

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ TİP KARIŞIK AKIŞLI MISIR
KURUTUCUDA HAVA AKIŞI VE ISI GEÇİŞİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra YİĞİN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nezaket PARLAK

Mayıs 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ TİP KARIŞIK AKIŞLI MISIR
KURUTUCUDA HAVA AKIŞI VE ISI GEÇİŞİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra YİĞİN

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**

Bu tez 09/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Doç. Dr.
Nezaket PARLAK
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
Hüseyin PEHLİVAN
Üye**

**Prof. Dr.
Yusuf ÇAY
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Esra YIĞIN

31.12.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, zorlu bir süreç olan tez sürecinde yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Nezaket Parlak’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma hayatımla paralel ilerleyen yüksek lisans eğitimim boyunca, tüm iş yoğunluğuna rağmen bana sonsuz anlayış gösteren ve daima manevi desteğini hissettiren değerli direktörüm Yük. Müh. Recep Ateş’e teşekkür ederim.

CDF yolculuğumda tanıştığım, değerli vaktini ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer meslektaşım Mert Selmanoğlu’na teşekkür ederim.

Son olarak beni ben yapan tüm değerleri borçlu olduğum, eğitim hayatım başta olmak üzere tüm hayatım boyunca destek ve sevgilerini tüm kalbimle hissettiğim sevgili babam Dr. İsmail Hakkı Yığın’a, annem Zuhale Yığın’a ve canımdan çok sevdiğim kardeşlerime binlerce kez teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3.	
MISIR VE MISIR KURUTMA	14
3.1. Mısırın Tanımı ve Tarihçesi	14
3.1.1. Mısırın kullanım alanları	15
3.2. Kurutma	16
3.2.1. Kurutma evreleri.....	16
3.3. Temel Kurutma Yöntemleri.....	17
3.3.1. Kontakt ile kurutma	17
3.3.2. Konvektif ile kurutma.....	18
3.3.3. Işınım ile kurutma.....	18
3.3.4. Dielektrik ile kurutma.....	18
3.4. Tahıl Kurutucular.....	18

3.4.1. Diğer kurutma sistemleri	20
3.5. Kurutmayı Etkileyen Faktörler	21
3.5.1. Kurutma havasının sıcaklığı	22
3.5.2. Kurutma havasının bağıl nemi	22
3.5.3. Kurutma havası hızı	23
3.5.4. Malzemenin kurutma sırasında istif şekli	23
3.5.5. Malzemenin cinsi ve kalınlığı	23
3.5.6. Malzemedeki nem farkı	23
3.5.7. Buharlaştırma yüzeyinin büyüklüğü	24
3.5.8. Kurutucunun ısı yalıtımı	24
3.5.9. Kurutucunun kapasitesi	24
 BÖLÜM 4.	
MISIR KURUTMA TESTLERİ	25
4.1. Materyal	25
4.2. Mısır Kurutma Testleri	26
 BÖLÜM 5.	
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ	30
5.1. Problem ve Sayısal Model	30
5.1.1. Korunum denklemleri ve ilave denklemler	33
5.1.2. Sınır şartları	35
5.1.3. Çözüm ağı bağımsızlığı	38
5.1.4. Gerçek kurutma geometrisinin (Model 5) HAD analizi	39
 BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR	41
6.1. Analiz Sonuçları	41
6.1.1. Model 1	41
6.1.2. Model 2	42
6.1.3. Model 3	44
6.1.4. Model 4	45

6.1.5. Model 5.....	47
6.2. Deney Sonuçları ile HAD Sonuçlarının Karşılaştırılması	53
BÖLÜM 7.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	66



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$P_{\text{giriş}}$	: Giriş basıncı (Pa)
ΔP	: Basınç düşümü (Pa)
$T_{\text{giriş}}$	: Giriş sıcaklığı (K)
$T_{\text{çıkış}}$	: Çıkış sıcaklığı (K)
T_1	: 10 cm'deki sıcaklık (K)
T_2	: 15 cm'deki sıcaklık (K)
T_3	: 25 cm'deki sıcaklık (K)
$V_{\text{giriş}}$	: Giriş hızı (m/s)
$V_{\text{çıkış}}$	: Çıkış hızı (m/s)
ΔP_{yerel}	: Yerel Basınç düşümü (Pa)
E_f	: Sıvı fazın enerjisi (J)
E_s	: Katı fazın enerjisi (J)
γ	: Ortam gözeneklilik değeri (birimsiz)
k_{eff}	: Termal iletkenlik (W/Mk)
S_f	: Akışkan entalpisi (kJ/kg)
K	: Yerel kayıp faktörü (birimsiz)
f	: Açık alan oranı (birimsiz)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
μ	: Dinamik viskozite (N.s/m ²)
ν	: Kinematik viskozite (m ² /s)
u	: X yönündeki hız (m/s)
v	: Y yönündeki hız (m/s)
w	: Z yönündeki hız (m/s)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
t	: Zaman (s)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kurutma evreleri grafiği	16
Şekil 3.2. Kule tipi tahıl kurutucu	19
Şekil 3.3. Kapalı tip karışık akışlı tahıl kurutucu.....	20
Şekil 4.1. Test materyalleri	25
Şekil 4.2. Kapalı tip mısır kurutma makinası.....	26
Şekil 4.3. Test şematiği	27
Şekil 4.4. Üçgen kanallı tahıl kurutma haznesi.....	28
Şekil 4.5. Operatör paneli ara yüzü	28
Şekil 4.6. Operatör paneli ara yüzü	29
Şekil 5.1. a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3.....	31
Şekil 5.2. Model 4	32
Şekil 5.3. Köşegen dizilime sahip Model 5.....	32
Şekil 5.4. Model 1 geometrisi	36
Şekil 5.5. Model 2 geometrisi	37
Şekil 5.6. Model 3 geometrisi	37
Şekil 5.7. Model 4 geometrisi	38
Şekil 5.8. Model 5 geometrisi	38
Şekil 5.9. Model 1 mesh yapısı	39
Şekil 5.10. Model 5 mesh yapısı	40
Şekil 6.1. Model 2 giriş hızı ile basınç düşümünün değişimi	43
Şekil 6.2. Model 2 hava giriş hızı ile sıcaklığın değişimi	44
Şekil 6.3. Model 3 HAD anaizi farklı giriş hızları ile sıcaklık değişimi.....	45
Şekil 6.4. Model 4 HAD analizi farklı giriş hızları için basınç düşümü değişimi .	46
Şekil 6.5. Model 4 HAD analizi farklı giriş hızları ile sıcaklık değişimi.....	46
Şekil 6.6. Model 5 Isıtma koşulunda zamana bağlı analiz grafiği	48
Şekil 6.7. Model 5 soğutma koşulunda zamana bağlı analiz grafiği.....	48

Şekil 6.8. Model 5 kurutma analizi sıcaklık dağılımı	49
Şekil 6.9. Model 5 hız dağılımı.....	49
Şekil 6.10. Model 5 basınç dağılımı	50
Şekil 6.11. Model 5 çıkış yüzeyi zamana bağlı soğutma analizi sıcaklık dağılımı	51
Şekil 6.12. Model 5 akış boyunca basınç dağılımı	51
Şekil 6.13. Model 5 akış boyunca hız dağılımı.....	52
Şekil 6.14. Model 5 akış boyunca sıcaklık dağılımı	52
Şekil 6.15. Model 5 soğutma koşulunda zamana bağlı sıcaklık değişimi.....	53
Şekil 6.16. Model 5 kurutma modül1 sıcaklık grafiği	54
Şekil 6.17. Model 5 kurutma modül2 sıcaklık grafiği	54
Şekil 6.18. Model 5 kurutma modül3 sıcaklık grafiği	55
Şekil 6.19. Model 5 soğutma modülü sıcaklık grafiği	55
Şekil 6.20. Model 5 tahıl yüksekliği- sıcaklık grafiği.....	56
Şekil 6.21. Tüm modellerin basınç düşümü karşılaştırma grafiği	57
Şekil 6.22. Model 5 ve teorik basınç düşümü grafiği	58

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Mısır aİt özellikler	35
Tablo 5.2. 3 Farklı eleman sayısında 2,8 m/s hız için sapma tablosu	39
Tablo 6.1. Farklı hızlar için Model 1 sürekli koşullu HAD analiz sonuçları	42
Tablo 6.2. Farklı hızlar için Model 1 zamana bağlı HAD analiz sonuçları	42
Tablo 6.3. Farklı hızlar için Model 2 HAD analizi sonuçları	43
Tablo 6.4. Farklı hızlar için Model 3 HAD analiz sonuçları	45
Tablo 6.5. Farklı hızlar için Model 4 HAD analiz sonuçları	46
Tablo 6.6. Gerçek geometride kurutma ve soğutma analiz sonuçları	47
Tablo 6.7. Tüm modeller için hıza bağlı analiz sonuçları	56
Tablo 6.8. Model 5 için hıza bağlı analiz sonuçları	57

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Gözenekli Ortam, Akış ve Isı Geçişi

Bu çalışmada, kapalı tip sürekli akışlı tahıl kurutma makinesinin, modüler tahıl haznesindeki kurutucu akışkan akışının ve ısı geçişinin deneysel ve nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Testler yaş mısır kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kurutma makinesinin tahıl haznesinin çeşitli konumlarına sıcaklık ve basınç ölçerler yerleştirilmiş bu sayede mısırın zamana bağlı olarak sıcaklıkları ve basınç düşümü değerleri belirlenmiştir. Tahıl kurutma haznesi kurutucu akışkan kanallı, kanalsız, kanallı köşegen dizilimli ve kanallı sıralı dizilimli olarak üç boyutlu bilgisayar destekli çizim programı CATIA ile tasarlanmıştır. ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak geometri, sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri (HAD) gerçekleştirilmiştir. Kurutma haznesi gözenekli ortam olarak tanımlanmış, farklı sınır şartlarında sürekli ve zamana bağlı çözümleri mısırın fiziksel özellikleri belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Dört model için farklı akış hızlarında aynı sınır koşullarında HAD analizleri yapılarak basınç düşümü ve çıkış sıcaklığı değerleri hesaplanmış, sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF AIR FLOW AND HEAT TRANSFER IN CONTINUOUS MIXED FLOW CORN DRYER

SUMMARY

Keywords: Drying, CFD, Porous Media, Flow and Heat Transfer

In this study, drying experiments of corn were carried out in a continuous type corn dryer which fed from the bunker. Various temperature and pressure switches are placed in the dryer chamber. In this way, the temperature and pressure drop of corn were investigated depending on time. Afterwards, the dryer chamber was designed with CATIA, a three-dimensional computer-aided drawing program, with no channels, diagonal arrangement with channels and sequential arrangement with channels. Geometry was modeled using finite element method by ANSYS Fluent software and flow analysis was performed. Continuous and time-dependent solutions of The drying chamber which defined as a porous medium were carried out under different boundary conditions by determining the physical properties of corn. Pressure drop and outlet temperature values were calculated by performing flow analyzes under the same boundary conditions at different flow rates for the four models and the results were presented comparatively.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkemizde tahıl grubu içerisinde en çok üretimi yapılan üçüncü ürün mısır olup, insan gıdası, hayvan yemi ve endüstri ham maddesi olarak kullanılan bir bitkidir. Mısır, hasadı eylül ekim aylarına rastlamakta olup, iklim koşullarının kurutmaya elverişli olmadığı yerlerde güvenli depolanabilmesi için tahıl kurutma makinelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek nem içeriği çürümeye, küflenmeye ve böceklenmeye sebep olmakta, doğal yollarla kurutma işlemi hem uzun süre almakta hem de ürün kaybına yol açmaktadır. Günümüzde, kısa sürede yüksek miktarda mısır kurutabilen depolara entegre çeşitli endüstriyel kurutma makineleri kullanılmaktadır. Söz konusu entegre sistemlerden biri çevre kısıtlarına uygun kapalı tip, sıcak hava kanallı sürekli akışlı kurutucuların, daha az enerji ile tahıl kalitesinin korunduğu, ürün kayıplarının daha az ve içerisindeki akış düzeni sayesinde homojen kurutma sağlayan sistemler olduğu bilinmektedir. Bu tip makinelerde ürün akışı yukarıdan aşağıya doğru gerçekleşir. Ürün önce sıcak havanın dolaştığı kurutma haznelerinden akar, ardından çevre havasının dolaştırıldığı soğutma haznelerinden geçerek soğur ve boşaltma sisteminden tahliye edilir. Sıcak hava ise yanma odasından bir fan vasıtasıyla önce kanallara, ardından tahılın içerisine sevk edilir. Kapalı tip sürekli akışlı tahıl kurutucularda, tahılın makine içerisinde kalma süresi; ürünün nem ve kalite gibi nihai özelliklerini, enerji sarfiyatını ve dolayısıyla kurutma verimini belirlemektedir. Kurutma sezonunda tesislere farklı üreticilerden gelen tahılların ilk nem değerlerindeki farklılıklar kontrol sürecini karmaşıktırır. Genellikle makineden çıkan ürünün nem değeri bir operatör vasıtasıyla elle numune almak suretiyle belirlenir, operatör kararına göre ürün depolama alanına veya kurutma makinesine gönderilir. Bu nedenle, anlık sıcaklık ve ürün neminin otomasyona dâhil edildiği haberleşmeli kontrol sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Kurutma haznesinde yaş ürünün nem içeriği zamanla azalmakta, ürün sıcaklığı ise azalan kuruma hızı periyodu sebebiyle artmaya başlamaktadır. Ürün sıcaklığı kurutma makinesi içindeki kalma süresini, dolayısıyla

boşaltma hızını ve mekanik tasarımda soğutma hacminin büyüklüğünü belirlemektedir. Farklı kapasitelerde kurutma makineleri tasarlanması durumunda kurutma hacmi ile soğutma hacmi arasında deneysel tecrübelerle dayalı belli oranlar dikkate alınmaktadır. Bu durum, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile tahılın kuruduğu ve soğuduğu hacim için akış ve ısı geçişi analizlerinin yapıp yapılamayacağı sorusunu gündeme getirmiştir. Bilindiği üzere, tasarım sürecinde deneysel çalışmalar hem maliyetli hem de daha fazla zaman ve emek gerektiğinden günümüzde ticari yazılımlar kullanmak suretiyle sayısal çalışmalar yapmak avantaj sağlamaktadır. Deneysel veriler ile doğrulanmış sayısal sonuçlar, tahıl haznesindeki hava akış kanallarının en uygun geometrik parametrelerinin ortaya çıkarılmasına, soğutma hacminin büyüklüğüne ve tahılın makine içerisinde kalma süresine cevap olabilir.

Bu çalışmada, Sakarya ilinde mısır kurutma tesisinde mevcut olan dört katlı kanallı yapıda tahıl haznelere sahip kapalı tip kurutma makinesinde mısır kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde belirli yerlere konumlandırılmış sıcaklık ölçerler ile hava sıcaklıkları ve basınç farkları ölçülmüştür. Tahıl haznesindeki hava akış kanallarının basınç düşümüne ve sıcaklıklara etkisini belirlemek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı hava hızlarında nasıl sonuçlar vereceğini görebilmek için kurutma haznesinin farklı modelleri oluşturulmuştur. Ürünün kurutma makinesine girişindeki yoğunluk, porozite gibi fiziksel özellikleri kullanılmıştır. Farklı hava hızları ve sıcaklıklarında analizler yapılmış ve basınç düşümü ve çıkış sıcaklığı incelenmiştir. Sonrasında kanallı yapının basınç düşümü ve sıcaklığa etkisini görebilmek için sıralı dizilimli ve köşegen dizilimli kanal yapılı geometri tasarlanmıştır. Kanallı yapıdaki modeller içinde aynı hız değerleri ve koşulları altında analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Daha sonrasında kanalların boyutu değiştirilerek yeni bir model oluşturulmuş ve aynı analizler bu model içinde gerçekleştirilerek, giriş debisinin değişiminin sıcaklık ve basınç düşümüne etkisi incelenmiştir. Son olarak deney düzeneğindeki kurutma haznesinin modeli oluşturulmuş ve doğrulanmış sınır şartları altında farklı hızlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, deney sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Plumb ve ark. [1] güney çamının kurutulması esnasında, ısı ve nem taşınımını gama zayıflatması kullanılarak deneysel olarak incelenmişlerdir. Kurutma hızının, yüksek nem içeriklerinde yüksek derecede sıcaklığa bağlı olmadığı ve Difüzyonun baskın taşıma mekanizması olması beklenen lif doygunluk noktasının altında, kurutma hızı biyolojik değişkenlik ve tane yöneliminden daha az etkilenirken sıcaklığın etkisinin belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Trelea ve ark. [2] bu çalışmada, kafes kurutma işleminin çevrim içi kontrolü için doğrusal olmayan bir tahmine dayalı optimal kontrol algoritması tanımlamışlardır. Kurutma toplu işlemi için doğrusal olmayan bir tahmine dayalı optimal kontrol algoritması tasarlanmış ve pilot ölçekli bir kurutucuda test edilmiştir. Tanımlanan kontrol algoritması, soğutma, sterilizasyon veya fermantasyon gibi diğer toplu işlemlere kolayca uyarlanabildiği belirlenmiştir.

Giner ve ark. [3] yaptıkları çalışmada, giriş ve çıkış hava kanalları etrafındaki havanın ve tahıl akışının iki boyutlu doğasının eşzamanlı, karşı ve çapraz akışlı yatak blokları kullanılarak modellendiği bir karma akışlı tahıl kurutma modeli gösterilmektedir. Model, ısıtılmış hava kanallarının yanından akan tahılın, egzoz kanallarının yanından akan tahıldan ayrı olarak modellenmesini sağlar, böylece ısıtma, kurutma ve buna bağlı olarak tahıl canlılığındaki kayıp hesaplanır. Sonuç olarak, ısıtma ve kurutmanın, bir dizi hava giriş kanalının yakınından geçen tahıl için, egzoz kanallarının yakınından geçen tahıldan daha yoğun olduğu bulunmuştur.

Tremblay ve ark. [4] konvektif ısı ve kütle transfer katsayılarının belirlenmesine yönelik su potansiyeline dayalı bir odun kurutma modelinin ısı ve kütle transfer denklemlerinin sınır koşullarının karakterizasyonu için bir deneysel yöntem

uygulamışlardır. Yöntem, ahşap numunenin nem içeriğinin ölçülmesi şeklindeydi. Sonuç; konvektif kütle transfer katsayısının ahşap yüzey nem içeriği yaklaşık % 80 e kadar sabit olduğunu ve sonra daha azaldığını veya nem içeriği daha da azaldıkça az ya da çok kademeli olarak azaldığını ve konvektif kütle transfer katsayısı hava hızı ile arttığı gözlemlenmiştir.

Etemoğlu ve ark. [5] kağıt kurutmanın ısı ve kütle transferi analizi için; hava ile kurutma yöntemini kullanarak bir model geliştirmişler ve kağıt kurutma işleminin teorik ve deneysel bulgularını karşılaştırmışlardır. Bu modelde, kurutma süresince kağıdın bir gözenekli ortam sunduğu ve buharlaşan sıvının sıcaklığına karşılık gelen yarı doymuş bir değerde kaldığı kabul edilmiştir.

Mellmann ve ark. [6] karışık akışlı bir tahıl kurutucusunda kurutma işlemini hesaplamak için birleştirilmiş ısı ve kütle transferinin matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Bir dizi yarı-durağan kurutma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve hesaplanan sonuçlar, uygulama için uygun olan durağan çalışma döneminde göreceli olarak iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kararsız ters çalışma modlarını daha doğru bir şekilde tahmin etmek için modelde daha fazla iyileştirme yapmanın gerekli olduğu belirlenmiştir. Hedef, karışık akışlı tahıl kurutmanın model tabanlı proses kontrolünün yanı sıra kurutucu aparatını optimize edebilmek için gereken doğrulukta bir model elde etmektir.

Veladat ve ark. [7] bu çalışmada makarna kurutma işlemi sırasında birleştirilmiş ısı ve kütle transferinin iki boyutlu bir analizini açıklamışlardır. Kararlı durumda makarna çevresinde akan havanın hız ve sıcaklık dağılımları tahmin edilmektedir. Bu profiller ve ısı ve kütle sınır tabakaları arasındaki benzerlik kullanılarak, makarna yüzeyinin farklı noktalarında yerel konvektif ısı ve kütle aktarım katsayıları belirlenmiştir. Bu değerleri kullanarak, kararsız durumda makarna nesnesi içindeki birleştirilmiş ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümü elde edildi. Ayrıca hava akımının hızı, sıcaklığı ve bağıl nemi gibi çalışma koşullarının makarnanın kuruma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Duyarlılık analizi sonuçları, hava sıcaklığı ve bağıl nemin kuruma hızı üzerindeki etkilerinin hava hızının etkisinden daha önemli olduğunu göstermektedir.

Son olarak, bu analizden elde edilen sonuçlar literatürlerde belirtilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sunulan modelde ayarlanabilir parametre kullanılmazken iyi bir uyum gözlenmiştir.

Heikki ve Jukka [8] bu çalışmada, artırılmış kurutma havası sıcaklığı kullanarak ve ölçeği küçültülmüş bir karma akışlı kesikli tahıl kurutucusunda kurutma hava akışını yönlendirme suretiyle elde edilen sistemin enerji tasarrufunu incelemiştir. Ürün olarak yulaf ve arpa kullanılmıştır. Yöntem, kurutma işlemi ilerledikçe kurutma hava akışı kademeli olarak azaltıldı ve kurutma havası sıcaklığının yükselmesine izin verilmesi şeklinde yapılmıştır. Sonuçlar, arpa kurutmak için %5 ve yulaf kurutmak için %14 enerji tasarrufu, arpa ve yulaf için sırasıyla %5 ve %17 buharlaşma oranında artış olduğunu göstermiştir. Ancak yulafta tane canlılığında bir miktar bozulma olduğu belirlenmiştir.

Jokiniemi ve Ahokas [9] ısı yalıtımının enerji tüketimi ve devridaimle karışık akışlı tip bir tahıl kurutucunun verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Gerçek enerji tüketimi, yalnızca biri yalıtılmış olan iki özdeş kurutma silosu içinde ölçülmüştür. Yalıtımlı kurutucu ile yalıtımsız kurutucu karşılaştırıldığında %16-%21 enerji tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir. Isı yalıtımının, kurutucudaki ısı kayıplarının çoğunu ortadan kaldırdığı ve suyun buharlaşmasını arttırdığı, böylece kurutucunun genel verimliliğini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Jokiniemi ve ark. [10] bu çalışmalarında devridaimli bir toplu tahıl kurutucusunda sürekli hava akış hızı kontrolü için mikro denetleyiciye dayalı gömülü bir kontrol sistemi tasarlamak ve bunu küçültülmüş bir araştırma kurutucusunda test etmektir. Kontrol sisteminin tasarlandığı gibi çalıştığını kanıtladı ve işlemin sonuna doğru kurutucu hava akış hızını sorunsuz bir şekilde azalttığı görüldü. Sonuçlar, kontrol sisteminin kurutucunun hem enerji verimliliğini hem de performansını arttırdığını, ancak sonuçlardaki varyasyonun da büyük olduğunu gösterdi.

Parlak [11] zencefilin, akışkan yataklı kurutmada hava sıcaklığı, akış hızı, nem ve yatak yüksekliğinin etkileri konusunda çalışma yapmıştır. Zencefil dilimlerinin

deneysel nem kaybı verileri, sekiz ince tabaka kurutma modeline uyarlanmıştır. İki terimli kurutma modeli, diğerlerine kıyasla 0.998 R² ile deneysel verilere daha iyi uyum göstermiştir.

Gornicki ve Kaleta [12] hacimli tahılın hava akışına direncini incelemişlerdir. Proses parametrelerinin etkisini, işlem parametrelerinin dökme tahılın hava akımına direnci üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Hava akışına karşı direncin tahıl nem içeriğindeki artışla azaldığını ve yoğun doldurma, basınç düşüşünde artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Yatay yöndeki yığın taneden hava akımına direnç, çoğu durumda, dikey yönden daha küçük olduğunu tespit etmişler. Yabancı maddelerle karıştırılmış taneler, temizlenmiş tanelere göre hava akışına daha fazla direnç sunduğunu gözlemlemişlerdir.

Jokiniemi ve ark. [13] yaptıkları çalışmada pasif bir paralel plakalı ısı eşanjörünün, özellikle dış ortam sıcaklığı düşük olduğunda, ısı eşanjörünün yüzeylerinde su yoğunlaşmasını sağlayarak tahıl kurutmada kayda değer bir enerji tasarrufu sağladığını göstermişlerdir. Devridaimli bir tahıl kurutucusunun egzoz havasından ısı enerjisini geri kazanmak için paralel bir plakalı ısı eşanjörü, teorik değerlendirmelerin yanı sıra ölçeği küçültülmüş bir araştırma kurutucusu ve deneysel ısı eşanjöründeki ölçümlerle incelenmiştir. Isı eşanjörü tatmin edici bir performans sergileyerek yaklaşık %18'lik bir ortalama enerji tasarrufu sağladı. Bu çalışma, ölçeği küçültülmüş bir araştırma kurutucusunda yürütüldüğünden, sonuçlar, kurutucu boyutuna göre ısı eşanjörünün ölçeği büyütülerek çiftlik ölçekli kurutucularda kullanılabilir.

Sahdev ve ark. [14] yer fıstığı açık güneşte kurutulması (OSD) için kütlesinin, Yer fıstığının (*Arachis hypogaea* L.) açık güneşte kurutulması (OSD) için kütlenin, konvektif ısı transfer katsayısı (CHTC) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneyleri, Hindistan'ın Rohtak şehrinde Mayıs (2016) ayı iklim koşullarında uygulamışlardır. 130 ve 198 g 'lık yerfıstığı numunelerini kütlesinde neredeyse hiçbir değişiklik kaydedilmeyene kadar kurutmuşlardır. Deneysel veriler, doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçta yer fıstığı kütlesinin artışıyla birlikte ısı transfer katsayısının da (CHTC) artışı gözlemlenmiştir.

Charmongkolpradit ve Luampon [15] manyok hamurunun ince tabaka halinde kurutulması için deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada etüv tipi bir kurutucu kullanılmıştır. Manyok hamuru üç farklı ısıda ve kütle değişmeyene kadar 20 dakikalık periyotlarda manyok hamuru kütlesi toplandı. Deneysel verilerde artan kurutma süresi ile nem oranı azalmış ve artan kurutma sıcaklığı ile kuruma süresi azalmıştır.

Onwude ve ark. [16] tatlı patates dilimlerinin kurutma kinetiğini incelemek için iki analitik model kullanarak, kurutma kinetiği, kütle ve ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonunda tarımsal ürünlerin kurutulmasında, düşük yoğunluklu orta kızılötesi uygulamalarının büyük bir potansiyel teşkil ettiğini rapor etmişlerdir.

Mellmann ve ark. [17] tarımsal ürünlerin hızlı ve güvenli bir şekilde korunması için kurutmanın hasat sonrası önemli bir işlem olduğunu, bu işlemin gerçekleşmesine yönelik Drying Group'un ATB Potsdam'daki tahılın tarımsal kurutulmasına yönelik güncel araştırma faaliyetlerini incelemişlerdir.

Turkan ve ark. [18] hava jetleri ile kurutma işlemini incelemişler, çarpma bölgesinde oluşan yüksek ısı ve kütle transfer katsayıları nedeniyle endüstride bu işlemin potansiyeli olduğunu göstermişlerdir. Yüksek hızlı ısıtılmış hava çarpma jetlerinin, özellikle paketlenme ve dönüştürme endüstrisi için döner preslerde buharlaşmalı mürekkep kurumasını iyileştirmede çok etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu yazıda, mürekkep kurutucu tasarımcılarına veri sağlamak amacıyla, ince mürekkep filmlerinin buharlaşarak kurutulmasını oluşturan ısı ve kütle transfer katsayılarının elde edilmesi için bir araştırma yapılmıştır. Son olarak, teorik sonuçlar sabit oran periyodu ve düşüş hızı periyodu için, özellikle kuruma süresi için tatmin edici bulunan bazı deneysel ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Reichert ve ark. [19] deneysel ölçümlerde, ölçüm gürültüsü ve sistematik hataların, ölçüm sonuçlarına etkisi üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Model tabanlı deney tasarımı için rastgele ve sistematik hata türleri dikkate alınmıştır. Optimal deney

tasarımını bulmak için biri Fisher Bilgi Matrisi (FIM), diğeri ortalama kare yeniden yapılandırma hataları (MSE) yaklaşımı kullanılmıştır. İki yaklaşımın değerlendirilmesi, FIM'in sistematik hataları dikkate almadığını ve ayrıca rastgele gürültü seviyesine bağlı olmadığını, MSE yaklaşımının sistematik hataları dikkate aldığını, ancak dezavantajına göre hesaplama açısından çok daha maliyetli olduğunu göstermiştir.

Koukouch ve ark. [20] zorlanmış taşınımlı kurutma yöntemini kullanarak ham zeytin presi (ROP) ve yağı alınmış zeytin presinin (DOP) kuruma sürecini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda Luikov sayısındaki artışın, kurutma sürecini hızlandırdığını ve belirli çiftler (Lu ve Ko) veya (Lu ve Pn) için, kurutmanın başlangıcında ortalama sıcaklığa göre ortalama su içeriğinde dikkate değer bir değişiklik olduğunu gözlemlemişlerdir.

Syahrul ve ark. [21] mısır tanelerinin kurutulmasında, akışkan yataklı kurutmanın termal modellemesi kurularak, nem transferinde hava sıcaklığı ve hava hızının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, akışkan yataklı kurutmanın termal verimlerinin mısırın nem içeriğinin azalması ve dolayısıyla artan kurutma süresi ile keskin bir şekilde azaldığını ve kurutma işleminin sonunda en düşük seviyeye geldiğini göstermektedir. Malzemeden nem transferi büyük ölçüde hava sıcaklığına, hava hızına ve malzemenin nem içeriğine bağlı olduğu görüldü. Model tahminleri ve mevcut deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

Çil ve ark. [22] hava sıcaklığı ve hızının mısır, fasulye ve nohutta kurutma performansına etkisini, laboratuvar ölçekli akışkan yataklı kurutma aparatı kullanarak incelemişlerdir. Üç farklı hava sıcaklığı ve iki farklı hava hızı uygulanarak kesikli kurutma deneyleri yapılmış, deneysel ve model sonuçlarını karşılaştırmak için de Henderson ve Pabis modeli kullanılmıştır. Laboratuvar ölçekli akışkan yataklı kurutma aparatı kullanıldı. Deneysel ve model sonuçları arasında performans kriteri olarak ortalama mutlak hatalar, ortalama karekök hatalar ve ortalama mutlak yüzde hata kullanılmıştır. Parçacıkların aktivasyon enerjisi değerleri literatürdeki benzer çalışmalarla aynı hızı göstermiştir.

Janas ve ark. [23] mısır tanelerinin depolanmadan önce kurutulması gerektiğinden yola çıkarak, kurutulma etkisini kontrol etmek için mısır tanesinde ısı ve kütle transferinin fiziksel bir modelini tasarlamışlardır. Bu amaçla, mısır tanesinde fiziksel bir ısı ve kütle transferi modeli tasarlandı. Fick ve Fourier denklemleri sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile çözüldü. Mısırın gerçek 3 boyutlu geometrisi NMR görüntüleme ile elde edildi ve daha sonra FEM hesaplamaları için gereken ağı oluşturmak için kullanıldı. Model, 50° C ile 100° C arasında sabit bir kurutma hava sıcaklığı ile akışkan yataklı kurutma sırasında mısır nemi ve tuzda çözünür protein içeriğinin evrimini doğru bir şekilde tanımladığı görüldü.

Correa ve ark. [24] bu çalışmalarında, mısır koçanlarının farklı hava sıcaklıklarında kurutma sürecini incelemek için bir logaritmik bir model kurulmuştur. Bu modelin kurulmasında ilk başta kurutma işlemi ile ilgili termodinamik özellikler belirlendi. Üç farklı sıcaklıkta mısır koçanları nihai nem içeriğine ulaşana kadar kurutuldu. Bunun için gözlemlenen verilere uyması için çeşitli tarım ürünlerinin kurutma sürecini tanımlamak için kullanılan geleneksel modeller kullanıldı. Mısır koçanlarının kurutma işlemi için Fick'in ikinci yasasının analitik bir çözümü anlamına gelen etkili difüzyon katsayısı (Def) belirlendi. Çalışma sonunda gözlemlenen verilere en iyi uyan modelin Logaritmik model olduğu sonucuna varılmıştır.

Ozahi ve Demir [25] mısır ve kabuksuz antep fıstığının kesikli tip akışkan yataklı kurutulması için mısır ve kabuksuz antep fıstığının kurutma performansı analizlerini yapabilmeye dönük test donanımı hazırlamışlardır. Test düzeneği, toplu tip akışkan yataklı kurutmada mısır ve kabuksuz antep fıstığının kurutma performansının analizleri için tasarlanmış, inşa edilmiş ve çalıştırılmıştır. Amaç belirsizlik analizleri ve kurutma parametrelerinin kurutma performansı üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Sonuç olarak atmosferik basınç altında çalıştırılan konvansiyonel kesikli tip akışkan yataklı kurutucularla ilgili bazı öncü çalışmalar da literatüre özgün bir katkı olarak tablolastırılmıştır.

Wei ve ark. [26] mısır tanelerindeki termo-fiziksel farklılıktan yola çıkarak çok aşamalı tavlama kurutma ile sürekli kurutma arasındaki ilişkiyi görmek için 3 boyutlu bir matematiksel model geliştirdiler. Simüle edilen sonuçlara göre, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ile kızılötesi termal görüntüleme ile elde edilen verilerin uyumlu olduğu görülmüştür. Değişken zamanlı çok aşamalı tavlama kurutmanın, sürekli kurutmaya göre daha kısa sürede gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çelik ve ark. [27] bu çalışmalarında, mısır kurutma işlemlerinde kullanılan kule tipi bir tahıl kurutucunun kontrol sisteminde kullanılacak model laboratuvar ölçekli bir test prototipi kuruldu. Endüstriyel kule kurutucularda olduğu gibi sıcak egzoz gazlarının kurutma odasına yatay olarak girmesine izin veren sabit yatak tasarımı yapıldı. Sonuçlar, en uygun modelin Midilli modeli olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiş ve endüstriyel kurutucuların kontrolünde kullanılmak üzere bir model önerilmiştir.

Çelik ve ark. [28] mısır kurutucusunun kurutma işleminin enerji ve ekserji analizlerini incelemişlerdir. 103 °C gaz sıcaklığında, $2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ve $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ olmak üzere iki farklı gaz hızında gerçek zamanlı bir tahıl nem ölçer ile kontrol edilen laboratuvar ölçekli bir kurutucuda deneyler gerçekleştirmişler ve sonucunda enerji kullanım oranlarının gaz hızıyla arttığını ve yüksek hızda maksimum ekserji veriminin oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Owusu-Sekyere ve ark. [29] mısır tanelerinin kuruma davranışını incelemek için matematiksel bir model kurmuşlardır. Bu model tanelerin kurtulmasında hava sıcaklığı ve hava hızının etkileri incelenmiştir. Mısır tanelerinin kurutucudaki kuruma davranışı da on (10) ince katmanlı matematiksel model kullanılarak araştırıldı. Modeller, deneysel ve tahmin edilen nem oranları arasındaki belirleme katsayısı (R^2) ve Ortalama Kare Hata (RMSE) değerlerine göre karşılaştırıldı. 50°C'lik bir ortalama kurutma havası sıcaklığında ve 2,5 m/s'lik kurutma havası hızında, ortalama nem içeriği (MC) %17,5 (wb) olan mısır, 3 saat kurutma ve ısı verim sırasıyla %81,1 ve %29,6 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, bu sonuçlar kurutma düşen oran döneminde gerçekleşti. Lojistik modeli, R^2 değeri 0.9902 ve RMSE değeri 0.04908

olan kurutucuda mısırın ince tabakalı kurutma kinetiğini en iyi şekilde tanımlamak için kullanıldı.

Giner ve ark. [30] çalışmalarında giriş ve çıkış hava kanalları etrafındaki hava ve tahıl akışının iki boyutlu yapısının eşzamanlı, karşı ve çapraz akışlı yatak blokları kullanılarak modellendiği bir karışık akışlı tahıl kurutma modeli sunmuşlardır. Model, ısıtılmış hava kanallarının yakınında akan tahılın, egzoz kanallarının yakınında akanlardan ayrı olarak modellenmesine izin verir, böylece ısıtma, kurutmadaki fark ve bunun sonucunda tahıl canlılığındaki kayıp hesaplanır. Her yatak türünde ısı ve kütle transferi ve tahıl canlılığı kaybı için önceden doğrulanmış simülasyon modelleri kullanmışlardır. Model tarafından tahmin edilen tahıl ve havanın nem içerikleri ve sıcaklıkları gözlemlerle tutarlı olduğu saptanmıştır.

Weigler ve ark. [31] bu makalenin amacı, partikül ve hava akışlarının sayısal ve deneysel olarak incelenmesiyle karışık akışlı kurutucuların geleneksel tasarımlarını değerlendirmek ve tasarım eksikliklerini keşfetmektir. Bu amaçla, ayrık eleman yöntemi (DEM) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak kurutucu geometrisi ve farklı hava kanalı düzenlemeleri (yatay ve diyagonal) incelenmiştir. Tane nem ve sıcaklık dağılımlarını değerlendirmek için kurutma deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, fazla nemi gidermek için ekstra kurutma maliyetlerinden (enerji), aşırı kurutma durumunda termal hasardan veya yetersiz kurutma durumunda sonraki depolama sırasında küf ve toksin oluşumundan kaçınmak için, karışık akışlı kurutucularda kurutma işlemini optimize etmeye ihtiyaç olduğu kanısına varılmıştır.

Liu ve ark. [32] mısır için derin yataklı mısır kurutma işleminin sayısal bir simülasyon sistemini kurmuşlardır. Tarım alanında yaygın olarak kullanılan su potansiyeli kavramı ve modelinin, vakumlu kurutma modelinin uygulanmasında faydalı olduğu kanıtlanmıştır ve tahıl kurutma ve depolamaya tanıtıldığından beri tahıl kurutma modelini keşfetmek için yeni bir yol sağlamıştır. Sayısal simülasyon ve ilgili deneysel araştırma sonuçlarına göre etkili olduğu kanıtlanmış derin yataklı mısır kurutma işleminin sayısal bir simülasyon sistemi kurmuş ve derin yataklı kurutmada desorpsiyon ve adsorpsiyonun bir arada var olduğunu ortaya koymuştur.

Yuan ve ark. [33] pirinç paketlerinin kurutulması sürecini incelemek için çok ölçekli ve çok katmanlı ısı ve kütle aktarım süreçlerini inceleyen bir model oluşturmuşlardır. Bu modeli doğrulamak için pirinç kurutma üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, kurulan modelin pirinç kurutmanın mekanik özelliklerini iyi açıklayabildiğini göstermiştir.

Olatunde ve ark. [34] ham pirincin silo sistemlerinde doğal havada kurutma işlemi sırasında tepeli, ters çevrilmiş ve düz yataklı tane kütle konfigürasyonlarındaki hava akımı dağılımı, gözenekli ortam formülasyonu ile üç boyutlu sonlu hacim yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Model, sivri şekilli tane kütlesi konfigürasyonunda uzun taneli pirinç içeren bir silodan elde edilen verilerle doğrulanmıştır. Sonuç olarak, ortalama tekdüze olmama katsayısı NUF'un tahıl kütlesi artığında düştüğü, eşit hava akımı dağılımının sağlanmasının 50 tona kadar mümkün olduğu, düşük hava akımlarının hızlı mikrobiyal büyümeye yol açabileceği belirlenmiştir.

Oksanen [35] bu çalışmada, toplu kurutma işlemi sırasında çift yatak modunun açılması önerilmektedir. Makale, bir çift yataklı karışık akışlı kurutucunun simülasyon çalışmasını sunmaktadır. Hava kanallarının yarısı kapatılarak tahıl yatağının derinliği azaltılmış, dikey yönde %100 artırılmıştır. Araştırma, bu homojen olmayan tahıl yatağında karşı basıncın nasıl değişeceğini gözlemlemektir. Simülasyon sonuçları, karşı basınçtaki artışın %67-77'den fazla olmadığını ve tahıl yatağından geçen hava akımının uzunluğunun %82 arttığını göstermektedir.

Wei. ve ark. [36] sıcak havayla kurutma sırasında gerilme çatlamasını tahmin etmek için çok bileşenli heterojenliğe dayalı bir nem-ısı transferi ve mısır taneleri stres modeli geliştirdiler ve bu modeli doğruladılar. Doğrulanmış model tarafından simüle edilen sonuçlara göre, her mısır bileşeninin nem gradyanının ve von Mises stresinin önce arttığını ve sonra azaldığı görüldü.

Literatür araştırması sonucu mısır dışında birçok ürünün kurutması üzerine birçok deneysel ve sayısal modelleme üzerine çalışma olduğu [1-20] görülmüştür. Bu

çalışmalarda kurutma faktörleri ve bu faktörlerin kurutmaya olan etkileri incelenmiştir. Kurutma sürecinde olması gereken nem oranları ve kurutma parametresine göre bu oranlara etkisini incelemişlerdir. En yaygın ince tabaka modellerinden Midilli ve Luikov modelleri kuruma davranışı için önerilmiştir.

Mısır kurutma üzerine ise daha çok deneysel çalışmalar yapıldığı [21-29] görölmektedir. Kurutma prosesinde tüketilen enerjiyi azaltmak, kurutma faktörlerinin kurutma süresine etkisini görmek ve dolayısıyla kurutma verimini arttırmak ve daha verimli sistemler oluşturmak için diğeri ürünlerin kurtulmasında kullanılan modeller incelenmiştir. Çalışmalarda çoğunlukla ince tabakalı modeller kullanılarak mısırın kuruma davranışı ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, farklı geometriye sahip hazne ve sistemlerin kurutma süresine etkileri incelenmiştir.

Kurulan her modelin deneylerle doğrulanması hem daha fazla emek ve maliyet sarfiyatına hem de zaman kaybına neden olması hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinin önemini arttırmaktadır. Fakat literatüre bakıldığında tahıl kurutma üzerine yapılmış HAD çalışmalarının çok az olduğu [30-36] göze çarpmaktadır. Mevcut çalışmalarda akış kanallarının geometrisinin akışa etkisinin ve tahılın soğuma koşullarındaki sıcaklık değişimlerinin incelenmediği görölmüştür. Literatürdeki bu eksikliği gidermek üzerine, mısır kurutma prosesi ticari HAD yazılımı kullanılarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM 3. MISIR VE MISIR KURUTMA

3.1. Mısırın Tanımı ve Tarihçesi

Mısır, binlerce yıldır tarımı yapılan insan ve hayvan beslenmesinde önemli bir yer tutan bitkilerden biridir. Anavatanı Güney Amerika kıtasından Dünyanın her yerine yayılmıştır. Buğday ve arpadan sonra en geniş ekim alanına sahip mısırın, girişi kuzey Afrika kıtasından başlamıştır. Bitkiye mısır adının verilmiş olması da Mısır ve Suriye üzerinden girdiğinin belirtisidir. Yetiştirilmesinin kolay olması, birim alandaki veriminin yüksek olması, farklı bir çok alanda kullanılması ve zengin besin içeriğine sahip olması nedeniyle önemli bir tahıl bitkisidir [37].

Mısır, Güneş ışığından azami ölçüde yararlanabilen, fotosentez ve kuru madde oluşturma yeteneğinin çok yüksek olması nedeniyle verimli bir tahıldır. Dünya'da yetiştirilen mısır çeşitleri, 7 grupta incelenir. Bunlar; atdışi mısır, sert mısır, cin mısır, şeker mısır, klavuzlu mısır, unlu mısır ve mumlu mısırdır. En çok tarımı yapılan atdışi mısır ve sert mısırdır. Cin mısır ve şeker mısır türleri ise genelde çerezlik olarak kullanılır. Diğerleri fazla bir ekonomik değeri taşımaz. Ülkemizde, üretimin % 80' ine yakını sert mısır çeşidinden oluşur. Mısırın yetişmediği dünyada çok aza yer vardır.

Mısır ile buğdayı karşılaştırsak, mısır 2,5 ila 4,5 m boyunda dev bir bitki ve bir tohumdan 4 ay gibi kısa bir sürede koçanda yaklaşık 600 ila 1000 tohum üretirken, buğday yetiştirilmesi 7-8 ay kadar sürer. Tek seferde sadece 70 ile 120 cm boyunda bir bitki ve bitki başına ortalama 50 ile 100 tohum üretir. Sıcak iklim tahılları arasında yeralan mısır, insan yemi, hayvan yemi ve endüstriyel hammadde olarak kullanılan bir bitkidir. Sapları ve yaprakları hayvan yemi olarak kullanılır ve ayrıca kağıt yapımında ve küçük ölçekli hasır el sanatlarında kullanılır. Atıştırılmalık olarak da tüketilen mısırın yem, yağ, tatlandırıcı sektörü ve biyoyakıt-biyoetanol üretiminde son yıllarda

kullanımı artmaktadır. Gerek üretim gerekse dünya ticaretine konu olan miktar nedeniyle dünya tarım ürünleri pazarında çok önemli bir yere sahip olan mısır üretim alanları incelendiğinde ilk sıralarda Çin, ABD, Brezilya ve Hindistan yer almaktadır. Dünya mısır üretimi ve tüketimi son 5 yılda 1,1 milyar ton civarındadır. Artan hayvansal üretime bağlı olarak yem kullanımının yanı sıra endüstriyel kullanımdaki artışla ortaya çıkan yüksek talep seviyesi üretimi bu seviyelerde tutmaktadır. Dünya genelinde üretilen mısırın yüzde 60'ının hayvan yemi için, yüzde 20'sinin ise tohum ve diğer tüketim için, geri kalan kısımlarının ise doğrudan insan gıdası olarak kullanıldığı tahmin edilmektedir [37].

Mısır, buğday ve arpadan sonra ülkemizde, tahıllar arasında sonra en geniş ekim alanına sahiptir. Ülkemizde ana ürün ve ikincil ürün olarak üretilmektedir. Tahıllar arasında ilk ürün olan buğday, ağırlıklı olarak Adana, Konya, Mardin, Sakarya'da birinci, Mardin ve Şanlıurfa illerinde ise ikinci ürün olarak üretilmektedir. Ülkemizde dünya veriminin çok üzerinde verim elde etmemize rağmen üretimimiz tüketimimizi karşılayamamaktadır. Özellikle son dönemde dünyada etkili olan Covid-19 salgını nedeniyle ülkelerin sınırlarının kapandığı ve dış ticaret himayesinin azaldığı günlerde mısır üretiminin artırılması gerektiği düşünülmektedir [38].

3.1.1. Mısırın kullanım alanları

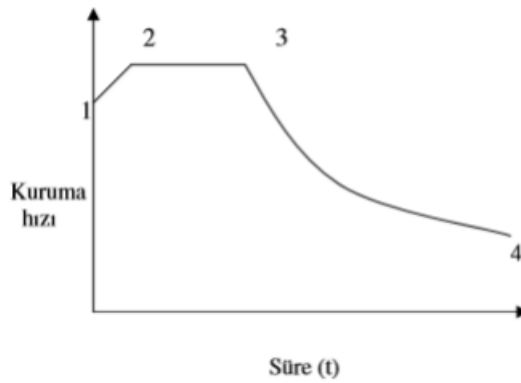
Mısırın birçok kullanımı vardır ve bitkinin her bir parçasının ayrı bir ekonomik değeri vardır. Bugün, mısırın doğrudan veya dolaylı olarak üretimine dahil olduğu yaklaşık 4000 farklı ürün bulunmaktadır. Mısırın başlıca kullanım alanları; hayvan yemi, yağ, taze tüketim, tatlandırıcı, şekerleme, çiklet, çikolata ürünleri, bebek mamaları, salata sosları, alkol, yüksek früktozlu mısır şurubu, diş macunu, (benzine katkı maddesi olarak) etanol ve otomotiv sanayii olarak gıda, mısır unu, nişasta, cips, çerez, tahıl ve yeşil kısımları konserve, malzemeleri, tekstil ve kozmetik sanayi temizlik şeklinde sıralanabilir. Dünya mısır üretiminin %60'ının hayvan yemi, %20'sinin insan gıdası (doğrudan tüketim), %10'unun işlenmiş gıda ve %10'unun diğer tüketim ve tohumlar için kullanıldığı bilinmektedir.

3.2. Kurutma

Genel tanımı ile kurutma; ürünlerde bulunan nemin amaca bağlı olarak izin verilen bir değere kadar buharlaştırılarak üründen uzaklaştırılmasıdır. Herhangi bir maddedeki nemin ısı ve kütle transferi yardımıyla alınması ve kurutma sıvısına (gaz, hava) taşınması prensibine dayanır. Endüstriyel ürünlerin işlenmesi için gıda ürünlerinin bozulmadan tutulması, uzun süre yaşayabilirliğinin korunması, ürün atıklarının değerlendirilmesi, ürün hacminin azaltılması ve depolama verimliliğinin artırılması gibi birçok nedenden dolayı kurutma yapılmaktadır. Tarımsal ürünlerin kurutulmasının amacı, ürünün depolama süresi boyunca stabilitesini sağlamak, başka bir deyişle ürünü sağlam tutmaktır.

3.2.1. Kurutma evreleri

Kurutma işlemi temel olarak bir ısı ve kütle transferi olgusudur. Ürün ve çevresi arasındaki ısı ve nem geçişlerinin bir sonucu olarak, ürün içindeki su buharlaşarak çevredeki hava ile karışır ve gider. Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi bu süreçte üç farklı aşama takip edilmektedir [39].



Şekil 3.1. Kurutma evreleri grafiği

Ürünün (1-2) kurutma aşaması, genellikle çok kısa sürdüğü için tarım ürünlerinin kurutma işleminde dikkate alınmayabilir. Sabit oranlı kurutma fazı (2-3), bu fazda, birim zaman başına kurutma malzemesinden buharlaşan su miktarı sabittir ve suyun

buharlaşması konveksiyonla ürünün yüzeyinden gerçekleşir. Bu aşamada malzemenin yüzeyinin ince bir su filmi ile kaplandığı varsayılmaktadır. Malzemenin iç kısmından yüzeyine taşınan suyun geliş hızı ve malzemenin yüzeyinden çıkan buharlaşma hızı eşittir. Malzemenin iç kısımlarından yüzeye su iletim hızı buharlaşma hızına göre azaldığında yüzeydeki su filmi kaybolmaya başlar ve bu faz sona erer ve "azalan hızda (3-4) kurutma fazı" başlar [39].

Mısırın hasat edilip işlendikten sonra bozulmadan ve kalıplanmadan uzun süre saklanabilmesi için kuru bazda%24-25 civarında olan hasat neminin %14-15'in altına düşürülmesi gerekmektedir. Mısırın kurutulması, mısırın üretim verimliliğini arttırmak, ekim alanlarından daha fazla faydalanmak ve yüksek nemi azaltarak bozulmadan uzun süre saklanabilmesini sağlamak için önemli bir işlemidir. Kurutma yöntemi olarak tahılların kurutulmasında uzun süredir kullanılan doğal güneşte kurutma yöntemi mısırın kurutulmasında da kullanılmakta ve ekonomik bir yöntemdir. Bununla birlikte, bazı olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuzlukları önleyen ve daha verimli olan diğer kurutma işlemi ise suni sıcak hava ile kurutmadır.

3.3. Temel Kurutma Yöntemleri

Tarım ürünlerinin kurutulmasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmasının yanı sıra kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayabilmelidir. Bu nedenle, birbirinden önemli ölçüde farklı olan çok çeşitli kurutucu türleri geliştirilmiştir. Tarımsal ürünlerin kurutulması için, güneş ışınlarının altına serilmesinden dielektrik kurutma tekniklerine kadar, bu işlemin gerekli olduğu ilk günlerden günümüze kadar birçok yöntem geliştirilmiştir.

3.3.1. Kontakt ile kurutma

Bu yöntemde kurutma için gerekli olan ısı enerjisi ısıtılan yüzeylerden iletilerek kurutulacak malzemeye iletilir. Kurutulmuş ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye temas eden ıslak malzemenin ısı iletkenliğine ve sıcak yüzeyin ısı iletkenlik katsayısına bağlıdır [40].

3.3.2. Konvektif ile kurutma

Bu yöntemde ısı, kurutma ortamından (genellikle sıcak hava) konveksiyonla ıslak malzemeye aktarılır. Sıcak hava, kurutulmuş ürün tabakasının üzerinden veya içinden geçirilir. Bu yöntemin ısı verimi, temasla kurutmadan daha düşüktür [41].

3.3.3. Işınım ile kurutma

Bu yöntemde kurutma için gerekli olan ısı enerjisi kızılötesi bölgedeki ışınlarla ıslak malzemeye iletilir. Bu ışınlar içinden geçtikleri ortamı ısıtmazlar; Onları emen nesneleri ısıtırlar. Kızılötesi ışınların ıslak malzemenin yüzeyinden etkilediği derinlik çok küçük olduğundan, bu yöntem tabakaları ince filmler şeklinde kurutmak için kullanılır [40].

3.3.4. Dielektrik ile kurutma

Nemli malzeme yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilirse, malzemenin içinde ısı oluşur. Nemli alanlar kuru alanlardan daha fazla ısı üretir. Bu şekilde malzemedeki nem profili otomatik olarak düzenlenir. Su, malzemeyi aşırı ısıtmadan buharlaşır [42].

3.4. Tahıl Kurutucular

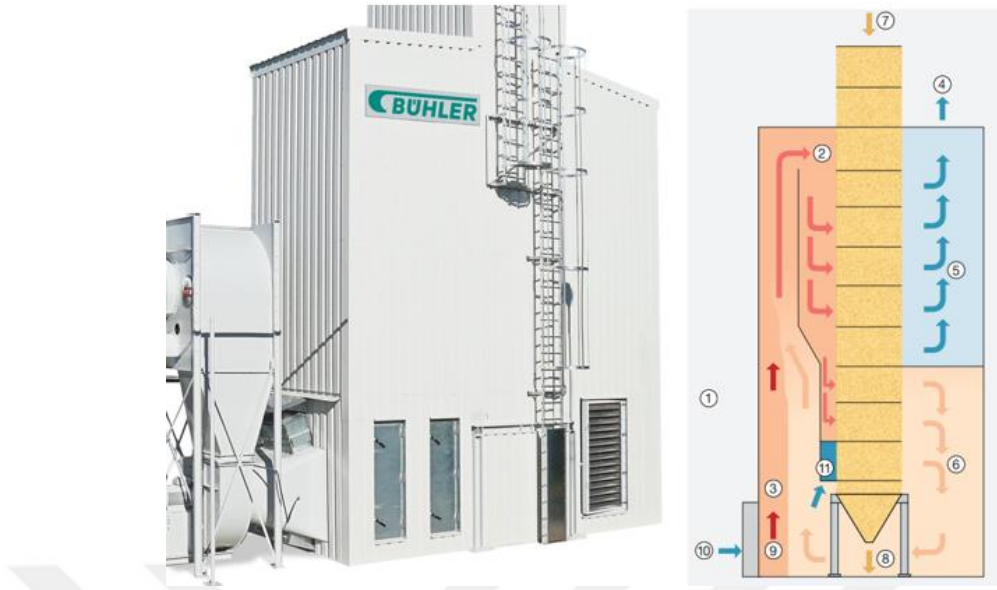
Endüstride tahıl genellikle yığın, kule, karışık akışlı katlı yatay tip veya karışık akışlı kapalı tip sürekli kurutucular ile kurutulmaktadır. Sürekli akışlı açık tip kurutma makinelerinin kapasiteleri 10 ile 80 ton/sa arasında değişmektedir. Kapalı tip modüler tahıl hazneli sürekli akışlı tahıl kurutucuların kapasiteleri ise 20 ton/sa ‘den 150 ton/sa kapasiteye kadar artırılabilir. Genel olarak bir kurutma makinesinde yanma odası, tahıl haznesi bölümü, kurutucu akışkanı sevk etmek için fanlar, hava akış kanalları ve tahılı sevk etmek ve kontrol etmek için diğer yardımcı donanımlar bulunur. Şekil 3.2.’de kule tipi bir tahıl kurutma makinesi görülmektedir. Bu tip kurutuma makinelerinde tahıl halkasal kesite doldurulur. Kurutma makinesinin merkezinde yanma odası ve fan sistemi yer alır. Sıcak egzoz gazları delikli halkasal

kesitteki tahılın içerisinde yatay doğrultuda geçer ve doğruca dışarıya gönderilir. Bu tip kurutma makinelerinde nemli ve toz partikülleri içeren kurutucu akışkan doğrudan dışarıya gönderilir [42].



Şekil 3.2. Kule tipi tahıl kurutucu

Şekil 3.3.'de, nemli ve tozlu kurutucu akışkanın doğruca dışarı gönderilmediği kapalı tip kurutma makinesi görülmektedir. Bu tip kurutma makinelerinde yanma odasından gelen kurutucu akışkan tahıl haznelerine kanallardan girerek gözenekli bölgeden akar. Bacaya gönderilmeden önce toz ayrıştırma sistemine girer. Çevre bakanlığının toz emisyon kısıtlarına uygun olarak tozlardan ayrıştırılır ve dışarı atılır [43].



Şekil 3.3. Kapalı tip karışık akışlı tahıl kurutucu

3.4.1. Diğer kurutma sistemleri

3.4.1.1. Titreşimli kurutucular

Bu tip kurutucularda, tohum gibi ürünlerin kurutulmasında kullanılabilir. Delikli bir levha üzerine ürün belli bir kalınlıkta yığılır. Bir fan yardımıyla sistemdeki sıcak hava delikli levhadan düşey biçimde sevk edilir. Sıcak hava teması ile ürün kurur iken bir taraftan ürün yatağı titreştirilir. Amaç ürünün karışmasını sağlayarak daha iyi ısı ve kütle geçişini sağlamaktır. Bu şekilde ürünün homojen kuruması sağlanır.

3.4.1.2. Akışkan yataklı kurutucular

Akışkan yataklı kurutma sistemlerinde ürün delikli bir levha üzerinde bulunur. Sıcak hava delikli levhadan girer, hava basıncı ürün ağırlığını yenecek boyutta olup, ürünün akışkanlaşarak hareket etmesini sağlar. Akışkan yataklı kurutucularda mükemmel bir karışım sağlanarak, homojen bir kurutma gerçekleşir. Akışkan yataklı kurutma işlemlerinde kullanılacak sıcaklık ve hava debisi öncelikle belirlenmesi

gereken parametrelerdir. Enerji tüketimi yüksektir ve verimliliği% 40-60 civarındadır [44].

3.4.1.3. Döner tip kurutucular

Döner kurutucular, konveyörlerde (konveyör bantları) veya tepsilerde serbest akışlı granül malzemelerin kurutulmasının zor olduğu yerlerde kullanılır. Döner kurutucularda kurutulacak malzeme kurutma borusundaki kanatçıklar yardımıyla besleme noktasından çıkış alanına doğru hareket ederken, kurutucu gaz akımı paralel veya ters yönde katı ile temas ettirilir ve katının nemi alınır. Kurutma mekanizması genellikle gaz akışından katı yüzeye konveksiyon ısı transferi, katı içindeki iletim ısı transferi ve katıdan dış ortama nem transferi adımlarını içerir. Bu tip kurutuculardaki kurutma hızı, tepsi veya tünel kurutuculardaki kurutma hızından daha yüksektir [45].

3.4.1.4. Bantlı kurutucular

Bant kurutma sistemi, taneli ürünlerin kurutma işlemlerinde de kullanılabilir. Sistemin çalışma prensibi, kurutulacak ürün kayış üzerinde hareket ederken sıcak hava ile temas ederek ürünün iç nemini azaltma prensibidir. Ürünlerin makinedeki sürekli hareketi, sabit kurutma sistemlerine kıyasla düzgün kurutma sağlar. Makinenin boyutuna ve türüne bağlı olarak bölümlerde farklılıklar olabilir. Enerji Tüketimi ürün tipine bağlı olarak 4000 ile 6000 kJ / kg arasındadır ve kurutucu verimliliği% 40-60 civarındadır [44].

3.5. Kurutmayı Etkileyen Faktörler

Hava kurutma, sıcaklığı etkileyen faktörleri incelerken, hareketin bağıl nem, hava hareket hızı ve yönü dikkate kurutma ortamdaki hava malzemeyle ilgili olarak, (ilk ve son nem) malzemenin nem içeriği, malzeme kalınlığı, buharlaşma yüzeyinin genişliği, kurutma ve ekipman ilgili olarak alınmalıdır. Yapı malzemesinin türünü ve özgül ısısını, ısı yalıtım durumunu, kurutma cihazının kapasitesini ve boyutlarını, kurutma yöntemini ve çevresel iklimi belirtmek mümkündür.

3.5.1. Kurutma havasının sıcaklığı

Islak ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça kuruma hızı da artar. Kurutmanın başlangıcında bu doğru orantılı etki çok belirgin olmakla birlikte, kurutma ilerledikçe ıslak ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki fark artsa bile kurutma hızının aynı oranda artmadığı görülmektedir.

Kurutma sırasında hava sıcaklığındaki artışla birlikte, su buharını havada tutma özelliği artar, malzemenin içindeki sıvının viskozitesi artar ve iç kısımdan yüzeylere ısı transfer hızı artar. Böylece yüksek buharlaşma oranı oluşur ve kuruma süresi kısalır. Bununla birlikte, kurutma sıcaklığının istenildiği gibi yüksek sıcaklıklara yükseltilmesi uygun değildir. Çünkü her malzemenin yükselebileceği maksimum sıcaklık vardır. Bu maksimum sıcaklık değerinin aşılması durumunda malzemelerde çatlama, renk değişimi ve büzülme gibi kurutma kusurları ve kalite düşüşleri meydana gelir. Kurutma, malzemenin kurutma sıcaklığının 19 altında bir sıcaklıkta yapıldığında, kurutulmuş malzemenin kalitesi artar, ancak kuruma süresi gerekenden daha fazla uzatılır. Bu nedenle kuruma süresi ve kuruma kalitesi dikkate alınarak en uygun sıcaklıkta kurutma yapılmalıdır [41].

3.5.2. Kurutma havasının bağıl nemi

Teknik kurutmada, kurutma ortamını oluşturan havanın malzemenin cinsine, kalınlığına ve nemine göre kurutmanın çeşitli aşamalarında belirli miktarda nem içermesi koruyucu bir kurutmanın uygulanması önemlidir. Çeşitli kurutma aşamaları için yetersiz nem içeren havada, malzeme yüzeyleri çok çabuk kurur, bu da kurutmada önemli bir kusur olan dış sertleşmeye ve dolayısıyla diğer kusurlara neden olur. Teknik kurutmada bu tür kusurları önlemek, iç tabakalardan yüzeylere uygun bir nem farkı oluşturmak ve sürekli bir nem akışı sağlamak için kurutma havasının kurutmanın her aşamasında yeterli nem içermesi gerekir. Öte yandan, kurutma fırınındaki kurutma havasının bir kurutma işleminde aşırı nemi, kuruma süresinin gereksiz yere uzamasına neden olmakta ve bu da kurutmada enerji tüketiminde artışa neden olmaktadır [41].

3.5.3. Kurutma havası hızı

Islak yüzeyden buharlaşma hızı, suya, ısı akışına ve nemli yüzeydeki düzgün tabaka yoluyla yayılan buhar miktarına bağlıdır. Yüzey üzerinden geçen yüksek akış hızına sahip hava akımı, bu düzgün tabakan kalınlığını azaltıcı yönde etki eder. Isı transferinin ve aynı zamanda buharlaşma hızının artmasını sağlar. Hem su yüzeyinin hem de hava akımının türbülanslı olması buharlaşma miktarını artırır. Kurutma havası hızının fazla olması durumunda iç kısımlarda meydana gelen hızlı kurumadan dolayı dış yüzeye doğru olan su akışı bozulmaktadır. Bu nedenle çatlama ve sertleşmeler görülmektedir. Kurutma havası hızının düşük olması durumunda ise malzeme yüzeyinde nemi uzaklaştıramamaktadır. Bu nedenle kurutma havası hızının belli sınırlar arasında tutulması kurutmanın kalitesi bakımından önemlidir [41].

3.5.4. Malzemenin kurutma sırasında istif şekli

Kullanılan kurutma tekniğine uygun olarak, kurutma havası kullanılan malzeme ile tam temas halinde olacak şekilde istiflenmelidir. Böylece uygun bir hava sirkülasyonu sağlanır ve kuruma süresi kısalır [41].

3.5.5. Malzemenin cinsi ve kalınlığı

Kurutma sıcaklığı ve nem değerleri malzeme tipine ve kalınlığına bağlı olarak belirlenir.

3.5.6. Malzemedeki nem farkı

Kurutma havasının veya kurutulacak malzemenin nem içeriği genellikle mutlak birimler (kg nem/kg kuru madde) veya her ikisi (ağırlık kuru madde yüzdesi) olarak ifade edilir. Temel olarak, nem yüzdesinde eşit bir artış, ağırlıklarda eşit değişiklikler yaratır. Malzemenin ıslak ağırlığına göre, yüzde veya mutlak birimlerdeki nem ifadeleri de nadiren görülür.

3.5.7. Buharlaşma yüzeyinin büyüklüğü

Malzemeyi parçalara ayırarak, kurutma havasıyla temas eden yüzey artacak ve buharlaşma hızı artacaktır. Kuruma süresi kısalmır.

3.5.8. Kurutucunun ısı yalıtımı

Kurutma fırınının içindeki sıcaklığı ve nemi korumak ve dışarıya ısı transferini önlemek için iyi bir yalıtım gereklidir. Genel olarak, kurutma fırınları ahşap, duvarcılık, beton ve metalden yapılmıştır. Metal olarak alüminyum tercih edilir. TS 1501'e göre ahşap, duvar, beton ve betonarme kurutma fırınlarında tavan, duvar ve kapıların ortalama ısı transfer katsayısı $1 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$, metal kurutma fırınlarında maksimum $0,7 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$ olmalıdır [41].

3.5.9. Kurutucunun kapasitesi

Kurutucu kapasitesi ısı tüketimini etkiler. Küçük ve normal kapasiteli kurutucuların enerji gereksinimi, büyük kapasiteli (50 m^3 'ten büyük) kurutuculardan daha yüksektir [41].

BÖLÜM 4. MISIR KURUTMA TESTLERİ

4.1. Materyal

Testlerde kurutulan mısır, Kasım ayında Sakarya bölgesinden hasat edilmiş olan (Zea mays indentata Sturt.) FAO 650-700 hibrit çeşittir. Mısırın başlangıç nem değeri testlerde %20 ila 22 arasında değişmektedir.

Şekil 4.1.'de mısırın fiziksel özelliklerinin tayin etmek için kullanılan hassas terazi, sınıflandırıcı, ağırlık ve yoğunluk tayini için nilemalitre ve nem ölçer görülmektedir. Numune bölücü kurutma makinesi öncesi ve çıkışında alınan mısır numunelerinin bölünmesi için kullanılmıştır. Sınıflandırıcı yardımıyla sınıflandırılan numunelerin ağırlıkları hassas terazide ölçülmüş, nem ve yoğunlukları belirlenmiştir.

a-Numune Bölücü



b-Hassas Terazi



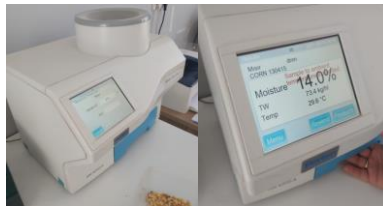
c-Sınıflandırıcılar



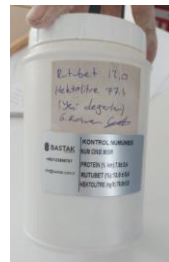
d-Nilemalitre



e-Mısır Rutubet, Yoğunluk ölçer



f-Kontrol Numunesi



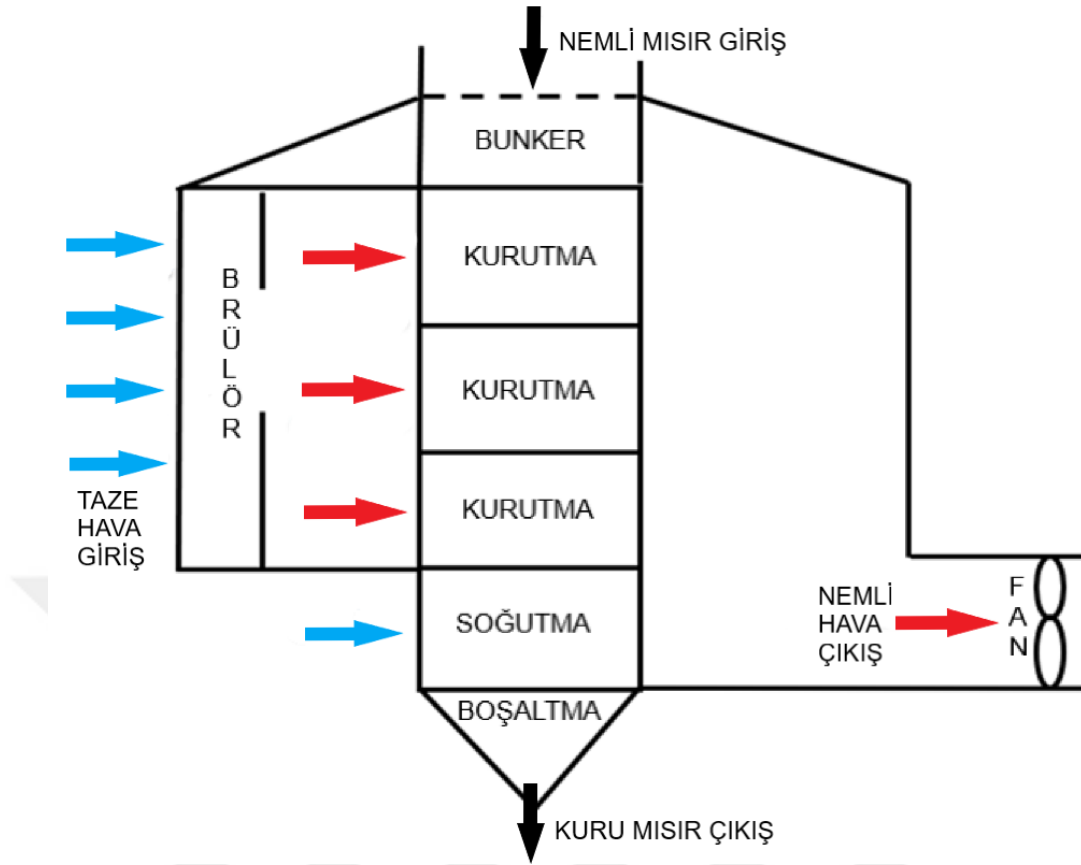
Şekil 4.1. Test materyalleri

4.2. Mısır Kurutma Testleri

Mısır kurutma testleri Sakarya ilinde Çelik kardeşler Ltd.Şti. (Adakurutma) bünyesindeki Şekil 4.2.'de görünen kapalı tip mısır kurutma makinesinde gerçekleştirilmiştir. Kurutma makinesinin çalışma prensibi Şekil 4.3.'de görülmektedir. Mısır, bunker bölümünden kurutucuya beslenir. Sistem sürekli akışlı olarak çalışır. Yukarıdan beslenen mısır kurutulmuş olarak alt kısımdan boşaltılır. Sistemde biri emiş fanı diğeri enerji sarfiyatı fanı olarak 2 adet fan bulunmaktadır. Fanlardan biri hem kurutma hem de soğutma görevi görürken diğeri enerji verimliliği sağlamak amacı ile egzoz gazını yanma odasına geri sevk etmek için kullanılmaktadır. Mısır, bunker haznesinden kurutma haznelerine doğru yavaş yavaş ilerler. Mısırın kurutulması için gerekli ısı enerjisi sıcak havadan sağlanır. Kurutma haznelerini geçtikten sonra soğutma bölümüne gelir. Burada mısır soğutulur ve boşaltma sistemi ile depolara sevk edilir [46,47].



Şekil 4.2. Kapalı tip mısır kurutma makinası

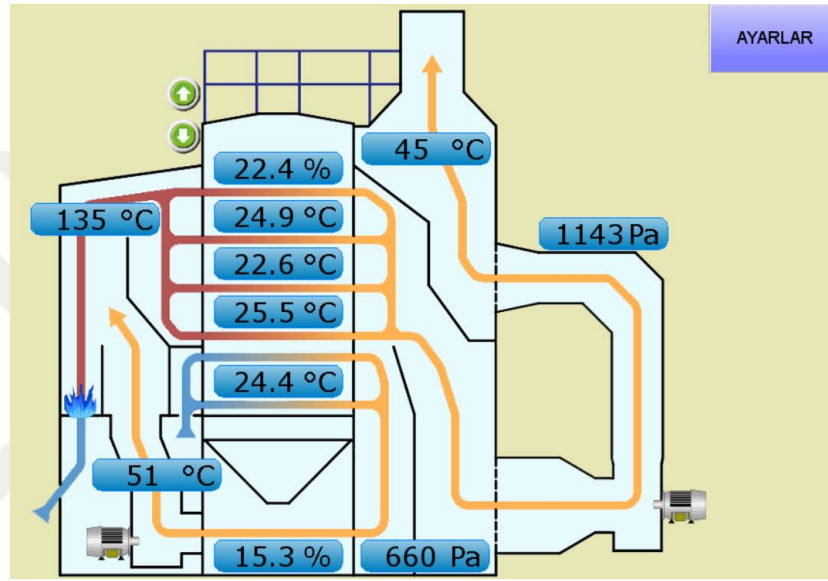


Şekil 4.3. Test şematığı

Kurutma haznesine sıcak hava üçgen (çatı) kanallardan girmektedir (Şekil 4.4.). Sıcak hava üçgen biçimli kanaldan gözenekli mısırın içerisine sevk edilir. Üçgen kanalların çıkışı kapalıdır. Gözenekli bölgeden akan sıcak hava alt veya üst sıradaki ters yerleştirilmiş aynı ölçülerdeki başka bir kanaldan kurutma bölümünü terk eder. Girişte yanma odasının sıcaklığı ölçülmektedir. Kurutma makinesi üzerine testlerde düzgün dağılmış sıcaklık verilerini alabilmek için her bir kurutma haznesine 8 adet Pt-100 sıcaklık ölçer yerleştirilmiştir. Basınç düşümlerinin belirlenebilmesi için giriş ve çıkış konumlarına basınç ölçerler yerleştirilmiştir. Kurutma işlemi boyunca sıcaklıkların değişimi, basınç ölçümleri nem ölçümleri operatör panelinden izlenmesi için ara yüzler oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 4.5.'te operatör panelinde simülasyonun ara yüzü görülmektedir. Aynı zamanda bu resimde ölçüm konumları da gösterilmiştir.

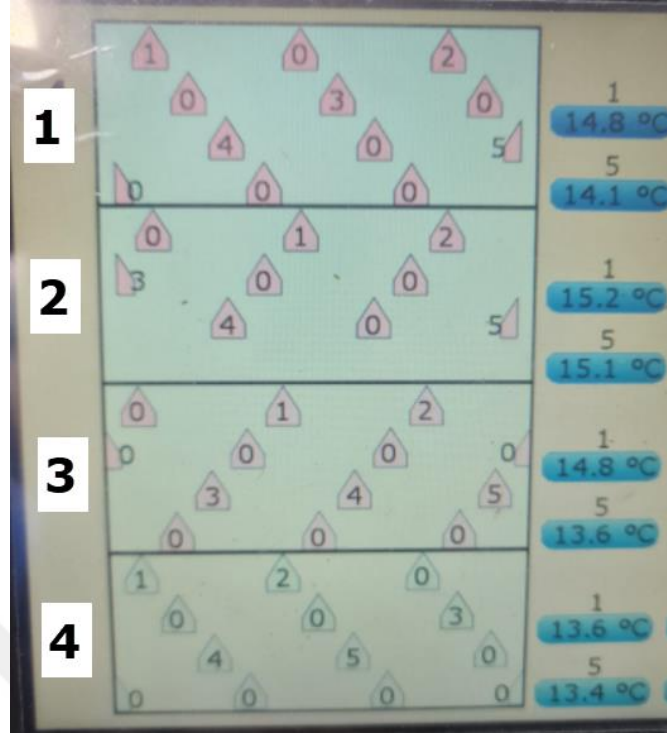


Şekil 4.4. Üçgen kanallı tahıl kurutma haznesi



Şekil 4.5. Operatör paneli ara yüzü

Testlerde ölçülen sıcaklıklar Şekil 4.6.'da gösterilmektedir. Yukarıdan aşağı ilk üç mısır haznesi (Modül 4-3-2) kurutma bölümü, en alttaki hazne (Modül 1) soğutma haznesidir. Her bir haznede hava çıkışına şekilde numaralandırılmış olarak gösterilen sıcaklık ölçerler yerleştirilmiştir.



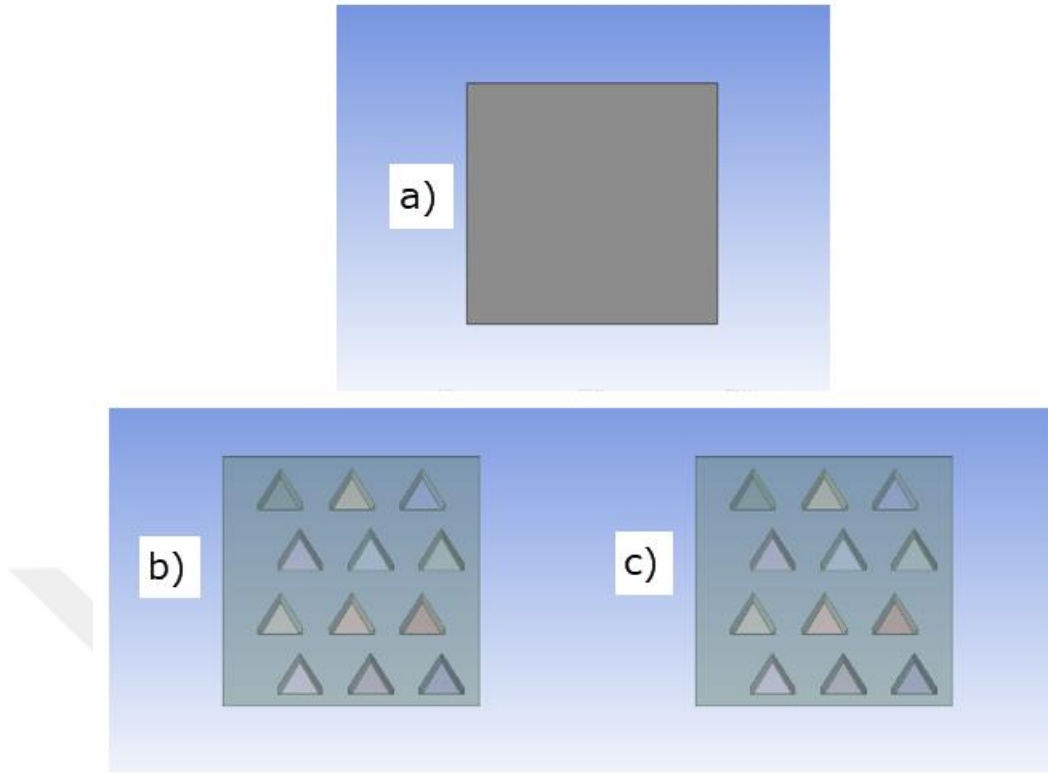
Şekil 4.6. Operatör paneli ara yüzü

Ayrıca test cihazında basınç ve sıcaklık ölçümleri manuel olarak ta ölçülmüştür. Yapılan mısır kurutma testlerinde ana fanın hacimsel debisi, test cihazında kanaldaki hava hızı, hava sıcaklığı ve bağıl nem değerleri Testo 350M/XL cihazı ve ilgili problemleri ile ölçülmüştür. Cihaz ile yapılan ölçümlerdeki hatalar hız için $\pm 0,2 \text{ m/s} + 1,5 \%$, basınç için $\pm 1 \text{ mm SS}$, bağıl nem için $\pm 0,1 \%$ RH ve sıcaklık için $\pm 0,5 \text{ °C}$ şeklindedir.

BÖLÜM 5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ

5.1. Problem ve Sayısal Model

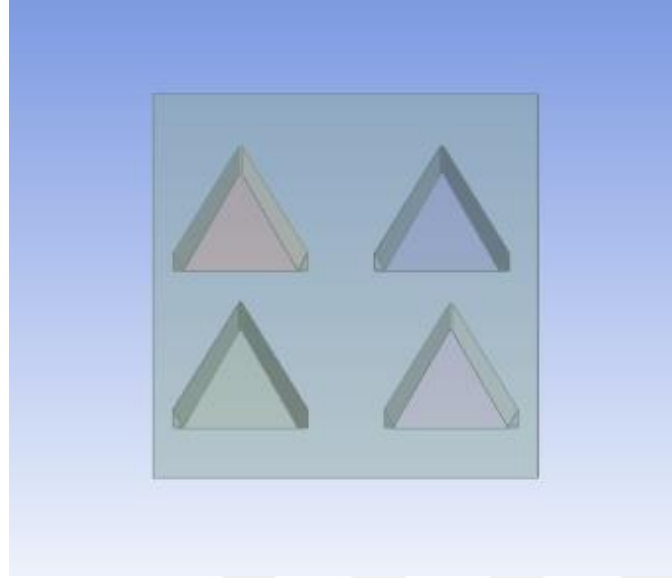
Kurutma; akış, kütle ve ısı transferi olaylarının eş zamanlı gerçekleştiği bir süreçtir. Mısır benzeri tahıl kurutma prosesinde gözenekli bir hacim içerisinde kurutucu akışkan akışı gerçekleşmekte, bu esnada tahıl içerisindeki nemin buharlaşması için gerekli gizli ısı sıcak kurutucu akışkandan sağlanmaktadır. Ticari HAD yazılımları ile gözenekli bölgelerdeki akışın basınç düşümü, tahılın ısınma ve soğuma süreçleri analiz edilebilir. Fakat kurutucu akışkanın sıcaklığındaki değişimi görmek için sadece HAD analizleri yetersiz kalabilir. Çünkü üründen buharlaşan nem için gerekli ısı enerjisi kurutucu akışkandan sağlanır. Kurutma sürecinde buharlaşma oranı, ortamın ısı taşınım katsayısı, ürün ve hava sıcaklığı, dolayısıyla sıcaklığa bağlı özellikler sürekli olarak değişir. Gerçek kuruma davranışı deneysel çalışma yapılarak belirlenmektedir.



Şekil 5.1. a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3

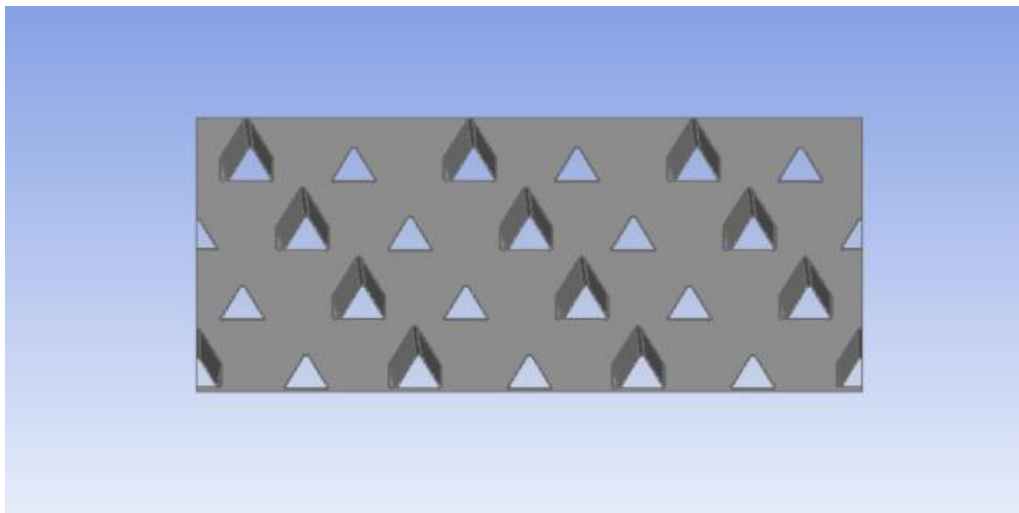
Bu tez çalışmasında ilk aşamasında; aynı hacme ($V=33 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$) sahip kanalsız (Model 1), sıra diziliimli kanallı (Model 2), köşegen diziliimli (Model 3) kanal yapılı üç farklı model gözenekli ortam kabulü ile basınç düşümündeki farklılıkları ortaya çıkarmak için analiz edilmiştir. Model görüntüleri Şekil 5.1.'de verilmiştir. Tahıl kurutma haznesinin hacmi büyüklüğündedir.

İkinci aşamada ise; köşegen diziliimli modelde hacim önceki modellerde aynı olmak üzere kanal geometrisi büyütülerek (Model 4) analizler tekrarlanmıştır. Model 4 Şekil 5.2.'de gösterilmiştir. Alt sıradaki üçgen kesitli kanallardan biri kurutucu akışkan girişi diğeri çıkıştır. Benzer şekilde üst sıradaki iki kanaldan biri giriş diğeri çıkıştır.



Şekil 5.2. Model 4

Son aşamada ise; mısır kurutma işlemini gözenekli ortam kabulüyle simüle etmek ve deneylerle (gerçekle) doğrulamak için kurutma test makinesinin tahıl haznesinin gerçek boyutları alınarak model (Model 5) oluşturulmuştur. HAD analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar testlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Soğutma süreci de dahil kurutma işlemi boyunca basınç düşümü ve çıkış sıcaklığı değerleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Model 5, Şekil 5.3.' te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Köşegen dizilime sahip Model 5

5.1.1. Korunum denklemleri ve ilave denklemler

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri Ansys Fluent V18 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kurutma analizlerinde giriş ve çıkışındaki hava akışı model içerisindeki ısı transfer yüzeyleri ve kurutulan mısır, k- ω SST türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Mısır içeren kurutma bölgesi dengesiz termal akışkanlar modeli (non-equilibrium model) seçilerek türbülanslı gözenekli bir ortam olarak kabul edilmiştir.

Gözenekli bölgedeki basınç düşümünü doğrulamak için ikinci dereceden Hunter'ın (1983) denklemi (Abou-El-Hana, 2008) kullanılır.

$$\Delta P_{\text{gözenekli}} = (R\dot{V} + S\dot{V}^2)L \quad (5.1)$$

Denklemde verilen S ve R katsayıları her ürün için değişkenlik göstermekte ve tane mısır için aşağıdaki gibidir.

$$R = 1,12 \frac{a}{b}$$

$$S = 0,346b$$

a ve b sabitleri sırasıyla 2,07 E+4 ve 30,4 olarak alınmaktadır.

Ani daralan ve genişleyen kanallar için yerel kayıplar;

$$\Delta P_{\text{yerel}} = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (5.2)$$

Burada K, ani daralmalar için yerel kayıp faktörüdür;

$$K = 0,75 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right] \text{ for } \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 > 0,715 \quad (5.3)$$

Benzer şekilde ani genişleme için;

$$K = \left[1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right]^2 \quad (5.4)$$

Ayrıca yüzde 40 açık alan oranına sahip delikli plakalar için (Applied flow Technology);

$$K = [0,707(1 - f)^{0,375} + 1 - f]^2 \frac{1}{f^2} \quad (5.5)$$

f açık alan oranıdır ve değeri % 40 olarak alınır.

Gözenekli ortamda kullanılan denklemler dışında akışı bütün durumlarda modellemek için korunum denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

x yönündeki net kütle akısı,

$$\left\{[(\rho u)] - \left[(\rho u) + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx\right]\right\} dydz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz \quad (5.6)$$

Kontrol hacmi içerisindeki kütle değişimi,

$$\left\{\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho dV) = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz\right]\right\} \quad (5.7)$$

Kararlı ve sıkıştırılamaz ($\rho = \text{sbt}$) akış için süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5.9)$$

Gözenekli ortam için Navier-Stokes denklemi aşağıdaki gibidir; (Vafai ve Tien, 1981).

$$\rho \left[\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2} (\mathbf{u} \nabla \mathbf{u}) \right] = -\nabla \vec{P} + \mu_{et} \nabla^2 \vec{u} - \frac{\mu}{K} \vec{u} - \frac{S_F}{\sqrt{K}} \rho |\vec{u}| \vec{u} + \rho \vec{g} \quad (5.10)$$

Gözenekli ortam bölgelerinde enerji denklemi iletim akısı ve ortamdaki mısırın termal ataletini kapsar ve aşağıdaki denklemle verilir. (Ansys Tutorial <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node233.htm>)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\mathbf{u} (\rho_f E_f + p)) = (\nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - (\sum h_i \mathbf{J}_i) + (\tau \mathbf{u})]) + S_f \quad (5.11)$$

Denklemde verilen E_f sıvı fazın enerjisi, E_s katı fazın enerjisi, γ ortam gözeneklilik değeri, k_{eff} termal iletkenlik ve S_f akışkan entalpisidir.

5.1.2. Sınır şartları

Gözenekli bir ortam olarak kabul edilen kurutucu modeli, sırasıyla kanalsız, köşegen dizilimli kanal yapılı, sıra dizilimli, köşegen dizilimli 2 kat büyüklüğündeki kanallı ve köşegen dizilimli deneysel boyutta kanal yapılı ve türbülanslı bir akışkan alanına sahip hava girişi ve çıkışı ile basitleştirilmiş bir geometriye sahiptir. Akış, süreklidir. Hava girişi sıcaklığı, hızı ve ürün girişi sıcaklığı gibi deney parametreleri kullanılarak simüle edilmiştir. K- ω SST türbülans modelini doğrulamak için, kurutucu ürün sıcaklıkları deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kurutma haznesi gözenekli ortam kabulü ile sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm ağı oluşturulduktan sonra bölgeye mısırın fiziksel özellikleri tanımlanmıştır. Mısır özellikleri Tablo 5.1.'de gösterilmektedir [47].

Tablo 5.1. Mısıra ait özellikler

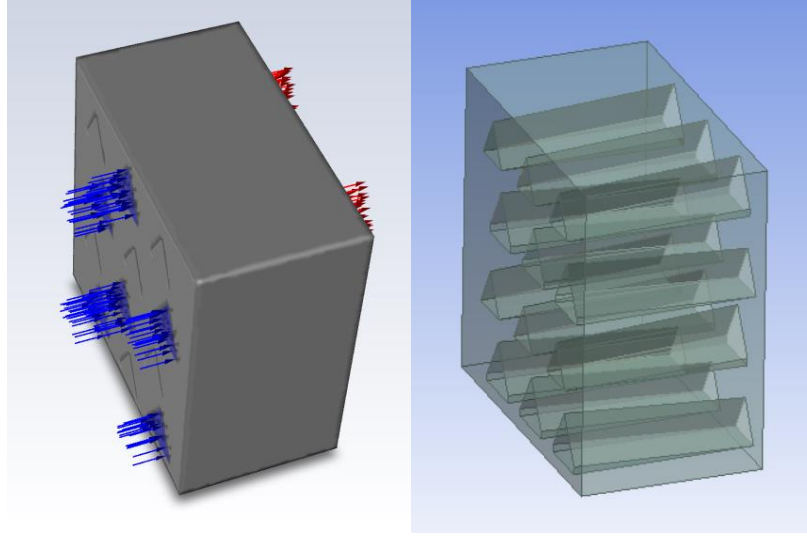
Mısır yoğunluğu, kg/m ³	727 kg/m ³
Mısır Özgül ısı değeri, J/kg.K	2095
Isı iletimi katsayısı, W/m.K	30
Porozite	0,42

Kurutucu akışkanın girdiği yüzey giriş diğer tarafı çıkış olarak verilmiştir. Kurutucu akışkan giriş sıcaklığı sabit ve 103 °C olarak belirlenmiştir. Çıkış basıncı atmosfer basıncı olarak belirlenmiştir. Şekildeki gibi yan duvarlar adyabatik, alt ve üst duvar simetri olarak tanımlanmıştır. Girişte hava farklı hava hızlarında tanımlanmış, çıkış 0 (Pa) basınç koşullarında analizler gerçekleştirilmiştir. Sınır şartları şematik olarak Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.

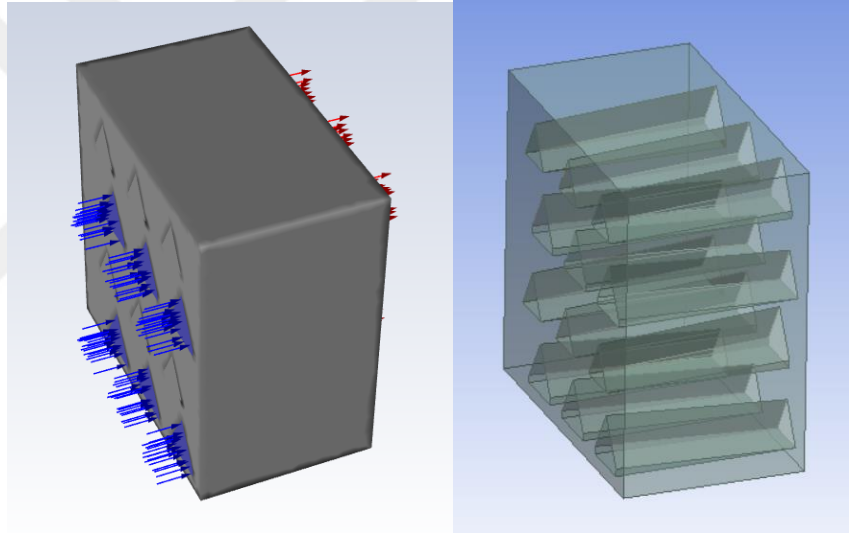


Şekil 5.4. Model 1 geometrisi

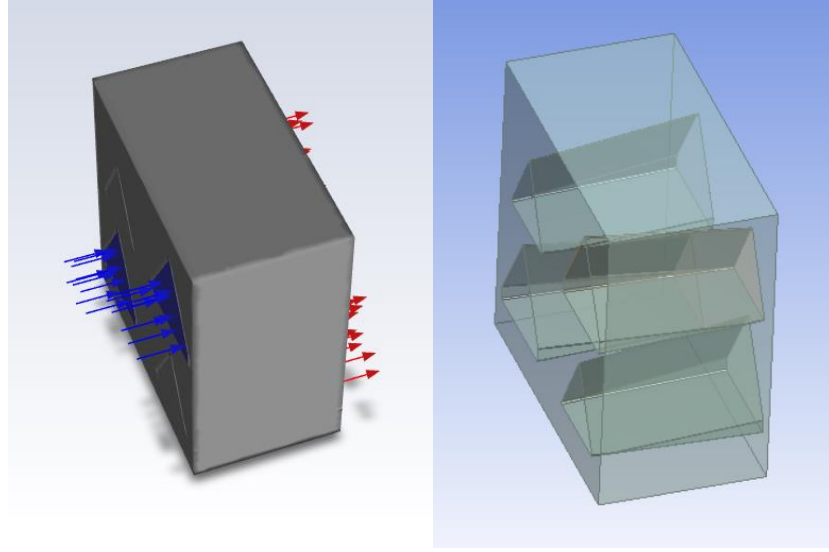
Şekil 5.3., 5.4., 5.5. ve 5.6.'da hava girişi ve çıkışlarının belirtildiği kanallı modellerin izometrik görüntüleri verilmiştir.



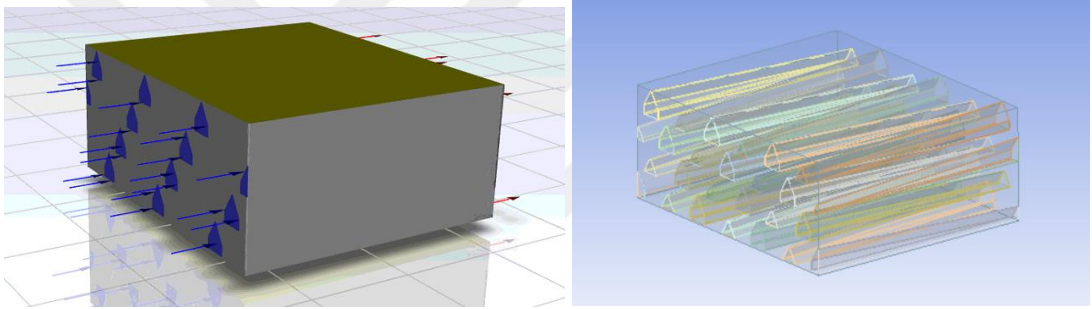
Şekil 5.5. Model 2 geometrisi



Şekil 5.6. Model 3 geometrisi



Şekil 5.7. Model 4 geometrisi



Şekil 5.8. Model 5 geometrisi

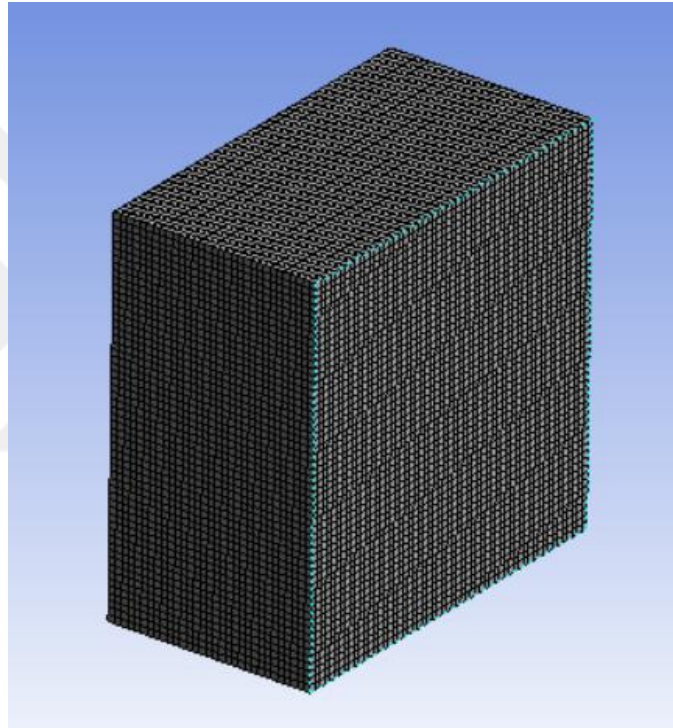
5.1.3. Çözüm ağı bağımsızlığı

Çözüm ağı bağımsızlığı elde edilen sonuçların doğruluğu açısından büyük önem arz etmektedir. Üç farklı eleman sayısı belirlenerek analizler tekrarlanmıştır. Bu analizde süreklilik, momentum, enerji denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-5} olarak ayarlanmıştır. Tablo 5.2.'de farklı eleman sayılarının sonuçlara etkisi görülmektedir. Yapılan analizlerde optimum eleman sayısı 100719 olarak belirlenmiştir. Geometrinin basit ve düzgün çözüm ağı oluşundan ötürü analiz sonuçlarına etkisi olmadığı, sonuçlar arasındaki farkın %1'in altında olduğu görülmüştür.

Tablo 5.2. 3 Farklı eleman sayısında 2,8 m/s hız için sapma tablosu

Eleman Sayısı	$P_{giriş}$ [Pa]	Fark [%]
100719	410,330	2,68.10-5
230625	410,341	9,74.10-6
950400	410,345	-

Şekil 5.7.'de 107648 düğüm noktasına sahip 100719 dörtyüzlü üçgen şekilli elemanlardan oluşan çözüm ağı görülmektedir. Model 2, 3 ve 4 benzer eleman sayılarında analizler gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı bağımsızlığı Model 5 için tekrarlanmıştır.

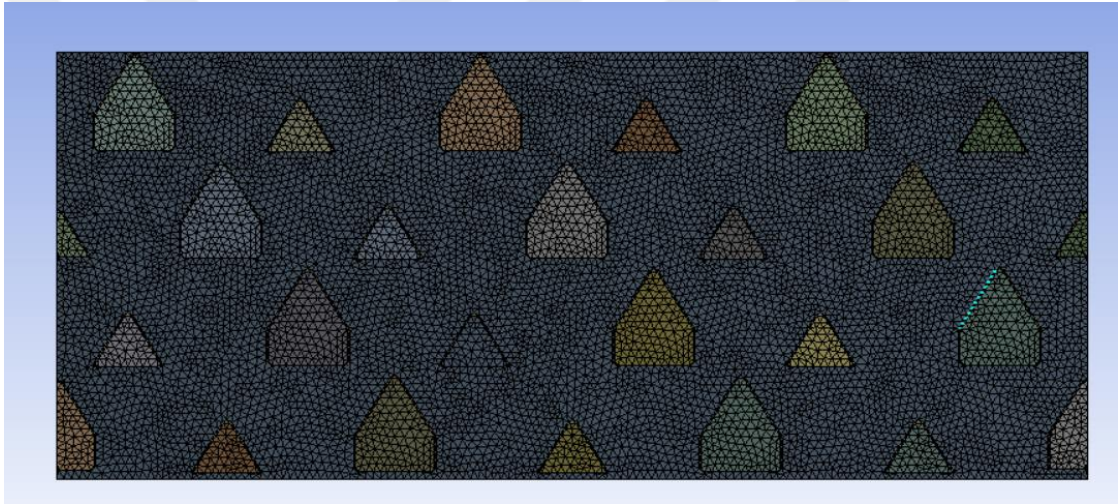


Şekil 5.9. Model 1 mesh yapısı

5.1.4. Gerçek kurutma geometrisinin (Model 5) HAD analizi

Bölüm 4.'te anlatıldığı üzere kurutma testleri Adakurutma firmasına ait kapalı tip mısır kurutma makinesinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile HAD analizlerini karşılaştırmak için, test makinesinin kanallı tahıl haznesinin geometrisi birebir alınmıştır (Şekil 5.8.). Kurutma makinesinde bu haznelerden üst üste yerleştirilmiş üç tahıl haznesi bulunmaktadır. Testlerde 120 °C'deki sıcak hava yanma odası tarafındaki açık kanallardan girip gözenekli tahıl arasından geçmektedir. Ardından baca tarafına

açık olan kanallardan çıkmaktadır. Giriş kanallarının bacaya çıkış tarafı kapalı olduğundan hava akışı açık olan kanala doğru yönelmekte bu sayede karışık akış gerçekleşmektedir. Tahıl üst haznelerde kurur iken, kurutma makinesinde son olarak soğutma haznesinden geçmektedir. HAD analizinde hava giriş hızı ve sıcaklığı testlerde ölçülen değerlere göre alınmıştır. Model 5 kullanılarak tahılın girdiği ilk kurutma haznesinde sıcak hava ile karşılaştığı ve son tahıl haznesinde soğutulduğu durumlar için akış ve ısı geçişi analizleri de gerçekleştirilmiştir. İlk haznede, sıcak hava ile karşılaşan soğuk tahıl durumu için sıcak hava 120°C , soğuk tahıl ise 17°C olarak varsayılmıştır. Tahılın soğutma durumunda ise tahıl 65°C , soğutma havası ise 17°C olarak alınmıştır.



Şekil 5.10. Model 5 mesh yapısı

Buna göre Model 5 için ilk yapılan HAD analizinde hava giriş sıcaklığı 120°C , hava giriş hızı $4,5\text{ m/s}$ alınmıştır. Diğer sınır şartları 5.1.2.'de anlatıldığı gibidir. Çıkış basıncı 0 Pa olarak belirlenmiştir. Tahıl haznesinin yan duvarları simetri olarak seçilmiştir. Ön ve arka yüzeylerin kanal haricindeki alanları adyabatik olarak belirlenmiştir. Soğuma durumunda atmosfer havası tahıl haznesine girer, yaklaşık 10-15 dk süresince tahılın soğutulması sağlanır. Tahılın soğumasını incelemek için hazneye giren hava sıcaklığı 17°C sabit sıcaklıkta tanımlanmıştır. Tahılın 65°C 'de olduğu varsayılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizdeki zaman adımları ise tahıl kurutucudaki tahılın ilerleme hızlarına uygun olarak belirlenmiştir. Zaman adımları artırılarak analizler tekrarlanmış sonuçlar karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

6.1. Analiz Sonuçları

6.1.1. Model 1

Model 1 hava kanalları olmayan tahıl haznesi modelidir (Şekil 5.2.). HAD analizleri 0,5 ila 8,33 m/s arasında değişen hava giriş hızlarında, 103 °C hava giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Hesaplama modelinde hava girişinden itibaren yatay yönde üç konum (girişten 10, 15 ve 25 cm uzaklıkta) belirlenmiş, bu konumlarda sıcaklıklar okunmuştur. HAD analizleri sürekli ve zamana bağlı gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.1.'de görülen sürekli koşullarda, Tablo 6.2'de zamana bağlı çözülen analiz sonuçları görülmektedir. Başlangıçta zamana bağımlı analiz 100 sn olarak verilmiştir. T1 girişten 10 cm, T2 girişten 15 cm T3 girişten 25 cm uzaklıktaki gözenekli bölgedeki sıcaklık değerleridir. HAD sonucunda bu konumlarda okunan sıcaklıkların hava hızı ile değişimi Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de görülmektedir. Girişe yakın sıcaklığın değerinin çıkışa göre daha yüksek olduğu, hava hızı arttıkça sıcaklıkların hava giriş sıcaklığına yaklaştığı görülmüştür. Hava sıcaklık değerleri birbirine yakın değerlerdedir. Bu durum gerçek tahıl kurutma haznesindeki sıcaklık dağılımı ile örtüşmemektedir. Hava gözenekli ortama eşit olarak dağılmakta ve ürünlerdeki nemin buharlaşması için gerekli ısı enerjisi havanın enerjisinden sağlanmaktadır. Kurutma haznesinde yer yer buharlaşma oranındaki farklılıklar sebebiyle sıcak ve soğuk bölgeler olması muhtemeldir. Fakat Tablo 6.1.'dekine benzer bir durum söz konusu değildir. Bu durum HAD modelindeki kütle transferinin eksikliğinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 6.1. Farklı hızlar için Model 1 sürekli koşullu HAD analiz sonuçları

$V_{giriş}$ [m/s]	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	$T_{çıkış}$ [K]	$P_{giriş}$ [Pa]
0,504	332,712	332,563	332,299	332,087	2,386
0,63	332,772	332,655	332,444	332,272	3,717
1,2	332,868	332,797	332,667	332,562	13,449
1,5	332,930	332,893	332,826	332,771	20,989
6,667	332,958	332,935	332,894	332,861	412,345
8,33	332,963	332,944	332,908	332,880	643,440

Tablo 6.2. Farklı hızlar için Model 1 zamana bağlı HAD analiz sonuçları

$V_{giriş}$ [m/s]	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	$T_{çıkış}$ [K]	$P_{giriş}$ [Pa]
0,504	332,804	332,701	332,495	332,321	2,354
0,63	332,772	332,655	332,444	332,272	3,717
1,2	332,917	332,874	332,787	332,713	133,190
1,5	332,934	332,899	332,830	332,771	208,050
6,667	332,985	332,977	332,962	332,948	410,592
8,33	332,988	332,982	332,969	332,959	640,922

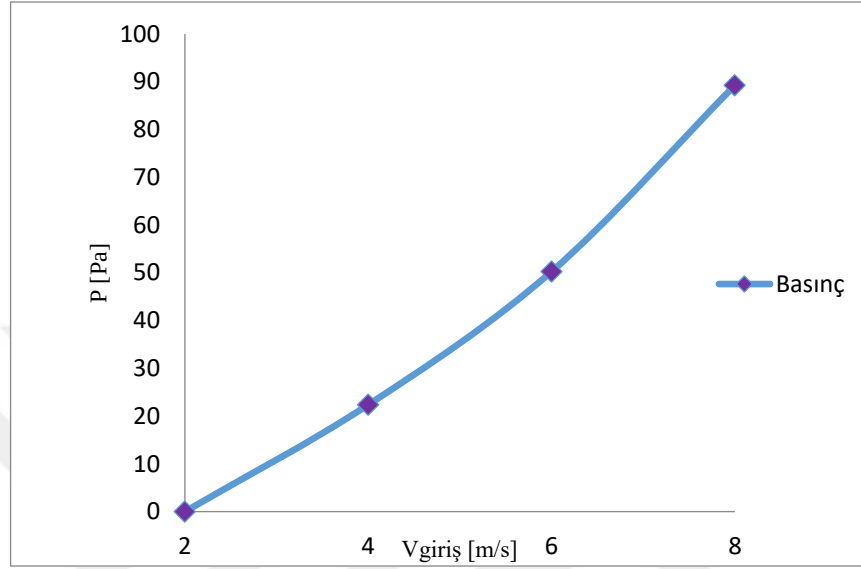
Zaman adımı 100 sn için yapılan analizlerde sürekli ve zamana bağlı analizlerde belirgin bir sonuç elde edilmediği görülmüştür. Bunun sebebi zaman adımının hesaplamalarda küçük alınmasıdır. Gerçek kurutma zamanı göz önünde bulundurularak, Model 5 için yapılan HAD analizleri zaman adımları artırılarak gerçekleştirilmiştir.

6.1.2. Model 2

60x60x33 cm³ hacimdeki hazne içerisine giriş alanı beşgen çıkış alanı ise üçgen olan kanallar konularak aynı sınır koşullarında 17 °C derecedeki mısır tanelerinin 103 °C derecedeki hava ile kurutma analizi farklı hızlar için yapılmıştır. Model 1 (kanalsız model) de olduğu gibi 10 cm'deki sıcaklık (T_1), 15 cm'deki sıcaklık (T_2), 25 cm'deki sıcaklık (T_3), çıkış sıcaklığı ve basınç düşümü incelenmiştir. Aşağıda verilen Tablo 6.3.'te 2, 4, 6 ve 8 m/s hız için yapılan sürekli koşullu HAD analiz sonuçları verilmektedir. Model 1'e nazaran kanallı modelde kanal yapısı daralan ve kanal çıkışı kapalı tasarlandığından akış türbülanslı olup daha fazla hazne içerisinde dolaşarak ısı transferini arttırmaktadır. Şekil 6.1.'deki basınç düşümü gözlemlendiğinde; hız arttıkça giriş basıncının arttığı görülmektedir.

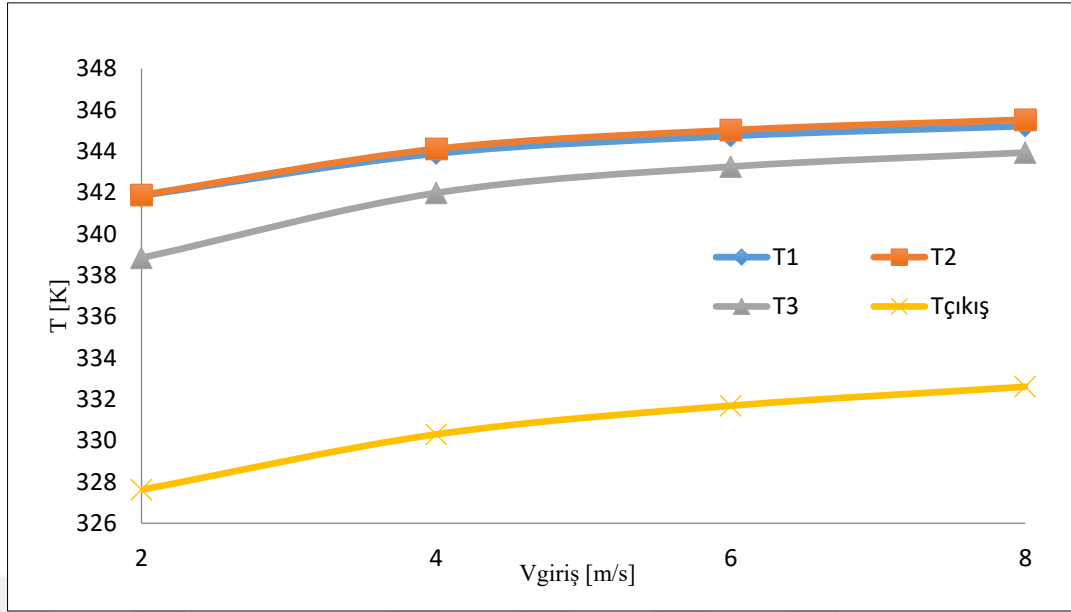
Tablo 6.3. Farklı hızlar için Model 2 HAD analizi sonuçları

$V_{giriş}$ [m/s]	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	$T_{çıkış}$ [K]	$P_{giriş}$ [Pa]
2	341,854	341,883	338,840	327,624	5,60399
4	343,884	344,112	341,981	330,301	22,361
6	344,737	345,020	343,254	331,686	50,247
8	345,217	345,526	343,934	332,605	89,258



Şekil 6.1. Model 2 giriş hızı ile basınç düşümünün değişimi

Şekil 6.2.'de hava giriş hızı ile hava sıcaklıkları arasındaki ilişki görülmektedir. Hava hızı arttıkça gözenekli bölgedeki kalma süresi azalmakta, sıcaklıklar giriş sıcaklığı değerine göre artmaktadır. 4 m/s hava giriş hızı için, T_1 ve T_2 sıcaklıkları 344 K civarında iken çok yakın, T_3 sıcaklığı 341 K, hazneden çıkış sıcaklığı ise 330 K olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.2. Model 2 hava giriş hızı ile sıcaklığın değişimi

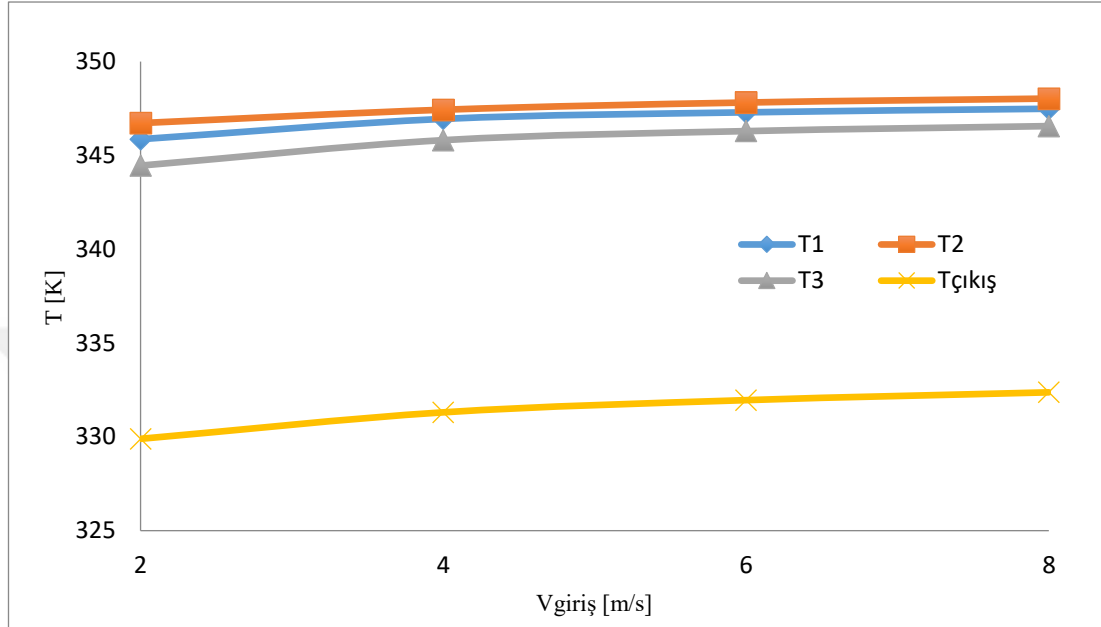
6.1.3. Model 3

60x60x33 cm³ hacimdeki hazne içerisine giriş alanı beşgen çıkış alanı ise üçgen olan kanallar konularak bu sefer Model 2'den farklı olarak köşegen dizilim yerine sıralı dizilimle yerleştirilmiş, aynı sınır koşullarında (kararsız ve adyabatik) 17 °C derecedeki mısır tanelerinin 103 °C derecedeki hava ile kurutma analizi farklı hızlar için yapılmıştır. Model 1 (kanalsız model) ve Model 2 (Köşegen dizilimli kanallı model) de olduğu gibi 10cmdeki sıcaklık (T1), 15 cm'deki sıcaklık (T2), 25cm'deki sıcaklık (T3), çıkış sıcaklığı ve basınç düşümü incelenmiştir. Model 3'ün incelenme sebebi dizilim değişikliğinin sıcaklık ve basınç düşümüne etkisini gözlemlemektir.

Aşağıda verilen Tablo 6.6.'da 2, 4, 6 ve 8 m/s hız için yapılan sürekli koşullu HAD analiz sonuçları verilmektedir. Model 1'e nazaran kanallı modelde kanal yapısı daralan ve kanal çıkışı kapalı tasarlandığından akış türbülanslı olup daha fazla hazne içerisinde dolaşarak ısı transferini arttırmaktadır. Fakat Model 3 sonuçları Model 2'e göre daha az ısı transferini olduğunu göstermektedir. Köşegen dizilimin sıralı dizilime göre akış türbülansına etkisinin daha fazla sebep olması ve ısı transferine etkisi mantıklıdır. Model 3 'de çıkış sıcaklığı ve kontür sıcaklıkları 2-3 derece daha az çıktığı aşağıdaki Tablo 6.6. ve Şekil 6.3.'de görülmektedir.

Tablo 6.4. Farklı hızlar için Model 3 HAD analiz sonuçları

$V_{giriş}$ [m/s]	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	$T_{çıkış}$ [K]	$P_{giriş}$ [Pa]
2	339,729	341,127	341,659	330,708	5,596
4	341,241	342,442	342,784	331,847	22,302
6	341,833	342,958	343,228	332,369	50,1062
8	342,174	343,255	343,484	332,694	89,004



Şekil 6.3. Model 3 HAD analizi farklı giriş hızları ile sıcaklık değişimi

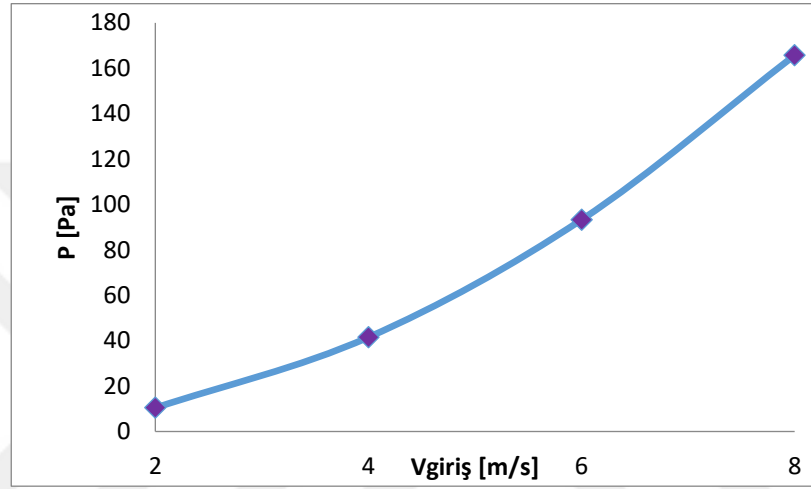
6.1.4. Model 4

60x60x33 cm³ hacimdeki hazne içerisine giriş alanı beşgen çıkış alanı ise üçgen olan kanallar bu kez köşegen dizilim diğer kanalların 2 katı olacak şekilde yerleştirilmiş, aynı sınır koşullarında (kararsız ve adyabatik) 17 °C derecedeki mısır tanelerinin 103° C derecedeki hava ile kurutma analizi farklı hızlar için yapılmıştır. Diğer 3 modelde olduğu gibi 10cmdeki sıcaklık (T1), 15 cm'deki sıcaklık (T2), 25 cm'deki sıcaklık (T3), çıkış sıcaklığı ve basınç düşümü incelenmiştir. Model 4'ün incelenme sebebi kanal boyutunun sıcaklık ve basınç düşümüne etkisini gözlemlemektir. Aşağıda verilen Tablo 6.7.'de 2, 4, 6 ve 8 m/s hız için yapılan sürekli koşullu HAD analiz sonuçları verilmektedir.

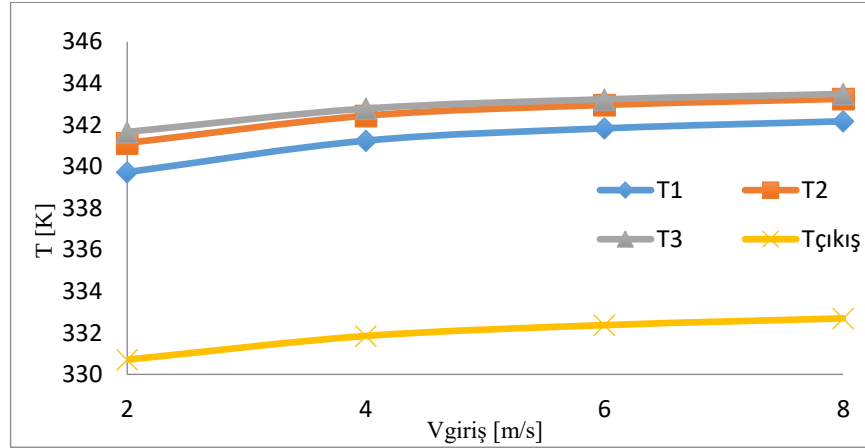
Tablo 6.5. Farklı hızlar için Model 4 HAD analiz sonuçları

$V_{giriş}$ [m/s]	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	$T_{çıkış}$ [K]	$P_{giriş}$ [Pa]
2	345,863	346,721	344,456	329,894	10,406
4	346,944	347,433	345,811	331,305	41,509
6	347,294	347,818	346,294	331,955	93,291
8	347,485	348,028	346,560	332,372	165,719

Aşağıda verilen Şekil 6.4.'de hızlara göre oluşturulan basınç düşümü eğrisi verilmektedir. Şekil 6.5.'de ise Model 4 HAD analizi eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Model 4 HAD analizi farklı giriş hızları için basınç düşümü değişimi



Şekil 6.5. Model 4 HAD analizi farklı giriş hızları ile sıcaklık değişimi

Model 4'te model 2 ve model 3 kıyasla basınç düşümü 2 kat daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi giriş alanı daha fazla olduğu için giren debinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

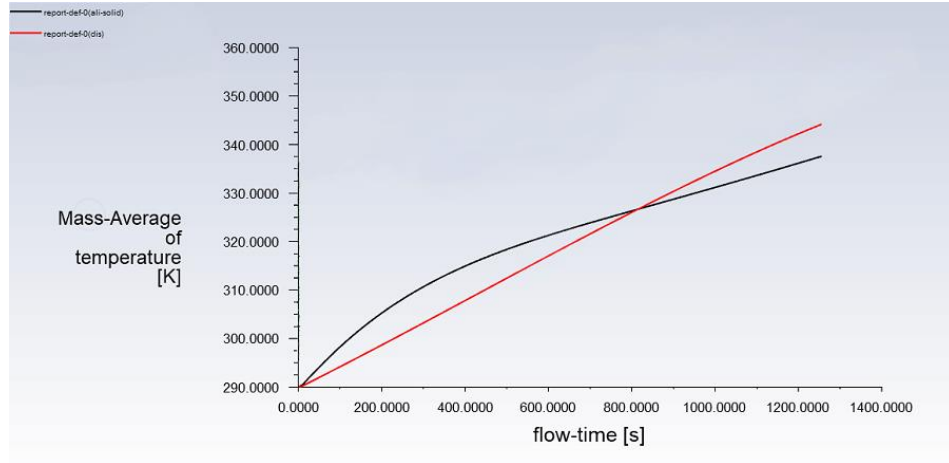
6.1.5. Model 5

Gerçek kurutma haznesinin geometrisi ile tasarlanan (2,517x1,158x2,383 m³) Model 5 için 4,5 m/s giriş hızına sahip 120 °C sıcaklıktaki hava ile kurutulan 17 °C sıcaklığa sahip mısırın, 20 dakikalık zamana bağlı analiz sonuçları ve 65 °C sıcaklıktaki kurutulmuş ürünün 17 °C sıcaklıktaki hava ile 10, 15, 20 dakikalık soğutma analizlerinin sonuçları aşağıda bulunan Tablo 6.6.'da verilmektedir.

Tablo 6.6. Gerçek geometride kurutma ve soğutma analiz sonuçları

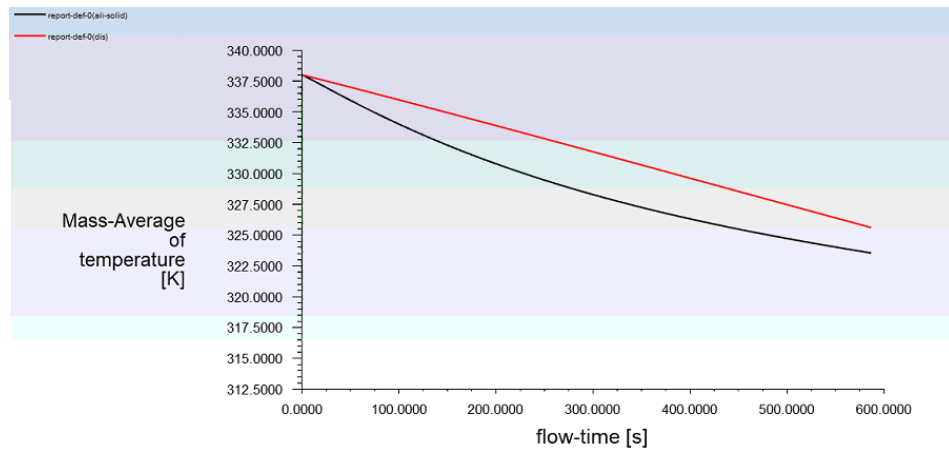
MODEL BÜYÜK GEO KURUTMA ANALİZİ ZAMANA BAĞLI							
Zaman (s)	V giriş [m/s]	T hava,g [K]	T ürün,g [K]	P giriş [Pa]	Thava,ç [K]	T ürün,ç [K]	Tal,ç [K]
1200	4,5 m/s	393	290	423,050	353,569	344,181	337,587
MODEL BÜYÜK GEO SOĞUTMA ANALİZİ ZAMANA BAĞLI							
	V giriş [m/s]	T hava,g [K]	T ürün,g [K]	P giriş [Pa]	Thava,ç [K]	T ürün,ç [K]	Tal,ç [K]
600	4,5 m/s	290	338	422,964	314,476	325,609	323,548
900	4,5 m/s	290	338	422,957	308,696	320,319	317,663
1200	4,5 m/s	290	338	422,956	309,100	313,6187	316,452

HAD analizleri zamana bağlı olarak yapılmıştır. Şekil 6.6.'da 20 dk süresince yapılan analiz sonucunda sıcaklık değişimi görülmektedir. Kırmızı eğri ürün sıcaklığının değişimini, siyah olan ise poroz bölge ile havanın temas ettiği kanal yüzeyinin sıcaklık değişimi vermektedir. Isıtma koşulunda her iki sıcaklığın hava giriş sıcaklığına (393 K) doğru yaklaştığı görülmüştür. Ürün 20 dk boyunca kurutma bölümünde kalmaktadır ve ürün sıcaklığının 344 K'e yükseldiği görülmüştür.



Şekil 6.6. Model 5 Isıtma koşulunda zamana bağlı analiz grafiği

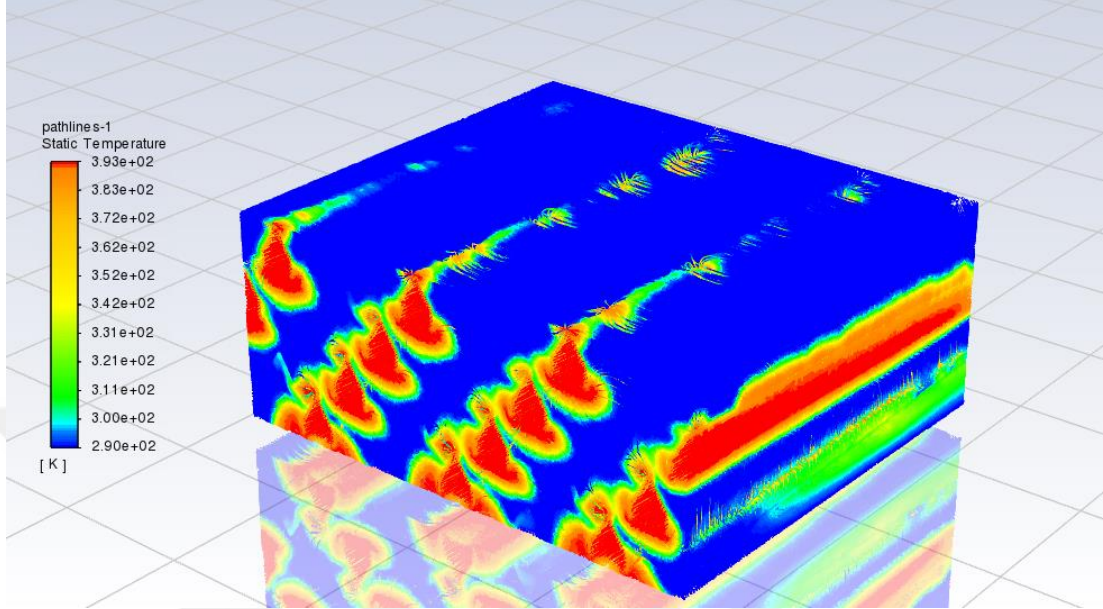
Kapalı tip kurutma makinesinde yaklaşık 10 dk süre boyunca mısır soğutma haznesinde kalmaktadır. Şekil 6.7.'de 10 dk süresince yapılan analiz sonucunda sıcaklık değişimi görülmektedir. Benzer olarak, kırmızı eğri ürün sıcaklığının değişimini, siyah olan ise poroz bölge ile havanın temas ettiği kanal yüzeyinin sıcaklık değişimi vermektedir. Soğutma koşulunda her iki sıcaklığın hava giriş sıcaklığına (290 K) doğru yaklaştığı görülmüştür. Minimum sıcaklık 313,618 K olarak saptanmıştır.



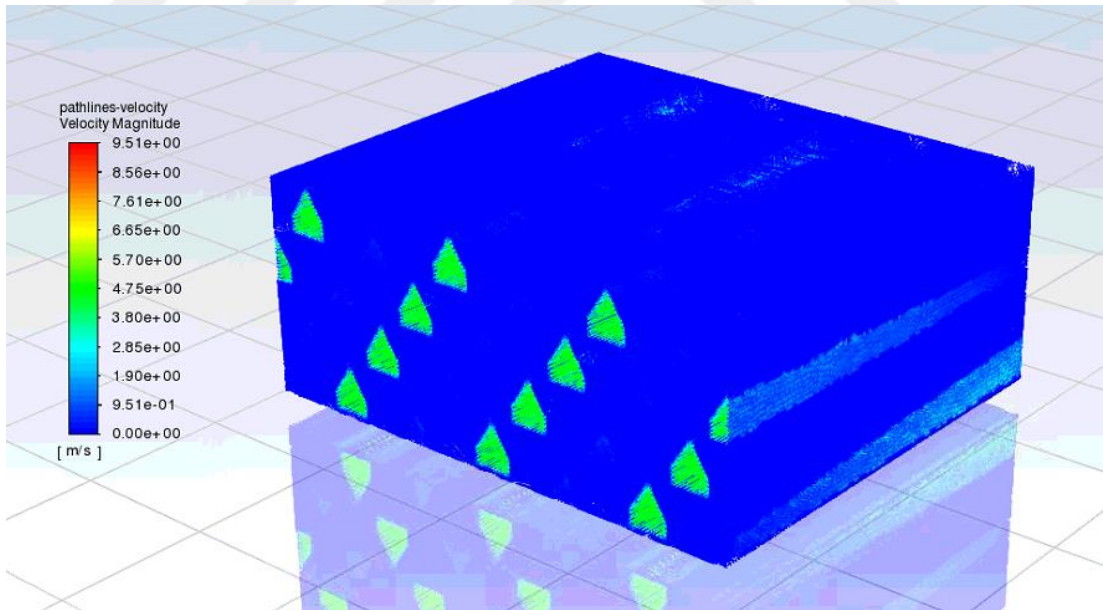
Şekil 6.7. Model 5 soğutma koşulunda zamana bağlı analiz grafiği

Kurutma analizinde enerji denklemi çözümlemesi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.8.'de görülmektedir. Mısırın bulunduğu kısımlar en düşük sıcaklıkta(mavi), kanalların içinden geçen en yüksek sıcaklıktaki hava(turuncu) ve

ürüne doğru sıcak havadan soğuk ürüne doğru bir ısı transferi gerçekleşmekte olduğu sıcaklık dağılımı kontüründe görülmektedir.



Şekil 6.8. Model 5 Kurutma analizi sıcaklık dağılımı



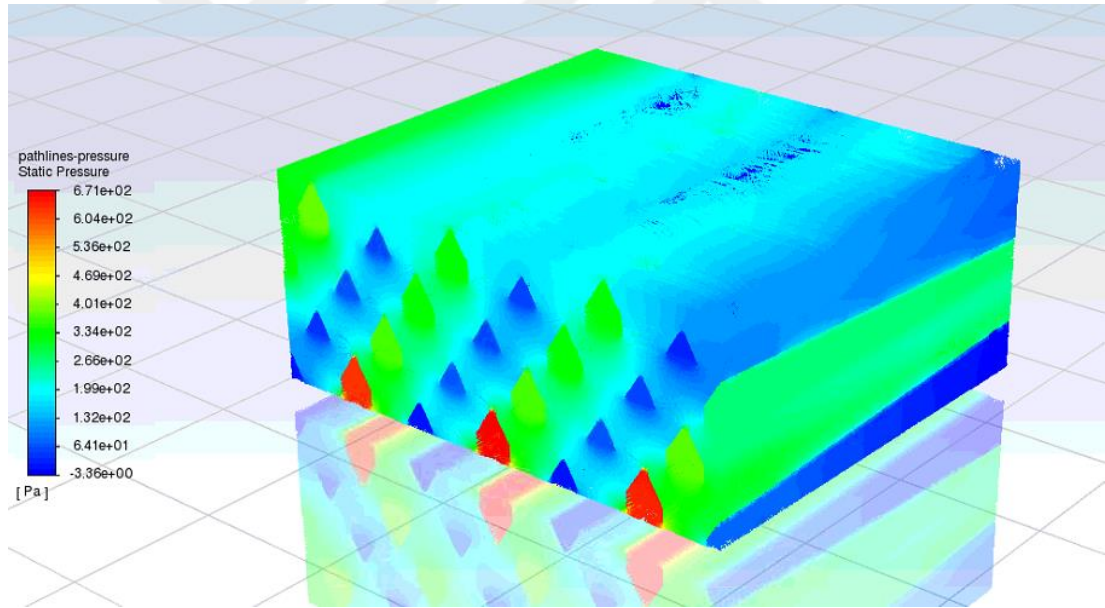
Şekil 6.9. Model 5 hız dağılımı

Şekil 6.9.'da hız dağılımı görülmektedir. Kanal girişinde hava hızı 4,5 m/s dir. Kanal kesit alanı sabit olmadığından dolayı akışkan çatı kanalda ilerledikçe hızlanmakta, maksimum hız 16,43 m/s olmaktadır. Kanal çıkış kapalı olduğundan dolayı hava poroz bölgeye nüfuz etmektedir. Sonrasında çıkmak için basınç farkından dolayı çıkış yüzeyi

açık olan kanallara doğru hareket etmekte, iyice karışmakta ve tahıl haznesini terk etmektedir.

Kurutma analizinin basınç dağılımı aşağıda verilen Şekil 6.10.'da görülmektedir. Soğuk havanın giriş yaptığı kanallar yeşil renkte görülmekte ve içeride dolaşıp çıkış kanalına girdiği noktalar mavi renkte görülmektedir. Giriş kanalında yüksek basınçta giren hava kurutma haznesinde dolaşırken basıncı azalmakta ve çıkış kanalına girdikten sonra çıkış noktasında atmosfere açıldığı için O'ya yaklaşmaktadır.

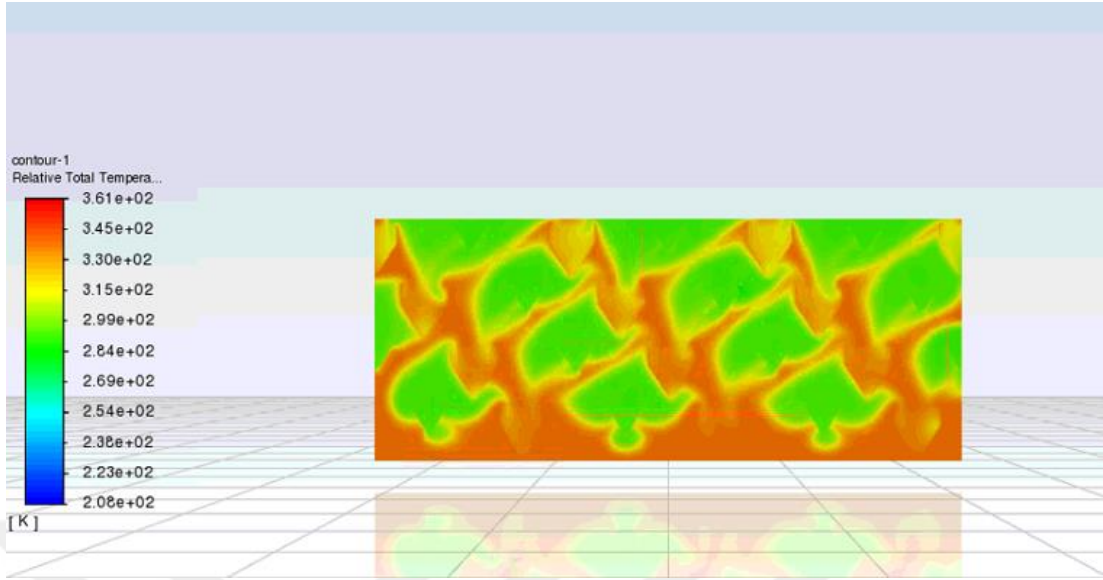
Kurutma haznesi gerçekte dört bölmeden oluşmaktadır. Analiz sürelerini dörtte bir oranında azaltmak için tek bölme için analiz yapıldığından en alt duvar simetri olarak tanımlanmıştır. Bu yüzden alt giriş kanalları daha yüksek basınçta görülmektedir. Analiz sonuçlarında bu alt üç kanal ihmal edilmektedir.



Şekil 6.10. Model 5 basınç dağılımı

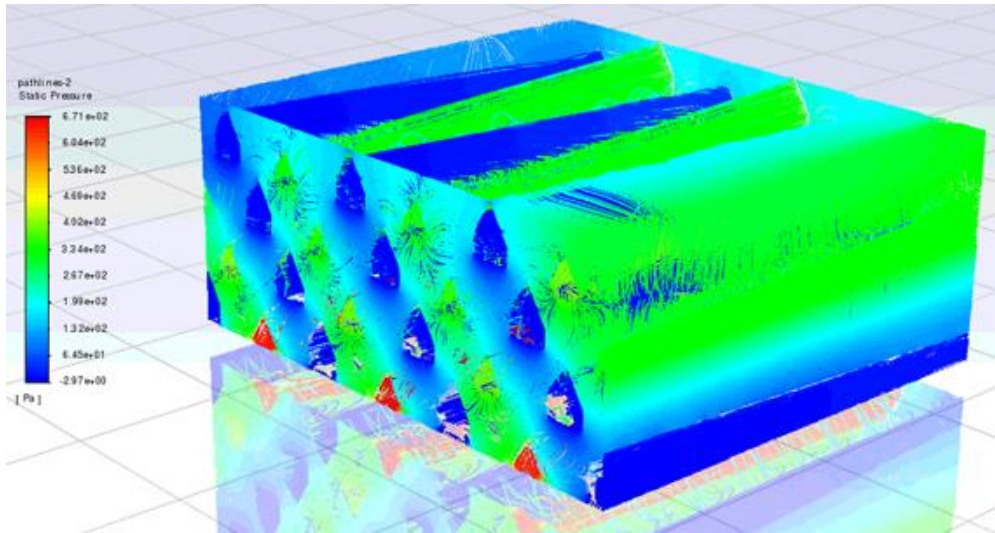
Kurutma bölümünden çıkan sıcak mısırın soğutulması gerekmektedir. Kurutma haznesinden alınan 338 K değerindeki ürün en alttaki haznede 293 K soğuk hava akışkanı verilerek soğutma prosesi uygulanmıştır.

Soğutma prosesini doğrulamak amacıyla yapılan soğutma analizinde çıkış yüzeyindeki bölgeden alınan aşağıdaki Şekil 6.11.'de sıcaklık dağılımı görülmektedir.



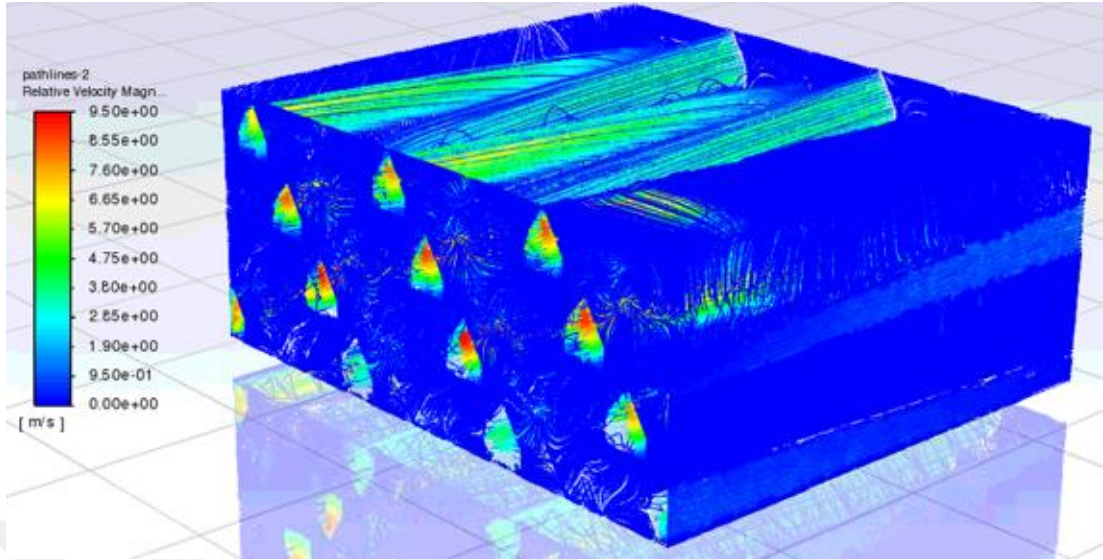
Şekil 6.11. Model 5 Çıkış yüzeyi zamana bağlı soğutma analizi sıcaklık dağılımı

Aşağıda verilen Şekil 6.12.'de basınç dağılımını gösteren akım çizgileri verilmektedir. Şekildede görüldüğü üzere kanalların giriş bölgesinden çıkışa doğru gidildikçe basınç azalır, 0 Pa' a yaklaşmaktadır.



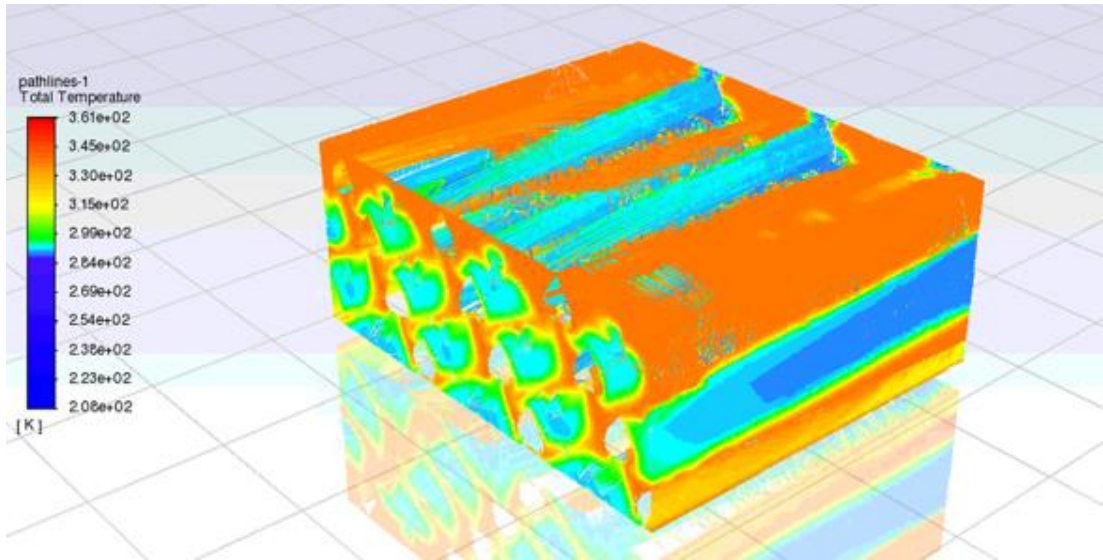
Şekil 6.12. Model 5 akış boyunca basınç dağılımı

Aşağıda verilen Şekil 6.13.'de hız değişimi incelendiğinde kanal içlerindeki hızın maksimum olduğu, kanal dışına doğru hızın azaldığı ve kurutma hazne içindeki hızın daha da az olduğu görülmektedir.



Şekil 6.13. Model 5 akış boyunca hız dağılımı

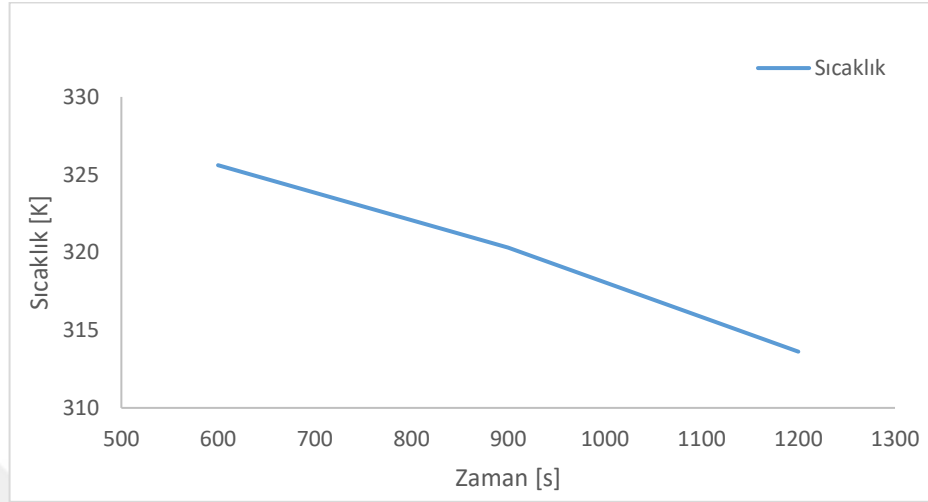
Aşağıda verilen Şekil 6.14.'de de akış boyunca sıcaklığın değişimi görülmektedir. Giriş kanalından verilen soğuk havanın sıcaklığı kanal boyunca yükseldiği ve kanal çevresindeki ürünlerin sıcaklığının daha düşük olduğu uzaklaştıkça değiştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 6.14. Model 5 akış boyunca sıcaklık dağılımı

Boşaltma hızı ayarlanarak kurutma haznesindeki kalma süresini değiştirilebilir. Soğutma haznesinde 10,15 ve 20 dk boyunca kaldığı durumda mısır sıcaklığının

değişimi Şekil 6.15.'de verilmiştir. 10. dk'da sıcaklık 325 K iken, 15.dk'da 320 K'ne, 20.dk'da 313 K'e düşmektedir.

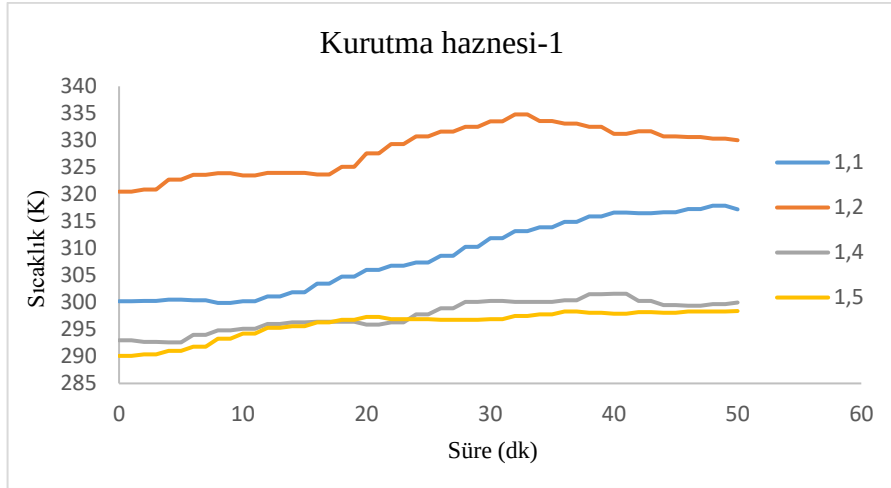


Şekil 6.15. Model 5 Soğutma koşulunda zamana bağlı sıcaklık değişimi

6.2. Deney Sonuçları ile HAD Sonuçlarının Karşılaştırılması

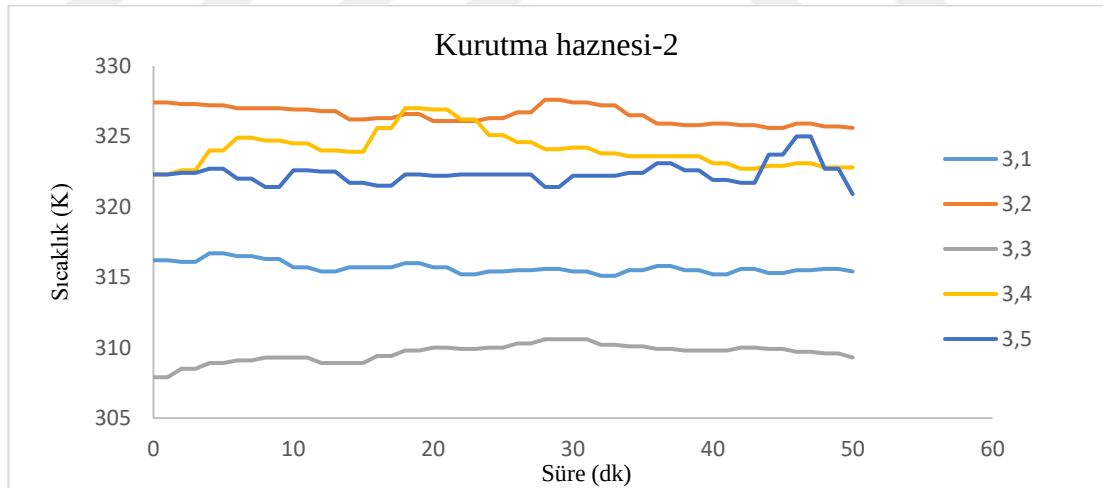
Gerçek geometriye (Model 5) ait HAD sonuçları, test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sırasında hava akımının geçtiği kanallara konulan sıcaklık sensörleri ile hava çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Aşağıda verilen grafiklerde kurutma yapılan 1.,2. ve 3. oda ve soğutma yapılan 4.odadaki kanal sıcaklıklarının grafikleri verilmektedir.

Şekil 6.16.'da ilk kurutma modülündeki hava çıkış sıcaklıkları görülmektedir. Sıcaklık ölçerlerin arasında 30 ila 60 cm arasında mesafe vardır. Bunker bölümünden dış atmosfer koşullarında mısır (17 °C) kurutma bölümüne giriş yaptığı için sıcak havanın enerjisi mısırın ısınması için harcanır. Bu nedenle haznenin üst kısmında ölçülen sıcaklıklar düşüktür. Mısır aşağıya doğru ilerlerken ısı geçişi ile birlikte kütle geçişi de gerçekleşir. Hava sıcaklığı yükselmez. Kurutma başlangıcında 290 K iken kurutmanın sonuna doğru arttığı görülmektedir.

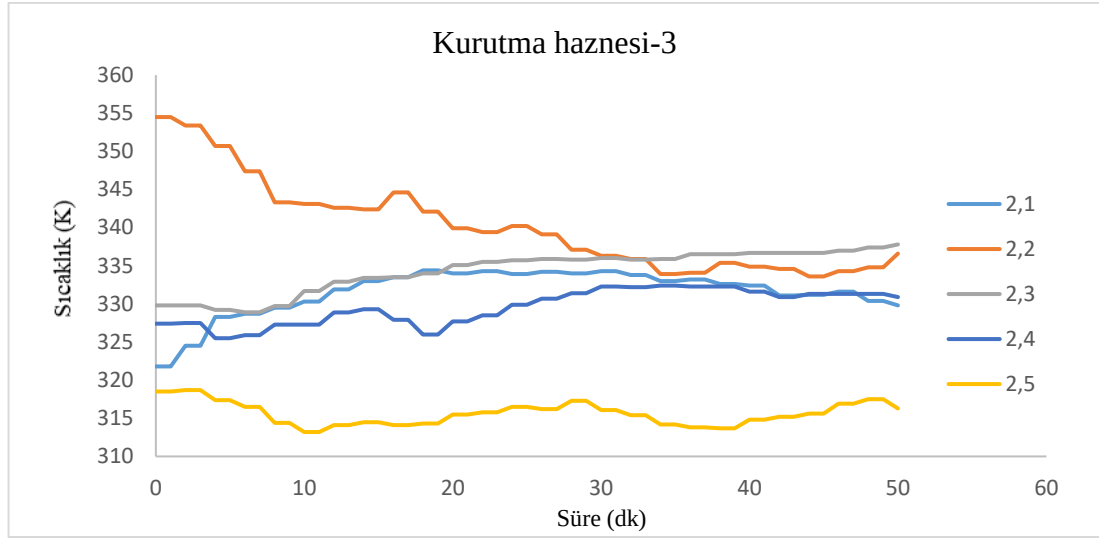


Şekil 6.16. Model 5 kurutma modülü1 sıcaklık grafiği

Şekil 6.17.'de ikinci ve Şekil 6.18.'de üçüncü kurutma modülündeki her bir kanaldan geçen havanın zamana bağlı sıcaklık değişimleri görülmektedir. Isı geçişinden dolayı mısır haznelerden aşağıya doğru indikçe kurutma havasının sıcaklığı düştüğü için mısırın sıcaklığı artmaktadır. Mısırın sıcaklığı arttıkça nem oranı da doğru orantılı olarak azalmaktadır.

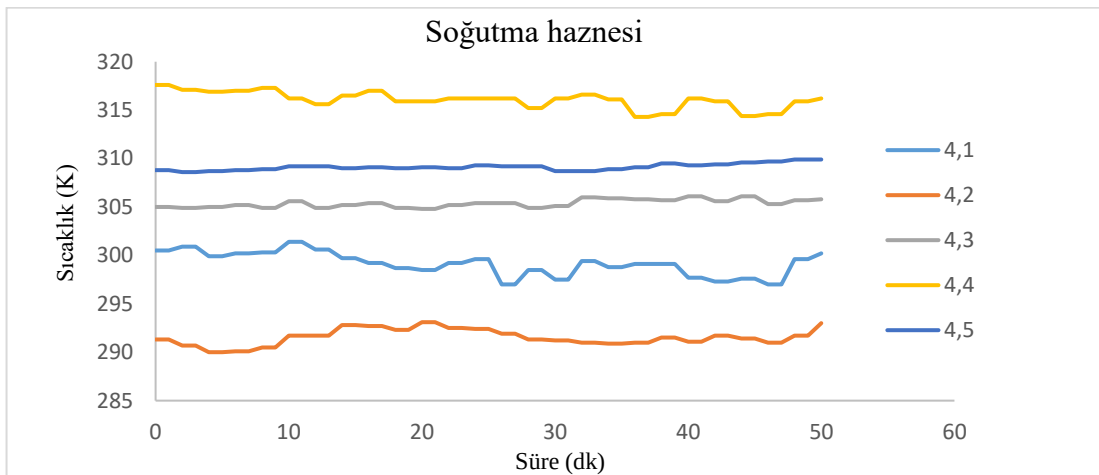


Şekil 6.17. Model 5 kurutma modülü2 sıcaklık grafiği



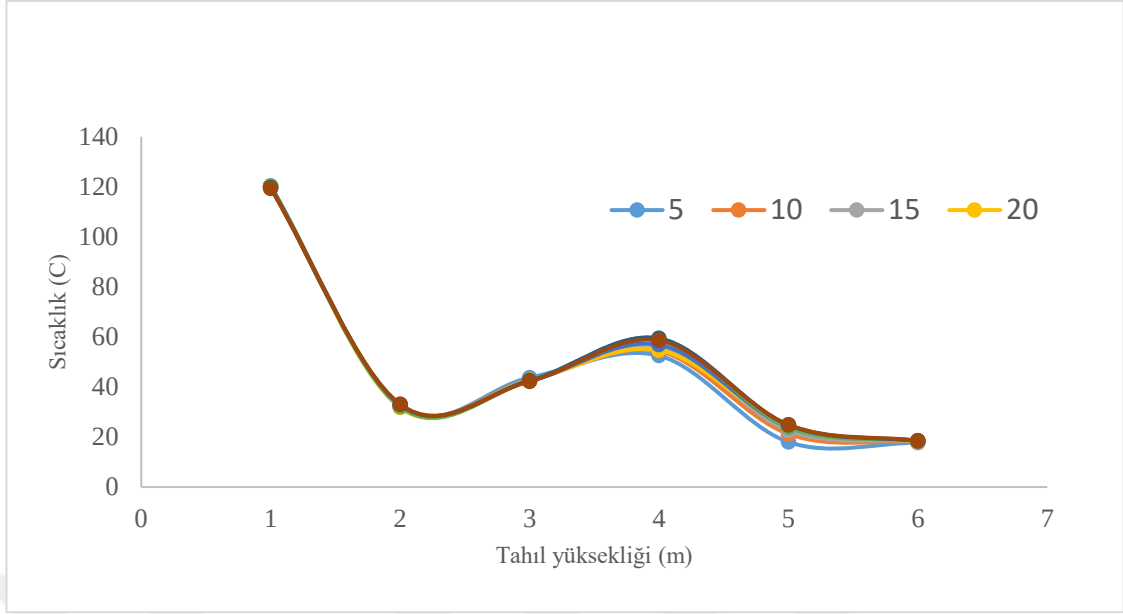
Şekil 6.18. Model 5 kurutma modülü3 sıcaklık grafiği

Şekil 6.19.'da dördüncü ve son hazne olan soğutma modülündeki her bir kanaldan geçen sıcaklıkların zamana bağlı sıcaklık değerleri görülmektedir. Haznenin içerisindeki kanal konumlarına göre yukarıdan aşağıya doğru sıcaklık değerleri düşmektedir. Bu bağlamda yukarıdan gelen sıcak hava aşağıya indikçe ürünü kuruttuğundan ve bu bölmedeki hazneye ek fan ile soğutma havası girişi olduğundan aşağıdaki bölgelerde bulunan kanallarda sıcaklık daha düşüktür.



Şekil 6.19. Model 5 soğutma modülü sıcaklık grafiği

Şekil 6.20.'de Sıcaklık ve tahıl yüksekliği grafiğinde 120 °C de giren havanın 5,10,15 ve 20. Dakikadaki sıcaklık değişimleri verilmektedir.



Şekil 6.20. Model 5 tahıl yüksekliği- sıcaklık grafiği

Tablo 6.7.'de farklı hızlar için Model1, Model 2, Model 3 ve Model 4'ün metre başına düşen basınç düşümleri verilmektedir. Teorik basınç düşümü denklemi kullanılarak yapılan hesaplama sonucunun Model1 ile uyum içerisinde olup diğer modellerden farklı olmasının sebebi teorik hesaplamada kanallı yapı için denklemin yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 6.7. Tüm modeller için hıza bağlı analiz sonuçları

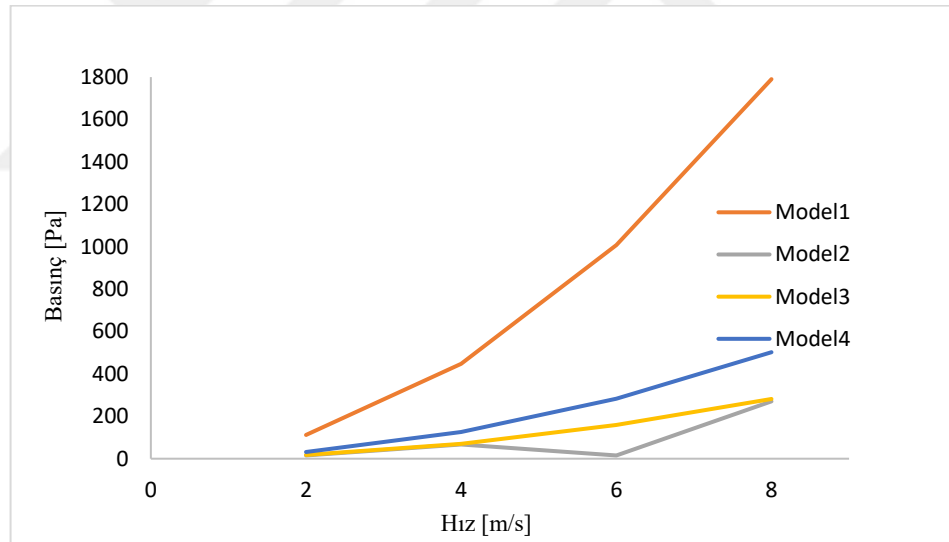
Vg [m ³ /s]	Pg,teo [Pa]	Pg,1 [Pa/m]	Pg,2 [Pa]	Pg,3 [Pa/m]	Pg,4 [Pa/m]
2	183,001	111,945	15,152	17,718	31,532
4	369,600	447,648	67,759	70,605	125,786
6	559,798	1007,094	15,152	158,586	282,699
8	753,595	1790,297	270,478	281,644	502,179

Model 5'in farklı hızlar için yapılan analizlerinde verdiği metre başına karşılık gelen basınç düşümleri aşağıdaki Tablo 6.8.' de verilmektedir.

Tablo 6.8. Model 5 için hıza bağılı analiz sonuçları

Vg [m ³ /s]	Pg,5 [Pa/m]
3	137,6
3,5	161,892
4	186,084
4,5	199,96
5	233,376

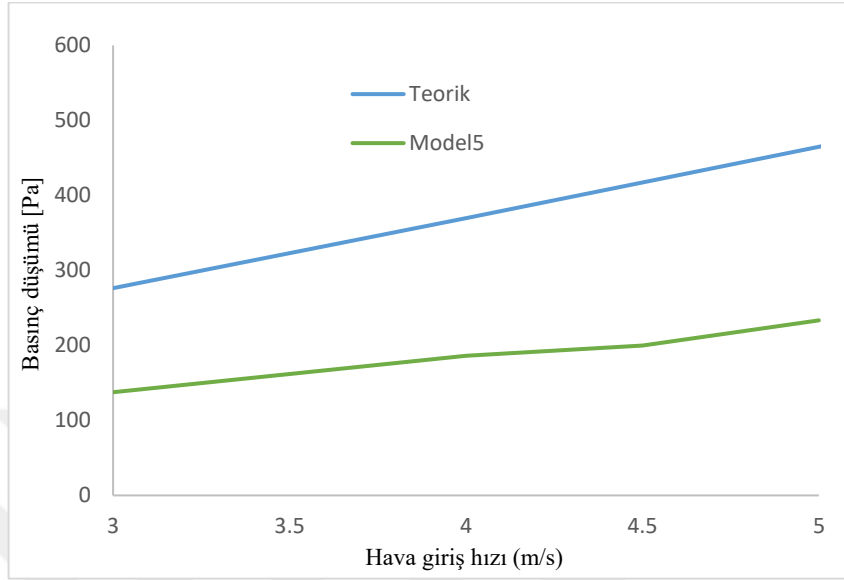
Şekil 6.21.'de Model 1, 2, 3 ve 4' de HAD sonuçları görülmektedir. Grafikte basınç düşümünün, hava giriş oranı ile değişimi verilmiştir. Buna göre, tüm hava hızları için en yüksek basınç düşümü hava kanalı olmayan Model 1'de olduğu görülmektedir. Model 2 ile Model 3' de basınç düşümü verileri birbirleri ile uyuşurken, Model 4'te, Model 2 ve 3'e göre daha yüksek basınç düşümü hesaplanmıştır. Burada toplam hava giriş kesit alanında azalmanın basınç düşümünü artırdığı görülmüştür. Sonuç olarak basınç düşümü bakımından köşegen ile sıralı dizilim modelleri arasında fark olmadığı, hava kanallarının basınç düşümünü azalttığı söylenebilir.



Şekil 6.21. Tüm modellerin basınç düşümü karşılaştırma grafiği

Şekil 6.22.'de gerçek geometriye ait HAD analizi sonucunda elde edilen basınç düşümü değerleri sunulmuştur. HAD sonuçları, denklem 5.1'den elde edilen teorik veriler ile karşılaştırılmıştır. Buna göre teorik verilerin HAD sonuçlarından elde edilenden daha yüksek olduğu görülmüştür. Denklem 5.1 gözenekli ortamlar için analitik bir denklem olup, kanallı akış düzenlemesi durumunda yetersiz kalmaktadır. Sonuç olarak tahıl kurutucularda hava akış kanalları basınç düşümünü azaltacak yönde

katkı yapmaktadır. Hava kanallı düzenlemeleri hava akışı doğrultusu yönünde daha uzun tahıl haznelerine olanak sağlamaktadır.



Şekil 6.22. Model 5 ve teorik basınç düşümü grafiği

BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kapalı tip kanallı hazneli sürekli akışlı tahıl kurutma makinesinde mısır kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde sıcak hava çıkışında birçok konumda sıcaklık ölçümleri ile basınç farkı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, yukarıdan aşağıya hareket eden tahılın kurummasına bağlı olarak ürün ve hava sıcaklıklarının arttığı, soğutma hacmine girdiğinde tahılın en yüksek sıcaklıkta olduğu görülmüştür. Bu durum tahılın depoya sevk edilmeden soğutulması gerektiğini bir kez daha göstermiştir. Basınç düşümü ölçümleri ise kanallı haznelerde bir metre başına basınç düşümünün, mevcut teori ile karşılaştırıldığında çok daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu durum, kanallı tahıl haznelerinin akış doğrultusu boyunca izin verilen mesafenin artmasının basınç düşümü açısından sorun teşkil etmeyeceğini göstermiştir.

Tahıl haznelerindeki kanal geometrisinin ve akış düzeninin basınç düşümüne, ürün sıcaklığına ve hava çıkış sıcaklığına etkisini görmek amacıyla dört farklı HAD modeli oluşturulmuştur. Model 1 hava kanalları içermeyen model olup, gözenekli akış modeli ile sınır koşullarının belirlenmesi ve kanallı modeller ile karşılaştırmak için analizleri gerçekleştirilmiştir. Kanal geometrisi ve akış düzenini incelemek amacıyla hava kanallı Model 2 ve 3 oluşturulmuş, köşegen ve sıralı dizilimli olduğu durumlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar köşegen dizilimli kanallı yapının sıralı dizilime göre daha üstün olduğunu göstermiştir. Hava akış kanalı geometrisi büyütülerek, aynı hacme sahip Model 4 oluşturulmuştur. Hava giriş kesiti arttığında aynı hava hızlarında giren havanın kütleli debisi arttığından basınç düşümünün Model 2 ve 3'e oranla arttığı görülmüştür. Hava giriş hızı düşürüldüğü durumda gözenekli bölgeden akan havanın hızı da düşeceğinden hava kanallarının kesit alanının büyük tutulmaması önerilir. Son olarak kurutma makinesinin kanallı tahıl haznesinin (Model 5) HAD analizleri gerçekleştirilmiş, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sıcaklık ve basınç

düşümü değerlerinin uyum içinde olduğu, deneylerin HAD sonuçlarını doğruladığı görülmüştür. Bu durum farklı kapasiteler için kurutma makinelerinin tasarlandığı durumlarda soğutma hacimlerinin öngörülmesi için HAD analizlerinin kullanılabileceğini göstermiştir. Diğer taraftan gözenekli hacimlerde akış için kullanılan mevcut basınç düşümü denklemlerinde elde edilen veriler ile hem HAD sonuçları hem de deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Teorik denklemden elde edilen basınç düşümü verilerinden deney sonuçlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kullanılan teorik denklemlerin gözenekli ortamlar için analitik denklemler olduğu, kanallı akışlar için yetersiz kaldıkları ve tahıl kurutucularda hava akış kanallarının basınç düşümünü azaltacak yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır. Yapılan analizlerde sadece enerji, süreklilik ve momentum denklemleri kullanılmış ve nem oranının incelendiği çoklu faz sınır koşulları kullanılmamış, sıcak hava ile uzaklaştırılan nem ihmal edilmiştir. Bu yüzden gerçek geometri için yapılan kurutma koşulu için analizler ile deneysel sonuçlar arasında farklılıklar olmuştur. Soğutma durumunda ise analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar örtüşmüştür. Bu çalışmada kullanılan hesaplama modeli gözenekli tahıl ortamında soğutma koşullarında kullanılması, ileriki çalışmalarda kütle transferinin dâhil edildiği modeller üzerine yoğunlaşılması önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] Plumb, O.A., Brown, C.A., Olmstead, B.A., Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine, *Wood Science and Technology* 18:187-204, 1984.
- [2] Trelea, I.C., Trystram, G., Courtois, F., Optimal constrained non- linear control of batch processes: application to corn drying. *J Food Eng* 31(4):403–421. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(96\)00096-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(96)00096-9), 1997.
- [3] Giner, S.A., Bruce, D.M., Mortimore, S., Two-Dimensional Simulation Model of Steady-State Mixed-Flow Grain Drying. Part 1: The Model *J. agric. Engng Res.* 71, 37—50 Article No. ag980297, 1998.
- [4] Tremblay, C., Cloutier, A., Fortin, Y., Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying, *Wood Science and Technology* 34 253[6]-276 Springer – Verlag 2000
- [5] Etemoglu, A.B., Can, M., Avci, A., Pulat, E., Theoretical study of combined heat and mass transfer process during paper drying, DOI 10.1007/s00231-004-0538-0, 2005.
- [6] Mellmann, J., Kocsis, L., Gottschalk, K., Mészáros, Cs., Farkas, I., Development of the Heat and Mass Transfer Model for Mixed-Flow Grain Dryer. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control* Seoul, Korea, July 6-11, 2008
- [7] Veladat, R., Ashtiani, F.Z., Rahmani, M., A Rigorous Analysis of Simultaneous Heat and Mass Transfer In The Pasta Drying Process, *Heat Mass Transfer*, 49:1481-1488, DOI 10.1007/S00231-013-1189-9, 2013.
- [8] Heikki, T.J., Jukka, M.A., Drying Process Optimisation In A Mixed-Flow Batch Grain Dryer, *Biosystems Engineering* Volume 121, May 2014, Pages 209-220 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>, 2014.
- [9] Jokiniemi, T., Ahokas, J., Effect Of Heat Insulation On The Energy Consumption Of Recirculating Mixed-Flow Batch Grain Dryer, September, 2014 *Agric Eng Int: CIGR Journal* Open access at <http://www.cigrjournal.org> Vol. 16, No.3 205 Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki, Koetilantie 5, P.O. Box 28, FI-00014 University of Helsinki, Finland, 2014.

- [10] Jokiniemi, T., Oksanen, T., Ahokas, J., Continuous Airflow Rate Control In A Recirculating Batch Grain Dryer, *Agronomy Research* 13(1), 89-94, 2015.
- [11] Parlak, N., Fluidized bed drying characteristics and modeling of ginger (*zingiber officinale*) slices. *Heat Mass Transf* 51:1085– 1095. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1480-4>, 2015.
- [12] Gornicki, K., Kaleta, A., Resistance Of Bulk Grain To Airflow-A Review. Part II: Effect Of Process Parameters, *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW* 2015:43-51, 2015.
- [13] Jokiniemi, T., Hautala, M., Oksanen, T., Ahokas, J., Parallel Plate Heat Exchanger For Heat Energy Recovery In A Farm Grain Dryer, *Drying Technology* 2016, VOL. 34, NO. 5, 547–556 <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1061541>, 2016.
- [14] Sahdev, R.K., Kumar, M., Dhingra, K.A., Effect of mass on convective heat transfer coefficient during open sun drying of groundnut, *Association of Food Scientists & Technologists*, 54(13):4510–4516 DOI 10.1007/s13197-017-2858-3, 2017.
- [15] Charmongkolpradit, S., Luampon, R., Study of thin layer dry- ing model for cassava pulp. *Energy Procedia* 138:354–359. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.138>, 2017.
- [16] Onwude, D.I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., Chen, G., Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption, *Heat and Mass Transfer* 54:2917–2933 <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2338-y>, 2018.
- [17] Mellmann, J., Weigler, F., Scaar, H., Research on Procedural Optimization and Development of Agricultural Drying Processes, *Drying Technology* 2019, VOL.37, NO.5,569-578 <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1494186>, 2019.
- [18] Turkan, B., Etemoğlu, A., Burak, C.M., An Investigation Into Evaporative Ink Drying Process On Forced Convective Heat And Mass Transfer Under Impinging Air Jets, *Heat and Mass Transfer* 55:1359-1369 <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2515-z>, 2019.
- [19] Reichert, I., Olney, P., Lahmer, T., Influence of the error description on model-based design of experiments. *Eng Struct* 193(15): 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.002>, 2019
- [20] Koukouch, A., Bakhattar, I., Asbik, M., Idlimam A., Zeghmatti, B., Aharoun, A., Analytical solution of coupled heat and mass transfer equations during convective drying of biomass: experimental validation, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020, <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02817-w>, 2020.

- [21] Syahrul, S., Hamdullahpur, F., Dincer, I., Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Appl Therm Eng* 22:1763-1775. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(802\)0079-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(802)0079-0), 2002.
- [22] Çil, B., Topuz, A., Fluidized bed drying of corn, bean and chickpea. *J Food Process Eng* 33(6):1079-1096. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00327.x>, 2009.
- [23] Janas, S., Boutry, S., Malumba, P., Elst, L.V., Bera, F., Modelling defydration and quality degradation of maize during fluidized-bed drying. *J Food Eng* 100(3):527-534 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.001>, 2010.
- [24] Corrêa, P.C., Botelho, F. M., Oliveira, G. H. H., Goneli, A. L. D., Resende, O., Campos, S.C., Mathematical modeling of the drying process of corn ears. doi: 10.4025/actasciagron.v33i4.7079. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(4), 575-581. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i4.7079>, 2011.
- [25] Ozahi, E., Demir, H., Presentation of a test rig with its experimental procedure and uncertainty analysis of measurements for batch type fluidized bed drying of corn and unshelled pistachio nut. *Measurement* 53:117–127. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.043>, 2014.
- [26] Wei, S., Wang, Z., Xie, W., Wang, F., Chen, P., Yang, D., A heat and mass transfer model based on multi-component heterogeneity for corn kernel tempering drying: Development and application. *Comput Electron Agric* 171:105335, 2020.
- [27] Çelik, E., Parlak, N., Çay, Y., Experimental and numerical study on drying behavior of CORN grain, Received: 1 May 2020 /Accepted: 31 August 2020 Published online: 10 September 2020 / *Heat and Mass Transfer* (2021) 57:321–332, 2020.
- [28] Çelik, E., Parlak, N., Çay, Y., Exergy and Analyses of Corn Drying Process: An Experimental Study In a Laboratory- Scale Dryer, *Heat Transfer Research* 52(3):1-13, 2021.
- [29] Owusu-Sekyere, E., Obeng-Akrofi, G., Akowuah, J.O., Maier, D., Performance Analysis and Drying Kinetics of Maize in an AflaSTOP Dryer. *Open Journal of Applied Sciences*, 11, 327-342. doi: 10.4236/ojapps.2021.113024. 2021.
- [30] Giner, S.A., Bruce, D.M., Mortimore, S., Two- Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-flow Grain Drying. Part 1: The Model, *J.agric.Engng Res.* 71,37-50, 1998.
- [31] Weigler, F., Scaar, H., Mellmann, J., Investigation of Particle and Air Flows in a Mixed- Flow Dryer, *Drying Technology*, 30: 1730–1741, 2012 Copyright # 2012 Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 0737-3937 print=1532-2300 online DOI: 10.1080/07373937.2012.703742, 2012.

- [32] Liu, Z., Wu, Z., Wang, X., Song, J., Wu, W., Numerical Simulation and Experimental Study of Deep Bed Corn Drying Based on Water Potential, vol 13 Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering <https://doi.org/10.1155/2015/539846>, 2015.
- [33] Yuan, Y., Tan, L., Zhao, Z., Xu, Y., Zhao, Y., Yuan, Y., Multiscale and multilayer structural modeling and simulation on drying of grain packing porous media. *Dry Technol* 34(14):1664–1676. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1141213>, 2016.
- [34] Olatunde, G., Atungulu, G.G., Sadaka, S., CFD Modeling Of Air Flow Distribution In Rice Bin Storage System With Different Grain Mass Configurations, *Biosystems Engineering* Volume 151, November 2016, Pages 286-297 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.007>, 2016.
- [35] Oksanen, T., Controlling Air Flow in Recirculating Mixed Flow Batch Dryer With Double Bed Mod, *Computers and Electronics in Agriculture* Volume 149, June 2018, Pages 133-138 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.018>, 2018.
- [36] Wei, S., Xiao, B., Xie, W., Wang, F., Chen, P., Yang, D., Stress simulation and cracking prediction of corn kernels during hot-air drying. *Food Bioprod Process* 121:202-212 <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01007>, 2020.
- [37] Babaoğlu, M., Trakya Tarımsal Araştırmalar Enstitüsü Müdürlüğü. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/ttae/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=89>, 2021.
- [38] Tmmob Ziraat Mühendisleri Odası Misir Raporu, http://zmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=32782&tipi=3&sube=0, 2020
- [39] Baş, B., Mısırın Çeşitli Kurutma Yöntemleriyle Kurutulması Üzerine Bir Araştırma, Y. Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, 2010.
- [40] Özgül, K., Ürünlerin Kuruma Karakteristik Değerlerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [41] Bayhan, H.A., (2011) Kabin Tipi Bir Kurutucuda Kurutma Sürecini Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2011.
- [42] http://www.adakurutma.com.tr/urun_kule_kurutucular.html., Erişim Tarihi: 11.03.2022.
- [43] <https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/en/products/ecodry dryer.html>., Erişim Tarihi: 21.01.2022.

- [44] Güngör, A., Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 17/20 Nisan 2013/İzmir, 2013.
- [45] Güngör A., Özbalta N., Endüstriyel Kurutma Sistemleri, Necdet Özbalta II Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 2013.
- [46] Nezaket Parlak Kurutma Tekniği Ders Notları, Doç.Dr. Nezaket Parlak
- [47] Baytaş, A.C., Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, İTÜ Dergisi, Fen Bilimleri, 4(1), 3-13, 2006.
- [48] <http://www.adakurutma.com.tr>, Erişim Tarihi: 22.02.2022.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Esra YİĞİN

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği / Enerji	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği	2016
Lise	Mithatpaşa Şükrü Ayna Anadolu Lisesi	2012

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	Başak Traktör	Motor Geliştirme Mühendisi
2016-2019	BilgiAdam (Ford Otosan Projesi)	Makine Mühendisi
2015	Sakarya Üniversitesi	Yabancı Öğrenci Asistanlığı

YABANCI DİL

İngilizce, Almanca

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

CFD Flow Analysis of a Lab-Scale Grain Drying Chamber (BİL TEK-V)

HOBİLER

Piyano çalmak, Doğa yürüyüşü yapmak