağı öngörülmüştür.

Parametreler		Her Seviyedeki S/G Oranlarının Ortalaması (dB)			Maks-Min (dB)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
A	Tambur Hızı (rpm)	-36,65	-42,05	-44,85	8,20
B	Meyane Sıcaklığı (°C)	-38,88	-42,41	-42,25	3,53
C	Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C)	-39,80	-42,36	-41,39	2,55
D	Yüzey Soğutma Sistemi	-42,82	-43,92	-36,81	7,12
Optimum Seviye		A	B	C	D
Optimum Seviye Kodu		1	1	1	3
Optimum Seviye Değerleri		nA1	nB1	nC1	nD3
Tüm S/G Oranlarının Ortalaması (nm, dB)		41,18			
Optimum Açıl Konum Tahmini (n-opt, dB)		$nm+(nA1-nm)+(nB1-nm)+(nC1-nm)+(nD3-nm) = 26.90^\circ$			



Şekil 6. Parametre seviyelerinin ortalama Sinyal/Gürültü oranları ve minimum değerlerinden salçalı meyane için optimum seviye kombinasyonunun belirlenmesi.



Şekil 7. Yüzey soğutma sistemleri 0.25; 0.65 ve 1.00 ile tambur yüzeyindeki salçalı meyane sıcaklığının (a) ve soğuma miktarının (b) açıl pozisyona bağlı değişimi.

Meyane sıcaklığı (T_{Mey}) ile soğuma miktarı (ΔT) sonuçlarını tambur yüzeyinde açıl pozisyona bağlı olarak grafiğe aktarılması uygun görülmüştür. Bu bağlamda Şekil 7.a, tambur yüzeyindeki meyane sıcaklığının açıl pozisyona bağlı değişimini, her üç yüzey soğutma sistemi (0.25; 0.65 ve 1.00) için göstermektedir. Kanallı tip (0.25) yüzey soğutma sistemiyle süreç senaryoları P1, P5, P9 iken; havuz tipinin (0.65) söz konusu olduğu senaryolar P2, P6, P7 ve konsantrik tipin (1.00) söz konusu olduğu senaryolar ise P3, P4, P8'dir. Bu grafiklerde gözlemlenmesi gereken ana bulgu; meyane sıcaklığının hedef değer olan 50 °C düzeyine indirilebilmesidir. Simülasyon sonuçları, P9 senaryosu dışındaki bütün çalışma şartlarında meyane sıcaklığının istenen sıcaklığa düşürülebildiğini göstermektedir.

Öte yandan, P9 senaryosuna ait parametreler incelendiğinde şu tespitler yapılmıştır:

- Tambur dönme hızı $n=1.5$ rpm ile en yüksek seviyede olması, meyane ile tamburun teması; buna bağlı olarak da soğuma süresini kısaltmaktadır. Açısız hızdaki artış soğuma üzerinde negatif etki yapmaktadır. Bu bulgu Şekil 7.b'de verilen soğuma seviye sonuçları ile birebir örtüşmektedir.
- Meyanenin tambura sevk sıcaklığı da $T_{Mey}=110$ °C ile en yüksek değerindedir. Yukarıdaki tespitle birlikte bu noktada yapılması gereken tespit, meyanenin başlangıçtaki sıcaklık değeri kayıt altına alınarak tambur hızı gerekirse düşürülmelidir.
- Soğutma suyu sıcaklığı ortalama bir değer olan $T_{Su}=15$ °C'dir. Bu durum soğutma suyu sıcaklığının özellikle tambur hızına göre ikincil etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak bu senaryoda soğutma suyu sıcaklığı için üst değer olan $T_{Su}=20$ °C'nin seçilmiş olması durumunda, meyanenin çıkış sıcaklığının daha da yüksek olacağı da tahmin edilmektedir.
- Şekil 7.a'da 0.65 ve 1.00 yüzey soğutma sistemleri için elde edilen sonuçlarda da en yüksek meyane çıkış sıcaklığı, tambur hızının en yüksek ($n=1.5$ rpm) olduğu P7 ve P8 senaryolarında tespit edilmiştir. Bu bulgu, soğutma sisteminin tasarımından (0.25; 0.65 veya 1.00) bağımsız olarak, tambur hızının soğuma seviyesi ΔT ile ters orantılı olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan tespit Şekil 7.b'de sunulan eğilimlerle de bütünüyle örtüşmektedir.

Yukarıdaki tespitleri tamamlar nitelikte olmak üzere Şekil 7.b, düşük tambur hızındaki ($n=0.5$ rpm) senaryolarda (P1, P2, P3) meyanenin soğuma seviyesinin (ΔT) diğer parametrelerden (meyane giriş sıcaklığı, soğutma suyu sıcaklığı ve soğutma sistemi) bağımsız olarak en yüksek değeri aldığını göstermektedir.

Bu noktaya kadarki tespitler bütünü ile tambur hızının soğuma seviyesi üzerinde birincil seviyede etkili olduğunu göstermekte ve hızın düşük seviyede tutulmasının soğuma seviyesini arttıracaklarını ortaya koymaktadır. Diğer taraftan tambur hızının azaltılmasının birim zamanda üretim miktarını azaltacağı göz önüne alınırsa, tambur hızına karar verirken, soğuma seviyesi ile birlikte üretim miktarının da eş zamanlı düşünülmesi gerekliliğine vurgu yapılmalıdır.

Yukarıdaki hususlara ilave olarak Şekil 7.a-b, tasarımı 0.25 olarak kodlanan kanallı tip yüzey soğutma sisteminin operasyonel açıdan diğer iki tasarım alternatifine (0.65 ve 1.00) göre daha yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Bu tespite bağlı olarak, havuz tipi (0.65) ve konsantrik tip (1.00) yüzey soğutma sistem alternatifleri arasında karar verebilmek için simülasyon çıktılarının farklı bir bakış açısı ile irdelenmesinin gerekliliği kendisini göstermektedir.

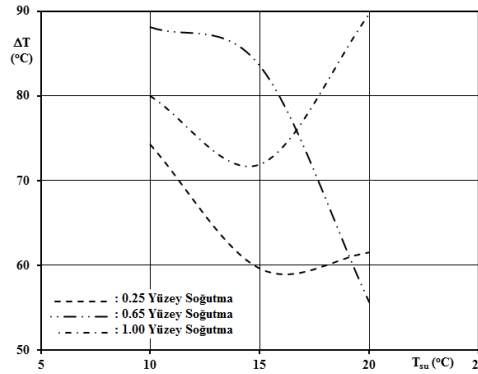
Tablo 4. Salçalı meyanede yüzey soğutma sistemleri 0.25 (a); 0.65 (b) ve 1.00 (c) ile öngörülen soğuma miktarları.

(a)				(b)			
0.25 YÜZEY SOĞUTMA				0.65 YÜZEY SOĞUTMA			
Operasyonel Senaryo =	P1	P9	P5	Operasyonel Senaryo =	P6	P2	P7
Tambur Hızı (Rpm) =	0.5	1.5	1	Tambur Hızı (Rpm) =	1	0.5	1.5
Meyane Sıcaklığı (°C) =	90	110	100	Meyane Sıcaklığı (°C) =	110	100	90
Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C) =	10	15	20	Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C) =	10	15	20
Soğuma Miktarı (°C) =	74.25	59.62	61.52	Soğuma Miktarı (°C) =	88.12	83.56	55.63
Ortalama Soğuma Miktarı (°C) =	65.13			Ortalama Soğuma Miktarı (°C) =	75.77		

(c)			
1.00 YÜZEY SOĞUTMA			
Operasyonel Senaryo =	P8	P4	P3
Tambur Hızı (Rpm) =	1.5	1	0.5
Meyane Sıcaklığı (°C) =	100	90	110
Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C) =	10	15	20
Soğuma Miktarı (°C) =	79.99	71.91	89.67
Ortalama Soğuma Miktarı (°C) =	80.52		

Yüzey soğutma sistemi tasarım alternatiflerinin kıyaslanmasına yönelik olarak yürütme gereği duyulan ek tartışmaya zemin oluşturması amacı ile Tablo 4 hazırlanmıştır. Burada her bir tasarım alternatifine (0.25; 0.65; 1.00) ait operasyonel senaryolar, soğutma suyu sıcaklığı küçükten büyüğe ($T_{su}=10-20$ °C) doğru olacak şekilde sıralanmıştır. Tabloda her bir senaryo için soğuma miktarları ΔT olarak verilirken, yüzey soğutma sistemleri ile elde edilen ortalama soğuma miktarları (ΔT_{ort}) da ortaya konmuştur.

Tablo 4, üç tip yüzey soğutma sistemi (0.25; 0.65 ve 1.00) için ortalama soğuma miktarlarının sırası ile $\Delta T_{ort}=65.13$ °C; 75.77 °C ve 80.52 °C olduğunu işaret etmektedir. Bu bulgu Şekil 7'deki tespit ile paralellik göstererek, 0.25 yüzey soğutma sisteminin diğer iki yapısal tasarım alternatifine göre daha başarısız olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan 0.65 ve 1.00 yüzey soğutma sistemlerine ait ΔT_{ort} değerlerinin mukayese edilebilir olması, soğuma değerlerinin soğutma suyu sıcaklığı (T_{su}) ile ilişkisinin irdelenme gereği hissedilmiştir. Bu doğrultuda, farklı soğutma sistemleri için Şekil 8'de verilen $\Delta T-T_{su}$ grafiği hazırlanmıştır.



Şekil 8. Salçalı meyane yüzey soğutma sistemleri 0.25; 0.65 ve 1.00 ile farklı soğutma suyu sıcaklıklarında elde edilen soğuma miktarları.

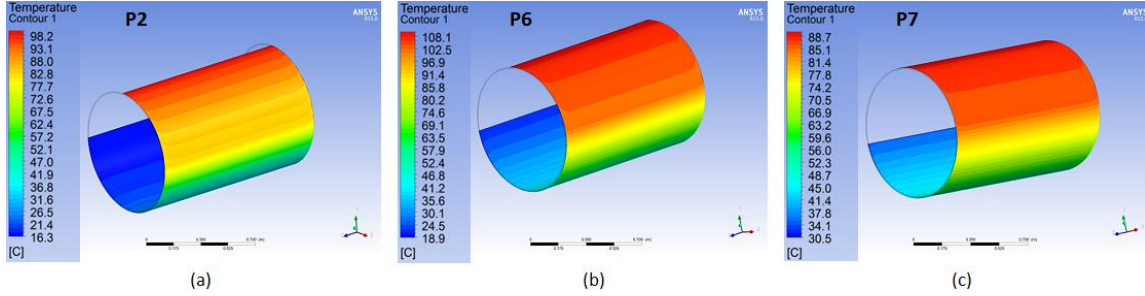
0.65 yüzey soğutma sisteminin $T_{su}<17$ °C için en yüksek soğuma seviyelerini sağladığı Şekil 8'de görülmektedir. Öte yandan, her ne kadar $T_{su}=20$ °C için 1.00 yüzey soğutma sistemi (P3 senaryosu) 0.65'e göre (P7 senaryosu) daha başarılı olarak gözüksün de; Tablo 3 ve Tablo 4'ten görüleceği üzere, P3 senaryosunda tambur hızı en düşük değer olan $n=0,5$ rpm iken, P7 senaryosunda en yüksek değer olan $n=1,5$ rpm'dir. Diğer bir deyişle, buradaki soğuma seviyesi, soğutma suyu sıcaklığından ziyade tambur hızına bağlı olarak şekillenmiştir. Tambur hızının soğuma seviyesi üzerinde en etkin parametre olduğu ve aralarında ters orantı bulunduğu dair önceki tespitler hatırlanırsa, Şekil 8'de kendisini $T_{su}>17$ °C için gösteren 0.65 ve 1.00 soğutma sistemleri arasındaki değişen eğilimin nedeni de göstermiş olacaktır. Sonuç olarak varılan tespit; Şekil 3.a ile gösterilen havuz soğutma sisteminin (0.65) farklı salçalı meyane giriş sıcaklığı, soğutma suyu sıcaklığı ve tambur hızı şartlarında diğer tasarım alternatiflerine göre (0.25; 1.00) daha başarılı/etkin soğuma sağlamakta olduğudur.

Salçalı meyane için yürütülen CFD analizleri, havuz tipi (0.65) yüzey soğutma sisteminin hedeflenen soğutma performansını sağladığını ortaya koymuştur. Bu tespiti sade meyane için de doğrulamak amacıyla Tablo 3'te verilen P2, P6 ve P7 senaryoları, fiziksel özellikleri Tablo 5'te verilmiş olan sade meyane için de yine ANSYS CFX 15.0 simülasyonlarıyla incelenmiştir.

Tablo 5. Sade meyane, tambur malzemesi ve suyun CFD analizlerinde kullanılan fiziksel özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Viskozite (Pa.s)	Özgül Isı (kJ/kg K)	Isı İletim Katsayısı (W/m K)
Sade Meyane – 90 °C	1199	1.7	1917	0.232
Sade Meyane – 100 °C	1191	1.7	1924	0.232
Sade Meyane – 110 °C	1190	1.7	1930	0.231
AISI316	8000	-	500	16.3
Su	997	0.0008899	4181.7	0.6069

Yapılan CFD analizlerinde, önceki aşamada salçalı meyane için yürütülen çalışmaya benzer şekilde, tamburun 270°'lik dönüşü süresince meyane tabakası için öngörülen sıcaklık değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Sade meyane için 0.65 yüzey soğutma sistemi ile üretimine yönelik elde edilen sonuçlar ise Tablo 6'da sayısal değerleriyle sunulmuştur. Sade meyane için soğuma değerleri, Tablo 4'te salçalı meyane için aynı senaryolarda öngörülen değerlerle kıyaslandığında, sonuçların eşit denecek kadar birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu tespit, havuz tipi (0.65) soğutma sistemi ile tasarlanacak granülasyon makinesinin meyane tipinden bağımsız olarak, hedeflenenle uyumlu soğutma yetkinliğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Sade meyane üretimi için Tablo 3'te havuz tipi (0.65) yüzey soğutma için verilen süreç parametreleri varyasyonlarına göre ANSYS CFX 15.0 programında gerçekleştirilen soğutma proses simülasyonlarında sayısal olarak modellenen soğutma tamburu yüzeyinde öngörülen sıcaklık dağılımları.

Tablo 6. Sade meyane için havuz tipi (0.65) yüzey soğutma sistemi ile öngörülen soğuma miktarı.

0.65 YÜZEY SOĞUTMA			
Operasyonel Senaryo =	P6	P2	P7
Tambur Hızı (Rpm) =	1	0.5	1.5
Meyane Sıcaklığı (°C) =	110	100	90
Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C) =	10	15	20
Soğuma Miktarı (°C) =	88.65	83.64	55.98
Ortalama Soğuma Miktarı (°C) =	76.09		

SONUÇ

Sade ve salçalı meyane üretiminde kullanılacak granülasyon makinesinin soğutma tamburunda, soğutma prosesi için yürütülen CFD simülasyon çalışmalarının sonucunda; geliştirilen granülasyon makinesinin 0.65 yüzey soğutma sistemli (%65 dolu havuz tipi) tasarımının, sade ve salçalı meyane için, farklı meyane sıcaklıkları (90-110 °C), soğutma suyu sıcaklıkları (10-20 °C) ve tambur hızlarında (0.5-1.5 rpm), tamburun 3/4 devrine kadar meyaneleri 50 °C'ye soğutabilme koşulunu sağlamada operatif başarı göstereceği tespit edilmiştir.

İstatistiksel deney tasarımı ve sayısal analiz çıktılarına göre yapılan değerlendirme sonucunda, enerji verimli bir üretim için konsantrik sistemin seçilmesi daha uygun bir çözüm olarak belirirken; aralarında dar bir mesafe ile konsantrik olarak iç içe geçmiş, sacdan kıvrıma ve ince cidarlı iki tüpün imalatında toleransların sağlanamaması riski, imalatındaki duruş riskleri ve işçilik maliyetleri, bu tasarıma sıcak bakılmamasına yol açmıştır. İmalatı ve işletmesi itibarıyla yapılabirliği ve işletilebilirliği en iyi ve en pratik tasarımın havuz tipi (0.65) soğutma sistemi olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, sade ve salçalı tip hazır meyane üretiminde kullanılacak granülasyon makinesinin tasarımında %65 suyla dolu havuz tipi (0.65) yüzey soğutma sistemi seçilmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmamızı, TÜBİTAK-1501 Programı çerçevesinde yürütülen 3131055 no.lu proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] ERASLAN, M., GÜLEGÜL, H.İ., SUNAR, F., UYGUR, F., PANAL, A., KONAKOĞLU, S., "Toplu Beslenme Sektörü Araştırması (Merkezi Mutfaklar)", T.C. Milli Eğitim Bakanlığı Mesleki ve Teknik Eğitim Araştırma ve Geliştirme Merkezi Başkanlığı, Ankara, 2003.
- [2] Endüstriyel Hazır Yemek Sektörü Genel Durum Değerlendirmesi, Bursa Yemek Sanayicileri Derneği (BUYSAD) Basın Bülteni, 06 Temmuz 2010, Bursa. (<http://www.buysad.org.tr/duyurular.php>)
- [3] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemlerini Güçlendirme Projesi, Yiyecek İçecek Hizmetleri, Fond ve Temel Çorbalar Ders Notları, Ankara, 2007.
- [4] AHRNE, L., CHAMAYOU, A., DEWETTINCK, K., DEYPERE, F., DUMOULIN, E., FITZPATRICK, J., MEESTERS, G., Processing of Food Powders, 341-368. Edited by AGUILERA, J.M., PETER, P.J., "Food Materials Science, Principles and Practice", Springer, New York, USA, 2008.
- [5] HELDMAN, D.R., SIGH, R.P., Gıda İşleme Mühendisliği, Çeviren: EVRANUZ, Ö., ÇATALTAŞ, İ., İnkılap Kitapevi, İstanbul, 1980.
- [6] CEMEROĞLU, B., "Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler", Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, No:29, Ankara, 2010.
- [7] CLELAND, D.J., VALENTAS, K.J., Prediction of Freezing Time and Design of Food Freezers, 71-124. Edited by VALENTAS, K.J., ROTSTEIN, E., SINGH, R.P., "Handbook of Food Engineering Practice", CRC Press, New York, USA, 2009.
- [8] TOLEDO, R.T., "Fundamentals of Food Process Engineering", Springer, New York, USA, 2007.
- [9] ONITA, N., IVAN, E., Estimation of the Specific Heat and Thermal Conductivity of Foods Only by Their Classes of Substances Contents (Water, Proteins, Fats, Carbohydrates, Fibers and Ash), Agroalimentary Processes and Technologies, 11, 1, 217-222, 2005.
- [10] FRICKE, B.A., BECKER, B.R., Evaluation of Thermophysical Property Models for Foods, HVAC&R Research, 7, 4, 311-313, 2001.
- [11] CHOI, Y., OKOS, M.R., Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods", Food Engineering and Process Applications, 1: 93-101, 1986.
- [12] MERRIT, S.G., "The Effect of Various Combinations of Whole Wheat Flour and Modified Food Starch and Whole Wheat Flour and Wheat Flour on Freeze-Thaw-Reheat Stability as Measured by Viscosity in Roux-Gravy", MS Thesis, University Wisconsin-Stout, Menomonie, WI, 2012.
- [13] KATO, Y., Chemical and Sensory Changes in Flavor of Roux Prepared from Wheat Flour and Butter by Heating to Various Temperatures, Food Sciences and Technology Research, 9, 3, 264-270, 2003.
- [14] NICOLAI, B.M., VERBOVEN, P., SCHEERLINCK, N., Modelling and Simulation of Thermal Processes, 91-112. Edited by RICHARDSON, P., "Thermal Technologies in Food Processing", Woolhead, Cambridge, UK, 2001.
- [15] AUGUSTO, P.E.D., CRISTIANINI, M., Computational Fluid Dynamics Evaluation of Liquid Food Thermal Process in a Brick Shaped Package, Ciencia e Tecnologia de Alimentos, 31, 134-141, 2012.
- [16] GÖKÇE, B., TAŞGETİREN, S., Kalite İçin Deney Tasarımı, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6, 1, 71-83, 2009.
- [17] BAYNAL, K., Çok Yanıtlı Kalite Karakteristiklerinin Eşzamanlı Eniyilenmesinde Taguchi Yöntemi ve Otomotiv Endüstrisinde Bir Uygulama, Endüstri Mühendisliği Dergisi, 16, 2, 1-24, 2005.
- [18] MEZARCIÖZ, S., OĞULATA, R.T., Süprem Kumaşlarda Patlama Mukavemeti Değerinin Taguchi Ortogonal Dizayna Göre Optimizasyonu, Tekstil ve Konfeksiyon, 4, 320-328, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Cemil Günhan ERHUY

1976 yılı Silifke-Mersin doğumludur. 1997 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Aynı Üniversiteden 2001 yılında Yüksek Mühendis; 2008 yılında Doktor unvanını almıştır. 1999-2004 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2004-2007 yılları arasında Ermetal Şirketler Grubu ve Erkalip A.Ş. bünyesinde Ar-Ge Proje Koordinatörü ve Kalite Mühendisi olarak görevler üstlenmiştir. 2009 yılında Platform A.Ş.'nin bir Tofaş projesinde Araştırmacı olarak görev almıştır. 2009-2010 yıllarında vatani görevini yedek subay olarak yerine getirdikten sonra, 2011-2012 yıllarında Tofaş Ar-Ge Merkezinde İleri Araştırmalar Uzmanı olarak görev yapmıştır. 2012-2013 yıllarında Urtim firmasında Ar-Ge Müdürü olarak çalışmıştır. 2013 yılında Ermetal A.Ş. Ar-Ge Merkezinde Teknolojik Araştırmalar Planlama ve Koordinasyon Şefi olarak atandığı görevini, 2014 yılından beri aynı alandan sorumlu Ar-Ge Müdür Yardımcısı olarak sürdürmektedir.

Mehmet GÖKÇEDAĞLIOĞLU

1967 yılı Samsun doğumludur. 1988 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümündeki öğrenimini tamamlamıştır. Mezun olduktan sonra 1998 yılına kadar Tunaoğlu Otomotiv firmasında Kalite Müdürlüğü; 1998-1999 yılları arasında Dynacast Ltd. Şti.'de Üretim Müdürlüğü görevini yapmıştır. 1999-2011 yılları arasında Ermetal A.Ş. firmasında Teknik Müdür olarak görevini sürdürmüştür. 2011 yılında Ermetal A.Ş. Ar-Ge Merkezine Ar-Ge Müdürü olarak atanmış olup, halen bu görevini sürdürmektedir.

Mahmut Esat TANRIBİLİR

1980 yılı Adana doğumludur. 2007 yılında Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2007 yılından itibaren çeşitli özel kurumlarda Gıda Mühendisi olarak görev almış; 2011-2013 yılları arasında Ermetal Şirketler Grubu bünyesinde bulunan Ergıda A.Ş.'de Kalite Güvence Sorumlusu olarak çalışmıştır. 2014 yılından itibaren Ermetal A.Ş. Ar-Ge Merkezinde Gıda Teknolojisi alanında yürütülen çalışmalarda Araştırma Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.

Yıldırım KILIÇ

1970 yılında Avusturya'nın Viyana kentinde doğmuştur. 1995 yılında Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Bilimi ve Teknoloji Bölümünden mezun olmuştur. 1998-2004 yılları arasında Kerevitaş A.Ş.'de çalışmıştır. 2004-2013 yılları arasında Ergıda A.Ş.'de görev almıştır. 2014 yılından itibaren Ermetal A.Ş. Ar-Ge Merkezi bünyesinde Gıda Teknolojisi alanında yürütülen çalışmalarda Araştırma Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.

Mehmet TEKE

1980 yılı Ankara doğumludur. 2001 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Aynı üniversitede 2010 yılında yüksek lisansını tamamlamış ve doktora çalışmasına başlamıştır. 2003 yılında askerlik hizmetini tamamladıktan sonra, 2003-2005 yılları arasında Presmak A.Ş.'de Proje Mühendisliği; 2005-2010 yılları arasında Figes A.Ş.'de sırasıyla HAD Proje Mühendisliği ve HAD Proje Liderliği görevlerini yürütmüştür. 2010 yılında Anova Mühendislikte Uzman HAD Proje Mühendisi olarak göreve başlamış olup, halen bu görevini sürdürmektedir.

A. Alper ÖZALP

26 Temmuz 1972 İstanbul doğumludur. Yardımcı Doçent, Doçent ve Profesör unvanlarını sırasıyla 2002, 2006 ve 2011 yıllarında alan yazar halen Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Profesör unvanı ile akademik hayatına devam etmektedir. Aynı zamanda Uludağ Üniversitesi Teknoparkı'nda faaliyet gösteren TEMAS AR-GE firmasının da kurucu ortağıdır. A. Alper ÖZALP akademik kulvarda akışkanlar mekaniği, ısı transferi, kurutma prosesleri, lüle ve mikro-kanal akışları,



aero-endüstriyel gaz türbini uygulamaları ile hidrodinamik yağlama konularında araştırmalar yürütmekte ve pek çok SCI dergi makalesi ile ulusal ve uluslararası bildirisi bulunmaktadır. A. Alper ÖZALP kurucusu olduğu TEMAS AR-GE bünyesinde, başta otomotiv, makine, tekstil, imalat ve yazılım olmak üzere endüstriye yönelik tasarım, proje hazırlama/yönetimi ve simülasyon programı geliştirme faaliyetlerini sürdürmektedir.