



**YENİ TİP PÜSKÜRTMELİ KURUTUCUDA ISI VE KÜTLE
TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

Yük. Müh. Sinem IŞIK

DOKTORA TEZİ

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği
Programı: Termodinamik**

Danışman: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ

NİSAN- 2019

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

**YENİ TİP PÜSKÜRTMELİ KURUTUCUDA ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Sinem IŞIK

(142120203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 Mart 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 19 Nisan 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Mehmet ESEN (F.Ü)

Doç. Dr. Gülşah ÇAKMAK (F.Ü)

Doç. Dr. Hasan BAYINDIR (D.Ü)

Doç. Dr. Atilla G. DEVECİOĞLU (B.Ü)

MART-2019

ÖNSÖZ

Doktora tezi olarak hazırlamış olduğum bu çalışmada, yeni tip püskürtmeli kurutucuda ısı ve kütle transferi incelenmiştir.

Yapmış olduğum çalışmalarım sırasında bilgi birikimini, tecrübelerini, dostane desteğini, maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Cengiz YILDIZ'a her zaman yanımda olduğu ve beni desteklediği için çok teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince tez izleme komitemde yer alan Sayın Prof. Dr. Mehmet ESEN ve Sayın Doç. Dr. Gülşah ÇAKMAK'a teşekkürlerimi sunarım. Öğrenim hayatım boyunca bilgilerini ve fikirlerini benimle paylaşan, yardımlarını esirgemeyen amcam Sayın Doç. Dr. Erol KILIÇKAP'a teşekkürlerimi sunarım. Makine Mühendisliği Bölümü öğrencilerinden Emre METİN, İbrahim Halil DOĞAN, Yusuf ÇELİK ve Beyzanur ER'e teşekkürlerimi sunarım. Makine Mühendisliği Bölümü Atölyesindeki çalışanlara verdikleri yardımlardan dolayı teşekkürlerimi sunarım. Daima yanımda olan ve beni destekleyen arkadaşlarım Arş. Gör. Ebru DOĞAN, Arş. Gör. Fatma ARVAS ve Arş. Gör. Hamide DEĞER, Arş. Gör. Şule MELEK ve Merve TOPTAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımı gerçekleştirmemde MF.17.03 numaralı proje ile verdiği mali destekten dolayı Fırat Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP)'ne teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca verdiğim bütün kararlarda beni destekleyen, özverili bir şekilde sürekli yanımda olan, sevgilerini, maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen çok değerli annem Asuman KILIÇKAP ve babam Tahir KILIÇKAP'a çok teşekkür ederim. Son olarak desteğini her daim hissettiğim, her zaman yanımda olan sevgili eşim Murat IŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla.

Sinem IŞIK
ELAZIĞ-2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LİSTESİ.....	XVIII
KISALTMALAR.....	XIX
SEMBOLLER LİSTESİ	XX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.2. Kurutma ve Kurutma Sistemleri.....	18
1.2.1. Kurutma.....	18
1.2.1.1. Kurutma Sistemi Seçimi.....	20
1.2.2. Kurutma Teorisi.....	23
1.2.2.1. Katıların Nem İçeriği.....	26
1.2.2.2. Nem İzotermi.....	27
1.2.2.2.1. Sorpsiyon-Desorpsiyon Histerezisi	29
1.2.2.2.2. Sorpsiyon İzotermi'nin Belirlenmesi.....	30
1.2.3. Isı ve Kütle Transferi.....	31
1.3. Teknolojik Kurutma Sistemleri	32
1.3.1. Isı Pompası ile Kurutma	32
1.3.2. Mikrodalga Kurutma	33
1.3.3. Aşırı Isıtılmış Buharlı Kurutma.....	33
1.3.4. Aşırı Isıtılmış Buharlı Flaş Kurutma	33
1.3.5. Dondurarak Kurutma.....	34
1.3.6. Vakum Kurutma	34
1.3.7. Hibrit Kurutma/Kombinasyon Kurutma.....	34

1.3.8. Mikrodalga Konveksiyon ve Mikrodalga Vakum Kurutma.....	34
1.4. Püskürtmeli Kurutma.....	35
1.5. Püskürtmeli Kurutma İşleminin Aşamaları	36
1.5.1. Püskürtmeli Kurutucuda Atomizasyon.....	39
1.5.1.1. Atomizasyon İşleminin Teorisi	42
1.5.2. Püskürtmeli Kurutma İşleminde Damlacık Kurutma	44
1.5.3. Damlacık Boyutu ve Dağılımı.....	45
1.5.4. Başlangıç Damlacık Boyutunun Son Parçacık Boyutu ile İlişkisi	47
1.5.5. Damlacık Hava Teması	48
1.5.6. Damlacıkların Kurutulması	48
1.5.7. Kurutulmuş Ürünlerin Havadan Ayrılması	49
1.5.8. Püskürtmeli Kurutma Tekniği İle Üretilen Tozların Özelliklerini Etkileyen Faktörler	50
1.5.8.1. Giriş Hava Sıcaklığı	50
1.5.8.2. Kurutma Havası Akış Hızı	52
1.5.8.3. Atomizer Hızı	52
1.5.8.4. Besleme Akış Hızı.....	53
1.5.9. Şekerce Zengin Gıdaların Püskürtülerek Kurutulması.....	53
1.5.10. Kurutma Yardımcı Maddeleri	54
1.5.11. Püskürtmeli Kurutucularda Isı ve Kütle Transferi	54
2. MATERYAL VE METOT	60
2.1. Deneylerde Yapılan Ölçümler ve Kullanılan Ölçme Aletleri	64
2.1.1. Sıcaklık Ölçümleri.....	64

2.1.2. Çıkış Hava Neminin Ölçümü	65
2.1.3. Çıkış Hava Hızının Ölçümü	65
2.1.4. Kurutma ve Ürün Odası Cam Sıcaklıklarının Ölçümü.....	66
2.1.5. Hassas Terazî.....	66
2.1.6. Toz Ürünün Nem Tayin Cihazı	67
2.1.7. Parçacık Morfolojisi, Boyutları ve Sem Görüntüleri	68
2.2. Deneylerin Yapılışı.....	68
2.3. Ölçülen Değerlerin Hata Analizi	71
3. BULGULAR	73
3.1. Püskürtmeli Kurutucunun Isıl Verimliliği.....	73
3.2. Değişen Parametrelere Göre Püskürtmeli Kurutucudan Elde Edilen Toz Ürün Miktarları	75
3.3. Kurutulmuş Tozların Karakterizasyonu	85
3.3.1. Tozların Nem İçeriği	85
3.3.1.1. Süt Tozlarının Nem İçeriği.....	85
3.3.1.2. Domates Suyu Tozlarının Nem İçeriği.....	87
3.3.1.3. Elma Suyu Tozlarının Nem İçeriği.....	88
3.4. Püskürtmeli Kurutucuda Süt Kurutulması Sırasındaki Analizler.....	90
3.4.1. Geliştirilmiş Püskürtmeli Kurutucuda Elde Edilen Süt Tozu Analizleri....	108
3.5. Standart ve Geliştirilmiş Püskürtmeli Kurutucuda Domates Suyu Kurutulması Sırasındaki Analizler.....	112
3.6. Standart ve Geliştirilmiş Püskürtmeli Kurutucuda Elma Suyu Kurutulması Sırasındaki Analizler.....	120
3.7. Parçacık Morfolojisi	120
3.7.1. Toz Ürünlerin SEM Görüntüleri	120
3.7.2. Toz Ürün Damlacık Boyutları	126
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	132
5. ÖNERİLER.....	136
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ	151

ÖZET

Kurutma, ürünün içeriğinde bulunan nemi uzaklaştırma işlemidir. Gıdaların kalitesini bozmadan raf ömrünü uzatmak için kullanılan en eski ve ucuz yöntemlerden birisidir. Kurutulmuş ürünün ağırlığı azaldığından dolayı, taşınabilme ve paketlenme kolaylığı sağlamaktadır. Kurutma işlemi gıda, kimya, ilaç ve tarım gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutma işlemi için mikrodalga, vakum, dondurarak, hibrit ve püskürtmeli kurutma gibi birçok kurutma yöntemi kullanılmaktadır.

Gıda sanayisinde toz ürün elde etmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri püskürterek kurutmadır. Püskürtmeli kurutma yöntemi daha çok ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için kullanılmaktadır. Püskürterek kurutma işleminde ürün, sıcak hava bulunan kurutma bölgesine atomizer aracılığıyla parçalanarak püskürtülmektedir. Böylelikle, atomizerden püskürtülen ürün geniş bir yüzey kazanmış olur. Bu işlemde, atomize edilerek oluşturulan parçacık sıcak hava ile temas eder. Bu şekilde geniş bir yüzeye yayılan ürünün kuruması daha hızlı ve sıcak hava ile daha az temas ile gerçekleşir. Püskürtmeli kurutma işlemi, sıvı ürünün püskürtülmesi, püskürtülen damlacıkların sıcak hava ile temas ettirilmesi ve sıcak hava ile kuruyan toz taneciklerinin gaz akışından ayrılarak toplanması aşamalarından oluşmaktadır. Püskürterek kurutma işleminde ısı ve kütle transferi, kurutma odasında birbirleriyle temas etmeleri sağlanan damlacıklar ve sıcak hava arasında gerçekleşir.

Bu çalışmada, sıvı ürünleri kuruturken duvarlara yapışmayı azaltmak, enerji kaybını düşürmek ve ürün miktarını artırmak amacıyla kurutma odasına pervane yerleştirilerek yeni tip püskürtmeli kurutucu geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen püskürtmeli kurutucu ve standart püskürtmeli kurutucuda süt, domates ve elma suları kurutulmuştur. Deneyler, üç nozul çapı (0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm) ve üç giriş havası sıcaklığı (140 °C, 170 °C ve 200 °C) kullanılarak yapıldı. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucularda, sıvı numunelerin kurutulması sırasında kurutma ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıkları, odaların cam sıcaklıklarının diferansiyel değişimi ile çıkış havasının sıcaklığı, nem içeriği ve hızı belirlenmiştir.

Standart ve yeni geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuların farklı parametrelerdeki kurutucu termal verimlilikleri, elde edilen toz ürün miktarları, tozların nem içerikleri, parçacık morfolojisi, parçacık boyutları ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri incelenmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasına yerleştirilen

pervanelerin, kurutma havasının akış yönünü değiştirdiği, spiral bir akış oluşturduğu ve kurutma duvarlarının sıcaklığını azalttığı görölmüştür. Bu manipölasyon kurutmada ısı verimin ve ürün veriminin artmasına yol açmıştır. Ayrıca, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda toz parçacıklarının kurutma duvarına ve birbirlerine yapışması önemli oranda azaltılmıştır.

Her iki tip kurutucuda da nem içerikleri %0.2-5 arasında olan süt, domates ve elma suyu tozları elde edilmiştir. Geliştirilmiş kurutucuda elde edilen tozların nem içerikleri standart kurutucudakilerden daha düşük olmuştur. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda süt kurutulmasında taşıyıcıya gerek duyulmamıştır. Ancak, verimli bir kurutma için domates suyu kurutulmasında %25 oranında maltodekstrin kullanılmıştır. Elma suyu için ise %25, %60 ve %80 oranlarında maltodekstrin kullanılmış ve verimli bir ürün eldesi için %80 oranının uygun olduğu görölmüştür.

Yeni geliştirilen kurutucu ile sıvı numunelerin kurutulmasıyla elde edilen toz ürünler miktar olarak daha fazla olmuştur. Ayrıca, geliştirilmiş kurutucuda elde edilen toz ürünlerin tane yapısının daha düzgün ve homojen bir yapıda olduğu ve birleşme olmadığı görölmüştür.

Anahtar kelimeler: Kurutma, Püskürtmeli Kurutma, Isı ve Kütle Transferi

ABSTRACT

Investigation of Heat and Mass Transfer in New Type Spray Dryer

Drying is the process of removing the moisture present in the product. It is one of the oldest and cheapest methods used to extend the shelf-life of foods without deteriorating the quality thereof. As the weight of the dried product is reduced, it provides ease of transport and packaging. The process of drying is widely used in sectors such as food, chemistry, medicine and agriculture. During this process, heat and mass transfer occur simultaneously. Many drying methods are used for drying, such as microwave, vacuum, freeze, hybrid and spray drying.

One of the most commonly used methods to obtain powder products in the food industry is spray drying. The spray drying method is mostly used for drying of the heat sensitive materials. In the spray drying process, the product is sprayed into the drying chamber with hot air by being disintegrated by means of an atomizer. Thus, the product sprayed from the atomizer will have a large surface. In this process, the atomized particle comes into contact with hot air. The product that is spread on a large surface this way, is dried faster and with less contact with hot air. The spray drying process comprises the steps of spraying the liquid product, contacting the sprayed droplets with the hot air and collecting the hot air-dried powder particles separated from the gas stream. In the spray drying process, heat and mass transfer takes place between the droplets and the hot air, which are allowed to contact each other in the drying chamber.

In this study, a new type of spray dryer was developed by placing a propeller in the drying chamber in order to reduce adhesion to the walls, decrease energy loss and increase the amount of product while drying liquid products. Milk, tomato and apple juices were dried in the newly developed spray dryer and a standard spray dryer. Experiments were carried out by using three nozzle diameter (0.5 mm, 1.5 mm and 2.5 mm) and three inlet air temperature (140 °C, 170 °C and 200 °C) throughout the study. In standard and improved spray dryers, while drying the liquid samples, the temperature of the air in the product chamber, the differential temperature of the chamber glass, the temperature, moisture content and velocity of the outlet air were determined.

Dryer thermal efficiencies of the standard and newly developed spray dryers, the amount of powder products obtained, the moisture content of the powders, particle morphology,

particle sizes and SEM (Scanning Electron Microscope) images were investigated. It has been found that the propellers placed in the drying chamber in the improved spray dryer change the flow direction of the drying air, create a spiral flow and reduce the temperature of the drying walls. This manipulation has lead to increased thermal efficiency and product yield in drying. Furthermore, the adhesion of the powdered particles to the drying wall and to each other in the improved spray dryer was significantly reduced.

Milk, tomato and apple juice powders with moisture content of 0.2-5% were obtained in both types of dryer. The moisture content of the powders obtained in the improved dryer was lower than that in the standard dryer. No carrier was required to dry milk in standard and improved spray dryer. However, 25% of maltodextrin was used in the drying of tomato juice for efficient drying. For apple juice, 25%, 60% and 80% maltodextrin was used and 80% was found to be suitable for efficient product acquisition.

The amount of powder products obtained by drying the liquid samples with the newly developed dryer was greater in quantity. In addition, it was observed that the grain structure of the powder products obtained in the improved drier was more uniform and homogenous and did not combine.

Keywords: Drying, Spray Drying, Heat and Mass Transfer

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Denge nem eğrisi.....	24
Şekil 1.2. Kurutma kinetik eğrileri.....	25
Şekil 1.3. Farklı sıcaklıklarda kurutulan elmanın kuruma süresine karşı nem oranı değişimi.....	26
Şekil 1.4. Seçilen maddeler için oda sıcaklığında tipik denge nemi izotermi	28
Şekil 1.5. Değişen higroskopisiteden oluşan malzemeler için sorpsiyon izotermi şekilleri.....	28
Şekil 1.6. Tipik bir sorpsiyon izotermi.....	29
Şekil 1.7. Tipik bir higroskopik katı için ıslatma ve kurutma izotermi.....	30
Şekil 1.8. Oda sıcaklığında çeşitli gıdaların sorpsiyon izotermi.....	31
Şekil 1.9. Kurutma işlemindeki ısı ve kütle transferi.....	32
Şekil 1.10. Püskürtmeli kurutma işleminin genel akış diyagramı.....	36
Şekil 1.11. Püskürtmeli kurutma işleminin aşamalarla şeması.....	37
Şekil 1.12.(a)Damlacık üretimi; (b)Döner tekerlekli bir atomizerden püskürtme şekli; (c)Püskürtülerek kurutulmuş parçacıklar ve (d)Farklı tip atomizerlerden elde edilen damlacık boyutları.....	40
Şekil 1.13. Püskürtmeli kurutucu tiplerinin şematik gösterimi (a) Eş akımlı (Co-current), (b) Karşı akımlı (Counter-current) ve (c) Karışık (Mixed) akım.....	41
Şekil 1.14. Püskürtmeli kurutucuda damlacık kurutma sıcaklığı eğrisi.....	45
Şekil 1.15. Lognormal olasılık dağılımı.....	46
Şekil 1.16. Partikül yüzey ve merkez sıcaklıklarının nem oranı ile değişimi.....	49
Şekil 1.17. Paralel akışlı püskürtmeli kurutucuda kuruyan ürünlerin ayrılması....	50
Şekil 1.18. Giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre termal verim değişimi.....	58
Şekil 2.1. Standart püskürtmeli kurutucunun a) Şematik resmi, b) Teknik resmi.	60
Şekil 2.2. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun a) Şematik resmi, b) Teknik resmi.....	60
Şekil 2.3. Deney cihazının teknik resmi.....	61
Şekil 2.4. İki akışlı basınçlı sprey nozul atomizer.....	61

Şekil 2.5. Sistemin çalışma şekli.....	62
Şekil 2.6. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasına yerleştirilen pervaneler.....	63
Şekil 2.7. Sıcaklık ölçüm cihazı.....	64
Şekil 2.8. Nem ölçüm cihazı.....	65
Şekil 2.9. Hava hızı ölçüm cihazı.....	65
Şekil 2.10. Lazer termometre	66
Şekil 2.11. Hassas tartı.....	67
Şekil 2.12. Nem tayin cihazı.....	67
Şekil 2.13. Scanning electron microscopy (SEM) ve tozların altın paladyum kaplama cihazı.....	68
Şekil 2.14. (a) Kurutma odası içerisindeki (b) Ürün odası içerisindeki sıcaklıkların ölçüm düzeneği.....	69
Şekil 2.15. Kurutma odası içerisindeki hava ve cam sıcaklıklarının ölçüm noktaları.....	70
Şekil 2.16. Ürün odası içerisindeki hava ve cam sıcaklıklarının ölçüm noktaları..	70
Şekil 2.17. Deneylerde kullanılan ürünler; (a) Doğal süt, (b) Sıkılmış saf domates suyu, (c) Sıkılmış saf yeşil elma suyu.....	71
Şekil 3.1. Standart püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği (Süt tozu).....	74
Şekil 3.2. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği (Süt tozu).....	75
Şekil 3.3. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen toz ürün miktarları (Süt tozu).....	76
Şekil 3.4. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen toz ürün miktarları (Süt tozu).....	77
Şekil 3.5. Standart püskürtmeli kurutucudaki kurutma ve ürün odası duvarları...	78
Şekil 3.6. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucudaki kurutma ve ürün odası duvarları.....	78
Şekil 3.7. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu).....	79
Şekil 3.8. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu).....	80
Şekil 3.9. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu).....	81

Şekil 3.10. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu).....	81
Şekil 3.11. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu).....	82
Şekil 3.12. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu).....	83
Şekil 3.13. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu).....	84
Şekil 3.14. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu).....	84
Şekil 3.15. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen süt tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi.....	85
Şekil 3.16. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen süt tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içerikleri.....	86
Şekil 3.17. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi.....	87
Şekil 3.18. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içerikleri.....	88
Şekil 3.19. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen elma tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi.....	89
Şekil 3.20. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen elma tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içerikleri.....	89
Şekil 3.21. Süt tozu.....	90
Şekil 3.22. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	91
Şekil 3.23. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	92
Şekil 3.24. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava ($T_{hava,g}$):140 °C).....	92

Şekil 3.25. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	93
Şekil 3.26. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	93
Şekil 3.27. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	94
Şekil 3.28. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	94
Şekil 3.29. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	95
Şekil 3.30. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	96
Şekil 3.31. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	96
Şekil 3.32. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	97
Şekil 3.33. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	97
Şekil 3.34. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	98
Şekil 3.35. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	98

Şekil 3.36. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	99
Şekil 3.37. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	99
Şekil 3.38. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	100
Şekil 3.39. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	101
Şekil 3.40. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	101
Şekil 3.41. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	102
Şekil 3.42. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	102
Şekil 3.43. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	103
Şekil 3.44. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	103
Şekil 3.45. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	104
Şekil 3.46. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	105

Şekil 3.47. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava neminin zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	105
Şekil 3.48. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava hızının zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	106
Şekil 3.49. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	106
Şekil 3.50. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava neminin zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	107
Şekil 3.51. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava hızının zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	107
Şekil 3.52. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	109
Şekil 3.53. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	109
Şekil 3.54. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	110
Şekil 3.55. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	110
Şekil 3.56. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çıkış hava sıcaklığının zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	111
Şekil 3.57. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çıkış hava neminin zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	111
Şekil 3.58. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çıkış hava hızının zamanla değişimi (Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C).....	112
Şekil 3.59. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	114

Şekil 3.60. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	115
Şekil 3.61. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	115
Şekil 3.62. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	116
Şekil 3.63. Çıkış hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	116
Şekil 3.64. Çıkış hava neminin zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	117
Şekil 3.65. Çıkış hava hızının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	117
Şekil 3.66. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	118
Şekil 3.67. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	118
Şekil 3.68. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	119
Şekil 3.69. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C).....	119
Şekil 3.70. Standart püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x; c) 170 °C, 1000x; d) 170 °C, 2500x; e) 200 °C, 1000x; f) 200 °C, 2500x.....	121
Şekil 3.71. Standart püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140	

°C, 2500x; c) 170 °C, 1000x; d) 170 °C, 2500x; e) 200 °C, 1000x; f) 200 °C, 2500x.....	122
Şekil 3.72. Standart püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x; c) 170 °C, 1000x; d) 170 °C, 2500x; e) 200 °C, 1000x; f) 200 °C, 2500x.....	123
Şekil 3.73. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x.....	124
Şekil 3.74. Standart püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen domates tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x.....	124
Şekil 3.75. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen domates tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x.....	125
Şekil 3.76. Standart püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen elma tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x.....	125
Şekil 3.77. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen elma tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x.....	126
Şekil 3.78. Standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Süt tozu).....	127
Şekil 3.79. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Süt tozu).....	127
Şekil 3.80. Standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Domates tozu).....	128
Şekil 3.81. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Domates tozu).....	129
Şekil 3.82. Standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Elma tozu).....	130
Şekil 3.83. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Elma tozu).....	130

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri.....	21
Tablo 1.2. Kurutucu tipine göre enerji tüketimi ve buharlaşma hızları	22
Tablo 1.3. Küresel damlacıkların boyutları ve yüzey alanlarının karşılaştırılması.	45
Tablo 2.1. Cihazın teknik parametreleri.....	64



KISALTMALAR

%M	: Nem
%S	: Katı ($\%S = \%100 - \%M$)
MR	: Nem oranı (Birimsiz)
Re	: Reynolds sayısı
SMD	: Sauter ortalama apı



SEMBOLLER LİSTESİ

$\dot{M}_{OB}$	: Odanın buharlaşma kapasitesi, $\text{kg.H}_2\text{O.s}^{-1}$
$\dot{M}_B$	: Besleme akış oranı, kg.s^{-1}
μ_s	: Sıvının viskozitesi, $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
A_d	: Damlacığın yüzey alanı, m^2
a, b, c, n	: Model sabitleri
A_p	: Parçacığın yüzey alanı, m^2
B	: Besleme oranı, kg.s^{-1}
C_g	: Gaz kütleindeki nem konsantrasyonu, mol.m^{-3}
C_d	: Damlacık yüzeyindeki nem konsantrasyonu, mol.m^{-3}
$C_{p,g}$	: Gazın özgül ısısı, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$C_{p,p}$	: Parçacığın özgül ısısı, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$C_{p,h}$	: Sabit basınçta havanın ısı kapasitesi, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
$C_{p,b}$	: Beslemenin ısı kapasitesi, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
D	: Damlacık Çapı, μm , m
d_0	: Damlacığın başlangıç çapı, μm
d_d	: Damlacık çapı, m
d_g	: Geçiş kurutma oranı noktasındaki çap, μm
D_{eff}	: Efektif nem difüzyonu
D_{Go}	: Lognormal dağılımın geometrik ortalama çapı, m
D_i	: Damlacık boyutu
D_{ort}	: Rosin – Rammler ortalama parçacık boyutu, m
Dm_{buh} / dt	: Buharlaşma hızı, kg.s^{-1}
d_p	: Parçacık çapı, m
d_{yo}	: Yüzey ortalama çapı, m
EG_{buh}	: Buharlaşma enerji tüketimi, kJ.kg^{-1}
EG_p	: Özgül enerji tüketimi, kJ.kg^{-1}
f_i	: Frekans sayısı
h	: Isı transfer katsayısı, $\text{W.m}^2.\text{K}^{-1}$
H_{buh}	: Buharlaşma gizli ısısı
$H_{\text{çevre}}$	: Çevre havasının entalpisi, $\text{kJ.kg}_{\text{kuru hava}}^{-1}$
H_{sh}	: Sıcak havanın entalpisi, $\text{kJ.kg}_{\text{kuru hava}}^{-1}$

K	: Eğim
k	: Isıl iletkenlik, W/m.K
k₁, k₂	: Thybo denklem sabiti
k_c	: Kütle transfer katsayısı
k_h	: Havanın ısı iletkenliği, W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
L_h	: Hava akış oranı, kg.s ⁻¹
M	: Kütleli hava debisi, kg.s ⁻¹
M_k	: Ürünün kuru kütlesi, g
M_s	: Ürün içerisindeki suyun kütlesi, g
m₀	: Başlangıç kütle, kg
m_ç	: Çözeltinin içindeki kuru madde miktarı, g
m_k	: Katı kütlesi, g
m_p	: Parçacık kütlesi, g
m_t	: Çözeltideki taşıyıcı maddenin kütlesi, g
N	: Damlacık sayısı
NM_{kb}	: Tozun kuru bazdaki nem miktarı, %
NM_{yb}	: Tozun yaş bazdaki nem miktarı, %
n	: Rosin – Rammler çarpıklık parametresi
η	: Genel adyabatik termal verimlilik
TE	: Birim zamandaki termal enerji, kJ.s ⁻¹
q	: Isı akısı, W/m ²
Q_{kayıp}	: Isı kaybı oranı, W, kW
Q_p	: Parçacığın ısı akısı, W/m ²
R	: Tutulan ağırlık konsantrasyonu, %
r	: Yarıçap, m
s	: Katı madde konsantrasyonu (kg toplam besin başına kg katı), kg.kg ⁻¹
S_d	: Damlacıktaki katı kütle konsantrasyonu (kg toplam besin başına kg katı), kg.kg ⁻¹
S_{geo}	: Geometrik standart sapma
S_p	: Parçacıktaki katı kütle konsantrasyonu (kg toplam besin başına kg katı), kg.kg ⁻¹
t	: Zaman, s
T_{azalan}	: Azalan kurutma hızındaki zaman, s

T_b	: Besleme sıcaklığı, °C
$T_{\text{çevre}}$	: Çevre sıcaklığı, °C
T_g	: Gazın sıcaklığı, °C, K
T_h	: Hava sıcaklığı, °C
$T_{\text{hava,ç}}$	: Kurutma havasının çıkış sıcaklığı, °C
$T_{\text{hava,g}}$	: Kurutma havasının giriş sıcaklığı, °C
T_p	: Parçacığın sıcaklığı, K
T_{sbt}	: Sabit kurutma hızındaki zaman, s
T_y	: Yüzey sıcaklığı, °C, K
T_{yt}	: Kuru havanın yaş termometre sıcaklığı, °C
V_g	: Gazın hızı, m.s ⁻¹
W	: Buharlaştırılmış su oranı, kg.s ⁻¹
w	: Kütleli fraksiyon, W.kg/m ⁴ .K
W_{atm}	: Atmosfer gazının kütle akış hızı, kg.s ⁻¹
W_{buh}	: Buharlaşma için kütle akış hızı, kg.s ⁻¹
W_g	: Gazın kütle akış hızı, kg.s ⁻¹
W_s	: Sıvının kütle akış hızı, kg.s ⁻¹
W_{th}	: Herhangi bir parametredeki toplam hatanın
X	: Nem içeriği, kg _{su} .kg _{ürün} ⁻¹
X_0	: Başlangıç nem içeriği, sıvı bazda, kg _{su} .kg _{ürün} ⁻¹
X_g^{kb}	: Geçiş kurutma oranı noktasındaki nem içeriği, kuru bazda, kg _{su} .kg _{ürün} ⁻¹
X_g^{sb}	: Geçiş kurutma oranı noktasındaki nem içeriği, sıvı bazda, kg _{su} .kg _{ürün} ⁻¹
X_{son}^{kb}	: Son nem içeriği, kuru bazda, kg _{su} .kg _{ürün} ⁻¹
X_{son}^{sb}	: Son nem içeriği, sıvı bazda, kg _{su} .kg _{ürün} ⁻¹
$Y_{\text{ç}}$	: Çıkış hava nemi, g _{su} .kg _{kuru hava} ⁻¹
$Y_{\text{çevre}}$	: Çevre hava nemi, g _{su} .kg _{kuru hava} ⁻¹
ΔH	: Buharlaşma gizli ısı, kj.kg ⁻¹
ΔT_{ort}	: Hava ve ürün arasındaki ortalama sıcaklık farkı, °C
λ	: Buharlaşma gizli ısı, J.kg _{su} ⁻¹
λ_{azalan}	: Azalan kurutma hızındaki gizli ısı, J.kg _{su} ⁻¹
λ_{buh}	: Çözeltinin buharlaşma gizli ısı, kj.kg ⁻¹
λ_{ik}	: Islak kütle gizli ısı, J.kg _{su} ⁻¹
λ_{sbt}	: Sabit kurutma hızındaki gizli ısı, J.kg _{su} ⁻¹

ρ_d	: Damlacık yoğunluğu, kg.m^{-3}
ρ_g	: Gaz yoğunluğu, kg.m^{-3}
ρ_k	: Kuruyan katının yüzey yoğunluğu, kg.m^{-3}
ρ_p	: Parçacık yoğunluğu, kg.m^{-3}
ρ_s	: Sıvının yoğunluğu, kg.m^{-3}
σ	: Yüzey gerilimi, N.m^{-1}



1. GİRİŞ

Gıda muhafazasının en eski yöntemlerinden biri kurutma işlemi yani dehidrasyondur [1, 2]. Meyve ve sebzelerin nem içeriği ve su aktiviteleri yüksektir. Taze ürünlerin kalitelerinin bozulmadan uzun süre korunabilmeleri için nem içeriğinin ve su aktivitesinin azaltılması gerekir. Sınırlı raf ömrü bulunan meyve ve sebzelerin kurutulmasındaki en önemli nedenler raf ömrünün arttırılması ve hacmin azaltılmasıdır [3].

Birçok gıda muhafaza yöntemleri arasında kurutmanın yeri ve ayrıcalıkları değişik açılardan incelenebilir. İlk olarak gıda içerisinde mevcut bulunan su, gıdanın bozulmasına olanak vermeyecek bir düzeye kadar azaltıldığı için kesin bir saklama imkanı oluşmaktadır. Ayrıca kurularak saklama, en ucuz muhafaza yöntemidir. Çünkü kurutulmuş gıda üretiminde daha az işçilik ve ekipman gerektiği gibi bunların depolanması ve taşınmasında da daha az masraf yapılır [4].

Taze meyve ve sebzeleri uzun süre bozulmadan tüketebilmek için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bu amaçla farklı kurutma sistemleri uygulanmakla birlikte sıvı gıdaları kurutmak amacıyla püskürterek kurutma veya sprey kurutma olarak ifade edilen işlem kullanılmaktadır [5].

Püskürtmeli kurutucu ile yapılan kurutma işlemi, ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması için yaygın olarak kullanılan ve iyi bilinen bir endüstriyel teknolojidir [6].

Püskürterek kurutma işleminde temel prensip, kurutma hücreesindeki sıcak hava içerisine ürünün atomize edilmesidir. Böylece ürüne geniş bir yüzey kazandırılarak hızlı bir kuruma gerçekleştirilir. Ürünün atomize edilmesiyle oluşan damlacıklar, sıcak hava ile temas eder etmez damlacık yüzeyinde buharlaşma olayı başlar. Damlacıktan nemin uzaklaştırılması ile damlacık yüzeyinde oluşan kabuk zamanla kalınlaşarak nem difüzyonu azalır. Çok kısa bir süre içerisinde kurumuş olan tanecik kurutma kabinini terk eder [7,8]. Böylece sıvı gıdaların saklanması için gerekli şartlar sağlanmış olur.

Sıvı gıdaların kurutulmasında kullanılan püskürtmeli kurutucular eş akımlı, karşı akımlı ve karışık akımlı şekilde sınıflandırılmaktadır [8]. Bu püskürtmeli kurutucuların birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. İyi tasarlanmış bir püskürtmeli kurutucu ile daha iyi bir kurutma, daha az yapışma ve daha iyi bir verim elde edilebilmektedir. Bu amaçla, çalışmada standart ve geliştirilmiş tip püskürtmeli kurutucularda sıvı ürünlerin kurutulması için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Dolayısıyla, sıvı ürünü kuruturken toz taneciklerinin cama ve birbirlerine yapışmasını azaltmak ve daha iyi bir ürün eldesi için yeni bir tip

püskürtmeli kurutucu tasarımı yapılmıştır. Tasarımda yeni tip geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasına pervaneler yerleştirilmiştir. Odanın içerisine yerleştirilen pervaneler ile kurutma havasının akış yönü değiştirilmiş, kurutma havasının ve ürünün oda içerisinde homojen olarak dağılımı sağlanmış, kurutma duvarlarının sıcaklığını azaltmış ve standart kurutucuya göre daha iyi bir verim elde edilmiştir. Kurutma işleminde sıvı ürün olarak süt, domates ve elma suları kullanılmıştır. Deneylerde 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çaplarında 3 farklı nozul ve 140 °C, 170 °C ve 200 °C olmak üzere 3 farklı giriş havası sıcaklığı kullanılmıştır. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda, farklı sıvı ürünlerin farklı deney şartlarında kurutulması sırasında kurutma ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıkları ve odaların cam sıcaklıklarının değişimi incelenmiştir. Ayrıca farklı deney şartlarında oluşan çıkış hava sıcaklığı, nemi ve hızı incelenmiştir. Farklı parametrelerde standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucularda oluşan kurutucu termal verimlilikleri, ısı ve kütle transferleri, elde edilen toz ürün miktarları, tozların nem içerikleri, parçacık morfolojisi, parçacık boyutları ve SEM görüntüleri belirlenmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Püskürtmeli kurutma ve püskürtmeli kurutucularla ilgili olarak yapılan literatür çalışmalarında ulusal olarak az sayıda çalışmanın yapıldığı, uluslararası çalışmalarda ise birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Püskürtmeli kurutucular ile ilgili yapılan çalışmaların araştırma sonuçları aşağıdaki gibi sınıflandırılarak özetlenmiştir.

- Kurutma ve püskürtmeli kurutma
- Meyve ve sebze suyu kurutulması ve parametrelerin kurutmaya etkisi
- Kurutma işleminde ısı ve kütle transferi
- Püskürtmeli kurutmada damlacık çapı, damlacık boyut dağılımı, nozul seçimi, nozul çapı ve atomizer tipi
- Kurutmada enerji tüketimi, ekserji ve enerji verimi, kurutma kinetiği

Kurutma ve püskürtmeli kurutma ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Santre ve Agashe (2014), sütü kurutmak için püskürtmeli kurutucunun matematik modellemesini yapmışlardır. Oluşturdukları püskürtmeli kurutucu modelinin amacının kurutucuda etkin parametreyi test etmek ve geliştirmek olduğunu belirtmişler ve modeli ürün kurutma karakteristikleri ile birlikte kütle ve enerji denklemlerini de dikkate alarak oluşturmuşlardır. Çalışmada buharlaşma oranı, son nem içeriği ve başlangıç sıcaklığı sabit tutulduğunda nem içeriğindeki değişimin; besleme akış oranı, ürün oranı, çıkış sıcaklığı ve ısı yüküne bağlı olduğu sonucuna varmışlardır [9].

Verma and Singh (2015), çeşitli meyve ve sebze sularının püskürtmeli olarak kurutulmasını incelemişlerdir. Püskürtmeli kurutmada optimize edilen esas parametrelerin hava giriş sıcaklığı, havanın nemi, hava çıkış sıcaklığı ve atomizer hızı olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan çalışmalardan giriş hava sıcaklığının verim üzerindeki en önemli etkiye sahip olduğunu, sıcaklık artışıyla veriminin arttığını ve nem içeriğinin azaldığını belirtmişlerdir [10].

Phisut (2012), meyve suyunun püskürtülerek kurutulması tekniğiyle ürünün özelliklerini etkileyen faktörleri incelemiştir. Püskürterek kurutma ile üretilen tozların fiziko kimyasal özelliklerinin, işlem değişkenlerine ve işletme parametrelerine bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca giriş sıcaklığı, kuru havanın akış hızı, atomizer hızı, besleme akış hızı, taşıyıcı madde türleri ve konsantrasyonlar gibi bazı faktörleri gözden geçirerek yorumlamıştır [11].

Parveen vd. (2013), püskürtmeyle kurutmada kullanılan atomizer tipinin, giriş hava sıcaklığının ve katkı maddesinin elma suyunun kalitesine etkisini incelemişlerdir. Giriş hava sıcaklığını 150 °C'den 170 °C'ye değiştirmişler ve değişen parametreler ile nem içeriği, kütle yoğunluğu ve su aktivitesinin azaldığını belirlemişlerdir. Deneylerde katkı maddesi olarak gum arabic ve maltodekstrin, atomizer olarak ise iki akışkanlı basınçlı nozul atomizer ve döner çarklı atomizeri kullanmışlardır. Sonuçta döner çarklı atomizer ve maltodekstrin kullanıldığında daha düşük nem içeriği, kütle yoğunluğu ve su aktivitesinin elde edildiğini belirtmişlerdir. En iyi sonuçlara ise maltodekstrin katkı maddesi, döner çarklı atomizer ve 160 °C giriş hava sıcaklığında ulaşıldığını ifade etmişlerdir [12].

Bhandari vd. (1997), şekerce zengin olan gıdaların püskürtülerek kurutulmasında oluşan sorunları araştırmışlardır. Bu ürünlerin püskürtülerek kurutulmasını önleyen temel nedenin yapışkanlık olduğunu belirtmişlerdir [13].

Liu vd. (2015), mikro partiküllerin üretilmesi için bir mikro akışkanları püskürtmek kurutmuşlardır. Bu tekniğin püskürtmeli olarak kurutulan parçacıkların özelliklerinin formülasyonu için çok uygun olduğunu belirtmişlerdir. Mikro akışkan ile püskürtmeli kurutmanın hem daha az işlem adımı, hammadde kullanımı ve atık oluşumu hem de daha kısa sürede üniform parçacıkların üretimi için çok avantajlı olduğu sonucuna varmışlardır [14].

Keshani vd. (2015), püskürtmek kurutma işlemindeki modelleme, işlem süreci ve duvarda biriken tortular hakkında genel bir araştırma yapmışlardır. Kurutucu duvarında biriken tortuların, ürünün kalitesini ve miktarını etkileyen önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Duvardaki tortuların birikmesinde; püskürtücü kurutucu tipi ve boyutunun, çalışma parametrelerinin ve kurutucu duvar özellikleri gibi çeşitli faktörlerin etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca kurutucu duvarında biriken tortuların ürün verimini düşürüp, imalat ve bakım maliyetlerini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır [15].

Bhandari vd. (1997), şekerce zengin gıdaları püskürtmek kurutmak için gerekli olan kurutma yardımcı maddelerinin miktarını optimize etmek için yarı ampirik bir denklem geliştirmişlerdir. Kurutma yardımcı maddesi olarak maltodekstrin DE6 kullanılmıştır. Püskürtmek kurutma deneylerine dayanarak şeker (sükroz, glikoz ve fruktoz) ve sitrik asit için kurutma indeksi değerlerini belirlemişlerdir. Belirledikleri indeks değerlerini kullanarak bu bileşenlerin model karışımları için bir denklem oluşturmuşlardır. Bu denklemi, şekerce zengin olan ananas suyu ve bal üzerinde denemişler. Denklemin bu ürünler üzerinde geçerli olduğu sonucuna ulaşmışlardır [16].

Mani vd. (2002), elde edilecek meyve suyu tozunda yapışkanlığın kurutma yardımcı maddesi ilavesi ile veya püskürtmeli kurutucu haznesinin iç yüzeyinin soğuk hava akımı modifikasyonu sağlanarak azaltılabileceği bildirilmiştir. Kurutma işleminde genel olarak en uygun meyve suyu/maltodekstrin oranının 55/45 olduğunu tespit etmişlerdir [17].

Walton ve Mumford (1999a, 1999b), püskürtme ile kurutulmuş farklı türde toz ürünler üzerine yaptıkları kapsamlı araştırmalarında, elde edilen ürünlerin fiziksel yapılarından yola çıkarak ürünlerin 'kabuk şeklinde, aglomere olmuş ve kristal yapıda' olmak üzere üç kategoriye ayrıldıklarını ifade etmişlerdir. Kabuk şeklinde oluşan partiküllerin genellikle küresel yapıda şekillendiği, bir kısmının ise yüzeysel bozukluklar ve kırılmalar ile şekillendiğini ifade etmişlerdir. Aglomere olmuş partiküller genellikle gözenekli ve dolu küreler halinde iken kabuk şeklinde oluşan püskürtmeli kurutulmuş partiküller içlerinde hava boşlukları içermektedir [18, 19].

Truong vd. (2005), eş-akımlı püskürtmeli kurutma işlemlerinde şekerce zengin gıdaların optimizasyonunu yapmışlardır. Modelde kurutma ortamındaki sıcaklık ve nem profilinin yanı sıra tek bir damlacık kurumasi için kütle, ısı ve momentum dengelerini incelemişlerdir. Damlacık dağılımı döner atomizerde elde edilmiştir. Bu modeli; damlacık çapı, yoğunluk, sıcaklık, nem içeriği ve eksen uzaklıkları boyunca değişen hava özelliklerindeki hız değişimlerini hesaplamak için kullanmışlardır. Çıkış hava sıcaklığı ve cam geçiş sıcaklığı arasındaki farkın püskürtmeli kurutma işlemindeki parçacıkların yapışkanlığı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Hesaplamalardan ve yapılan deneylerden modelin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır [20].

Meyve ve sebze suyu kurutulması ve parametrelerin kurutmaya etkisi ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtildiği gibidir.

Borges vd. (2002), tropik tutku meyvesi suyunu ve ananas suyunu püskürtmeli kurutucu kullanarak toz haline getirmişlerdir. Üründeki maltodekstrin oranını artırarak elde edilen toz ürünün yoğunluğunun (g/cm^3) arttığı sonucuna ve ürün üzerinde kurutucu hava çıkış sıcaklığının da belirli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmıştır [21].

Abadio vd. (2004), püskürtmeli kurutucu kullanarak ananas suyu tozu elde etmişlerdir. Bu denemelerde düşük atomizasyon hızında %10 maltodekstrin kullanarak yüksek çözünürlükte, serbest akabilen ve çok düşük yoğunluğa sahip meyve suyu tozu elde etmişlerdir [22].

Rodriguez vd. (2005), tropik kaktüs armudunu (dikenli armut) iki farklı dekstroz endeksli maltodekstrin ve iki farklı hava giriş sıcaklığını kullanarak püskürtmeli kurutucuda kurutmuşlar ve elde edilen ürünlerde çeşitli analizler yapmışlardır. Elde ettikleri üründe maltodekstrin konsantrasyonundan dolayı renk değişiminin olduğunu ifade etmişlerdir. Uygulanan basınç ve sıcaklıkla kuru üründeki nemin, işlem basıncı ve giriş konsantrasyonu ile de higroskopikliğinin değiştiğini belirtmişlerdir [23].

Karaca vd. (2015), vişne suyu konsantresinin, giriş sıcaklıklarının ve taşıyıcı tipinin (maltodekstrin DE6, maltodekstrin DE12, gum arabic) püskürtmeli kurutma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Fenolik içeriği koruma açısından gum arabic maltodekstrinden daha iyi olmasına rağmen, arap sakızının (gum arabic) veriminin daha düşük olduğunu belirtmiştir. Püskürtmeli kurutmada 150 °C giriş sıcaklığı, %30 pompa ayarı, %25 vişne içeriği ve DE12 maltodekstrinini kullanarak yüksek verimli vişne suyu tozunu elde etmiştir [24].

Shrestha vd. (2007), portakal suyunun kurutulmasında maltodekstrin oranının elde edilen ürün üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ürün üzerinde %50 maltodekstrin (DE6) oranını kullandığında kurutmada bir etki sağlamadığını, üründe yapışkanlık meydana geldiğini ifade etmişlerdir. %60'ın üzerinde maltodekstrin oranının kullanıldığı kurutma işleminin daha başarılı olduğunu, maltodekstrin oranını arttırdıkça daha yüksek giriş hava sıcaklığında (T_g) çalışılması gerektiğini ve böylece meyve suyu tozu veriminin de artacağını belirtmişlerdir [25].

Bielecka ve Majkowska (2000), püskürtmeli kurutucuda yoğurt kurutmak için giriş hava sıcaklığını 180 °C'de sabit tutarak çıkış hava sıcaklığını 60–80 °C arasında değiştirerek farklı deneyler yapmışlardır. Üründeki canlı laktik asit bakterisi sayısının kurutma işlemindeki çıkış sıcaklığına ve kurutma öncesi yoğurtta bulunan bakteri sayısına bağlı olduğunu elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda da canlı bakteri sayısı en yüksek ve en kaliteli yoğurt tozu üretimi için 70–75 °C hava çıkış sıcaklığının uygun olacağı sonucuna varmışlardır [26].

Osman ve Endut (2009), püskürtmeli kurutucuda farklı çalışma şartlarında Roselle (*Hibiscus Sabdariffa* bitkisi) ve ananas tozunu elde etmişlerdir. Çıkış sıcaklığı 80 °C' de sabit tutulmuş, giriş sıcaklığı sırasıyla 140 °C, 160 °C, 180 °C ve 200 °C olarak değiştirilmiştir. Çalışmada 3 farklı maltodekstrin DE10 (%3, %5 ve %10) konsantrasyonu kullanılmıştır. Elde edilen Roselle - ananas tozunun nem içeriği, çözünürlüğü, su aktivitesi ve higroskopisitesi analiz edilmiştir. %10 maltodekstrin kullanıldığında kurutucu duvarlarındaki yapışkanlığın daha az olduğunu ve en yüksek verimi elde ettiklerini ifade etmişlerdir. 180 °C giriş sıcaklığı ve %10 maltodekstrin oranında en iyi tozu elde ettiklerini belirtmişlerdir. Sonuçlardan elde ettikleri bulgulara göre maltodekstrin konsantrasyonunun ve giriş sıcaklığının verim üzerinde önemli etkilere sahip olduğu sonucuna varmışlardır [27].

Mestry vd. (2011), karpuz ve havuç suyunu belirli oranlarda karıştırarak püskürtmeli kurutucuda kurutmuş ve formülasyon geliştirmişlerdir. Bu probiyotik suyu 120-160 °C hava sıcaklığı ve 2.0-5.0 mL/min akış oranında laboratuvar ölçekli bir püskürtmeli kurutucuda kurutmuşlardır. Bunların fiziksel ve biyolojik özelliklerini ve çözünürlük verilerini inceleyerek kurutma şartlarını elde etmişlerdir. Giriş hava sıcaklığı ve besleme akış oranının önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca elde edilen tozları SEM (scanning electron microscopy) ve DSC (differential scanning calorimetry) kullanarak analiz etmişler ve farklı çalışma şartlarındaki parçacıkların büyüklük ve şekillerinin farklı olduğunu gözlemlemişlerdir [28].

Fazaeli vd. (2012), laboratuvar ölçekli bir püskürtmeli kurutucu kullanarak elde ettikleri karadut tozunun püskürtmeli kurutma şartlarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla giriş hava sıcaklığını (110, 130 ve 150 °C), hava akış miktarını (400, 600 ve 800 L/h) ve maltodekstrin yoğunluğunu (%8, 12 ve 16) seçerek deneyler yapmışlar ve optimum işlem şartlarının 130 °C giriş hava sıcaklığı, %8 maltodekstrin yoğunluğu ve 800 L/h hava akış oranı olduğu sonucuna varmışlardır [29].

Kemp vd. (2013), yumurta albümininin sulu çözeltisinden toz ürün elde etmek amacıyla iki akışkanlı bir nozul ile atomizasyon ve püskürtmeli kurutma üzerine deneyler yapmışlardır. Parçacık boyutunun çözelti yoğunluğu ile arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca 2-3 mikronlu parçacıkları yüksek atomizasyonlu gaz akışlarında elde ettiklerini ortaya koymuşlardır [30].

Quek vd. (2007), karpuz suyu tozunu elde etmek amacıyla iki farklı maltodekstrin konsantrasyonu (%3 ve 5) ve dört farklı giriş sıcaklığında (145, 155, 165 ve 175 °C) Büchi mini spray dryer B-191 kullanarak deneyler yapmışlardır. Kurutulmuş karpuz suyu tozları çeşitli özellikleri açısından analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan maltodekstrin ilavesinin ürünün yapışkanlığını azalttığı ve psikokimyasal özelliklerini değiştirdiğini açıklamışlardır. Ayrıca giriş sıcaklığındaki artışın püskürtmeli kurutulmuş tozların ağırlığını, renk tonlarını ve şeker içeriğini azalttığını ve 155 °C giriş sıcaklığında en iyi özellikteki tozların elde edildiğini belirtmişlerdir [31].

Souza vd. (2009), püskürtmeli kurutmayla elde ettikleri domates suyu tozunun fiziksel özellikleri üzerine hava giriş sıcaklığı, besleme akış oranı ve atomizer hızının etkisini irdelemişlerdir. Bu değişkenlerin ürün üzerinde önemli bir pozitif etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. En iyi özellikteki domates suyu tozunu 200 °C giriş hava sıcaklığı, 276 g/min besleme akış oranı ve 30000 rpm atomizer hızında elde etmişlerdir [32].

Roustapour vd. (2006), pilot ölçekli bir püskürtmeli kurutucuda limon suyunun kurutulması üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Limon suyunun düşük cam geçirme sıcaklığı, yapışkanlık gibi karakterlerinden dolayı kurutulmasının çok zor olduğunu belirtmişler ve bu problemi çözmeyi amaçlamışlardır. Limon suyunun püskürtmeli kurutulmasında yapışkanlık probleminden dolayı katkı maddeleri kullanılmadan kurutulmasının imkansız olduğunu açıklamışlardır. Bu doğrultuda %10 silikon dioksit ve %20 maltodekstrin (DE5) kullanımının en uygun kurutma şartlarını sağladığını belirtmişlerdir [33].

Yousefi vd. (2011), nar suyunun püskürtmeyle kurutulmasında kullanılan taşıyıcı tiplerinin tozlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde maltodekstrin, gum arabic ve mumsu nişastayı taşıyıcı olarak kullanmışlardır. Bütün taşıyıcıların kurutucu verimini arttırdığını ve en yüksek verimin gum arabic kullanıldığında elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca gum arabic kullandıklarında en iyi toz ürün, çözünübilirlik, toz morfolojisi ve en düşük kütle yoğunluğunu elde etmişlerdir. Ayrıca en iyi renk özelliklerini maltodekstrin kullanarak elde ettiklerini de eklemişlerdir [34].

Goula ve Adamopoulos (2003), domates püresinin püskürtmeli kurutulmasında elde edilen domates tozları üzerindeki püskürtmeli kurutma şartlarının etkisini araştırmışlardır. Pilot ölçekli bir püskürtmeli kurutucu (Buchi, B-191) kullanarak çeşitli kurutma hava akış oranı, sıkıştırılmış hava akış oranı ve hava giriş sıcaklığını seçerek 24 farklı deney yapmışlardır. Sıkıştırılmış hava akış oranı ve hava giriş sıcaklığı arttıkça nem içeriğinin azaldığı sonucuna varmışlardır [35].

Mishra vd. (2014), amla suyu tozunu farklı giriş sıcaklıkları (125, 150, 175 ve 200 °C) ve maltodekstrin (%3, 5, 7 ve 9) seviyelerinde püskürtmeli olarak kurutmuştur. Giriş sıcaklığı ve maltodekstrin seviyesinin tozların nem içeriği ve higroskopisitesini etkilediğini ve yüksek giriş sıcaklığında küçük boyutlu parçacıklar oluştuğunu belirtmişlerdir. %7 maltodekstrin ve 175 °C giriş sıcaklığında daha düşük higroskopisite elde edilmiştir [36].

Goula and Adamopoulos (2010), farklı sıcaklıklarda nemli hava (110, 120, 130 ve 140 °C) ve maltodekstrin (21 DE, 12 DE ve 6 DE) kullanarak konsantre portakal suyunu laboratuvar ölçekli bir püskürtmeli kurutucuda kurutmak için yeni bir kurutma tekniği geliştirmişlerdir. Tozların nem içeriğini, kütle yoğunluğunu, rehidrasyonunu ve higroskopisitesini analiz etmişlerdir. Giriş sıcaklığının artması ve maltodekstrin yoğunluğunun azalmasıyla tozun nem içeriğinin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca giriş sıcaklığı ve maltodekstrin yoğunluğunun artmasıyla rehidrasyon yeteneğinin arttığı, higroskopisitesi ve kütle yoğunluğunun azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [37].

Chegini and Ghobadian (2007), laboratuvar ölçekli püskürtmeli kurutucuda portakal suyunu kurutmak için gerekli olan temel parametreler üzerine çalışmışlardır. Bu bağlamda; kurutma temel materyali, giriş ve çıkış hava sıcaklığı, besleme akış oranı ve cam geçirme sıcaklığı parametreleri incelenmiştir. Bu parametreleri değiştirerek testler yapmışlardır. Giriş hava sıcaklığı ve besleme akış oranının kurutma verimi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu sonucuna ulaşmışlar ve optimum kurutma şartlarını belirlemişlerdir [38].

Tan vd. (2015), tıbbi bir meyve olan ve diyabet tedavisinde kullanılan acı kavun suyu tozu üzerindeki püskürtmeli kurutma sıcaklıklarının etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda çeşitli giriş ve çıkış sıcaklıklarını kullanmışlardır. En uygun giriş ve çıkış sıcaklığının sırasıyla 140 °C ve 80 °C olarak elde etmişlerdir [39].

Cano-Chauca vd. (2005), püskürterek kurutma işlemi sırasında mango suyuna eklenen taşıyıcıların etkisini incelemişlerdir. Tozun fonksiyonel özelliklerini, higroskopisitesini, yapışkanlığını ve çözünürlüğünü araştırmışlardır. Laboratuvar ölçekli püskürtmeli kurutucuda mango suyuna %0, 3, 6 ve 9 konsantrasyonunda kristal halinde selüloz ve %12 konsantrasyonunda maltodekstrin, gum arabic ve nişasta ilave ederek deneyler yapmışlardır. Selüloz ilave ettiklerinde yüzeyde kristalleşme oluştuğunu, tozdaki yapışkanlığın arttığını ve çözünürlüğün etkilendiğini görmüşlerdir. Ayrıca %9 selüloz eklendiğinde maltodekstrin, gum arabic ve nişasta için çözünürlüğün sırasıyla %72, 71 ve 31 olduğu sonucuna ulaşmışlardır [40].

Garofulic vd. (2016), vişne suyu tozuna taşıyıcı malzemenin ve sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Deneyleri 150, 175 ve 200 °C'lik kurutma sıcaklıklarında yapmışlar. Ayrıca taşıyıcı madde olarak %20, 30 ve 40 oranlarında gum arabic ve 4-7/13-17 DE (Dextrose equivalent) içeriğinde maltodekstrin kullanmışlardır. Taşıyıcı madde oranındaki artışın nem içeriği ve toz higroskopisitesini düşürdüğünü; kütle yoğunluğu, çözünürlük ve ürün verimini artırdığını gözlemlemişlerdir. En yüksek sıcaklıkta nem içeriği ve tozdaki kütle yoğunluğunun azaldığını görmüşlerdir. Sonuçlardan en uygun vişne suyu tozunu 200 °C sıcaklık ve 4-7 DE'li %27 maltodekstrin kullanıldığında elde etmişlerdir [41].

Fang and Bhandari (2012), bayberry (Çin koca yemişi, meyve) suyunun püskürtmeli kurutulmasında kullanılan maltodekstrin ve protein verimliliğini karşılaştırmışlardır. Şekerce zengin bir meyve olan bayberry suyunun tek başına kurutulunca toz ürün çıkmadığını görmüşlerdir. Bu suya az miktarda protein (%1) veya çok miktarda maltodekstrin (DE10) (>%30) eklenince yapışkanlık probleminin üstesinden gelmişlerdir. Toz ürünün elektron spektroskopisi, yüzey gerilimi ve cam geçiş sıcaklığı (T_g) analizlerini yapmışlardır. Tozların yapışkanlığını azaltmak için maltodekstrin kullanımında cam geçiş sıcaklığını, protein kullanıldığında ise protein miktarını arttırmanın uygun olduğunu görmüşlerdir [42].

Bhandari vd. (1993), yoğunlaştırılmış siyah üzüm, kayısı ve ahududu suyunu farklı maltodekstrin oranlarında iki püskürtmeli kurutucu kullanarak düşük hava sıcaklıklarında (90-160 °C) kurutmuşlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda DE6 maltodekstrin kullanarak

siyah üzüm, kayısı ve ahududu için sırasıyla 65/35, 60/40 ve 55/45 oranlarında en iyi kurutma verimini elde etmişlerdir [43].

Khalilian Movahhed and Mohebbi (2015), iki akışlı atomizer kullanarak havuç ve kereviz suyu karışımının tozunu elde etmişlerdir. Havuç ve kereviz suyu karışımı 2:1 oranında karıştırılıp, püskürtülmüştür. Giriş hava sıcaklığı (120-150 °C), maltodekstrin yoğunluğu (0.7-0.9 kuru madde), ve besleme akış hızı (36-53 mL/min) belirli aralıklarda kullanılmıştır. Tozun nem içeriği, su aktivitesi, higroskopikliği, suda çözünme süresi, renk değişikliği, partikül boyutu, kütle yoğunluğu gibi özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde en iyi çalışma koşulları olarak sıcaklık 130 °C, besleme akış hızı 36 mL/min ve maltodekstrin yüzdesi 0.87 kuru madde elde edilmiştir [44].

Caliskan and Dirim (2013), sumak özütünün püskürtmeli kurutulmasında eklenilen maltodekstrin miktarının ve farklı kurutma şartlarının toz halindeki ürünün özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada pilot ölçekli bir püskürtmeli kurutucu kullanılmıştır. Giriş/çıkış hava sıcaklıkları 160/80, 180/90 ve 200/100 °C alınmıştır. Maltodekstrin DE 10-12 eklenmesiyle çözülebilirlik %10, 15, 20 ve 25 olarak elde edilmiştir. Tozların nem içeriği, su aktivitesi, kütle yoğunluğu, çözülebilirliği gibi özellikleri incelenmiştir. Yapılan analizlerden, sıcaklık ve maltodekstrin arasındaki ilişkinin tozlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır [45].

Koca vd. (2015), peynir tozunun fiziksel, kimyasal ve duyuşal özellikleri üzerine püskürtmeli kurutma şartlarının etkisini incelemişlerdir. Beyaz peynir tozunun kalitesi üzerine püskürtmeli kurutma parametrelerinin (giriş-çıkış hava sıcaklığı, atomizasyon basıncı gibi) etkisini incelemek için 7 farklı kurutma şartı altında 24 çeşit peynir tozu üretmişlerdir. Sonuçlardan elde edilen tozların düşük nem içeriği ve su aktivitesi değerine sahip olduğu görülmüştür. En önemli işlem parametresinin çıkış hava sıcaklığı olduğu ve yüksek çıkış hava sıcaklığının tozlarda kahverengileşmeye neden olup, çözülebilirliği azalttığı sonucuna ulaşmışlardır [46].

Barbosa vd. (2015), portakal tozunun üretimi için püskürterek, dondurarak ve konveksiyonlu sıcak hava ile kurutma yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Elde edilen tozlardaki C vitamini içeriğini değerlendirmişlerdir. Oda sıcaklığındaki kurutmalarda konveksiyonlu sıcak hava ile kurutmanın daha uzun süre dayanıklılık içerdiğini görmüşlerdir. Dondurarak kurutulan tozlarda ise daha yüksek maliyet ve uzun kuruma sürelerini görmüşlerdir. Fakat portakal suyu gibi süt içermeyen ürünler için en iyi yöntemin püskürtmeli kurutma olduğunu belirtmişlerdir [47].

Zareifard vd. (2012), kireç suyunu küçük laboratuvar ölçekli püskürtmeli kurutucuda kurutmuş ve ürün kalitesini değerlendirmişlerdir. Kireç suyunun maltodekstrin seviyesini (%40, 50 ve 60), kurutma havası sıcaklığını (140, 155 ve 170 °C) ve akış hızını (47.1, 53.5 ve 57.8 m³/h) değiştirerek 27 farklı deney yapmışlardır. Maltodekstrin konsantrasyonunun artmasıyla tanecik boyutunun arttığını gözlemlemişlerdir [48].

Papadakis vd. (2006), laboratuvar ölçekli püskürtmeli bir kurutucuda üzüm suyu tozunu elde etmişlerdir. 21DE, 12DE ve 6DE'lik maltodekstrin kullanarak kurutma odasındaki yapışkanlık probleminin üstesinden gelmeye çalışmışlardır. Her tip maltodekstrin için kurutma işlem şartlarını ve maltodekstrin yoğunluğunu belirlemişlerdir. En başarılı toz ürün 6DE maltodekstrin kullanımıyla elde edilmiştir. Sırasıyla giriş/çıkış hava sıcaklıkları ve toplam katı içeriğini; 110/77 °C ve %40 olarak saptamışlardır. Elde edilen tozların yüksek higroskopisitesi hariç bütün fiziksel ve duyuşal özelliklerini yeterli bulmuşlardır [49].

Caparino vd. (2012), mango tozlarının fiziksel özellikleri ve mikroyapıları üzerinde kurutma yöntemlerinin etkisini incelemişlerdir. Mango tozlarını 0.05 kg su/kg katı içeriğinde dondurarak, tamburlu ve püskürtmeli kurutma ile elde etmişlerdir. Püskürtmeli kurutma ile tozları maltodekstrin (DE10) ekleyerek kurutmuşlardır. Seçilen kurutma yöntemlerinde kurutma zamanının saniyeler ile 30 saat arasında, ürün sıcaklığının ise 20-105 °C arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Mango tozlarının renk içeriğinin dondurarak kurutulmuş tozlara kıyasla tamburlu kurutmada daha koyu, püskürtmeli kurutmada ise daha açık olduğu görülmüştür. Tamburlu kurutma ile kurutulmuş tozların kütle yoğunluğunu diğer kurutma yöntemlerine göre daha yüksek bulmuşlardır. Tozların cam geçirme sıcaklıklarında farklılıklar görülmemiştir. Dondurarak kurutulmuş mango tozlarının parçacıkları diğer kurutma yöntemleriyle elde edilen ürünlere göre daha gözenekli ve düzensiz şekle sahip olduğu gözlemlenmiştir. Püskürtmeli kurutulmuş tozlar ise daha düzenli ve küresel şekle sahiptir. Çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında tamburlu ve püskürtmeli kurutulmuş tozların daha iyi bir kalitede olduğu belirlenmiştir [50].

Goula and Adamopoulos (2005), hazırladıkları domates püresinden elde ettikleri domates tozu üzerindeki püskürtmeli kurutucunun performansını incelemişlerdir. Püskürtmeli kurutma işlemleri için iki akışkanlı nozul atomizer ve eş-akımlı (co-current) çalışan pilot ölçekli bir püskürtmeli kurutucu kullanmışlardır. %14 sabit katı konsantrasyonlu domates püresini kullanarak 64 farklı deney yapmışlardır. Deneylerde besleme oranını ve sıcaklığını, atomizer basıncını sabit tutarak; sıkıştırılmış hava akış oranını ve giriş havası sıcaklığını değiştirmişlerdir. Duvarlarda kalan ve kapta toplanan ürün

için veriler toplanmıştır. Deneysel verilerin analizinden ürün geri kazanımı ve değişen işlem şartları arasında bağıntılar elde edilmiştir. Laboratuvar ölçekli püskürtmeli kurutucunun avantajlı olduğunu kanıtlamışlardır. Kurutma havasının önden nemini alarak kullanılmasının, kurutma duvarlarında tortuların birikmesini azalttığını ve daha düşük çıkış hava sıcaklıklarında ürünlerin kurutulmasını sağladığını belirtmişlerdir [51].

Kurutma işleminde ısı ve kütle transferi ile ilgili yapılan çalışmalar ile ilgili yapılan çalışmaların bir bölümü aşağıda özetlenmiştir.

Dharshini vd. (2008), domates suyunun püskürtmeli kurutulmasında oluşan ısı ve kütle transferi üzerine çalışmışlardır. Başlangıçta domates suyunu 60 °C'ye ısıtmışlar ve besinin atomizasyonu için basınçlı nitrojen gazını kullanmışlardır. Böylece püskürtmeli kurutucunun performansını geliştirmişlerdir. Deneylerde bütün parametreleri sabit tutup giriş hava sıcaklığını değiştirmişlerdir. Giriş hava sıcaklığı 133 °C'den 161 °C'ye kadar değişiklik göstermiştir. Isı transferinde %11.62 ve kütle transferinde ise %0.51'lik bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir [52].

Liang vd. (2001), yüksek katı içerikli çözelti damlacığını sabit hız periyodu boyunca püskürterek kurutma için yeni bir model geliştirmişlerdir. Kütle ve ısı transferini, denklemler kullanarak sayısal olarak çözümlenmişlerdir. Su bazlı süspansiyon damlacıkları için tek dağılımlı silis parçacıkların granül morfolojisi üzerine olan etkileri deneysel olarak incelenip karşılaştırılmış ve çözeltideki katı madde konsantrasyonunun artmasıyla granül içeriğinin arttığı görülmüştür [53].

Volkov vd. (2014), yüksek sıcaklıktaki gazlar yardımıyla su damlacıklarının hareketi sırasında ısı ve kütle transferi ile faz geçişlerindeki makroskobik düzenlilikleri sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Su damlası buharlaşma oranları tespit edilmiştir. Su damlacıkları içindeki gaz-su buharı konsantrasyonlarını ve buhar-buhar karışımının sıcaklık değerlerini seçmişlerdir. Isı ve kütle transferi modellerinin yeterliliği ve sayısal sonuçlarının değerlendirilmesi için iki fazlı gaz-buhar damlacık karışımlarının teşhisi için 'Parçacık Görüntüsü Velosimetresi ve İnterferometri Parçacık Görüntüleme' yöntemlerini kullanarak deneyler yapmışlardır. Su damlacıklarının buharlaştırılmasının sayısal ve deneysel sonuçlarını değerlendirmişlerdir [54].

Zbicinski vd. (1996), çalışmalarında atomizasyon boyunca ısı ve kütle transferi üzerine türbülansın etkisini deneysel olarak incelemişler ve sonuçlarını tartışmışlardır. Püskürtmeli kurutucuların verimliliğini artırmanın yollarından birinin kurutmadaki akışın türbülansını arttırmak olduğunu belirtmişlerdir. Deneyler sonucunda değişen buharlaşma kapasitesinin

analizlerini yapmışlardır. Gazın ve atomize edilmiş malzemenin sıcaklığı ve parçacık boyut dağılımının atomizere uzaklığın bir fonksiyonu olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca hava akış türbülansındaki artışın, buharlaşma kapasitesinin %20-25 artmasına neden olduğunu kanıtlamışlardır [55].

Püskürtmeli kurutmada damlacık çapı, damlacık boyut dağılımı, nozul seçimi, nozul çapı ve atomizer tipi ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verildiği gibidir.

Ren vd. (2011), püskürtmeli kurutucularda doğru nozul seçmenin kurutmada önemli kritik bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmalarında deneysel analiz ve deney modeline göre yüksek yapışkanlıklı ve yüksek su içerikli malzemeleri kurutmak için kullanılan yeni bir metot geliştirmişlerdir. Basınç ve püskürtme açısı arasında örnek varyasyonlar elde etmişlerdir. Bu sonuçlara göre basınçlı püskürtmeli nozulların yapışkanlı ve yüksek su içeriğine sahip malzemeler için en iyi seçenek olduğu kanısına varmışlardır. Teknolojik gereksinimi karşılamak için püskürtme açısı ve basıncı ayarlanabilmektedir. Deneylerde yüzey basıncının 1.5×10^5 Pa'dan daha büyük olması gerektiğini, max. kritik değerin nozul büyüklüğüne göre kullanılabilir olduğunu ve basıncın kritik değeri geçtiğinde püskürtme açısının azalacağını belirtmişlerdir [56].

Tan vd. (2011), püskürtmeli kurutma işleminin deneysel modelini ve PI kontrol uygulaması işlemini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Deney sisteminde, bir nozul atomizer ve laboratuvar ölçekli püskürtmeli kurutma sistemi kullanılmıştır. Kurutucu madde olarak ise DE 10-15 maltodekstrin ve portakal suyu kullanılmıştır. Çalışmada son nem içeriği ve çıkış hava sıcaklığı üzerindeki maltodekstrin yoğunluğu ve giriş hava sıcaklığının etkilerini incelemişlerdir. Bunun sonucunda ise giriş hava sıcaklığının, nem içeriği ve çıkış hava sıcaklığı üzerindeki etkisinin maltodekstrin yoğunluğundan daha büyük olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Böylece, giriş hava sıcaklığı önemli değişken olarak seçilmiştir. Gözlemden elde ettikleri sonuçlara göre doğrudan sentez metodunun püskürtmeli kurutma işleminde PI kontrolü için en uygun ayarlama metodu olduğunu açıklamışlardır [57].

Zhijun vd. (2010), püskürtmeli kurutucudaki damlacık çapı ve damlacık sıcaklığının ortalama değerlerinin değişimi üzerine basıncın etkisini araştırmışlardır. Çıkış basıncının; referans basıncı, buharlaşma hızı, kurutma hızı ve kurutma sıcaklığını etkilediğini belirtmişlerdir. Parçacık takibinin çok fazlı modeli olan k-ε türbülans modeli, sıvı buharlaşma modeli ve ideal gaz denklemini, hesaplamaları yapmak için kullanmışlardır. Düşük basınç kullanımının, kurutucu büyüklüğünü ve damlacığın dolaşma uzaklığını kısaltmak için bir yol gösterebileceği sonucuna varmışlardır [58].

Choi and Son (2008), bir mikro kanaldaki farklı açılarla damlacık hareketini kütle ve momentum korunumu denklemlerini kullanarak nümerik bir şekilde çözümlenmiştir. Damlacık hareketi üzerindeki giriş akış hızı, damlacık büyüklüğü ve yan duvarın etkilerini araştırmışlardır ve damlacığın dinamik hareketinin temas açısına bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca temas açısının artmasıyla kayma hızının arttığını, giriş akış hızı arttıkça damlacık duvar temas alanının arttığını gözlemlemişlerdir [59].

Yoon vd. (2011), iki tip girdap açısı ve üç farklı nozul çapını kullanarak deneyler yapmışlar ve iki akışlı nozulun atomizasyon özelliklerini incelemişlerdir. Püskürtülen damlacık boyutunu, hızını ve türbülans yoğunluğunu ölçmüşlerdir. Girdap açısını damlacık büyüklüğü ile kontrol etmişlerdir. Yaptıkları deneylerden en uygun nozul tipini girdap açısı 90° ve spiral çapı 1 mm olarak belirlemişlerdir [60].

Yan vd. (2014), düşük basınçlı girdaplı bir nozul sisteminin atomizasyon performansını farklı yapısal parametreler kullanarak incelemişlerdir. Ortalama tanecik boyutu ve akışkan basıncı arasında bir ilişki olduğunu ve artan basınç ile püskürtme açısının arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca damlacığın katı yüzdesi arttıkça Sauter ortalama çapının arttığını, nozul atomizasyon performansının ve püskürtme açısının ise azaldığını açıklamışlardır. Sonuç olarak düşük basınç için en uygun nozul tipini ve optimal parametreleri belirlemişlerdir [61].

Rahman vd. (2010), elektrostatik kuvvetler yardımıyla nano parçacıklar içeren damlacıkları bir nozuldan geçirerek simülasyonlarını yapmışlardır. Damlacık büyüklüğünün; uygulanan voltaj, kullanılan mürekkebin özellikleri ve nozul boyutu gibi farklı parametrelere bağlı olduğunu görmüşlerdir. Uygulanan voltajı artırarak damlacık çapının azaltılabileceğini ve kutup tipi ağızlık kullanarak daha küçük damlacıklar üretilabileceğini vurgulamışlardır [62].

Schmid vd. (2011), ilaç uygulamaları için nano püskürtmeli kurutucuyu inceleyerek damlacık boyutuna, püskürtmenin etkisini araştırmışlardır. Püskürtme ağzındaki parçacık birikimine püskürtme çözeltisinin etkisini analiz etmişlerdir. 0.5-0.8 µm'lik submicron parçacık büyüklüklerini 50 mg toz miktarları için yüksek verimle elde etmişlerdir [63].

Shi and Kleinstreuer (2007), yüksek hızlı damlacığın püskürtmeli dinamiği için bir bilgisayar simülasyon modeli geliştirip analizini yapmışlardır. Türbülanslı gaz akışı, damlacık hızları ve boyut dağılımları açısından geçici püskürtmeli oluşumunu farklı arka basınçlar için incelemişlerdir. Düşük arka basınç (1 atm) ve yüksek arka basınçtaki (30 atm) ortamlar altında oluşan spreylere tartışmışlardır. Düşük arka basınçta spreylere uzun ince

geometrik özelliklerinin olduğunu ve yüksek basınçlardan daha hızlı nüfus ettiklerini belirtmişlerdir. Yüksek arka basınç altındaki spreylerde ise damlacık boyutu farkının olmadığı sonucuna varmışlardır [64].

Gimbun vd. (2015), eş zamanlı püskürtmeli kurutma bölgesinde ayrılmış bir girdap simülasyonu (DES) ve $k-\epsilon$ tabanlı Reynolds ortalaması Navier-Stokes (RANS) hesabını yapmışlardır. Ortalama eksenel hız, sıcaklık ve nem profili tahminini yapmışlar ve bunları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Püskürtme bölgesindeki türbülans modelin bu özelliklerin tahmini üzerinde çok belirgin etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Bulgular girdap simülasyonunun (DES), RANS tabanlı $k-\epsilon$ modellerine kıyasla püskürtmeli kurutma odasında akış alanının daha doğru bir tahmin (hata %5'ten az) sunduğunu ortaya koymuşlardır [65].

Wang vd. (2014), iki akışkanlı atomizasyon akışında, elektrostatik bir spreylerdeki damlacık büyüklüğü ve hız profili karakteristikleri için PDPA (The Phase Doppler Particle Analyzer) tekniğini incelemişlerdir. İki boyutlu hız içerikleri ve damlacık büyüklüğü dağılımını belirli noktalarda eş zamanlı olarak ölçmüşlerdir. Damlacıklar üzerindeki özel yüzey yükleri için deney verileri ile Rayleigh sınırı arasındaki farkları; elektrik enerjisinden yüzey enerjisine, enerji kaybına, Taylor kararsızlığı parçalanmasına ve aşırı yük polarizasyonu olmaksızın enerji dönüşümü nedeniyle sunulmuş ve tartışılmıştır. İki farklı ölçekli damlacıklar için ölçülen ortalama hız profilleri ve RMS (Root Mean Square) hız değerlerinin, atomizasyon işleminde aerodinamik ve elektrostatik kuvvetlerin etkilerini açığa çıkardıklarını belirtmişlerdir [66].

Hosseinalipour vd. (2016), girdaplı bir enjektörün iç akış analizini kullanarak damlacık boyut dağılımının tahmini için maksimum entropi prensibini uygulamışlardır. Maximum entropi prensibi, sıvı spreylerin hız dağılımı ve damlacık büyüklüğü tahmini için kullanılan ilk yöntemlerden biridir. Bu prensipteki bazı sakıncalardan dolayı, tahmin edilen sonuçların deneysel verilerle uyuşmadığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, maksimum entropi prensibi modelinin gelişimi için farklı bir yaklaşım sunulmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tekniğine dayalı olarak, enjektör içindeki akışın sayısal çözümü kullanılarak maksimum entropi prensibi modeli denkleminde mevcut enerji kaynağının iyileştirilmesini önermişlerdir. Önerilen model, bir girdaplı enjektör tarafından oluşturulan içi boş koni spreynin damlacık boyut dağılımını tahmin etmek için uygulanmıştır. Çalışmada, mevcut deneysel verilerin önceki modellerin sonuçlarından daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [67].

Deventer vd. 2013, püskürtmeli kurutma için inkjet (mürekkep püskürtmeli) teknolojisine bağlı bir nozul geliştirmişlerdir. Bunu ilk olarak gıda ve süt endüstrisinde kullanmışlardır. Bu endüstrilerde toz ürünün kalitesinin ısı yüküne, toz şekline ve boyut dağılımına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. İnkjet nozulların geleneksel püskürtmeli kurutma nozullarına göre daha yüksek viskoziteli sıvıları atomize edebildiği ve enerji tasarrufu sağlayabildiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada, sistemin enerji tasarrufları, emisyon azaltımı ve artan enerji geri kazanımı ile ilgili avantajları da tartışmışlardır [68].

Mezhericher vd. (2010), damlacık kurutma kinetiğine dayalı bir püskürtmeli kurutma modeli geliştirmişlerdir. Model iki fazlı Eulerian- Lagrangian yaklaşımını ve iki aşamalı damlacık kurutma kineğini içermektedir. Bu yaklaşımları püskürtmeli damlacık içerisindeki kütle, nem içeriği ve sıcaklık profillerinin tahminini sağlamaktadır. Geliştirilen modeli, basınçlı bir nozul atomizerin kullanıldığı pilot ölçekli püskürtmeli kurutucudaki kurutma işlemlerinin simülasyonu için kullanmışlardır. Dağınık fazın tahmin edilen kurutma davranışını, hava hızı, sıcaklık ve nemin akış modelini kullanan CFD-FLUENT kurutma kinetikleri modelinde hesaplanan verilerle karşılaştırmışlardır. Sayısal simülasyonun sonuçları, tahmin edilen parçacık yörüngesindeki duvar sınırlarının önemli etkisinin yanı sıra kurutma odasında tahmin edilen ısı ve kütle transferi üzerinde kullanılan kurutma kinetiklerinin önemli etkisini kanıtlamışlardır. Böylece, damlacık kurutma kinetikleri ve gerçekçi sınır şartlarının uygun modelinin gerçek püskürtmeli kurutma performansının sayısal tasarımı için çok önemli olduğunu belirtmişlerdir [69].

Kurutmada enerji tüketimi, ekserji ve enerji verimi, kurutma kinetiği ile ilgili yapılan çalışmalar ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Aghbashlo vd. (2012), püskürtmeli kurutucu kullanarak üç farklı kurutma havası sıcaklığında (140, 160 ve 180 °C), balık yağı mikrokapsüllenmesi işlemindeki enerji ve ekserji analizi üzerine deneyler yapmışlardır. Kurutma havası sıcaklığı ve duvar materyalinin; enerji verimliliği, kurutma odasındaki enerji kaybı, ekserji verimliliği, ekserji kaybı ve entropi üretimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 140 °C ve 180 °C arasındaki kurutma hava sıcaklıklarında elde edilen enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %7.48-8.54 ve %5.25-7.42 aralığında bulunmuştur. Bulgulardan yüksek kurutma havası sıcaklığında ekserji veriminin enerji veriminden daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [70].

Kajiyama and Park (2011), püskürterek kurutmada enerji tüketimi üzerine besleme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. MATLAB yazılımını kullanarak püskürtmeli kurutucuların performansını, enerji tüketimini ve ısı verimliliklerini değerlendirmişlerdir.

Termal verimliliğin işlem parametrelerinin değişmesiyle değişmediğini görmüşlerdir. Ayrıca enerji tüketiminin nem içeriği ve besleme akış oranının artmasıyla, son nem içeriğinin azalmasıyla arttığı sonucuna ulaşmışlardır [71].

Tsotsas (2012), kurutma kinetiğinin parçacık oluşumu üzerindeki etkisini araştırmış ve literatürdeki son çalışmalara değinmiştir. Kurutma yoğunluğunun püskürtmeli akışkan yataklardaki parçacık oluşumu üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [72].

Mezhericher vd. (2012), kurutma kinetiğinin kapsamlı formülasyonuna dayalı 3 boyutlu püskürtmeli kurutma modeli üzerine çalışmışlardır. Bir püskürtmeli kurutucu içerisindeki silica çözeltisinin kurutulmasında basınçlı bir sprej atomizeri incelemişlerdir. Araştırmalarını daha önce yayınlanan 2 boyutlu modellerle karşılaştırmışlardır. Simule edilmiş püskürterek kurutma işleminde mikrometre büyüklüğündeki silica çözelti parçacıklarını elde etmişlerdir [73].

Erbay and Koca (2012), beyaz peynir tozu üretimi boyunca püskürtmeli kurutma işleminin ekserjik, enerjik ve ekserjiekonomik analizleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, pilot ölçekli püskürtmeli kurutucu kullanarak beyaz peynir tozunu üretmişlerdir. Kurutma deneylerini; giriş hava sıcaklığı 160-230 °C, çıkış hava sıcaklığı 60-100 °C ve atomizasyon basıncını 294.2-588.4 kPa aralığında gerçekleştirmişlerdir. Püskürterek kurutma işleminin performansını ve işlem şartlarının kurutma performansı üzerindeki etkisini enerji, ekserji ve ekserji ekonomik analizlerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Performans değerlendirmesini; enerji ve ekserji verimleri, iyileştirme potansiyel oranı (IP), toplam maliyet ve ekserjiekonomik faktör terimlerini kullanarak yapmışlardır. Ekserji verimlerini %2.66-6.00, IP oranını 7.54-10.96 kW, toplam maliyeti 7.30-7.82 TL/h ve ekserji ekonomik faktörleri %76.09-81.93 arasında elde etmişlerdir [74].

Ai vd. (2016), püskürtmeli kurutma işleminde ısı geri kazanım sisteminin analizi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarında enerji tüketimini azaltmak için, etkili bir ısı geri kazanım sistemini önermişlerdir. Bu sistemde egzoz havasının atık ısını giriş havasını ısıtmak için kullanmışlardır. Sistemin bir yıllık ekonomik analizlerini yapmışlar ve geleneksel püskürtmeli kurutma sistemine göre %21.3 enerji tasarrufu elde etmişlerdir. Bu sistemin geri ödeme süresini 2.4 yıl olarak bulmuşlardır [75].

1.2. Kurutma ve Kurutma Sistemleri

1.2.1. Kurutma

Kurutma, nem içeriğini ve su aktivitesini azaltarak gıdaları korumak için kullanılan eski bir tekniktir [11]. Kurutarak saklama yöntemi, gıdayı uzun süre korumanın en iyi yoludur. Kurutma işlemi başlangıçta güneş ışığı ve sıcak hava ile yapılmaktaydı. Günümüzde ise kurutma teknikleri alanında ilerlemeler olmuş ve yeni teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Kurutulan gıdanın azalan ağırlığı sayesinde taşınabilme ve paketleme kolaylığı sağlaması, ayrıca uzun süre bozulmadan depolanma imkanı sağlaması gibi kolaylıklardan dolayı gıdayı kurutarak saklama işlemi çok fazla tercih edilen bir işlem olmaktadır. Günümüzde tepsili kurutma, püskürtme ile kurutma ve dondurarak kurutma gibi birçok kurutma tekniği bulunmaktadır. Kurutma teknikleri arasında bulunan püskürtmeli kurutma genellikle meyve suyu tozu üretmek için kullanılır [11]. Kuru tozları elde etmek için kullanılan püskürtmeli kurutma yöntemi; işlem sırasındaki hijyenik koşulları, işletme maliyetleri ve kısa temas süreleri yönünden tercih edilmektedir [34, 76].

Kurutma sistemleri olarak; konveksiyon, kondüksiyon ve elektro manyetik dalgalarla kurutma olmak üzere üç farklı kurutma sistemi vardır. Konveksiyon kurutmada kurutulacak madde sıcak bir gaz ile kurutulur. Bu gaz çoğunlukla hava olmaktadır. Sıcak gaz kurutulacak maddenin içinden, üzerinden ve arasından geçerek buharlaştırma işlemini gerçekleştirir. Kondüksiyon kurutmada, ısı kondüksiyon ile taşınarak buharlaştırma işlemini gerçekleştirir. Isı, sıcak bir yüzeyden kurutulacak olan maddeye iletilir. Elektro manyetik dalgalarla kurutmada ise, ısı kurutulacak olan maddeye elektro manyetik dalgalarla transfer edilir [77].

Kurutma; gıda, deri, kimya, silah, orman ürünleri sanayisi ve tarım sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutma işleminde ısı ve kütle transferi birlikte oluşur. Kurutulacak malzemenin özellikleri ve kurutma havası koşulları işlemin önemli parametreleridir ve iyi bilinmeleri gerekmektedir [78].

Kurutma, ısı uygulamasından dolayı eşzamanlı ısı ve kütle transfer işleminden kaynaklanan üründen nemin çıkarılmasını içerir [79]. Kurutma; ürünün fiziksel, kimyasal ve depolama özelliklerini değiştirmek için ısı girişi veya ısının uzaklaştırılmasını gerektirir. Kütle transferi, mikrobiyal aktivite ve bozulma reaksiyonları için suyun varlığını azaltarak gıdaları koruyan süreçlerin önemli bir özelliğidir [80, 81].

Kurutmada kurutma gazı olarak, genellikle hava kullanılır. Kurutma havası hızının ya da sıcaklığının artması; kullanılan enerji miktarının artmasına sebep olur. Ürün içerisindeki nemin buharlaştırılması için verilmesi gereken enerjinin daha kısa sürede kurutma sistemine verilmesi; kurutma süresini azaltır. Kurutma havasının sıcaklığı; nemi ve ürün içerisindeki nem ise; kuruma hızını belirler. Kurutma havasının neminin azaltılması da kurutma hızını artırarak kurutma süresini kısaltır [81].

Kurutma sisteminde havanın yeniden dolaştırılması ısı verimin artmasını sağlar. Fazla dolaştırılan hava ile ısı kaybının azalması ve daha az dolaştırılan hava ile de kuruma hızının artması dolaştırılan hava oranının en uygun duruma getirilmesiyle önlenabilir. Kurutma havasının sistemde sürekli dolaştırılmasından havanın nem içeriği etkilenir. Havanın nem içeriğinin korumak amacıyla belirli zaman aralıklarında nem analizi yapılabilir. Havanın yaş termometre sıcaklığındaki doyma nemi ile sisteme sağlanan havanın çiğ noktası sıcaklığındaki nemi arasındaki fark, havanın soğurabileceği maksimum nem miktarını vermektedir. Havanın gerçek nem alma potansiyeli ısı ve kütle transferi oranlarıyla hesaplanmaktadır ve genel olarak maksimum değerlerden düşük olmaktadır [82].

Bir kurutma sisteminde harcanan enerji; herhangi bir yakıtın yanmasıyla, alternatif enerji kaynaklarıyla (güneş, rüzgar vb.) jeotermal enerjiyle, elektrik enerjisi ya da daha başka bir enerji kaynağı ile sağlanır. Kurutma için gerekli olan ısı, bu enerji kaynaklarından karşılanır ve böylece kurutma işlemi gerçekleşir. Sistemde aynı havanın dolaştırılması sonucunda, bağıl nemi zamanla yükselecek ve nem alma kabiliyeti azalacaktır. Bu da; istenmeyen durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Tamamen taze hava ile çalışan sistemlerde, kurutma havası ürün üzerinden geçirildikten sonra egzozdan atıldığından sistemde enerji tüketimini artırmaktadır [81, 83].

Tüm gıda ürünleri kurutma işlemi sırasında bazı boyut değişikliklerine maruz kalır. Kurutma sırasında ürün hacminin ilk ürün hacmine oranı olan büzüşme, hava dehidrasyonunda ürünün kalitesini etkileyen çeşitli problemlere neden olan önemli bir sorundur. Büzüşme gerilimi, hücre duvarlarının çok sayıda kırılmasına ve malzemenin içinde çok sayıda küçük boşluk oluşmasına neden olabilir. Aynı zamanda bu durum ısı ve kütle taşıma özelliklerini, özellikle ısı ve kütle yayılımlarını, ürün yüzey alanını ve moleküler difüzyon mesafesini de etkileyerek, genel kuruma hızını sınırlandırmaktadır. Büzüşmenin sonucu ürün boyutu, yapısı, rengi, tadı ve aroması etkilenmektedir [84, 85]. Nem içeriğinin genel olarak azalmasıyla büzülmenin arttığı, ancak büzüşme

özelliklerinin kurutulan ürünler ve kurutma yöntemlerine göre farklılaştığı görülmektedir [81, 86, 87].

Ülkemizde tarım ürünlerinin önemli bir kısmı kurutularak saklanır veya depolanır. Ancak, tarımsal ürünlerin işlenmesinde, depolanmasında tüketime sunulmasında kullanılan teknoloji, ülkemizde istenen düzeyde değildir. Günümüzde tarımsal ürünlerin kurutulmasında kullanılan çok değişik kurutucu tipleri geliştirilmiş ve başarılı kurutma denemeleri gerçekleştirilmiştir Dünyada ise sebze ve meyvelerin kurutulması için uygulanan çok değişik yöntemlerle, bu ürünlerin değişik biçim ve boyutlarda doğranmış, kurutulmuş ya da toz veya granül halde üretimleri gerçekleştirilmektedir [88].

1.2.1.1. Kurutma Sistemi Seçimi

Kurutma sisteminin seçimi aşağıdaki aşamalarda yapılmaktadır:

- 1- Kurutulacak ürün için uygun olan kurutucular incelenir.
- 2- Uygun olan bütün kurutucu tiplerinin yatırım ve işletme maliyetleri yapılır.
- 3- Belirlenen kurutma sistemlerinin prototipi ya da laboratuvar ölçeklisi yapılır.
- 4- Farklı parametrelerde kurutma deneyleri yapılarak elde edilen ürünlerin kaliteleri belirlenir [89].

Kurutucuların tasarımı gereksinimlere göre belirlenir. Kurutulacak ürünün başlangıçtaki hali (sıvı, katı, toz vb.) kurutucu tasarımında çok büyük etkiye sahiptir. Aşağıda verilmiş olan Tablo 1.1 ve 1.2 sırasıyla bazı ürünlerin kuruma sıcaklıklarını, sürelerini ve kurutucu tipine göre enerji tüketimi ve buharlaşma hızlarını kapsamaktadır [89, 90].

Tablo 1.1. Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri [89].

Malzeme Cinsi	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Hafta	Gün	Saat
Meşe Tahtaları	32-52	1-4		
Yumuşak Tahtalar	70-105		2-14	
Tuğlalar	77			30
Kahve	50-72			12-48
Kauçuk	36-60		2-6	
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65-92			4-20
Meşin ve Köseleler	26-38		2-6	
Meyveler	55-80			6-24
Üzüm	60-65			24
Elma	1. Kademe 70-80 2. Kademe 74			8
Şeftali, Armut	68			24-30
Şerbetçi Otu	50-65			6-12
Sebzeler	50-65			2-18
Havuç	1. Kademe 70 2. Kademe 65			14-24
Mantar	1. Kademe 44 2. Kademe 65			
Soğan	1. Kademe 70-88 2. Kademe 55-60			10-15
Deriler	21-32			2-150
Fırın Boyaları	105-175			1/4-6
Sabun	38-52			12-72
Tütün Yaprakları	29-55			12
Çay Yaprakları (Fanaj veya ilk kurutma)	38			4-8
Çay Yaprakları (Kurutma)	70-110			1-2

Tablo 1.2. Kurutucu tipine göre enerji tüketimi ve buharlaşma hızları [89, 91].

	Enerji Tüketimi (kj/kg buharlaştırılan su)	Buharlaşma hızı (kg su/h m² veya m³)
Kabinet kurutucu (Normal basınç)	5000-13000	0.1-15/m ²
Kabinet kurutucu (Vakum)	3000-5000	0.1-1/m ²
Tünel kurutucu	5500-6500	
Band kurutucu	4000-6000	
Jet hava püskürtmeli kurutucu	5000-7000	50/m ²
Rafli kurutucu	3500-9000	4-8/m ²
Döner kurutucu	4600-9200	30-80/m ²
Santrifüj kurutucu	3000-4000	90/m ³
Akışkanlaştırılmış yatak kurutucu		
Pnömatik yatak kurutucu	4600-9200	<u>Tanecik çapı</u> d _p =0.5 mm 100/m ³ d _p =1 mm 20/m ³ d _p =5 mm 4/m ³
Spiral borulu kurutucu	3500	500/m ³
Püskürtmeli kurutucu	4600-11500	1-50/m ³
Silindir kurutucu	3200-6500	7-25/m ²

Kurutucu seçiminde dikkate edilmesi gereken noktalar ve parametreler aşağıdaki gibidir.

1. Malzemenin Kuruma Karakteristikleri

- Başlangıç nem içeriği
- Son nem değeri
- Kurutma sıcaklığı
- Kurutma süresi

2. Kurutulacak Malzemenin Özellikleri

- Zehirlilik
- Tutunabilirlik
- Tanecik boyutu

3. Malzemenin Kurutucuya Yüklenişi ve Alınışı

- Birim zamanda işlenecek malzeme miktarı
- Sürekli-kesikli işlem
- Kurutma adımından önceki işlem
- Kurutma adımından sonraki işlem

4. Ürün Kalitesi

- Ürünün ayrışması
- Fazla kurutma
- Ürün sıcaklığı
- Ürün yoğunluğu
- Ürün zedelenmesi

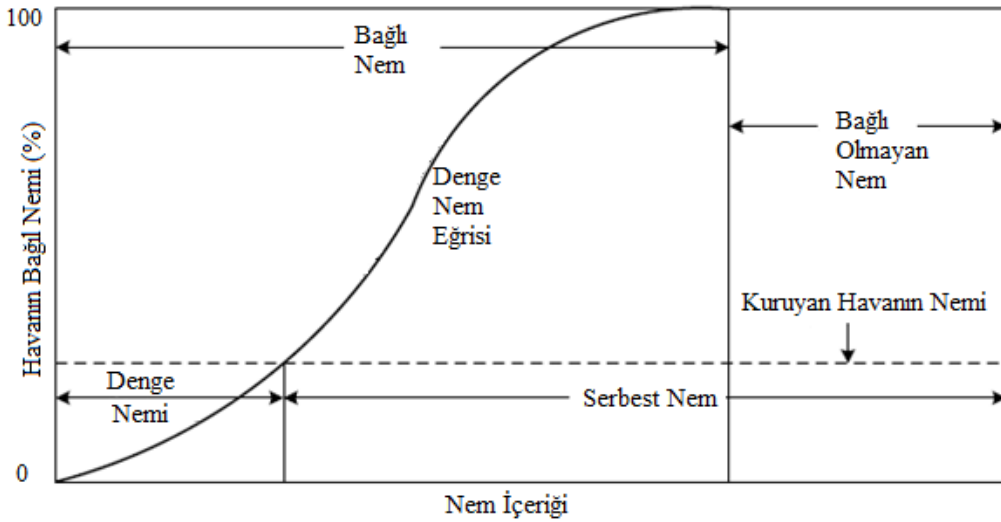
5. Tasarlanan Sistemin Kurulacağı Yerin Özellikleri

- Havanın temizliği, sıcaklığı, nemi
- Yakıt durumu
- İzin verilecek gürültü, titreşim, toz, ısı kayıpları
- Hammadde temini
- Atık gaz çıkışı

Belirtilen parametrelere göre ürünle ilgili en uygun kurutucu tipine karar verilebilir [88].

1.2.2. Kurutma Teorisi

Kurutma, üründen nemin uzaklaştırılması işlemidir. Kurutma boyunca gerekli enerji nemi buharlaştıran ısıtma kaynağından aktarılır [92]. Nem içeren malzemeler higroskopik ve higroskopik olmayan olarak sınıflandırılabilir. Higroskopik bir materyaldeki nem iki şekilde bulunur: bağlı nem ve bağlı olmayan nem [93]. Bağlı nem, aynı sıcaklıkta saf sudan daha düşük bir denge buhar basıncını kullanır (Şekil 1.1). Bağlı nem örnekleri arasında, gözenekli bir katı içinde çok küçük kılcal kısımlarda bulunan, yüzeyde absorbe edilen veya katı maddelerle kimyasal olarak birleştirilen su bulunur. Bağlı olmayan nem, bağlı olan nemi aşan su içerir. Bağlı olmayan nem aynı sıcaklıkta saf suya eşit bir denge buharı basıncı uygular. Higroskopik olmayan bir malzemedde, bütün su bağlı olmayan nem olarak bulunur [93].

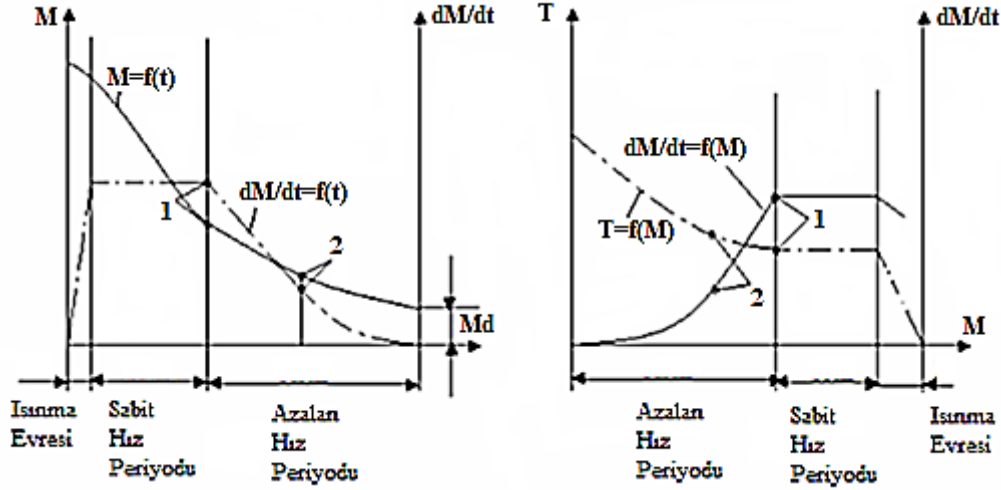


Şekil 1.1. Denge nem eğrisi [93].

Tuzlar, metal oksitler ve birçok polimer higroskopik materyallerin örnekleri arasındadır. Higroskopik olmayan malzemelerin örnekleri arasında ise kırık taşlar, plastik topaklar vb. bulunur [94].

Katıların kurutulması, sabit hız periyodu ve azalan hız periyodu olmak üzere iki periyoda ayrılır. Sabit hız periyodunda, malzemedan bütün bağıl olmayan nem çıkarılır ve kurutma hızı oldukça sabit bir hızda ilerler. Bu aşamada, yüzeydeki buharın kısmi basıncı doyma buhar basıncına eşittir.

Kurutma işleminin ilk aşaması, yüzeyde doymuş koşulları koruduğu sürece yüzeye nemin yayılma (difüzyon) hızı devam eder. Bağıl olmayan nemin tamamı giderildikten sonra yüzeydeki buharın kısmi basıncı düşer ve kuruma hızı azalır, buna azalan hız periyodu denir. Sabit hız periyodundan azalan hız periyoduna dönüşmenin gerçekleştiği nem içeriği, kritik nem içeriği olarak adlandırılır. Kuruma, azalan hız periyodunda nem içeriği dengeye ulaşana kadar devam eder (Şekil 1.2). Denge nemi, çevrenin su buharının kısmi basıncıyla dengede olduğu nemdir [93].



Şekil 1.2. Kurutmanın kinetik eğrileri [93].

Gıda ürünlerinde bulunan suyun uzaklaştırılması önemli bir fiziksel olaydır. Pek çok iç ve dış faktörler kurutma işlemine etki etmektedirler. Kurutma işleminin en önemli mekanizmalarını, moleküler difüzyon ve kapiler akım oluşturmaktadır. Fick'in ikinci kuralı kullanılarak küre şeklindeki maddelerin kurutulmasındaki moleküler difüzyon olayı belirlenmektedir [95]. Fick'in ikinci kuralı, kurutma işlemi uygulanan gıdaların kuruma hızının düşüş periyodundaki kütle difüzyon eşitliği olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitlik aşağıda verildiği gibidir [96]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (1.1)$$

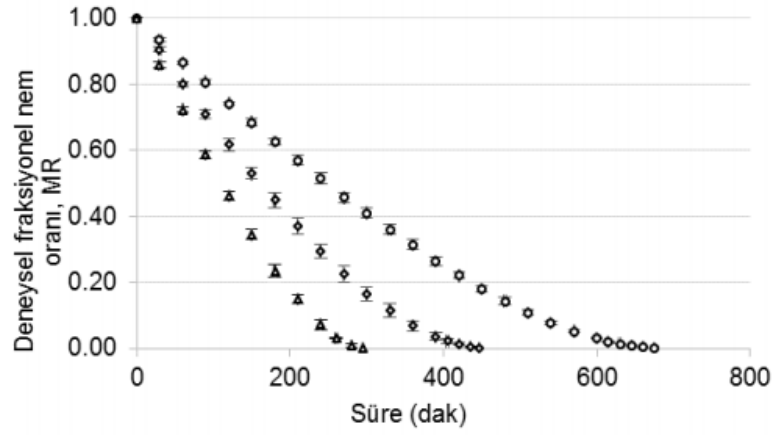
Kararsız hal difüzyonunda Fick'in ikinci kuralının analitik çözümü, küresel boyutlardaki gıdaların kuruma hızının düşüş periyodunda meydana gelen nem transferini ifade etmek için kullanılmaktadır. Kuruma sırasında nemin azalmasından kaynaklanan büzülme, sabit difüzyon katsayısında ve sıcaklığın dikkate alınmaması durumunda aşağıdaki şekilde yazılır.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}}}{R^2} \right) \right) \quad (1.2)$$

Bu eşitlik uzun süren kurutma işlemleri için aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{R^2} \right) \quad (1.3)$$

Kurutma sırasında elde edilen veriler kullanılarak $\ln(MR)$ –zaman (dak.) grafiği elde edilir ve efektif nem difüzyonu buradan bulunabilir (Şekil 1.3). $\ln(MR)$ –zaman (dak.) grafiğinin eğimi K değerini ifade etmektedir [97]:



Şekil 1.3. Farklı sıcaklıklarda kurutulan elmanın kuruma süresine karşı nem oranı değişimi ($\circ$ 60°C; $\diamond$ 70°C; Δ 80°C) [97].

Grafiğe göre eğim (K) aşağıdaki şekilde yazılır.

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (1.4)$$

Böylece, efektif nem difüzyonu,

$$D_{eff} = \frac{K R^2}{\pi^2} \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilir.

1.2.2.1. Katıların Nem İçeriği

Islak bir katı veya sıvı çözeltide bulunan nem; nemin doğasına, katının yapısına ve sıcaklığa bağlı olarak bir ölçüde bir buhar basıncı uygular. Sürekli taze gaza maruz kalan ıslak bir katı içindeki nemin buhar basıncı gazdaki buharın kısmi basıncına eşit olana kadar nemini kaybetmeye devam eder. Katı ve gaz daha sonra dengeye gelir ve bu katı maddenin nem içeriği, hakim koşullar altında denge nem içeriği olarak adlandırılır. Süresiz bir şekilde

uzun süre bu havaya daha fazla maruz kalmak, herhangi bir ek nem kaybına yol açmayacaktır. Katıdaki nem içeriği, daha düşük bağıl nemli havaya maruz bırakılarak daha da azaltılabilir [98].

Bir katı maddenin nem içeriği (X), katı madde içindeki kuru malzemenin ağırlıkça nem içeriği olarak ifade edilir. Islak malzemenin toplam kütesine dayanan nem-katı oranı (W) yardımıyla nem içeriği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$X = \frac{W}{1-W} \quad (1.6)$$

Higroskopik bir malzemede serbest nem, doygunluk nemine karşılık gelen denge nem içeriğinden fazla olan nemdir. Bir higroskopik olmayan malzemenin tüm nem içeriği serbest nemdir. Serbest nem içeriği, belirli bir sıcaklıkta çıkarılabilen nem içeriğidir ve hem bağıl hem de serbest nemi içerebilir.

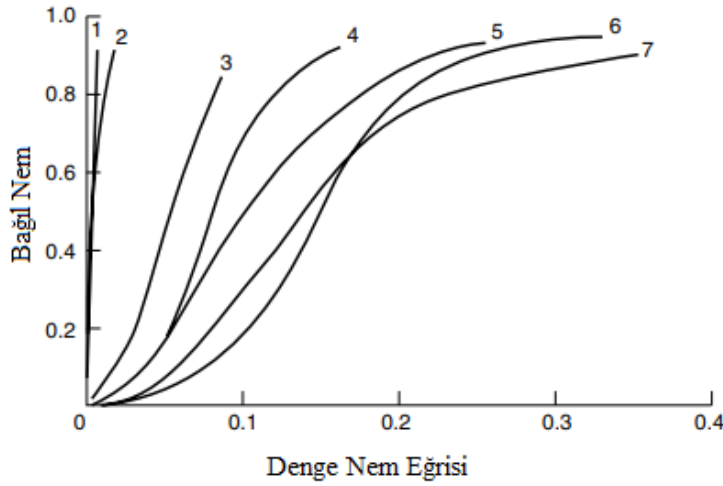
Serbest su ve buhar arasındaki ara yüzün yakın çevresinde, denge altındaki buhar basıncı doymuş buhar basıncıdır. Çok nemli ürünler, neredeyse doyma buharı basıncına eşit olan arayüzde bir buhar basıncına sahiptir. Suyun uzaklaştırılmasıyla katıların konsantrasyonu arttırılırsa, çözünmüş higroskopik katı maddeler, ozmotik kuvvetlerden dolayı buhar basıncında bir düşüş meydana getirir. Suyun daha fazla uzaklaştırılması, sonuç olarak ürünün yüzeyinin kurutulmasına neden olur. Bu durumda su sadece iç kısımda çok küçük kılcal kısımlarda, küçük parçacıklar arasında, büyük moleküller arasında ve moleküllerin kendilerine bağlı olarak bulunur. Bu bağlanma, önemli ölçüde buhar basıncını düşürür. Bu nedenle böyle bir ürün, sadece buhar basıncının önemli ölçüde azaldığı bir dış atmosfer ile dengede olabilir [98].

1.2.2.2. Nem İzotermi

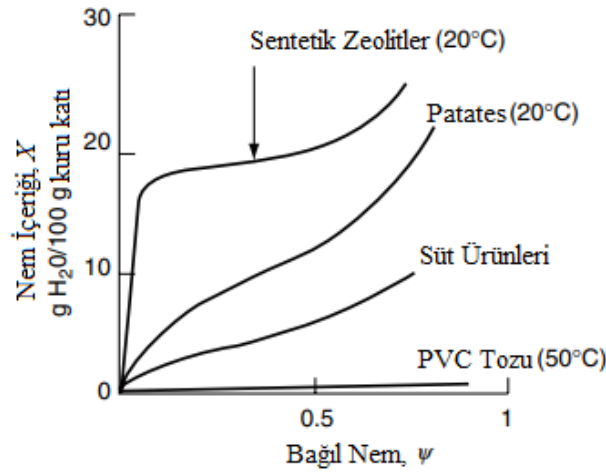
Kuru bir ürün, aynı anda buhar basıncını düşürerek suyu tutabiliyorsa higroskopik olarak adlandırılır. Farklı ürünler higroskopik özelliklerinde geniş çapta değişir. Bunun nedeni, moleküler yapıları, çözünürlükleri ve reaktif yüzeylerin kapsamıdır.

İzotermal koşullar altında deneysel olarak ölçülen sorpsiyon izotermi, bir ürünün higroskopik özelliklerini tanımlamak için kullanılır.

Birim ağırlığa göre sorpsiyon ile bağlı olan nemin bağıl neme karşı çizildiği ve bunun tersi bir grafik oluşturulur. Bu izotermeler, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Şekil 1.5'ten görüldüğü üzere, sentetik zeolitlerin oldukça higroskopik olduğu, ancak polivinil klorür (PVC) tozunun hafif higroskopik olduğu görülmektedir. Patates ve süt ara higroskopisite özelliği göstermektedir.



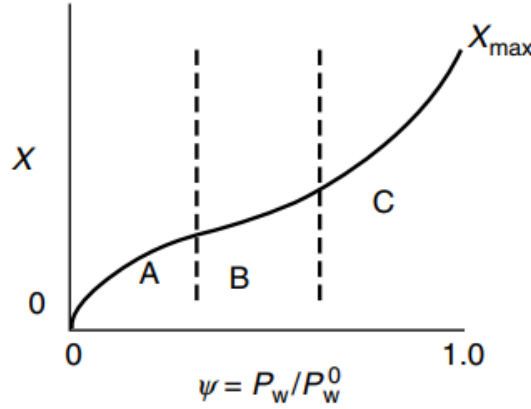
Şekil 1.4. Seçilen maddeler için oda sıcaklığında tipik denge nemi izotermeleri: (1) Asbest lifi, (2) PVC (50 °C), (3) Odun kömürü, (4) Kraft kağıdı, (5) Süt, (6) Buğday, (7) Patates [98].



Şekil 1.5. Değişen higroskopisiteden oluşan malzemeler için sorpsiyon izotermi şekilleri [98].

Şekil 1.6, birçok kuru gıda ürününün çoğu sorpsiyon izotermi karakteristiğini göstermektedir. Dış atmosferin P_w 'sinin kısmi basıncı neredeyse sıfır ise, kuru ürün içindeki denge nemi de neredeyse sıfır olacaktır. Eğrinin A bölümü, bazı yerlerde A'nın sonuna doğru

çok moleküllü tabakalar bulunmasına rağmen monomoleküler tabakaların oluşturulduğu bir bölgeyi temsil eder.



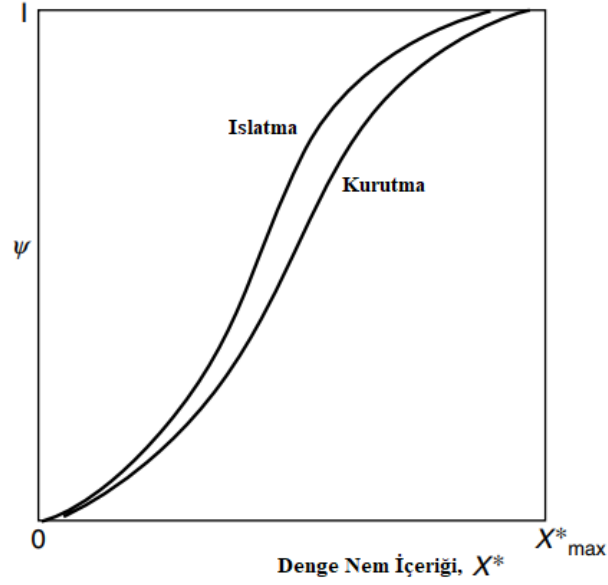
Şekil 1.6. Tipik bir sorpsiyon izotermi [98].

B bölümü, çift ve çoklu tabakaların esas olarak oluşturulduğu bir geçiş bölgesidir. Burada kılcal yoğunlaşma da meydana gelebilir. C bölümünde eğrinin eğimi tekrar artar, bu da esas olarak kılcal yoğunlaşmanın ve şişmenin artmasına bağlanır. Maksimum higroskopisite X_{max} , katı, nem ve doymuş hava ile dengede olduğu zaman elde edilir ($\psi=1$) [98, 99].

1.2.2.2.1. Sorpsiyon-Desorpsiyon Histerezisi

Bir ürünün denge nem içeriği, ürünün ıslatılıp ıslatılmamasına (sorpsiyon veya absorpsiyon) ya da kurutulmasına (desorpsiyon) bağlı olarak farklı olabilir (Şekil 1.7). Bu farklılıklar neredeyse bütün higroskopik ürünlerde değişen derecelerde gözlenmiştir.

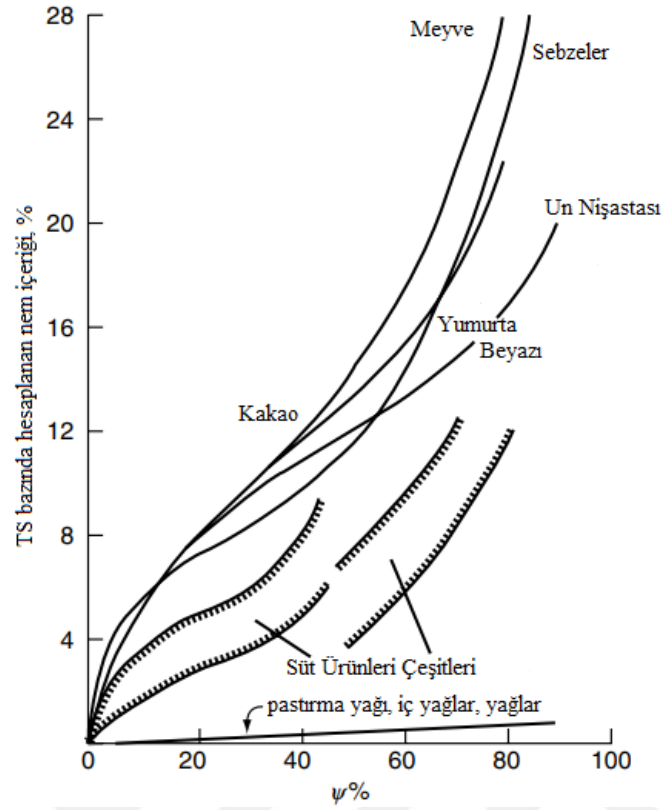
Histerezi açıklamak için kullanılan hipotezlerden biri, ürünün çevresine küçük bir kılcal damar ile ilişkili bir gözenek düşünülür [99]. Absorpsiyon sırasında, bağıl nem arttıkça, gözenek boşken kılcallar dolmaya başlar. Sadece havadaki buharın kısmi basıncı kılcallardaki sıvının buhar basıncından daha büyük olduğunda nem gözenek içine girecektir ve gözenek sıvı ile dolacaktır. Bu sıvı, yalnızca ürünü çevreleyen havanın kısmi basıncının kılcaldaki sıvının buhar basıncının altına düştüğünde kılcaldan dışarı çıkabilir [98].



Şekil 1.7. Tipik bir higroskopik katı için ıslatma ve kurutma izotermi [98].

1.2.2.2.2. Sorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi

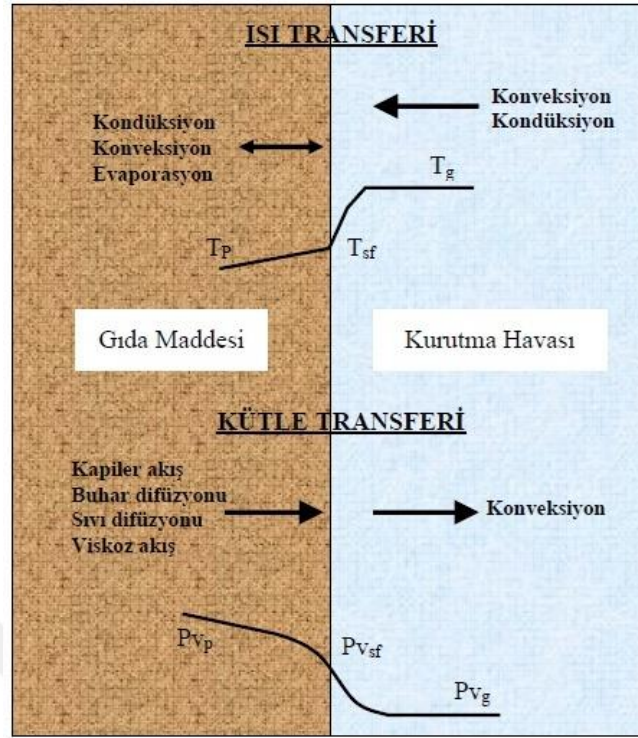
Sorpsiyon izotermi deneysel olarak çoğunlukla kuru ürünlerden başlayarak oluşturulmuştur. Ürünün dengede olduğu havanın başlangıçtaki nemi, konsantre sülfürik asit veya fosfor pentoksit kullanarak son derece düşük değerlere getirilmelidir. Böylece ürünün nem içeriği başlangıçta sıfıra yakındır. Daha sonra ürün termostatik olarak kontrol edilen atmosferde art arda daha fazla neme maruz bırakılır. Hava ile katı arasındaki dengeye ulaşmak için yeterli zaman tanınır. Şekil 1.8’de bir dizi gıda ürününün absorpsiyon izotermi gösterilmiştir [94, 98, 99, 100].



Şekil 1.8. Oda sıcaklığında çeşitli gıdaların sorpsiyon izotermi [98].

1.2.3. Isı ve Kütle Transferi

Kurutma havasından kurutulacak gıda maddesinin yüzeyine ısı transferi ve kurutulacak gıda maddesinin içinden yüzeyine olan kütle transferi olmak üzere aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi kurutulacak gıda maddesinden kurutma sırasında gerçekleşen ve eş zamanlı olan iki çeşit transport yöntemi vardır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Kurutma işlemindeki ısı ve kütle transferi [101].

Buharlaşıma, kurutulacak maddesinin yüzeyinde ya da içerisinde oluşur. Bu durum hem gıda maddesinin cinsine hem de kurutma şartlarına göre değişebilir. Kurutma sırasında ürüne iki şekilde enerji aktarılabilir. Bunlar, konveksiyon ve kondüksiyon şeklinde sağlanır.

Kurutma sırasında, katı ile kurutucu gaz arasındaki ısı ve kütle transferi için aşağıda verilen genel denklemden yararlanılır [101]:

$$\text{Newton Soğuma Kanunu; } q = h(T_y - T_g) \quad (1.7)$$

$$w = k(\rho_k - \rho_g) \quad (1.8)$$

1.3. Teknolojik Kurutma Sistemleri

1.3.1. Isı Pompası ile Kurutma

Geleneksel kurutucularda enerji kaybını azaltmak için; ısı pompaları kurutucudan çıkan egzozda kaybedilen suyun buharlaşmasının gizli ısını geri kazanmak için sistemlere

yerleştirilir. Egzoz akışına bir ısı pompası buharlaştırıcısı yerleştirilerek, kurutucudan çıkan hava soğutulur ve daha sonra soğutucu tarafından nem alınır [76].

1.3.2. Mikrodalga Kurutma

Mikrodalgada kurutmada, 300 MHz ila 300 GHz frekans aralığında elektrik enerjisi kullanılır ve 2.450 MHz en yaygın kullanılan frekanstır. Mikrodalga fırınlar, 60 Hz frekanstan 2.450 MHz frekansına kadar yerel güç hatlarından alternatif akımdan hızlandırarak bir fırının içinde üretilir [102]. Mikrodalga enerjisinin kurutma için kullanılması ile orta derecede düşük bir enerji tüketimi söz konusudur [103]. Mikrodalgalar tek başına bir kurutma işlemini tamamlayamadığı için, mikrodalga işleminin verimliliğini daha da artırmak için zorlamalı hava veya vakum gibi tekniklerin birleştirilmesi tavsiye edilir [76, 104].

1.3.3. Aşırı Isıtılmış Buharlı Kurutma

Aşırı ısıtılmış buharla kurutmada tamamen buhardan yararlanılmaktadır. Aşırı ısıtılmış buharın gıda maddesini kurutma kabiliyeti, verilen bir basınçta ilgili doyma sıcaklığının üzerindeki sıcaklığını yükseltmek için verilen duyulur ısıya bağlıdır [105].

Sabit yatak, akışkan yatak, flash, darbe (impingement), pnömatik ve püskürtmeli kurutucularda; ürünlerin kaliteli bir şekilde kurutulabilmesi için aşırı ısıtılmış buhar teknolojisi kullanılmaktadır [76].

1.3.4. Aşırı Isıtılmış Buharlı Flaş Kurutma

Yüksek sıcaklığa duyarlı gıda ürünleri, vakum altındayken aşırı ısıtılmış buharlı flaş kurutma ile işlenecek yüksek verimlilik elde edilir. Pnömatik ya da flaş kurutmada kullanılan akışkan aşırı ısıtılmış buhar şeklindeki gazdır. Genellikle linyit, kabuk, turba ve posa gibi organik bileşiklerin kurutulması için kullanılır [76, 106].

1.3.5. Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma, yüksek kalitede ürün elde edilebilmesini sağlayan ürünlerdeki suyu almanın en iyi yöntemlerinden biridir. Dondurarak kurutma, suyun katıdan gaz haline geçtiği buz parçasının süblimleşmesidir. Çok düşük sıcaklıktan dolayı, bütün bozulma aktiviteleri ve mikrobiyolojik aktiviteler durdurulur ve ürüne daha iyi bir kalite sağlanır [76, 107].

1.3.6. Vakum Kurutma

Vakum kurutma, özellikle meyveler gibi uzun sürede kuruyan ve ısıya duyarlı ürünler için kullanılan kurutma tekniğidir. Vakum işleminde gıdanın içeriğinde bulunan su düşük sıcaklıklarda atmosferik koşullardan daha kolay buharlaşmaktadır. Ayrıca vakum işlemi, suyun üründen uzaklaştırılması sırasında ortamda hava bulunmadığı için oksidasyon reaksiyonlarının azaltmasını sağlayabilmektedir [108, 109].

1.3.7. Hibrit Kurutma/Kombinasyon Kurutma

Hibrit kurutma teknolojileri; kurutmada kombine teknolojilerin bireysel işlemlere göre daha verimli olduğunun anlaşılmasıyla hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır [76].

İlk hibrit kurutma geleneksel kurutma işlemiyle birleştirilmiş kurutma işlemi, bir mikrodalga fırın veya mikrodalga vakum işlemi ile kurutma süresinin düşürülmesi, ürün kalitesinin artırılması ve enerji gereksinimlerinin en aza indirilmesiyle sağlanmıştır [110, 111].

1.3.8. Mikrodalga Konveksiyon ve Mikrodalga Vakum Kurutma

Suyun kaynama noktası düşük basınçlarda azaldığından, ürün kalitesini arttırmak için mikro dalga kurutmaya vakum uygulanabilir. Bu şekildeki mikrodalga-vakumlu birleşik kurutma, yüksek verimli kurutulmuş meyve ve sebzeler üretmek için önem taşımaktadır [76, 112].

1.4. Püskürtmeli Kurutma

Püskürtmeli kurutma, sıvı malzemeleri katı veya yarı katı parçacıklara dönüştürmek için en iyi kurutma yöntemlerinden biridir [73, 113]. Hem ısıya dayanıklı hem de ısıya duyarlı ürünlerde kullanılabilen püskürterek kurutma yöntemi, bir toz ürünü elde etmek için bir sıvı ürünün bir sıcak gaz akımı içerisine anlık olarak atomize edildiği işlemdir [11, 37, 114].

Püskürtmeli kurutma, sıvı gıdalardan ısıya duyarlı malzemelerin kurutulması ve toz haline getirilmesi için geniş çapta yaygın olarak kullanılan iyi bilinen bir endüstriyel teknolojidir. Püskürtmeli kurutmadaki amaç, en düşük sermaye ve işletme maliyetlerinde çevreye zarar vermeden, ürün üzerinde minimum olumsuz etki ile en hızlı sıvı giderimini elde etmektir [6]. Püskürtmeli kurutmada ısı yardımıyla sıvı çözelti kaliteli bir şekilde kuru toza dönüştürülür [115]. Püskürtmeli kurutma işlemi 4 temel adımdan oluşmaktadır [14, 115, 116, 121]:

- i) Atomizasyon,
- ii) Damlacık ve sıcak gaz arasındaki temas,
- iii) Su buharlaşması,
- iv) Gaz-toz ayrımı.

Atomizasyon işleminde damlacık boyutunun ve homojenliğinin tekdüzeliği, nozul tasarımındaki önemli hususlardandır. En yaygın olarak kullanılan nozullar; pnömatik iki akışkanlı nozul, basınçlı nozul ve koni nozuldur. Püskürtme ile kurutma işlemi; tek aşamada, iki veya üç aşamada olabilir. Pnömatik nozul tipi kurutucular çoğunlukla tek kademeli kurutma ile çalışır. İki aşamalı sistem, püskürtmeli kurutucuyu ve ardından titreşimli akışkanlı bir yatak sistemini içerir. Üç aşamalı prosesler, anlık sulandırma ile kurutulmuş tozun özelliklerini iyileştirir. Çünkü akışkan yatak, bir kurutucu-toplayıcı olarak çalışır ve parçacık aglomerasyonunu kontrol eder [76, 117].

Püskürterek kurutma, meyve suyu tozlarını elde etmek için çoğunlukla kullanılan bir işlemdir [22, 31, 40]. Püskürtmeli kurutma; kahve, süt, yumurta, meyve ve sebze suyu gibi ısıya duyarlı ürünler için oldukça uygun bir işlemdir [22, 43]. Gıda, kimya ve ilaç gibi farklı endüstrilerdeki uygulamalarda da tercih edilir [29].

Püskürterek kurutma işlemiyle; kaliteli, düşük su aktivitesine ve daha kolay nakliye ve depolamaya sahip tozlar elde edilir [11]. Püskürtmeli kurutma ile elde edilen meyve ve sebze

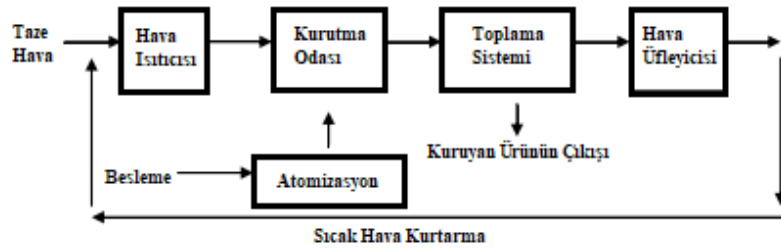
suyu tozları; daha uzun depolama süresi, taşıma ve kullanım kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı çok tercih edilen kullanışlı gıda ürünleridir. Örnek olarak; portakal, elma suyu tozu gibi meyve suyu tozları şekerleme ürünlerinin üretiminde; domates tozu gibi sebze suyu tozları ise hazır çorba, toz soslar vb. ürünlerin üretiminde kullanılmaktadırlar [118].

Toz ürünün fizikokimyasal özellikleri esas olarak, giriş sıcaklığına, hava akış hızına, besleme akış hızına, atomizer hızına, taşıyıcı madde tiplerine ve bunların konsantrasyonuna bağlıdır [119]. Bu nedenle, daha iyi görsel ve besleyici özellikli ve daha iyi işlem verimine sahip ürünler elde etmek için kurutma işlemini optimize etmek önemlidir [120].

Püskürterek kurutma işleminde kullanılan gaz genellikle hava veya azot gibi inert bir gazdır. Püskürtmeli kurutma, gıdaların su içeriğini ve su aktivitesini düşürerek, kimyasal ya da biyolojik bozulma riskini ortadan kaldırır. Elde edilen ürünün depolama ve nakliye maliyetlerini azaltır [114].

1.5. Püskürtmeli Kurutma İşleminin Aşamaları

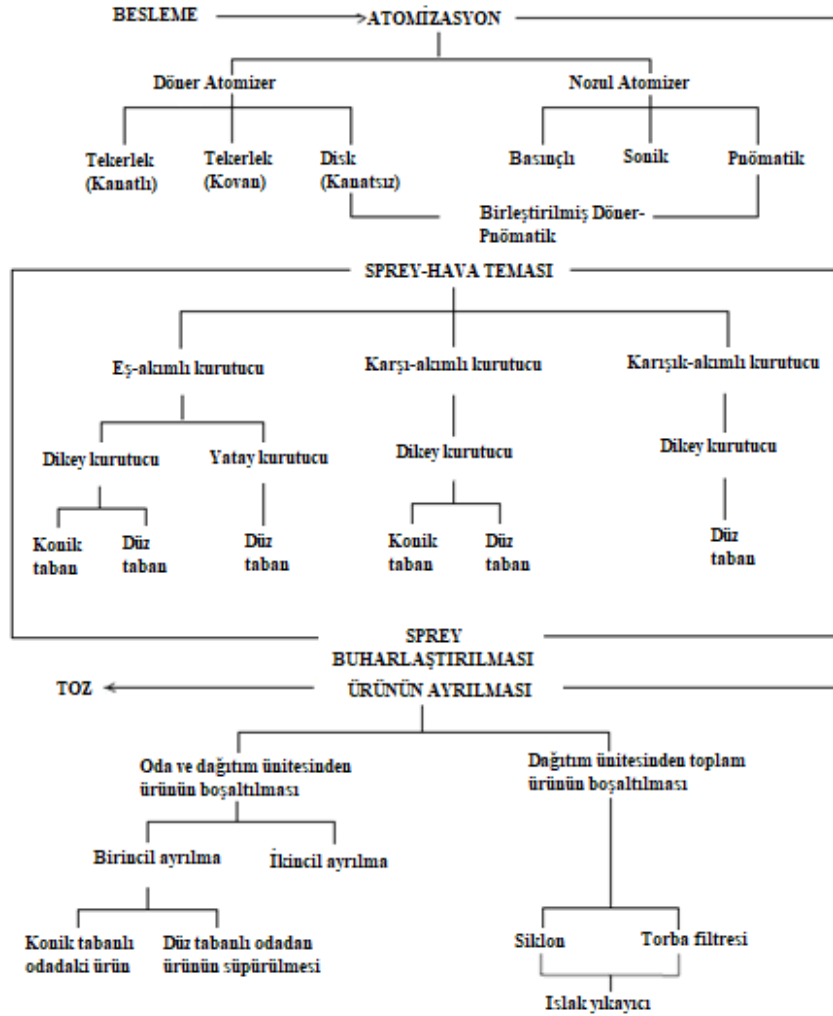
Püskürterek kurutma, kurutma odasında damlacıkların sıcak hava ile temas ettirilmesi ve atomizer aracılığıyla sıvı maddenin püskürtülmesini içerir. Isı ve kütle transferi, atomizerin oluşturduğu damlacıklar ile sıcak gazın kurutma odasında birbirleriyle temas etmeleri sonucu gerçekleşir. Damlacıklardan nemin buharlaştırılması ve kuru toz parçacıkların oluşumu, kontrollü sıcaklık ve hava akımı koşulları altında gelişir [115]. Kuru toz, kurutma odasından sürekli olarak boşaltılır ve işlem yenilenir. Aşağıdaki şekilde püskürtmeli kurutma işleminin akış diyagramı verilmiştir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Püskürtmeli kurutma işleminin genel akış diyagramı [115].

Püskürtmeli kurutma işlemi, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi üç aşamada tamamlanabilir [121]. Birinci aşamada, çözelti veya karışımdan oluşan besleme sıvısı hazırlanır. Hazırlanan sıvı besleme püskürtmeli kurutma bölgesinde atomizer aracılığıyla ince damlacıklara ayrılarak pompalanır. İkinci aşamada, ince sıvı damlacıklar eşzamanlı ya da karşı akımlı

akan bir sıcak gaz akımı ile temas ettirilirler. Bu aşamada sıvı damlacıkların içerisindeki nem buharlaştırılarak kuru toz parçacıklar oluşur. Üçüncü aşamada, kurumuş olan toz parçacıkları bir siklon ayırıcı ile sıcak gaz akışından ayrılırlar. Sıvı damlacıklar içerisindeki nem buharlaşan sıcak havaya karışarak nemli bir gaz oluşturur ve bu gaz işlem sonunda sistemden çıkarılır [93].



Şekil 1.11. Püskürtmeli kurutma işleminin aşamaları şeması [121].

Püskürtmeli kurutucuda kurutulmuş parçacıklar, küresel şekilde ve çeşitli boyutlarda elde edilirler. Düşük giriş hava sıcaklığındaki parçacıkların çoğu büzülmüş bir yüzey şeklindedir. Yüksek giriş hava sıcaklığında ise pürüzsüz yüzeyli çok sayıda parçacık oluşur. Bu durum daha hızlı su buharlaşmasına ve pürüzsüz ve sert bir kabuk oluşmasına neden olan yüksek giriş hava sıcaklıkları için kurutma oranındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır [120].

Çok yüksek giriş hava sıcaklığında püskürtülerek kurutulan üründen daha sert parçacıklar oluşabilmektedir [122]. Kurutma sıcaklığı yüksek olduğu zaman, nem çok hızlı bir şekilde buharlaşmakta ve böylece kuru ve sert parçacıklar elde edilmektedir. Böylece parçacık, kurutucunun daha soğuk bölgelerine hareket ettikçe, buhar vakum içinde yoğunlaştığı zaman içi boş parçacık sönmez. Bununla birlikte, kurutma sıcaklığı daha düşük olduğu zaman, parçacık yüzeyi daha uzun süre nemli ve esnek kalır. Böylece içi boş parçacık soğudukça sönebilir ve büzüşebilir [120].

Püskürterek kurutulan toz ürünler nem standardına uygundur. İyi bir püskürtmeli kurutucunun amacı standart nem içeriğine sahip toz ürünler üretmektir. Püskürtülerek kurutulmuş ürünlerin kalitesi genellikle işlem parametrelerine bağlıdır [123].

Püskürtmeli kurutma sistemi,

- Bir hava ısıtıcısı,
- Bir kurutma odası,
- Bir atomizer,
- Bir toplama sistemi ve
- Bir üfleyici sistem

olmak üzere beş temel elemandan oluşmaktadır [115].

Püskürtmeli kurutmanın temel avantajları aşağıdaki gibidir:

1. Ürün özellikleri ve kalitesi daha etkili bir şekilde kontrol edilir.
2. Isıya duyarlı gıdalar, biyolojik ürünler ve farmasötik ilaçlar atmosferik basınç ve düşük sıcaklıklarda kurutulabilir.
3. Püskürtmeli kurutma sürekli çalışma ve nispeten basit bir donanımda yüksek tonajlı üretim sağlar.
4. Püskürtmeli kurutmada üniform ve aynı özelliklere sahip küresel parçacıklar üretilir.
5. Verim diğer direkt kurutuculardan daha iyidir [116].

Püskürtmeli kurutmanın dezavantajları aşağıdaki gibidir:

1. Püskürtmeli kurutma, yüksek kütle yoğunluğuna sahip ürünlerin kurutulmasında başarısız olur.
2. Verilen bir kapasite için diğer kurutucu tiplerinden daha büyük buharlaştırma oranları gereklidir.

3. Diğer kurutuculara kıyasla daha yüksek bir başlangıç maliyetine sahiptir.
4. Yapılan ürünü kurtarma ve toz toplama kurutmanın maliyetini artırır [116].

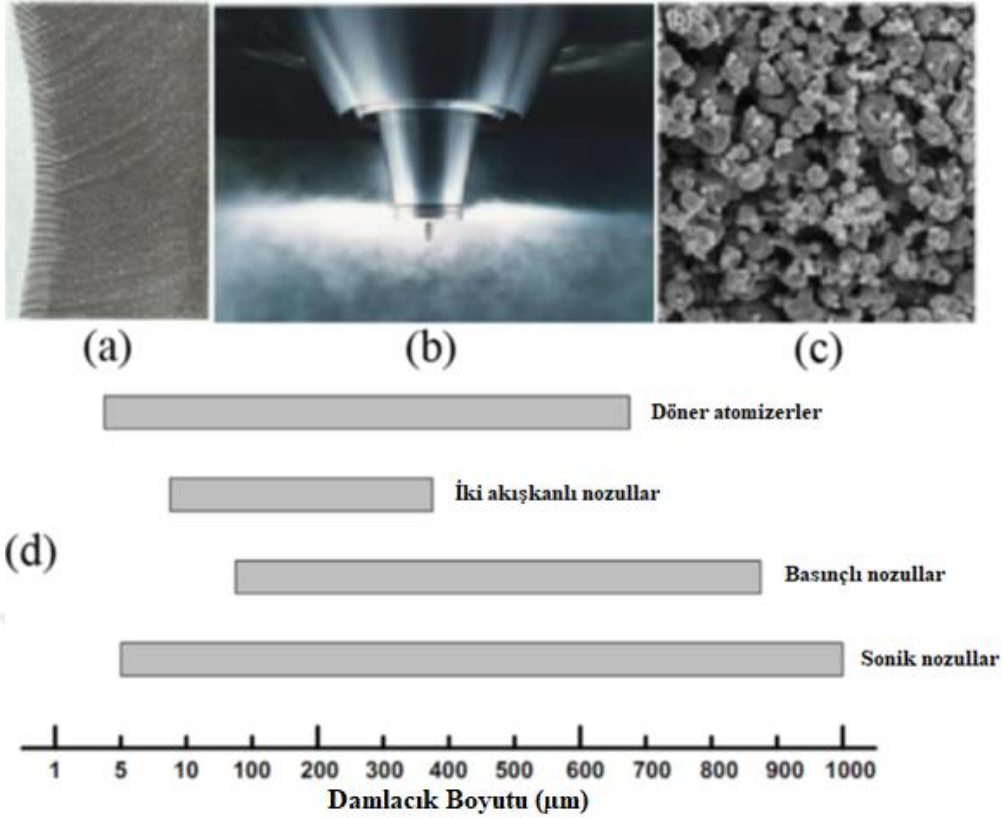
1.5.1. Püskürtmeli Kurutucuda Atomizasyon

Püskürtme, sıvı çözeltilerden büyük yüzey alanlarına sahip damlacıkların oluşturulması işlemine denmektedir. Aynı çapa sahip küçük parçacıkların oluşturulması ideal bir püskürtme işleminin amaçlarındandır. Böylece, püskürtülen bütün damlacıklara eşit kütle ve ısı transfer hızı iletilmiş olur. Bütün damlacıkların eşit kuruma zamanında homojen bir biçimde kurutulmaları sağlanır [116].

Atomizasyonda, sıvının bir nozuldan geçirilerek sprey haline gelmesi sağlanır. Nozuldan püskürtülerek toz halinde kurutulacak olan sıvının yüzey alanı artırılır ve daha sonra sıcak hava ile temas ettirilir. Nozul büyüklüğü, püskürtmeli kurutucunun boyutuna göre farklılık gösterebilir. Endüstriyel ölçekli püskürtmeli kurutucularda damlacık boyutu nozula bağlı olarak 20 µm ile 180 µm arasında değişir [11]. Diğer küçük ölçekli püskürtmeli kurutucularda ise bu boyut değişebilir. Çünkü bu tip kurutucularda amaç ısı ve kütle transferini optimize etmek için kuru hava ile sıvı arasında maksimum bir ısı transfer yüzeyi oluşturmaktır [124, 125]. Atomizer seçimi kurutulmuş ürünün istenen özelliklerine göre değişiklik göstermektedir.

Atomizasyon, son ürünlerin özelliklerini etkileyen en iyi sıvı buharlaştırma koşulunu sağlamak için çok önemlidir [14]. Sıvı beslemeyi atomize etmek için bir kuvvet uygulaması gereklidir. Ticari olarak temin edilebilen atomizasyon sistemleri, spreyi oluşturmak için kullanılan enerji tipine göre sınıflandırılır: basınçlı nozullar (pressure nozzles), santrifüj atomizer (centrifugal atomiser), kinetik enerji nozulu (kinetic energy nozzle) ve sonik enerji atomizeri (sonic energy atomiser) [116].

Farklı tip atomizerlerin ürettiği damlacık büyüklükleri Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Damlacıkların büyüklüğü atomizasyon enerjisini değiştirerek değiştirilebilir. Daha büyük atomizasyon enerjisi ile daha küçük damlacıklar oluşturulabilir Aynı miktarda enerji ile daha düşük yüzey gerilimi ya da viskoziteye sahip bir besin daha küçük damlacıklar oluşturma eğilimindedir [126].



Şekil 1.12. (a) Damlacık üretimi; (b) Döner tekerlekli bir atomizerden püskürtme şekli; (c) Püskürtülerek kurutulmuş parçacıklar (d) Farklı tip atomizerlerden elde edilen damlacık boyutları [116].

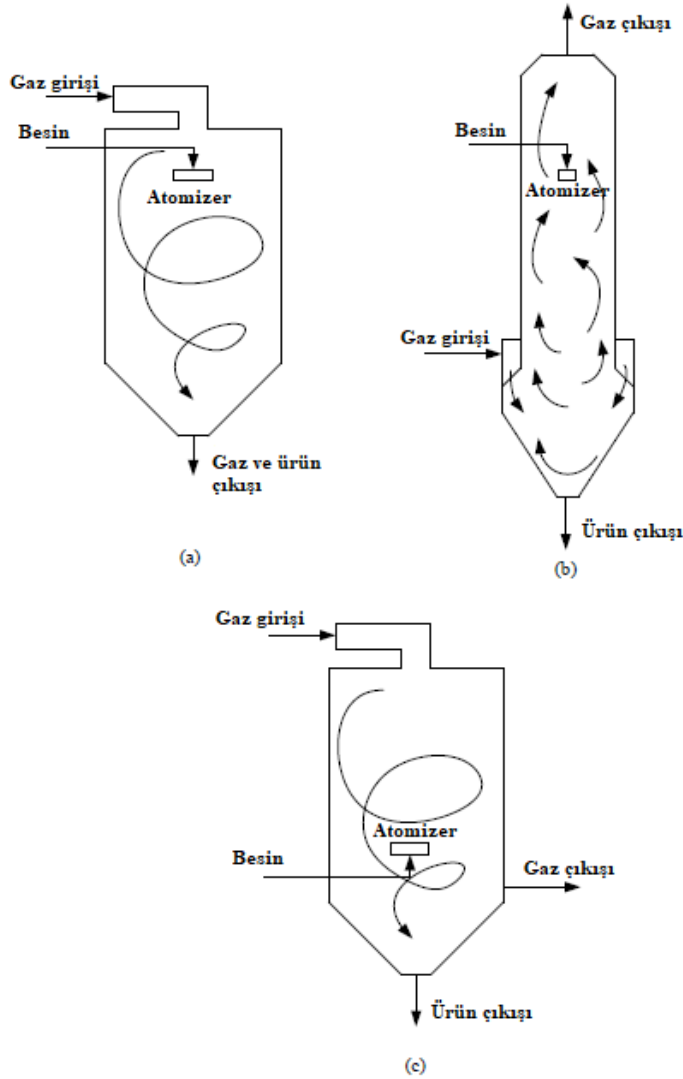
Atomizerin düzeni ve ısıtılmış gaz akışının girişi, kurutma odasının düzenine bağlı olarak değişebilir [127]. Eş akımlı kurutucu (co-current dryer), sıvı sprey ve kurutma havasının kurutucudan aynı yönde geçtiği kurutucu tipidir. Karşı akım kurutucu (counter current dryer) tipinde ise sprey ve kurutma havası, kurutma odasına zıt yönde girmektedir [14]. Şekil 1.13'te püskürtmeli kurutucu tiplerinin şematik resmi verilmiştir (Şekil 1.13).

Eş akımlı kurutucuda (the co-current spray dryer), damlacıklar çok kısa bir süre sıcak hava içerisinde kaldıklarından çözücü buharlaşması hızlı bir şekilde gerçekleşir. Bu nedenle bu tip kurutucular ısıya duyarlı ürünler için uygundur. Gıdaların doğal içeriklerinin değişmemesini sağlar [14, 127, 128].

Karşı akımlı püskürtmeli kurutucu (the counter-current spray dryer), verimli ısı kullanımına sahiptir. Isıya karşı hassas olmayan ürünler için uygundur. Bu tip kurutucuda, püskürtme havası temasının eş-akım ve karşıt akım arasında olduğu ve genellikle daha küçük kurutucularda kullanıldığı karmaşık bir akış stratejisi vardır [129].

Karışık tip püskürtmeli kurutucuda, parçacıklar yukarı doğru hareket eder. Püskürtme memesi altta bulunduğu için sıvı çözelti yukarı doğru püskürtülür. Sıcak gaz sisteme

kurutma odasının tepesinden girer. İlk olarak, damlacıklar sıcak gaz ile karşı akım (counter-current) temasında bulunurlar. Kısa süre içerisinde yerçekiminden dolayı parçacıklar aşağı doğru hareket etmeye başlar ve sıcak gaz ile eş-akım (co-current) durumuna gelir. Bir siklon ayırıcı kullanılarak kurutulmuş tozlar egzoz gazı ile sistemden ayrılırlar. Bu tip püskürtmeli kurutucu sistemi termal olarak kararlı ürünler için uygundur. Endüstride karışık tip püskürtmeli kurutucuya kıyasla, eş-zamanlı ve karşı akımlı püskürtmeli kurutucu sistemleri daha fazla tercih edilmektedir [121].



Şekil 1.13. Püskürtmeli kurutucu tiplerinin şematik gösterimi (a) Eş akımlı (Co-current), (b) Karşı akımlı (Counter-current), (c) Karışık (Mixed) akım [93].

1.5.1.1. Atomizasyon İşleminin Teorisi

Atomizasyon hızının artırılması ile beslemedeki parçacık büyüklüğü ve havanın temas etmesinde bir azalma olur. Bu da düşük yoğunlukta gözenekli ürünler oluşmasına neden olur [130].

Masters (1985) [93] sabit atomizer hızında damlacık büyüklüğünün sıvının viskozitesi ile doğru orantılı olduğunu belirtmiştir. Sıvı viskozitesi arttıkça damlacık çapı da artar. Bu nedenle maltodekstrin yoğunluğunun artmasıyla elde edilen damlacık çapının da arttığını görmüşlerdir. Bunu Jinapong vd. (2008) [131] soya sütünü kuruttukları çalışmalarında, Keogh vd. (2003) [132] sütü kuruttukları çalışmalarında ve Tonon vd. (2008) [120] açai tozunu kuruttukları çalışmalarında doğrulamışlardır.

Döner atomizerler ve basınçlı nozullar, 20 mikronun altında ince parçacıklar elde etmek için uygun değildirler. Püskürtmeli kurutmada ince parçacıkların eldesi genellikle iki akışkanlı sprej nozul (a two-fluid spray nozzle) ile mümkündür. Bu nozulda sıvı, bir ağızlıktan sıcak gaz içerisine nozul aracılığıyla püskürtülür [30]. İki akışkanlı sprej nozuldaki atomizasyon prensibi basınçlı nozullar ve döner atomizerlerden farklıdır. Basınçlı nozullar ve döner atomizerlerde, atomizasyon için yüksek basınç ve merkezkaç kuvveti ile üretilen yüksek hızlı sıvı akışı kullanılır. İki akışkanlı sprej nozullarda hava 100 m/s'nin üzerinde hızlı bir şekilde hareket eder. Bu hız genellikle ses hızı (Ortam havasında ses hızı yaklaşık olarak 340 m/s'dir.) civarındadır. Gaz-sıvı ara yüzünde oluşan kesme kuvveti atomizasyona neden olur. Laboratuvar ve pilot ölçekli püskürtmeli kurutucularda nozuldan çıkan sıvı hızı yaklaşık olarak 0.1-5.0 m/s'dir [30].

İki akışkanlı sprej nozulda atomizasyon işlemini sınırlayıcı iki olası faktör vardır. Birincisi, damlacıklar gaz-sıvı ara yüzündeki kesme kuvvetleri tarafından üretilir. Bunların da atomizasyon akış hızına ve nozul geometrisine bağlı olan atomizasyon gazının yerel gaz hızına bağlı olması beklenir. İkincisi, gazlar yavaş hareket eden sıvı ile temas ettiğinde momentumları yavaşlar, damlacıklar birbirinden kopar ve hızlanırlar. Bu etki, atomizasyon gazının düşük akış hızlarında ya da besleme sıvısının yüksek akış hızlarında daha belirgin olacaktır [39]. Böylece, W_{atm}/W_s (atomizasyon gazının sıvının akış miktarına oranı) atomize edici gaz ve sıvı beslemenin kütle akış hızlarında sıklıkla kullanılan bir karakterizasyon parametresi yazılabilir [133].

Genel olarak kabul edilen teori, bu faktörlerin her ikisinin de bir etkisinin olabileceğidir. Yüksek atomizasyon gaz akış hızında ve düşük sıvı akış hızında, kesme kuvvetleri ve gaz hızı baskın etkiye sahiptir. Sıvının akış hızı arttıkça, momentum dengesi ve W_{atm}/W_s önemli hale gelir [134].

Döner atomizerler ve basınçlı nozullarda, başlangıçtaki damlacık boyutu ve son parçacık boyutu için çok sayıda korelasyon mevcuttur. Fakat iki akışkanlı spreynozullar için bu korelasyonlar daha azdır. Thybo vd. [134], Masters [93] tarafından önerilen bir denkleme benzerlik gösteren aşağıdaki korelasyonu önermektedirler. Buna göre yüzey ortalama çapının (d_{sm}), damlacık çapına (D) oranı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{d_{yo}}{D} = \left(1 + \frac{W_s}{W_{atm}}\right) k_2 \left(\frac{\mu_s \sqrt{\sigma}}{\sqrt{\rho_s \rho_g} V_g^2 D^{1.5}}\right)^{k_1} \quad (1.9)$$

İlk terim atomizasyon gazı akışının ve W_{atm}/W_s 'nin ikili etkisine izin vermeyi amaçlamaktadır. Denklemdaki üs katsayısı tipik olarak yaklaşık 0.6'dır. Dolayısıyla tahmini parçacık çapı atomizasyon hızıyla kabaca ters orantılıdır [30].

Daha yüksek atomizer hızları parçacık büyüklüğünü azaltır [93, 135] ve beslemedeki hava girişi, düşük görünür yoğunluklu gözenekli ürünlerde, yeniden hidrasyonun daha zor hale getirilmesiyle sonuçlanır [19].

Farklı durumlar için farklı sıvı akışları, ısı dengesine bağlıdır. Mümkün olan maksimum buharlaşma miktarı (W_{buh}) ve izin verilen besleme sıvı kütleli akışı (W_s) ısı dengesi ile aşağıdaki şekilde yazılabilir [30]:

$$W_{buh} \lambda_{buh} = W_g c_{p,g} (T_{hava,g} - T_{hava,\zeta}) - Q_{kayıp} \quad (1.10)$$

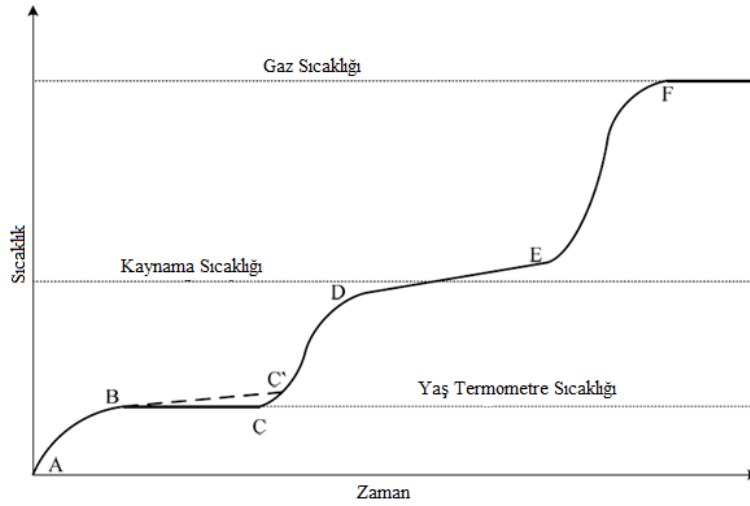
Daha sonra maksimum sıvı akışı aşağıdaki gibi verilebilir [30]:

$$W_s = \frac{W_{buh}}{(1-s)} = \frac{W_g c_{p,g} (T_{hava,g} - T_{hava,\zeta}) - Q_{kayıp}}{\lambda_{buh} (1-s)} \quad (1.11)$$

1.5.2. Püskürtmeli Kurutma İşleminde Damlacık Kurutma

Püskürtmeli kurutma işleminde damlacıkların kurutulması eş zamanlı olarak ısı, kütle ve momentum transferini içerir. Damlacıklar atomizerden enjekte edildiğinde, damlacıklar kurutma gazı ile temas eder ve ısı konveksiyon yoluyla gazdan damlacık içine aktarılır. Damlacıklara aktarılan ısı, nem buharlaşması sırasında gizli ısıya dönüştürülür. Atomizerden püskürtülen damlacıkların hızı, çevreleyen gazdan çok daha büyüktür. Bu nedenle damlacıklar ve kurutma gazı arasındaki momentum transferi gerçekleşir. Bir damlacığın tipik sıcaklık profili Şekil 1.14'te verildiği gibidir. Damlacık yüzeyinden nemin buharlaşmasından dolayı, damlacığın sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına (Şekil 1.14'te A-B aralığı) ulaşır. Damlacık yaş termometre sıcaklığına ulaştığı anda, kurutma neredeyse sabit bir hızda ilerler ve damlacığın sıcaklığı sabit kalır (Şekil 1.14'te B-C aralığı). Çözünmüş katıları içeren damlacıkların sıcaklığında (Şekil 1.14'te BC) küçük miktarlarda bir artış olacaktır. Bu olay, çözünmüş katıların varlığı buhar basıncını ve dolayısıyla kütle transfer hızını düşüreceğinden ve damlacık sıcaklığının yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkmasına neden olmasından kaynaklanır. Nemin buharlaşmasından dolayı, damlacığın yüzeyi kısa sürede katı bir tabaka ile kaplanır ve damlacık bir partiküle dönüşür. Damlacığın bir partiküle dönüştüğü nem içeriği kritik nem içeriği olarak adlandırılır [93].

Kritik nem içeriğine ulaşıldığında, yüzeyden uzaklaştırılan nem partikülün iç kısmından yüzeye nemin yayılması sınırlandığından dolayı kurutma hızı düşer [93]. Azalan kuruma hızından dolayı, gazdan damlacığa taşınan ısıнын çoğu partikülün sıcaklığının artmasına katkıda bulunur ve partikül sıcaklığı hızla yükselir (Şekil 1.14'te C-D aralığı). Kurutma gazı sıcaklığı, nemin kaynama noktasından daha büyükse, nemin buharlaşması kaynama noktasında gerçekleşecektir. Bu noktada, bütün ısı partikülden nemin buharlaşmasında kullanılacak ve partikül sıcaklığı kaynama noktasında kalacaktır. Katıların varlığından dolayı kaynama noktasında bir artış olacaktır (Şekil 1.14'te D-E aralığı). Bütün serbest nem uzaklaştırıldıktan sonra partikülün sıcaklığı, partikül sıcaklığının değiştirilmesinde (Şekil 1.14'teki E-F aralığı) değişerek kurutulmuş partiküllere aktarılan ısı tekrar yükselmeye başlayacaktır. Partikül sıcaklığındaki artış, kurutma gaz sıcaklığına ulaşınca kadar devam edecektir [93].



Şekil 1.14. Püskürtmeli kurutucuda damlacık kurutma sıcaklığı eğrisi [136].

1.5.3. Damlacık Boyutu ve Dağılımı

Sıvı atomizasyonu, püskürtmeli kurutma işleminin en önemli aşamasını oluşturmaktadır. Püskürtme işlemine başlamadan önce en uygun atomizer tipinin seçilmesi gerekir. Elde edilecek ürünün kalitesini etkileyen parametrelerden biri de damlacık boyut dağılımı ve hızlarıdır. Damlacıkların boyut dağılımı, ısı transfer yüzeyine ve kurutma hızına etki eden en önemli parametredir. Tablo 1.3'te küresel damlacıkların yüzey ve boyutlarının karşılaştırılması gösterilmektedir [116].

Tablo 1.3. Küresel damlacıkların boyutları ve yüzey alanlarının karşılaştırılması [116].

Damlacığın Toplam Hacmi (m ³)	Damlacık Çapı	Damlacık Sayısı	Bir Damlacığın Yüzey Alanı	Toplam Yüzey Alanı (m ²)
1	1.234 m	1	3.14 m ²	3.14
1	1 cm	1.986×10^6	3.14 cm ²	623.6
1	1 mm	1.986×10^6	3.14 mm ²	6,236
1	100 µm	1.986×10^6	31.4 µm ²	62,360
1	1 µm	1.986×10^6	3.14 µm ²	6,236,000

Damlacıkların boyut ve dağılımı, partikülün boyut ve dağılımını doğrudan etkilemektedir. Ortalama damlacık boyutu ve boyut dağılımına hep birlikte 'püskürtme karakteristiği' denmektedir. Bu değer bütün damlacıkların dağılımını karakterize etmektedir. Sauter ortalama çapı (SMD, Sauter Mean Diameter), damlacık boyut dağılımını karakterize

etmek için kullanılmaktadır. Toplam damlacık hacminin toplam damlacık yüzey alanına oranı ‘Sauter ortalama çapı (SMD)’nı ifade etmektedir [115].

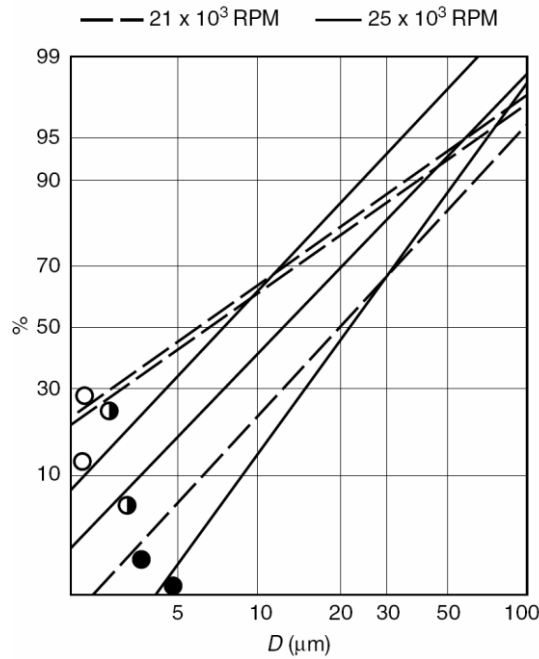
Buna göre, damlacık ortalama çapı aşağıdaki şekilde ifade edilir [137].

$$SMD = \frac{\sum_1^I D_i^3 f_i}{\sum_1^I D_i^2 f_i} \quad (1.12)$$

Boyut dağılımı, frekans veya toplam dağılım eğrileri kullanılarak gösterilebilir. Lognormal ve Rosin – Rammler dağılımları püskürtmeli kurutucu hesaplamalarında en sık kullanılan dağılım metotlarıdır. Lognormal dağılımın geometrik ortalama çapı (D_{GO}) ve geometrik standart sapma (s_{geo}) parametrelerine bağlı matematiksel ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir [138].

$$\frac{dN}{dD} = \frac{1}{D \cdot s_{geo} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\log D - \log D_{GO})^2}{2s_{geo}^2} \right] \quad (1.13)$$

Burada N , damlacık sayısını göstermektedir. Grafikselleştirimi Şekil 1.15’te görülmektedir.



Şekil 1.15. Lognormal olasılık damlacık dağılımı [139].

Rosin – Rammler dağılımı, genellikle nozullardan püskürtülen değişik tip ve çaptaki damlacıklar (veya partiküller) için kullanılmaktadır. Rosin–Rammler fonksiyonu yardımıyla ağırlık konsantrasyonu (R) aşağıdaki şekilde yazılır [139]:

$$R = 100 \exp \left[- \left(\frac{D}{D_{ort}} \right)^n \right] \quad (1.14)$$

1.5.4. Başlangıç Damlacık Boyutunun Son Parçacık Boyutu ile İlişkisi

Yeniden yapılandırmayı kolaylaştırmak için gıdaların fiziksel özellikleri arasında nem içeriği, görünür yoğunluk, gerçek yoğunluk ve ilgili parçacık gözenekliliği, parçacık boyutu ve dağılımı bulunur. Bu özellikler beslemenin yapısından (katı içeriği, viskozite ve sıcaklık), püskürtmeli kurutucu tipinden, operasyonel hız atomizasyonundan ya da basınçlı nozul memesinden ve hava giriş ve çıkış sıcaklıklarından etkilenir [93, 140, 141].

Başlangıç damlacık boyutu ve son parçacık boyutu; birleşme, toplanma ya da aşınma olmadığı varsayılarak katı madde üzerindeki bir kütle dengesi ile ifade edilebilir:

$$m_k = m_\zeta S_d = \frac{\pi}{6} d_d^3 \rho_p S_d = m_p S_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p S_p \quad (1.15)$$

Son parçacık boyutu, başlangıçtaki damlacık boyutu yardımıyla Denklem 1.16'daki gibi yazılabilir:

$$d_p = d_d \left(\frac{\rho_d S_d}{\rho_p S_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.16)$$

Böylece verilen damlacık boyutu için, düşük katı madde konsantrasyonunda ve yüksek parçacık yoğunluğunda daha küçük boyutlarda parçacıkların oluşması beklenir [30].

Denklem 1.16'daki ρ_p katı maddenin gerçek yoğunluğu olarak alınırsa, denklem minimum parçacık büyüklüğünü verir. Fakat parçacık gözenekli ya da içi boş (örneğin, bir dış kabuk oluşmuşsa) olursa, ortalama yoğunluk daha düşük ve parçacık çapı daha büyük olur [30].

Damlacık sıcaklığı çözücünün kaynama noktasının üzerinde olduğunda ve damlacık içinde aşırı basınç etkileri meydana geldiğinde; şişirme, büzme, hava deliği oluşumu ve

parçalanma meydana gelebilir. Bu olay genellikle kurutucu çıkış sıcaklığının, çözücünün kaynama noktasının üzerinde olmasına bağlanır [142].

1.5.5. Damlacık Hava Teması

Püskürtmeli kurutucunun en önemli bileşeni kurutma odasıdır. Burada, püskürtülmüş damlacık sıcak hava ile temas ettirilir ve kurutma işlemi başlar. Hava gıda ile temas ettirilmeden önce, besleme akışkanının özelliklerine bağlı olarak ısıtma elemanı tarafından önceden belirlenmiş bir sıcaklığa ısıtılır. Sıcak hava, püskürtülmüş damlacıklarla hava dağıtıcısı aracılığıyla temas ettirilir [11].

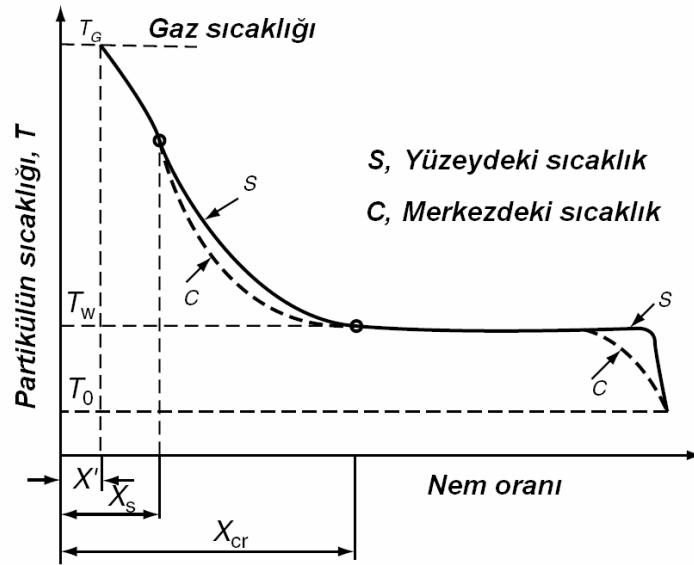
Sıcak havanın ısı enerjisi buharlaşma için kullanılır ve soğutulan hava sistem içinde kurutulmuş parçacıkları pnömatik olarak taşır. Sıcak hava ve sprey damlacıklarının birkaç saniyelik temas süresi vardır. Kuruma sağlandığında havanın sıcaklığı aniden düşer. Nozul, damlacık ve sıcak havanın temas alanını artırır. Sıcak hava, damlacıktaki nemi buharlaştırarak toz haline dönüştürür. Eş-akım işleminde sıvı, aparat boyunca sıcak havanın akışı ile aynı yönde püskürtülür. Sıcak havanın giriş sıcaklığı 150-220 °C arasındadır. Buharlaşma çok hızlı bir şekilde meydana gelir. Elde edilen kuru tozlar orta sıcaklıklara (50-80 °C) maruz kalır. Karşı akım kurutmada, sıvı yüksek sıcaklık işlemi için sıcak hava akışının ters yönünde püskürtülür. Isıya duyarlı ürünler genellikle bu işlemle üretilirler. Ancak, bu işlemin temel avantajı ise enerji tüketiminde daha ekonomik olduğunun kabul edilmesidir [11, 113, 114, 124, 125].

1.5.6. Damlacıkların Kurutulması

Damlacıkların kuruma aşamasında; sıvı ve gaz fazları arasında sıcak hava temasları ve sıcaklık dengesi bulunur. Isı transferi havadan ürüne doğru gerçekleştirilir. Su transferi ise, buhar basıncındaki farklılıktan dolayı ters yönde gerçekleştirilir. Kurutma teorisine dayanarak, üç adım olduğu kabul edilir. Sıcak hava-sıvı temasından hemen sonra, ısı transferi büyük ölçüde damlacıkların sıcaklığının artmasına ve sabit bir değere ulaşmasına neden olur. Bu değer yaş termometre sıcaklığı olarak tanımlanır. Daha sonra su damlacıklarının buharlaşması sabit bir sıcaklıkta ve su buharı kısmi basıncında gerçekleştirilir. Damlacık çekirdeğinden yüzeyine su difüzyonu oranı genellikle sabit ve yüzey buharlaşma oranına eşit olarak kabul edilir. Son olarak, damlacık su içeriği kritik bir

değere ulaştığında, damlacık yüzeyinde kuru bir kabuk oluşur ve kurutma hızı hızla azalır. Parçacık sıcaklığı havanın sıcaklığına eşit olduğu anda kurutma işlemi tamamlanır. Ortaya çıkan parçacıklar; tek biçimli içi boş küreler ya da gözenekli ve düzensiz şekilli olabilir [11, 113, 114, 124, 125].

İçinde çözünmüş katı madde içeren damlacıklar suyun normal buhar basıncından daha düşük buhar basıncına sahip olduklarından, kütle ve ısı transferine sebep olan buhar basıncı ve sıcaklık farkları azalmaktadır. Bu nedenle, çözünmüş katı madde içeren damlacıklardaki buharlaşma hızı, saf su içeren damlacıkların buharlaşma hızından daha düşük olur. Azalan kuruma hızı periyodunda, damlacık sıcaklığı sürekli arttığı için ısı transferi sağlayan sıcaklık itici kuvveti azalmaktadır (Şekil 1.16).



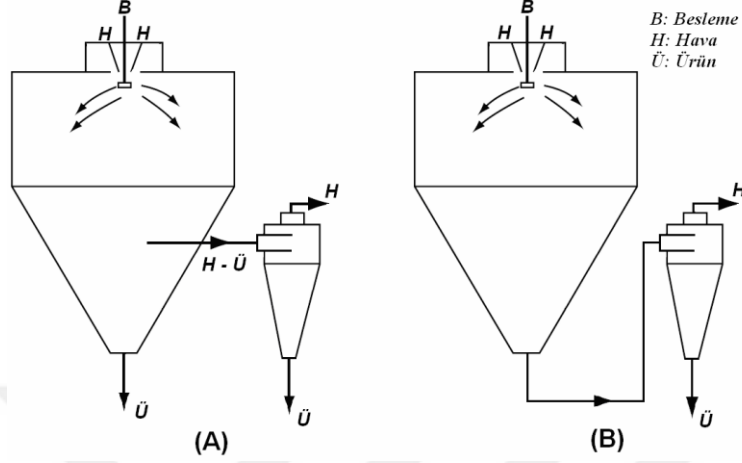
Şekil 1.16. Partikül yüzey ve merkez sıcaklıklarının nem oranı ile değişimi

Kurutma süresince nem içeriği kritik nem oranına düşmüyorsa tüm kurutma sabit hız periyodunda gerçekleşir. Eğer kurutma başlangıcında maddenin nemi kritik nem noktasının altında ise kurutma yalnızca azalan hız periyodunda gerçekleşmektedir [11].

1.5.7. Kurutulmuş Ürünlerin Havadan Ayrılması

Kuruyan parçacıkların sıcak havadan ayrılması kurutma işleminin son aşamasını oluşturmaktadır. Bu işlem, genellikle atmosferdeki ürün kaybını azaltan kurutucunun dış tarafına yerleştirilen bir siklon aracılığıyla gerçekleşir. Yoğun parçacıklar, kurutma odasının

tabanında toplanırken, en ince olanlar nemli havadan ayrılmak için siklondan geçer. Ürün kaybını azaltmak için siklonlara ek olarak filtreler de yerleştirilebilir. Elde edilen toz, küresel damlalardan kaynaklanan parçacıklardan oluşur [11, 114, 124]. Ayrıca, ürünün tamamının siklondan geçerek toplandığı kurutma sistemi de bulunmaktadır (Şekil 1.17).



Şekil 1.17. Paralel akışlı püskürtmeli kurutucuda kuruyan ürünlerin ayrılması

1.5.8. Püskürtmeli Kurutma Tekniği İle Üretilen Tozların Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Püskürterek kurutma tekniği, gıda endüstrisinde optimum şartlar altındaki etkinliği nedeniyle toz gıdalar üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [40, 143]. Giriş hava sıcaklığı, hava akış hızı, besleme akış hızı, atomizer hızı, taşıyıcı madde tipleri ve bunların konsantrasyonu gibi püskürtmeli kurutma parametreleri, püskürtülerek kurutulmuş gıdaların parçacık boyutunu, kütle yoğunluğunu, nem içeriğini, verimini ve higroskopisitesini etkilemektedir [34, 38, 135].

1.5.8.1. Giriş Hava Sıcaklığı

Nem içeriği, kütle yoğunluğu, parçacık boyutu, higroskopisite ve morfoloji gibi toz özellikleri giriş hava sıcaklığından etkilenmektedir. Genellikle püskürtmeli kurutma tekniğinde kullanılan giriş hava sıcaklığı 150-220 °C aralığındadır. Ürün ile kurutma havası arasında daha hızlı ısı transferi olduğundan dolayı, kurutucu hava sıcaklığındaki artış ile nem içeriği azalır. Daha yüksek giriş havası sıcaklıklarında, atomize edilmiş besleme ve kurutma havası arasında daha büyük bir sıcaklık farkı oluşur ve bu durum suyun buharlaşması için

en büyük itici gücü oluşturur [11]. Giriş hava sıcaklığı tozun yoğunluğunu da etkiler. Giriş hava sıcaklığındaki artış, damlacık yüzeyinde hızlı bir şekilde kurutulmuş tabaka oluşturarak damlacık yüzeyinin sertleşmesine neden olur [120, 135, 144].

Giriş hava sıcaklığının, tozun higroskopisitesi üzerinde de etkisi vardır. Daha yüksek giriş sıcaklıklarında üretilen toz parçacıkları, içerisinde bulunan nemden dolayı daha higroskopiktirler. Yüksek kurutma havası sıcaklığı toz taneciklerinin nem içeriğini azaltır ve higroskopisitesini artırır. Giriş hava sıcaklıklarının artması, işlem veriminin daha yüksek olmasına neden olur. Bu da, yüksek giriş hava sıcaklıkları kullanıldığı zaman ortaya çıkan ısı ve kütle transfer işlemlerinin daha yüksek verimliliğinden kaynaklanmaktadır [11, 38, 145, 146].

Giriş hava sıcaklığı tozun morfolojisini de etkilemektedir. Giriş hava sıcaklığı düşük olduğunda parçacıklar buruşmuş bir yüzey gösterirken, artan giriş hava sıcaklıklarında ise pürüzsüz yüzeye sahip çok sayıda parçacık oluşur [120].

Tonon vd. (2008) yaptıkları çalışmada, artan giriş hava sıcaklığının daha yüksek işlem verimini sağladığını ve daha yüksek ısı ve kütle transferini oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca tozun nem içeriğinin, giriş hava sıcaklığı ve besleme akış oranından büyük oranda etkilendiğine de değinmişlerdir [120].

Giriş hava sıcaklığındaki artış daha büyük parçacıklar oluşmasına neden olur [120]. Reiniccius (2001) [147]'e göre, daha hızlı kuruma koşullarında yapılan kurutmada oluşan parçacıklar, daha yavaş kuruma şartları altında yapılan kurutmada oluşan parçacıklardan daha büyüktür. Çünkü çok hızlı kuruma bir parçacığı erkenden kurutur ve kuruma boyunca parçacıkların büzülmesine izin vermez. Giriş hava sıcaklığı düşük olduğunda, parçacık büzülür ve daha küçük çapta parçacıklar oluşur. Nijdam ve Langrish (2006) [122] benzer sonuçları elde etmişler ve süt tozu üretimi için giriş hava sıcaklığının 120-200 °C arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Benzer şekilde Tonon vd. (2011), kurutma sıcaklığındaki artış ile daha düşük nem içeriğine, su aktivitesine ve kütle yoğunluğuna sahip parçacıklar üretildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, daha yüksek sıcaklıklarda üretilen tozların daha büyük hacimde, düşük kütle yoğunluklu ve daha yüksek su adsorpsiyon oranına sahip olduğu belirtilmektedir [148].

Giriş hava sıcaklığının yanı sıra çıkış hava sıcaklığı da tozun özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Sıkıştırılmış hava akış hızı ya da giriş hava sıcaklığı azaltılırsa çıkış hava sıcaklığı da azalır ve böylece tozun nem içeriği artar. Yüksek giriş hava sıcaklığı işlem verimini ve çözünürlüğü artırırken; kütle yoğunluğunu, nem içeriğini ve su aktivitesini

azaltır [149]. Dolayısıyla çıkış hava sıcaklığı, giriş hava sıcaklığına benzer olarak parçacık boyutu, yüzey pürüzlülüğü, yoğunluğu, partiküllerin yapışkanlığı, ürün verimi, artık çözücü ya da nem seviyeleri gibi ürün morfolojisini etkileyen en kritik parametrelerden biri olmaktadır. Püskürtmeli kurutma işlemi uygulandıktan sonra, ikincil tozun kuruması genellikle fazla artık çözücünün uzaklaştırılması için gereklidir. Çözücülerin varlığı, moleküler hareketliliği artırarak katı dağılımını plastikleştirir ve kristal büyümesinin gelişimine neden olabilir. Daha düşük bir çıkış sıcaklığında meydana gelen püskürtmeli kurutma işlemi, yüksek artık çözücü seviyesine ve zayıf akış özelliğine sahip bir ürün verir [150-152].

1.5.8.2.Kurutma Havası Akış Hızı

Kurutma havası akış hızının artması, ürünün kurutma odasında kalma süresini azaltır ve daha yüksek nem içeriğine sahip olmasını sağlar. Toz parçacıklarının kütle yoğunluğunun kurutma hava akış hızına etkisi, ürünün yapışkan yapısından dolayı nem içeriği üzerindeki etkisine bağlıdır. Tozlardaki yüksek nem içeriği, tozların birbirine tutunmasına ve tozlar arasında daha fazla boşluk oluşmasına neden olur. Bu da daha büyük kütle hacmi ile sonuçlanır. Böylece, kurutma hava akış hızının yükselmesi tozdaki nem içeriğinin artmasına ve toz kütle yoğunluğunun artan hacimden dolayı azalmasına yol açar [11]. Ayrıca, toz çözünürlüğü de kurutma hava akış hızından etkilenmektedir. Toz çözünürlüğünün nem içeriği ile ilişkisi vardır. Nem içeriği düşük olan tozların çözünmesi daha kolaydır [153]. Bu nedenle, kurutma hava akış hızının artması, tozun nem içeriğinin artmasına ve toz çözünürlüğünün azalmasına yol açar [154].

1.5.8.3. Atomizer Hızı

Atomizer hızının artırılması nem içeriğini azaltabilir [135]. Çünkü yüksek atomizer hızı, daha küçük damlacık ve tanecik boyutuna neden olur [155]. Böylece artan temas yüzeyinden dolayı sıcak hava daha fazla nemin buharlaşmasını sağlar [11].

1.5.8.4. Besleme Akış Hızı

Yüksek akış hızlarında, besleme ve kurutma havası arasında çok kısa bir temas süresi oluşur. Bu da ısı transferinin verimliliğini azaltarak daha az su buharlaşmasına neden olur. Besleme akış hızının artması, ısı ve kütle transferinin azalmasına ve işlem veriminin olumsuz etkilenmesine neden olur [120].

1.5.9. Şekerce Zengin Gıdaların Püskürtülerek Kurutulması

Meyve suları ve protein gibi şeker bakımından zengin gıdaların püskürtülerek kurutulması, şekerlerin düşük cam geçiş sıcaklıklarından dolayı çok zordur [16]. Bu nedenle, şeker bakımından zengin gıdaların püskürtülerek kurutulmasında kurutucu duvarlarında tozlar birikir. Bu da ürünün verimini azaltır ve gıdanın kirlenmesine yol açar [25, 156]. Başarılı bir püskürtmeli kurutma için, püskürtme sırasında ürünün yüzey sıcaklığı cam geçiş sıcaklığının 10-20 °C üzerine ulaşmamalıdır [16]. Kurutma malzemelerinin cam geçiş sıcaklığını ve depolama stabilitelerini arttırmak ve ayrıca kurutma işlemini kolaylaştırmak için çözeltiye yüksek molekül ağırlığına sahip kurutma yardımcı maddeleri eklenebilir [157].

Tüm kurutma sistemlerinde olduğu gibi püskürtmeli kurutucularda da meyve ve sebzelerin kurutma şartları hatalı seçilirse damlacıklarda yüksek sıcaklıktan dolayı kabuk oluşumu meydana gelir. Damlacık yüzeyinde oluşan kuru tabaka sonucunda büzüşme oluşur ve ıslak olan alttaki tabakaya baskı uygular. Üzerinde baskı olan alt tabaka bu basınca direnç göstermeye başlar. Damlacığın en üst tabakası kurumuş olduğundan büzüşemez ve gerilerek sert kabuk halini alır. Sert kabuk haline gelen üst tabaka bir daha büzüşemez ve sert tabaka halini koruyarak alt tabakalardan ayrılır. Kabuk oluşumundan dolayı kuruma hızında düşüş meydana gelir [158]. Şeker bakımından zengin gıdalarda kabuk oluşumu sıklıkla görülebilir. Kabuk oluşumu suyun difüzyonunu önler. Dışında oluşan kabuktan dolayı damlacığın iç kısmı ıslak halde kalır ve kuruyamaz. Böylece ürünün dayanıklılığı da azalmış olur. Kurutulacak ürüne göre kurutma koşulları çok iyi seçilerek bu sorunun engellenmesi mümkündür [158].

1.5.10. Kurutma Yardımcı Maddeleri

Meyve ve sebze sularını daha verimli bir şekilde kurutmak ve cama yapışmaları engellemek için kurutma yardımcı maddeleri olarak maltodekstrin, gum arabik ve nişasta kullanılmaktadır. Bu taşıyıcı maddeler yüksek çözünürlük ve düşük viskoziteye sahiptirler. Maltodekstrinler, yüksek cam geçiş sıcaklığı ve düşük maliyetlerinden dolayı gıda maddelerinin püskürtülerek kurutulması için en çok tercih edilen kurutma yardımcı maddelerindendir [148].

1.5.11. Püskürtmeli Kurutucularda Isı ve Kütle Transferi

Damlacıklar ve sıcak gaz arasındaki ısı ve kütle transferi aşağıda verilen denklemlerdeki gibi hesaplanabilir [159]:

$$m_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_g - T_p) + \frac{dm_{buh}}{dt} h_{buh} \quad (1.17)$$

$$m_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = 4\pi r^2 Q_p - m_p h_{buh} (T_p) \quad (1.18)$$

Burada dm_{buh}/dt gaz fazı ile damlacık arasındaki kütle transferi olup, aşağıdaki şekilde yazılır [65].

$$\frac{dm_{buh}}{dt} = -k_c A_p (C_d - C_g) \quad (1.19)$$

Kütle Yoğunluğu:

Tozun kütle yoğunluğu, aşağıdaki denklemdeki gibi numune ağırlığının hacmine bölünmesiyle bulunur [12].

$$\text{Kütle yoğunluğu} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Meyve suyu tozunun ağırlığı}}{\text{Numunenin hacmi}} \quad (1.20)$$

Nem Miktarı:

Tozun kuru bazdaki ve yaş bazdaki nem miktarı aşağıdaki denklemlerdeki gibi kütle kaybından hesaplanabilir [12].

Kuru bazdaki nem miktarı:

$$NM_{kb} = \frac{M_s}{M_k} \times 100 \quad (1.21)$$

Yaş bazdaki nem miktarı:

$$NM_{yb} = \frac{M_s}{M_s + M_k} \times 100 \quad (1.22)$$

Ürün Verimi:

Ürün verimi, toplanan kuru toz kütlelerinin kuru maddedeki su kütlesi ve kuru maddenin kütlelerinin toplamına oranı olarak aşağıdaki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$\text{Ürün verimi} = \frac{m_p}{m_\phi + m_t} \times 100 \quad (1.23)$$

Burada, m_p , püskürtülerek kurutulmuş tozun kütlesi (g); m_ϕ , çözeltinin içindeki kuru madde miktarını (g) ve m_t , çözeltideki taşıyıcı maddenin kütlesidir (g) [71].

Besleme Debisi ve Hava Akışı Arasındaki İlişki:

Kütle dengesini kullanarak buharlaştırılan nem miktarı besleme debisi yardımıyla aşağıdaki denklemden bulunabilir [71, 160]:

$$W = F \left(\frac{X_0 - X_{son}^{sb}}{1 - X_{son}^{sb}} \right) \quad (1.24)$$

Buradan hava akışı yani kütleli hava debisi ile buharlaştırılan nem miktarı aşağıdaki gibi yazılır.

$$W = M (Y_\phi - Y_{\text{cevre}}) \quad (1.25)$$

Isıtma Havası Enerji Miktarı:

Hava sıcaklığını arttırmak için gerekli olan enerji aşağıdaki denklemden bulunabilir [71]:

$$P = M (H_{sh} - H_{\text{çevre}}) \quad (1.26)$$

Damlacık Kuruma Hızı:

Sabit kurutma hızında kütle ve ısı transferi dikkate alınarak kurutma hızı aşağıdaki şekilde yazılır [71, 161, 162].

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h \cdot A_d (T_{hava,g} - T_{yt})}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot d \cdot k_h (T_{hava,g} - T_{yt})}{\lambda} \quad (1.27)$$

Buradaki h ,

$$Re < 20 \text{ için } h = \frac{2k_h}{d} \quad (1.27-a)$$

şeklinde yazılabilir.

Küçük bağıl hızda havada hareket eden küresel damlacık için Denklem (1.27) ve (1.27-a)'dan yararlanılarak kurutma için gerekli kuruma zaman ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır [71]:

$$dt = \frac{\lambda \rho_s}{4k_h (T_{hava,g} - T_{yt})} d(d) \quad (1.27-b)$$

Denklem (1.27-b)'de, başlangıç ($t=0$; $d=d_0$) ve son şartlar ($t = t_{sbt}$; $d = d_c$) koşulunda ve kurutma zamanı için aşağıdaki denklem yazılır [71]:

$$t_{sbt} = \frac{\rho_s \lambda_{sbt} (d_0^2 - d_g^2)}{8k_h (T_{hava,g} - T_{yt})} \quad (1.28)$$

Damlacık Çapı:

Geçiş kurutma hızı noktasındaki çap, aşağıdaki denklemlere bağlı olarak damlacığın başlangıç çapına göre ifade edilebilir [71]. Buna göre geçiş kurutma hızı noktasındaki katının, toplam katıya oranı aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\frac{m_t}{m_0} = \frac{\rho_k \left(\frac{4}{3} \pi d_g^3 \right)}{\rho_k \left(\frac{4}{3} \pi d_0^3 \right)} = \frac{X_g^{sb}}{X_0} \quad (1.29)$$

Katının Yoğunluğu:

Katının yoğunluğunun (ρ_k) sabit olduğu kabul edilirse yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$d_g = \left(\frac{X_g^{sb}}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} d_0 \quad (1.29-a)$$

Püskürtmeli Kurutucuların Isıl Verimliliği:

Püskürtmeli kurutucular, mümkün olan en yüksek ısı verimliliğinde çalıştırılmak istenir. Püskürtmeli kurutma işleminin verimi, buharlaşma için gerekli ısının toplam ısıya oranı olarak tanımlanır. Matematiksel olarak;

$$\eta = \frac{\dot{M}_{OB} \lambda}{L_h (T_h - T_{yt}) C_{p,h} + \dot{M}_B (T_b - T_{yt}) C_{p,b}} \quad (1.30)$$

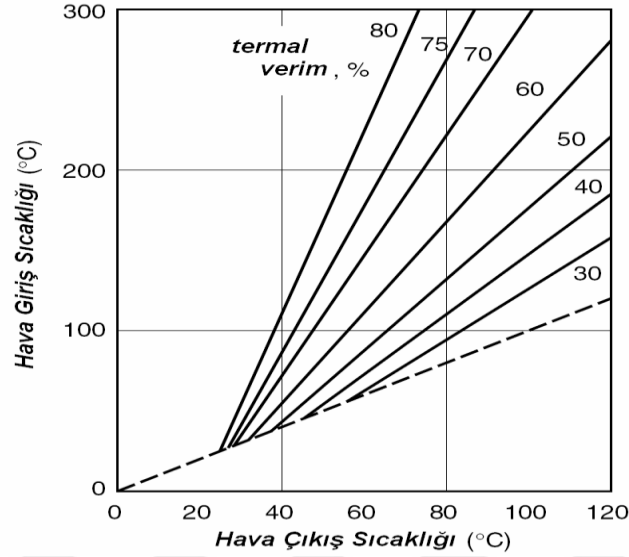
şeklindedir. Eğer kurutma operasyonu adyabatik şartlarda gerçekleşiyorsa, net ısı kaybı ihmal edilebilir ve ısı verim Denklem 1.31'den hesaplanır.

$$\eta = \left[\frac{(T_{hava,g} - T_{hava,\zeta})}{(T_{hava,g} - T_{\zeta avre})} \right] \times 100 \quad (1.31)$$

Diğer endüstriyel kurutucular gibi püskürtmeli kurutucular da büyük miktarlarda enerji tüketirler. Buharlaşan su tonu başına yaklaşık olarak 3-20 GJ [163] enerji tüketimi olur ve genellikle bu enerji de verimsiz bir şekilde kullanılır [164]. Kurutucuların kapasitesinin azalması ile püskürtmeli kurutucuların ısı verimliliği de azalmaktadır. Kapasitesi 1 t/h'ten

daha az olan püskürtmeli kurutucular nem kütlesinin buharlaştırılmasında yaklaşık olarak 4-5 kat daha fazla enerji tüketirler [163].

Kurutma havası giriş ve çıkış sıcaklığına göre termal verim değişimi grafiksel olarak Şekil 1.18’de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre termal verim değişimi

Kurutucu veriminin, hava giriş ve çıkış sıcaklığı farkı ile doğru orantılı olması, giriş sıcaklığının maksimum, çıkış sıcaklığının ise minimum olduğu durumda maksimum verimin elde edilebileceğini göstermektedir. Ancak bu şartların sağlanmasında bazı kısıtlamalar ön plana çıkmaktadır. Giriş hava sıcaklığının yüksek olması pek çok ürünün yapısına ciddi zararlar verdiği gibi düşük çıkış sıcaklığı ise ürünün içerdiği nem miktarının artmasına sebep olmaktadır. Diğer yünden, ısı girişinin azaltılması da ayrıca termal verimi artıran diğer bir unsurdur. Isı tüketimi buharlaşma hızıyla doğru orantılıdır ve besleme çözeltisinin konsantrasyonuna bağlıdır. Besleme çözeltisinde katı konsantrasyonunu %10-25 seviyesinde artırmak verilen aynı buharlaşma hızında ısı tüketimini %67 oranında azaltmaktadır [137].

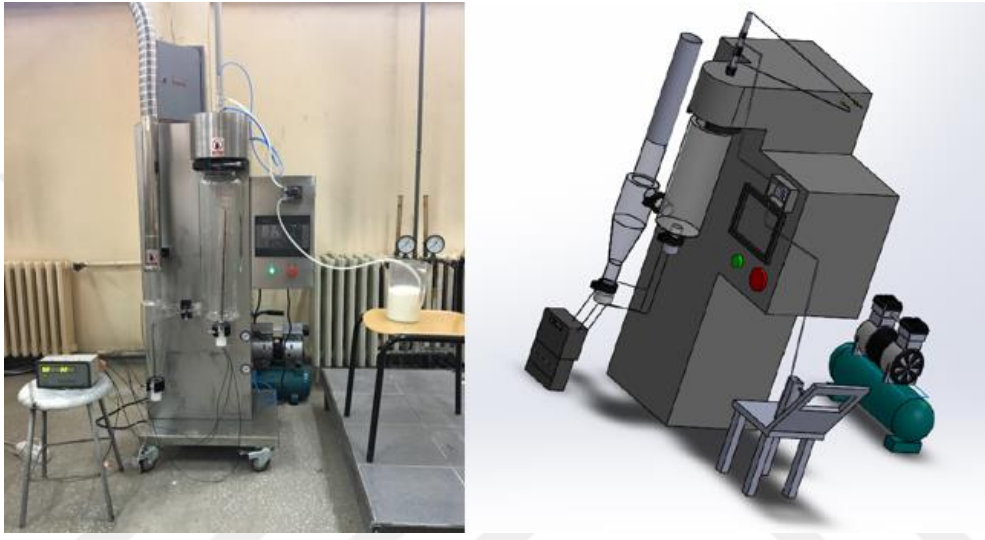
Isıl olarak verimli bir püskürtmeli kurutma işlemi, yakıt tüketimini azaltarak ve daha çevre dostu hale gelerek işletme maliyetini azaltabilir. Isıl verim, çevreye olan ısı kayıplarını en aza indirerek geliştirilebilir. Kurutma gazının sıcaklığının artırılması ve kurutucunun mümkün olan en düşük egzoz gazı sıcaklığında çalıştırılması ile püskürtmeli kurutucuların ısıl verimliliği arttırılabilir. Fakat bu işlem için kurutma işleminin daha yüksek bir besleme hızında çalıştırılması gerekir. Bu da kuru tozların duvarda daha fazla birikmesine yol

açabilir. Ayrıca daha yüksek giriş hava sıcaklıkları üründe ısı bozulmalarına neden olabilir ve kurutucudan olan ısı kaybını artırabilir [93].

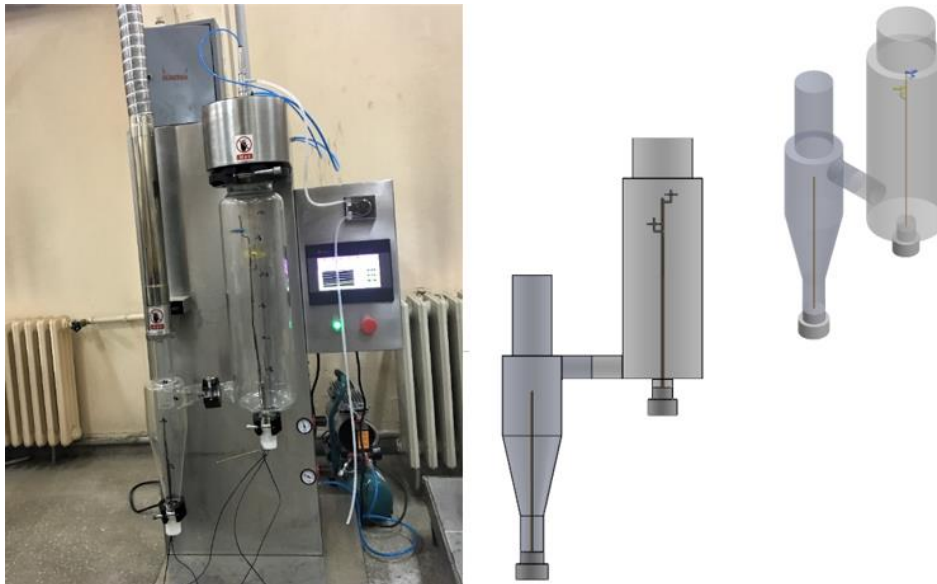


2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada deneysel çalışma amacıyla standart ve geliştirilmiş püskürtmeli tip kurutucu sistemi tasarlanmıştır. Standart tip püskürtmeli kurutucunun teknik resmi ve şematik resmi Şekil 2.1’de verilmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli tip kurutucunun deney düzeneği ise Şekil 2.2’de verilmiştir. Deneyler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı Tekniği laboratuvarında yapılmıştır.

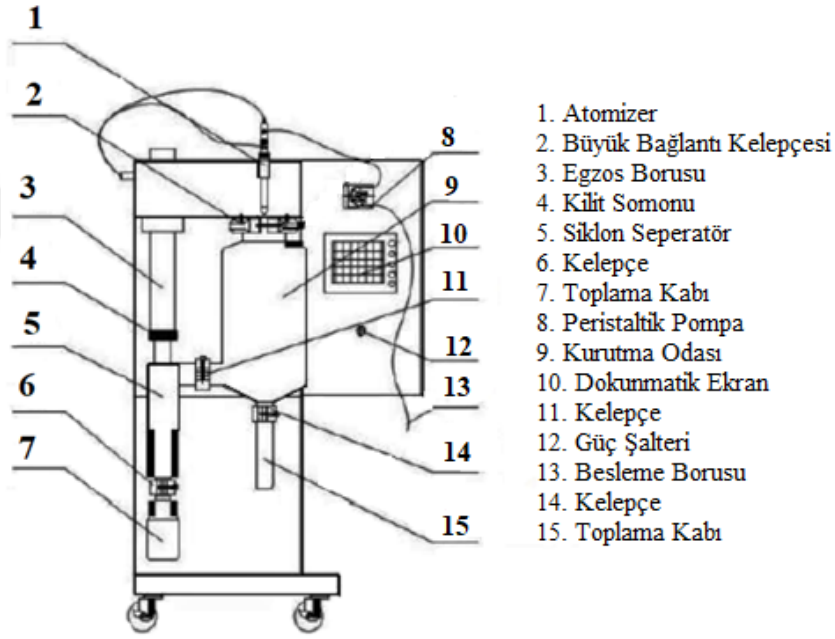


Şekil 2.1. Standart püskürtmeli kurutucunun a) Şematik resmi, b) Teknik resmi



Şekil 2.2. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun a) Şematik resmi, b) Teknik resmi

Deney düzeneğinde bulunan elemanlar hava kompresörü, fan, elektrik odası, kurutma odası, ürün odası, atomizer, nozul, atomizere beslemeyi sağlayan silika jel boru ve sistemden hava sızmasını önleyerek odaları birleştirmek için kullanılan ara kelepçelerden oluşmaktadır (Şekil 2.3). Püskürtmeli kurutucu tasarımı için maksimum besleme debisi 2 lt/h olarak seçilmiştir. Kurutma odası dış çapı 160 mm ve toplam uzunluğu 600 mm'dir. Kurutma odasının içerisine püskürtme işlemini yapmak için iki akışlı basınçlı (a two fluid pressure nozzle) nozul atomizeri yerleştirilmiştir (Şekil 2.4).

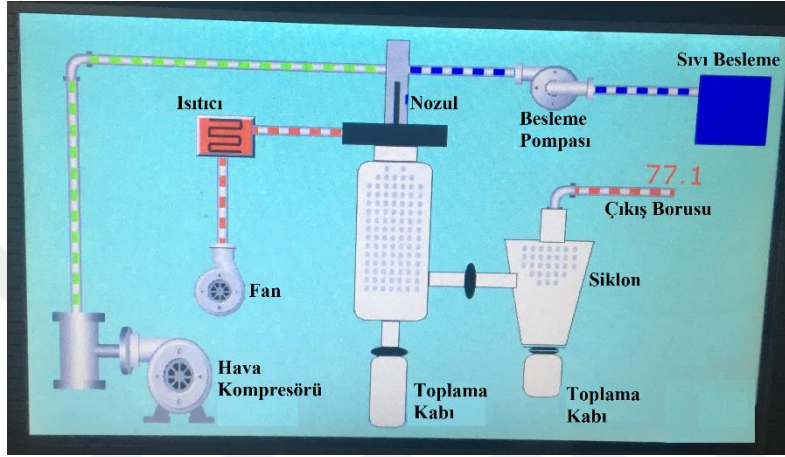


Şekil 2.3. Deney cihazının teknik resmi



Şekil 2.4. İki akışlı basınçlı sprej nozul atomizer

Deney setinin çalışma prensibi Şekil 2.5'te verilmiş olup öncelikle deney için fan ve kompresör çalıştırılmaktadır. Daha sonra deneyin yapılacağı giriş sıcaklığı ayarlanmakta ve hava ısıtıcısı açılmaktadır. Cihazın ayarlanan giriş sıcaklığına kadar ısınması beklenmektedir. Cihazdaki hava sıcaklığı ayarlanan giriş sıcaklığına gelince deney başlatılmaktadır. Nozula bağlı olan besleme borusunun hortumu ölçekli kaptaki bulunduran sıvı ürüne daldırılmaktadır. Besleme pompası ve nozul açılmakta ve ölçümler alınmaya başlanmaktadır.



Şekil 2.5. Sistemin çalışma şekli

Püskürtmeli kurutucuda kompresör 60-90 psi aralığında çalışmaktadır. Kurutma işlemi boyunca kompresör, hava basıncını 60 psi'a kadar çıkartıp bu basınçta sabit tutmuştur.

Püskürtmeli kurutmada verimi arttırmak, cam sıcaklıklarını düşürmek, kurutma odası içerisinde homojen karışımı sağlamak ve ürünün birbirlerine ve cama yapışmasını engellemek için kurutma odasına pervaneler yerleştirilerek yeni tip püskürtmeli kurutma sistemi geliştirilmiştir (Şekil 2.2).

Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda, kurutma odasına başlangıçta bir adet, sonra eşit aralıklarla iki adet ve daha sonra üç adet pervane yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Pervaneler sıcaklığa dayanıklı plastik malzemeden yapılmış olup, 3 kanatlı ve 6 cm çapındadır (Şekil 2.6). Pervanelerin dönmesi nozul çıkışındaki hava ile doğrudan sağlanmıştır. Kullanılan nozul çapına göre kurutma odası içerisindeki hava hızları şu şekildedir: 0.5 mm nozul kullanıldığında nozula uzaklığı 15 cm olan T_3 noktasındaki hava hızı ortalama 2.75 m/s, 30 cm olan T_2 noktasındaki hava hızı 1.39 m/s ve 45 cm olan T_1 noktasındaki hava hızı ise 0.64 m/s olarak ölçülmüştür. 1.5 mm nozul kullanıldığında T_3 noktasındaki hava hızı ortalama 1.83 m/s, T_2 noktasındaki hava hızı 1.79 m/s ve T_1

noktasındaki hava hızı ise 0.83 m/s olarak ölçülmüştür. 2.5 mm nozul kullanıldığında T_3 noktasındaki hava hızı ortalama 1.76 m/s, T_2 noktasındaki hava hızı 0.72 m/s ve T_1 noktasındaki hava hızı ise 0.63 m/s olarak ölçülmüştür. Yapılan denemeler neticesinde en verimli dönmenin sağlandığı açı olarak yatay ve birbirlerine çapraz gelecek şekilde 5 cm aralıkla iki adet pervane yerleştirilmiştir. Birinci pervane, kurutma odasının sol tarafına doğru en üst noktadan 13 cm aşağıya yatay olarak yerleştirilmiştir. İkinci pervane ise birinci pervane ile çapraz gelecek şekilde kurutma odasının sağ tarafına, odanın en üst noktasından 18 cm aşağıya yerleştirilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasına yerleştirilen pervaneler

Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun teknik parametreleri aşağıda verildiği gibidir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Cihazın teknik parametreleri

Maksimum Kapasite	1500-2000 ml/h
Giriş Hava Sıcaklık Aralığı	40-300 °C
Çıkış Hava Sıcaklık Aralığı	40-140 °C
Sıcaklık Hassasiyeti	±1 °C
Kurutma Zamanı	1.0-1.5s
Püskürtme Pompasının Debisi	50-2000 ml/h
Püskürtme Yönü	Aşağı Doğru Eş-Akımlı
Isıtıcı (fan) Gücü	3 kW 220 V
Net Ağırlığı	110 kg

2.1. Deneylerde Yapılan Ölçümler ve Kullanılan Ölçme Aletleri

2.1.1. Sıcaklık Ölçümleri

Deneyisel çalışmalarda kurutma odası, ürün odası, çevre havası ve egzoz sıcaklık ölçümleri için 32 kanal girişi olan IEC 668 normlarına uygun, giriş ve çıkışların programlanabildiği, Elimko E-680 serisi dijital termometre kullanılmıştır (Şekil 2.7). Cihazın çalışma ortam sıcaklıkları 0-55 °C aralığındadır. Sıcaklık ölçümleri için demir konstantan termokupl (J Tipi) kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Sıcaklık ölçüm cihazı

2.1.2. Çıkış Hava Neminin Ölçümü

Kurutma cihazının çıkış hava sıcaklığı ve neminin ölçümleri ‘LYK BGM1361 Probu Sıcaklık ve Nem Ölçer’ ile yapılmıştır (Şekil 2.8). Cihazın ölçüm yaptığı nem birimi %RH, sıcaklık birimi °C’dir. Cihazdaki hassas prob ‘-10 ile 50 °C’ sıcaklık aralığında ölçüm yapabilmektedir. Daha yüksek sıcaklık ölçümleri için cihazın yanında K tipi prob bulunmaktadır. K tipi prob ile ‘-50 ile +400 °C’ye kadar sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir.



Şekil 2.8. Nem ölçüm cihazı

2.1.3. Çıkış Hava Hızının Ölçümü

Kurutma cihazının çıkış hava hızını ölçmek için ‘CEM DT-8880 Teleskobik Probu Kızgın Tel Hava Hızı ve Sıcaklık Ölçer’ kullanılmıştır (Şekil 2.9). Cihazın ölçme yaptığı hız birimi m/s’dir. Hava hızı ölçüm aralığı 0.1-25.0 m/s’dir. Cihaz ‘±5%+1d’ okuma veya ‘±1%+1d’ tam ölçek hassasiyetine sahiptir.



Şekil 2.9. Hava hızı ölçüm cihazı

2.1.4. Kurutma ve Ürün Odası Cam Sıcaklıklarının Ölçümü

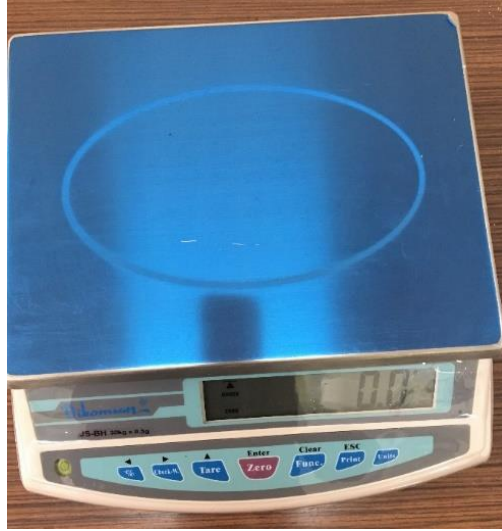
Kurutma ve ürün odasının cam duvarlarının sıcaklığı belirlenen noktalardan ‘E-SUN Non-Contact Infrared Thermometer’ marka lazer termometre ile ölçülmüştür (Şekil 2.10). Cihazın ölçüm yaptığı sıcaklık birimi °C’dir. Cihazın sıcaklık ölçüm aralığı -20-320 °C’dir. Cihaz +/- 2 °C hassasiyete sahiptir.



Şekil 2.10. Lazer termometre

2.1.5. Hassas Terazi

Deneyde kurutulacak sıvı ürünlerin ve elde edilen toz ürünlerin tartımı için ‘Dikomsan JS-30BM’ marka hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 2.11). Cihaz dört farklı ağırlık birimine sahiptir. +/- 1 g hassasiyete ve 300x230mm ölçülerine sahiptir. Çalışma ortamı 0-40 °C ve RH ≤ %85 arasındadır. Güç kaynağı, akü: 6V/4Ah- 9V 700 mA AC/DC adaptördür.



Şekil 2.11. Hassas tartı

2.1.6. Toz Ürünün Nem Tayin Cihazı

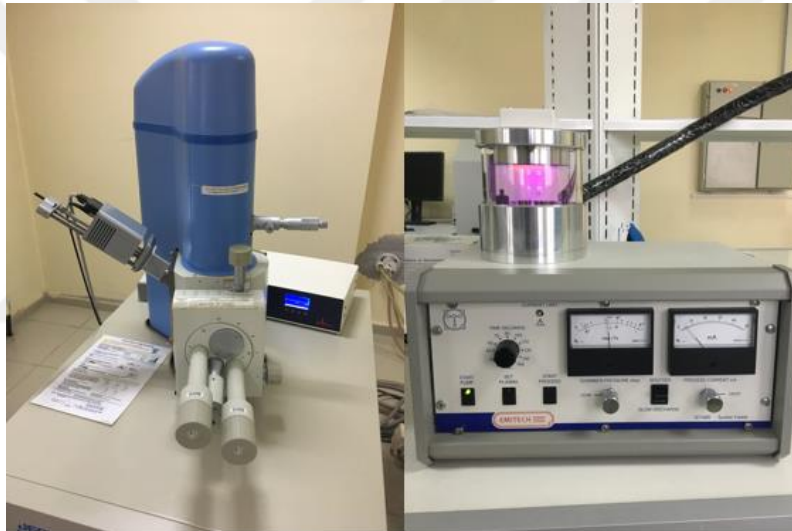
Elde edilen toz ürünün nem tayini, ‘Denver Instrument IR-60 Moisture Analyzer’ cihazı ile yapılmıştır. Nem cihazının gücü 115V ve maksimum ölçüm kapasitesi 60 g’dır. Cihazın ısıtıcı tipi infrared (kızılötesi) ışıdır. Cihazın hassasiyeti $\pm 0,001$ (g)’dir. Nem cihazına numuneler bırakılarak ve infrared ışınlarla $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar ısıtılarak nem miktarı %M (moisture) cinsinden elde edilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Nem tayin cihazı

2.1.7. Parçacık Morfolojisi, Boyutları ve SEM Görüntüleri

Deneylerde elde edilen toz ürünlerin morfolojisi ve parçacık boyutlarının tespiti için ‘JSM-6510 Series Scanning Electron Microscope (SEM)’ cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.13). Tozların farklı büyüklükte ve birçok açıdan görüntüleri alınarak analizleri yapılmıştır. Analiz için öncelikle tozlar numune tutuculara yerleştirilerek numune tutucular karbon bantla kaplanmıştır. Bantların üzerine analizi yapılacak tozlar yapıştırılmıştır. Karbon bantlara yapışan tozlar kaplama cihazına bırakılarak, kaplama cihazında SEM için gerekli olan kaplama yapılmıştır. Tozlar, altın paladyum ile kaplanarak SEM cihazına bırakılmıştır. SEM’de 5kV’da 1000x, 1500x 2000x, 2500x, 3000x, 4000x, 5000x ve 10000x büyütürük tozların morfolojik yapısı ve taneciklerin çapları görüntülenmiştir.



Şekil 2.13. Scanning electron microscopy (SEM) ve tozların altın paladyum kaplama cihazı

2.2. Deneylerin Yapılışı

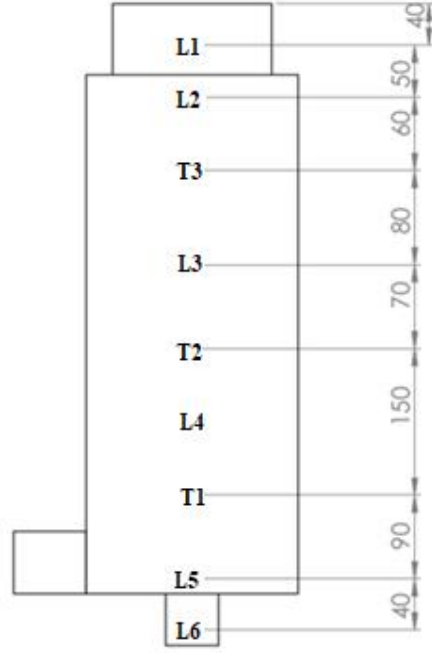
Standart ve geliştirilmiş tip püskürtmeli kurutucuda süt ve farklı tür sebze ve meyve sularının kurutulması gerçekleştirilmiştir. Deneyler, yardımcı madde kullanılmadan ve yardımcı maddeli olarak standart ve geliştirilmiş kurutucuda yapılmıştır. Bu amaçla bütün deneylerde besleme ürünleri 1000 ml sabit miktar olarak hazırlanmış ve kullanılmıştır. Deneylerde ürün besleme kabı olarak, darası 244.5 gram olan ölçülü kap kullanılmıştır. İlk deneyde ölçülü kaba 1000 ml süt bırakılmıştır. Yapılan tartımda sütün 982.5 gram ağırlıkta olduğu görülmüştür. Yani sütün yoğunluğu Elazığ şartlarında, $\rho = m/V = 982.5\text{gr}/1000\text{ ml} = 0.9825\text{ gr/ml} = 0.9825\text{ kg/l}$ olarak elde edilmiştir.

Kurutma sistemine bağlanılan kompresör basıncı 60 psi’da sabit tutacak şekilde ayarlanmıştır. Sistemin çalışması sürecinde kurutucudaki hava akış debisi 60 m³/h, besleme sıvısı akış debisi 5 mL/dak, besleme aralığı 5 s ve nozul hava akışı 700 l/h olarak ayarlanmıştır. Bütün çalışma boyunca bu parametreler sabit tutulmuştur.

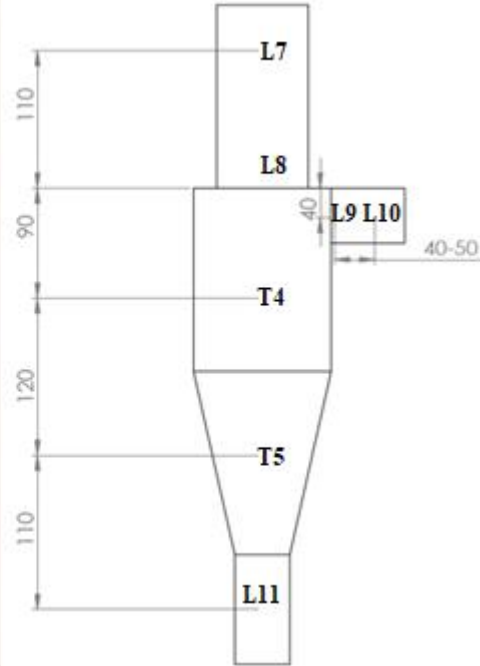
Kurutma ünitesinde bulunan kurutma odası ve ürün odasının belirli noktalarından ölçümler alınmıştır. Ölçümlerde odaların içerisindeki hava sıcaklıkları ve cam duvarların sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Kurutma odası ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıkları ince metal bir çubuk yerleştirilerek belirli noktalarda sabitlenen termokupllarla termometreye bağlanarak okunmuştur (Şekil 2.14). Kurutma odası, 16 cm çapında ve 60 cm uzunluğunda silindirik bir hazneden oluşmaktadır. Kurutma odası için, odanın en üst noktası başlangıç noktası kabul edilerek 15’er cm aralıklarla ölçüm noktaları belirlenerek termokupllar yerleştirilmiştir. En üst noktadan itibaren 15. cm’de T₃, 30. cm’de T₂ ve 45. cm’de T₁ hava sıcaklıkları ölçülmüştür (Şekil 2.15). Aynı şekilde ürün odasının içerisindeki hava sıcaklıkları için, odanın egzoz borusuna bağlanan kısmı en üst nokta kabul edilerek odanın içerisinde noktalar belirlenmiş ve termokupllar takılmıştır. En üst noktadan itibaren 20. cm’ye T₄ ve 32. cm’ye T₅ hava sıcaklığı için termokupl yerleştirilerek ölçümler alınmıştır (Şekil 2.16). Odaların cam duvarlarının üzerindeki sıcaklıkların ölçüldüğü noktalar L1-L11 aşağıdaki şekildeki gibi belirlenmiştir. Cam duvarın üzerindeki sıcaklıklar ise lazer termometre ile belirlenen noktalardan ölçülmüştür.



Şekil 2.14. (a) Kurutma odası içerisindeki, (b) Ürün odası içerisindeki sıcaklıkların ölçüm düzeneği



Şekil 2.15. Kurutma odası içerisindeki hava ve cam sıcaklıklarının ölçüm noktaları

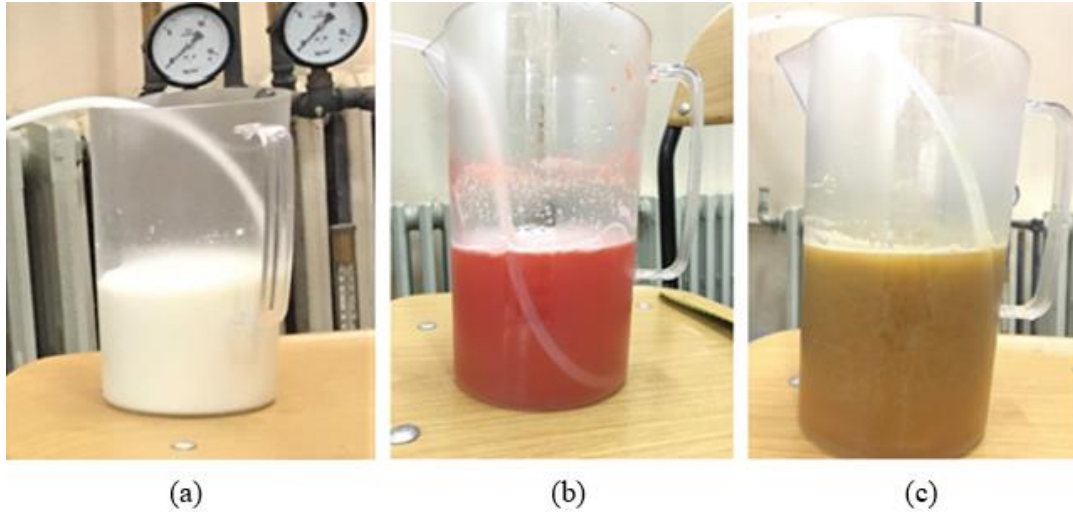


Şekil 2.16. Ürün odası içerisindeki hava ve cam sıcaklıklarının ölçüm noktaları

Standart ve geliştirilmiş kurutucularda deney için 0.5 mm; 1.5mm ve 2.5 mm olmak üzere 3 farklı nozul çapı ve 140 °C, 170 °C ve 200 °C olmak üzere 3 farklı giriş hava sıcaklığı kullanılarak 9 deney yapılmıştır. Farklı parametreler altında kurutma sisteminin ve elde

edilen tozların çeşitli özellikleri analiz edilmiştir. Bu amaçla deney bitiminde elde edilen her bir tozdan analiz yapmak üzere ayrı ayrı numuneler alınmıştır.

Yukarıda belirtilen parametreler altında her iki kurutucuda da doğal süt kurutulmuş ve aynı şekilde domates suyu ve yeşil elma suyu kurutulmuştur. Domates suyu ve yeşil elma suyu için taze domatesler ve ‘Granny Smith’ adı verilen elmalar kullanılmıştır. Bunlar ‘Arçelik K 1579’ marka katı meyve sıkacağında sıkılarak membran filtreden geçirilmiştir (Şekil 2.17). Elde edilen sıvı ürünlerden püskürtmeli kurutucu yardımıyla süt tozu, domates tozu ve yeşil elma tozu elde edilmiştir.



Şekil 2.17. Deneylerde kullanılan ürünler; (a) Doğal süt, (b) Sıkılmış saf domates suyu, (c) Sıkılmış saf yeşil elma suyu

2.3. Ölçülen Değerlerin Hata Analizi

Genellikle dikkatsizlik, tecrübesizlik, ölçüm cihazlarının yanlış seçimi ve değerlerin okunmasından kaynaklanan deneysel hatalar bulunmaktadır. Yapılan deneylerin hata analizleri aşağıdaki gibi verilmiştir:

- a) Termokupl çiftlerinden kaynaklanan hata = ± 0.1 °C
- b) Bağlantı elemanları ve noktalardan kaynaklanan hata = ± 0.1 °C
- c) Kurutma ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.1 °C
- d) Kurutma ve ürün odasının cam yüzey sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.1 °C

- e) Egzoz çıkışındaki sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.1 °C
- f) Çıkış hava hızının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.1 m/s
- g) Çıkış hava neminin ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.1 RH
- h) Çevre sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.1 °C
- i) Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin okunmasında yapılabilecek hata = ± 0.05 s
- j) Periyodik olarak hava hızı değerlerinin okunmasında yapılabilecek hata = ± 0.05 s
- k) Periyodik olarak hava neminin değerlerinin okunmasında yapılabilecek hata = ± 0.05 dakika
- l) Sistem kaçaklarıyla ilgili belirsizlik = ± 0.5
- m) Termometrenin hassasiyeti = $\pm \%0.5$
- n) Anemometrenin hassasiyeti = $\pm \%1$
- o) Nem ölçerin hassasiyeti = $\pm \%0.5$
- p) Hassas terazinin hassasiyeti = ± 0.01 g
- q) Tozların nem ölçümünde yapılabilecek ortalama hata = ± 0.001 %M

Herhangi bir parametredeki toplam hatanın belirlenmesi için sabit hataların, imalat hatalarının ve rastgele hataların dikkate alınmasıyla toplam hata değeri;

$$W_{th} = [(x_1)^2 + (x_2)^2 + ...(x_n)^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

denklemini ile hesaplanabilir [165].

Sıcaklık ölçümünde yapılabilecek toplam hata (W_s) = ± 0.245 °C

Hava neminin ölçümünde yapılabilecek ortalama hata (W_{rh}) = ± 0.005 RH

Hava hızı ölçümünde yapılabilecek ortalama hata (W_h) = ± 0.05 m/s

Hassas terazide yapılabilecek ortalama hata (W_t) = ± 0.1 g

Tozun içerdiği nem ölçümünde yapılabilecek ortalama hata (W_n) = ± 0.0316 %M

3. BULGULAR

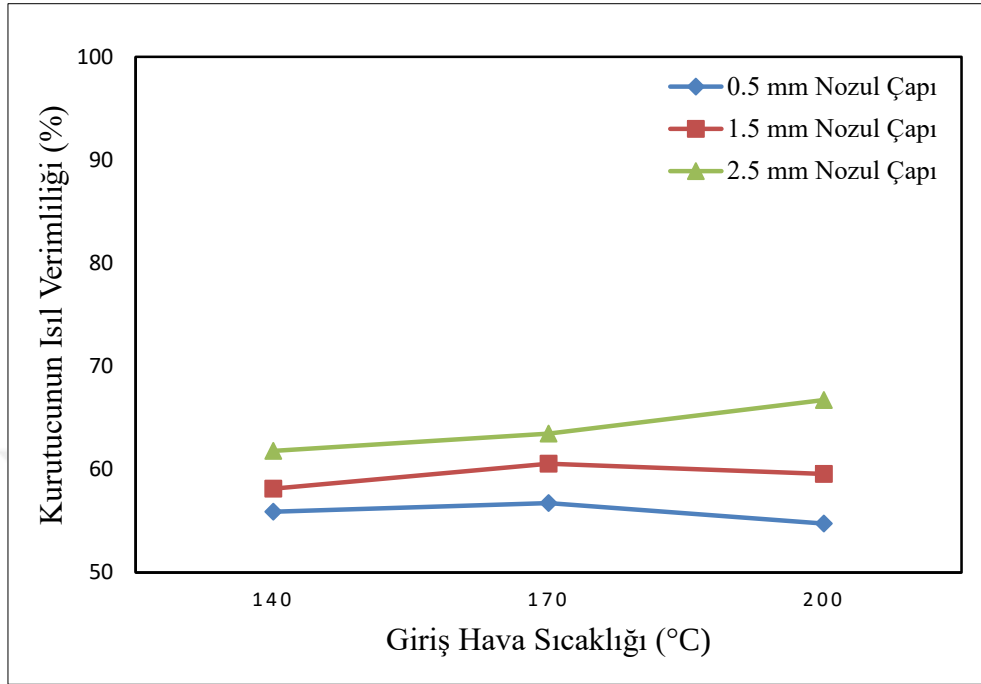
3.1. Püskürtmeli Kurutucunun Isıl Verimliliği

Püskürtmeli kurutucuların ısı verimliliği, aşağıdaki denklemde verildiği gibi kurutmaya harcanan ısıнын toplam ısı oranı olarak ifade edilmektedir [93]. Dış ortam şartları her deney için aynı olduğundan dışarıya olan ısı kaybı miktarı aynı kabul edilerek, sistemin adyabatik olduğu kabulüyle ısı verim aşağıdaki şekilde belirlenmiştir. Buna göre ısı verimlilik (η), giriş ($T_{hava,g}$) ve çıkış hava sıcaklıkları ($T_{hava,\phi}$) arasındaki farkın giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$) ve çevre sıcaklığı ($T_{\phi evre}$) arasındaki farka oranı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\eta = \frac{T_{hava,g} - T_{hava,\phi}}{T_{hava,g} - T_{\phi evre}} \times 100 \quad (3.1)$$

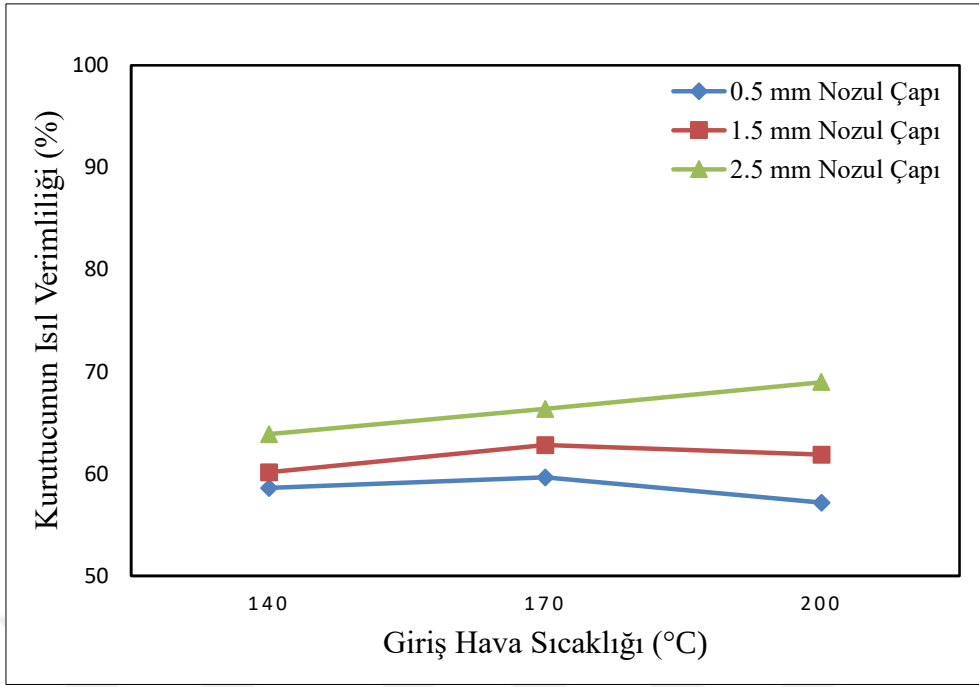
Süt, domates suyu ve elma suyu deneyleri için standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği hesaplanmıştır. Bütün deneylerde oda sıcaklığı yaklaşık olarak 23 °C civarındadır. Ayrıca kullanılan ürünlerin sıcaklığı ortalama olarak 18 °C civarındadır. Tüm sıvılar için diğer parametreler sabit tutularak 3 farklı giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$: 140 °C, 170 °C ve 200 °C) ve nozul çapı (0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm) değiştirilerek deney yapılmıştır. Deneyisel çalışma yapılan sıvılar için ortalama ısı verimliliklerin çok yakın olduğu görülmüş ve bu nedenle aşağıdaki şekilde sistemde süt kurutulması durumunda farklı çalışma şartları altında kurutucunun ısı verimlilikleri grafiksel olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi standart püskürtmeli kurutucuda giriş hava sıcaklığı 140 °C’de en yüksek ısı verim 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında %61.8; ikinci sırada 1.5 mm nozul çapı ile %58.12 ve üçüncü sırada ise 0.5 mm nozul çapı ile %55.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.1). Giriş hava sıcaklığı 170 °C’de sabit tutulduğu zaman en yüksek ısı verim 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında %63.47 elde edilmiştir. Sırasıyla 1.5 mm nozul çapında ısı verim %60.54 ve 0.5 mm nozul çapında %56.73 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.1). Giriş hava sıcaklığı 200 °C’de sabit tutulduğu zaman en yüksek ısı verim 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında %66.72, 1.5 mm nozul çapında %59.55 ve 0.5 mm nozul çapında %54.75 değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.1). Süt kurutulurken kullanılan parametrelerden standart püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliğinin %66.72 ile en yüksek olduğu durum 2.5 mm nozul çapı ve 200 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında görülmüştür. Bu değeri, 170 °C giriş hava sıcaklığı

kullanıldığında sırasıyla %63.47 ile 2.5 mm nozul çapı ve %61.8 ile 140 °C giriş hava sıcaklığı ve 2.5 mm nozul çapının kullanıldığı çalışma takip etmektedir.



Şekil 3.1. Standart püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği (Süt tozu)

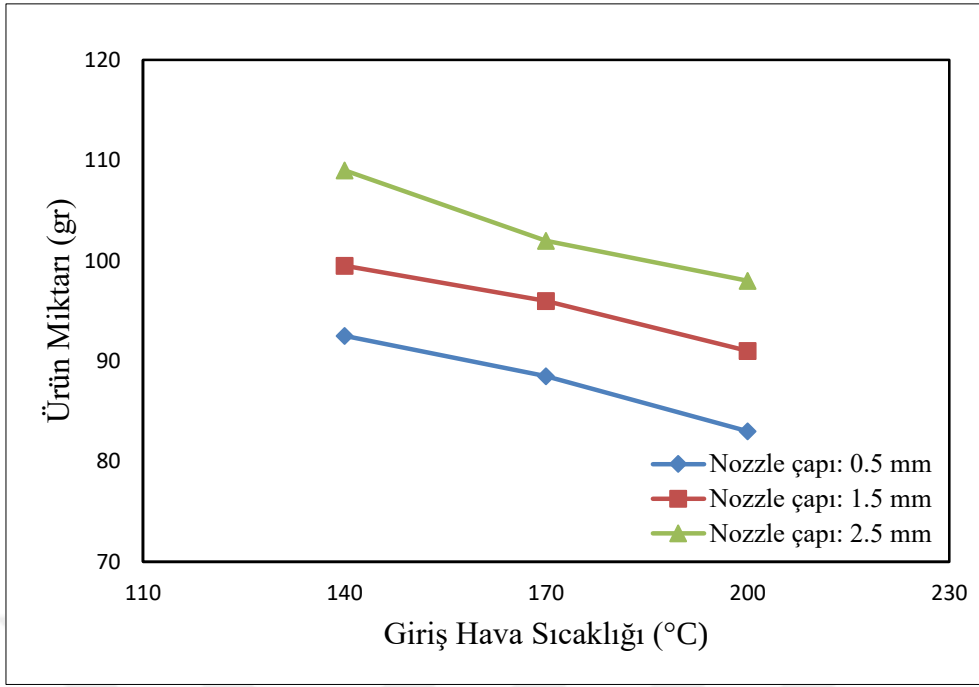
Aynı parametreler kullanılarak, her bir parametre için geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği hesaplanarak Şekil 3.2’de verilmiştir. Giriş hava sıcaklığı 140 °C’de ısı verimleri 0.5 mm; 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çapları için sırasıyla %58.63; %60.17 ve %63.9 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.2). Giriş hava sıcaklığı 170 °C’de sabit tutulduğunda ise 0.5 mm; 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çapları için geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği sırasıyla %59.65; %62.81 ve %66.35 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.2). 200 °C’de sabit tutulan giriş hava sıcaklığında ise 0.5 mm; 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çapları için sırasıyla %57.18; %61.87 ve %68.97 olarak geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği elde edilmiştir (Şekil 3.2). Bu sonuçlardan da anlaşıldığı üzere, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu kullanıldığında en yüksek ısı verim %68.97 ile 2.5 mm nozul çapı ve 200 °C giriş hava sıcaklığının kullanıldığı çalışmada elde edilmiştir. Bu değeri sırasıyla, %66.35 verim ile sonuçlanan 2.5 mm nozul çapı ve 170 °C giriş hava sıcaklığının kullanıldığı çalışma ile %63.9 verim ile 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığının kullanıldığı çalışma takip etmektedir.



Şekil 3.2. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği (Süt tozu)

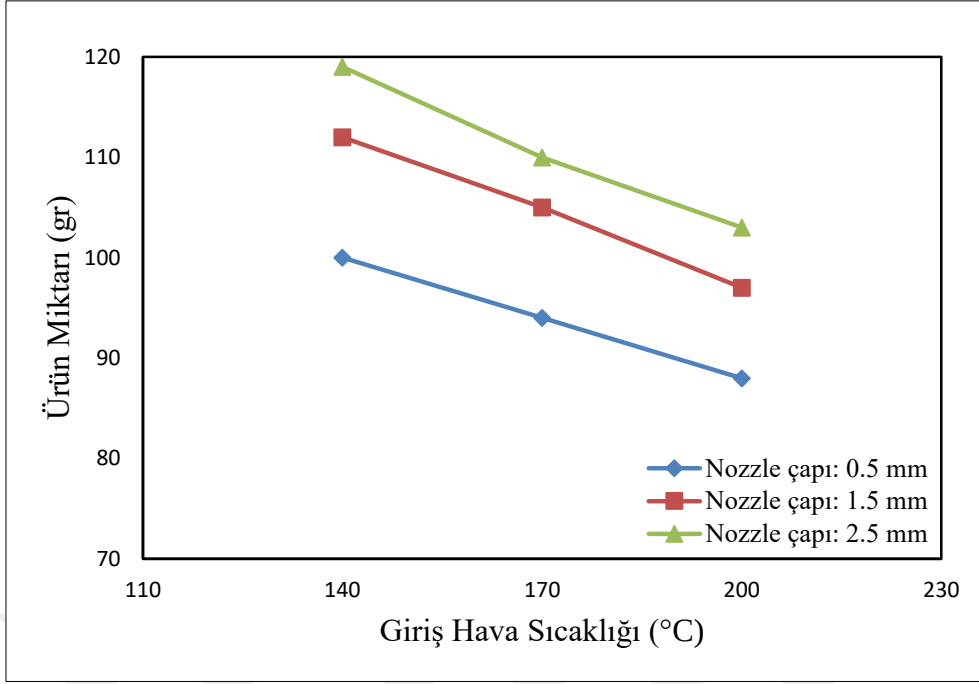
3.2. Değişen Parametrelere Göre Püskürtmeli Kurutucudan Elde Edilen Toz Ürün Miktarları

1 litre sıvı besleme ürünü kullanılarak standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çeşitli parametrelerde elde edilen toz ürün miktarları aşağıda özetlenmiştir (Şekil 3.3-Şekil 3.14). Buna göre, standart püskürtmeli kurutucuda 1 litre süt kullanılarak çeşitli parametrelerde elde edilen süt tozu miktarları Şekil 3.3'te verildiği gibidir. 0.5 mm; 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çapları ve $T_{\text{hava,g}}$: 140 °C; 170 °C ve 200 °C giriş hava sıcaklıkları kullanılarak farklı parametrelerde elde edilen kurutulmuş süt tozu için tartımlar yapılmıştır. Standart püskürtmeli kurutucuda maksimum süt tozu 109 gram olarak 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığında elde edilmiştir. Bu değeri sırasıyla 170 °C giriş hava sıcaklığı ve 2.5 mm nozul çapında 102 gram ile 140 °C sıcaklık ve 1.5 mm nozul çapında 99.5 gram toz ürün takip etmektedir. Bu verilere göre, standart püskürtmeli kurutucuda en fazla elde edilen süt tozu miktarı 109 gram ürün tozunun elde edildiği 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığıdır. Bu değerlere göre elde edilen süt tozu miktarının sıcaklık artışı ile azaldığı, nozul çapının artışı ile arttığı görülmüştür.



Şekil 3.3. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen toz ürün miktarları (Süt tozu)

Geliştirilmiş pervaneli kurutma odasında 1 L süt, standart kurutucu ile aynı nozul çapı ve giriş havası sıcaklığında kurutulmuştur. Bu deney sonucunda aynı parametrelerin kullanıldığı iki farklı püskürtmeli kurutucu sistemi karşılaştırılmıştır. Standart püskürtmeli kurutucuda en fazla 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş havası sıcaklığında 109 gram süt tozu elde edilirken, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda aynı parametrede 119 gram ürün elde edilmiştir. Hem elde edilen toz miktarı bakımından hem de tozun özellikleri ve kurutma işleminin verimi bakımından geliştirilmiş kurutucunun daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, toz miktarının sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığı, nozul çapı artışına bağlı olarak arttığı görülmüştür (Şekil 3.4). Geliştirilmiş kurutma sisteminde, kurutma işlemi sırasında partiküllerin kurutma ve ürün odası camlarına daha az yapıştığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.5 - Şekil 3.6). Püskürtülen sıvı beslemenin havanın akış yönünde dönerek kuruyup toz haline geldiği görülmüştür. Geliştirilmiş kurutma sisteminde, kurutma sırasında toz partiküllerinin birbirlerine daha az yapıştığı ve elde edilen tozların daha pürüzsüz olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda sistemlerin temizlenmesi işleminde, pervaneli kurutma sisteminin temizlenmesi cama yapışma azaldığından dolayı çok daha kolay olmuştur.



Şekil 3.4. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen toz ürün miktarları (Süt tozu)

Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma sırasında kurutma odası ve ürün odasındaki cam duvarlara yapışmanın geliştirilmiş kurutma odasına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, süt ürününde fazla yapışma olmadığından taşıyıcı kullanılmamıştır. Aşağıdaki şekillerde standart ve geliştirilmiş kurutma ve ürün odasındaki ürün yapışması durumu süt için verilmiştir.



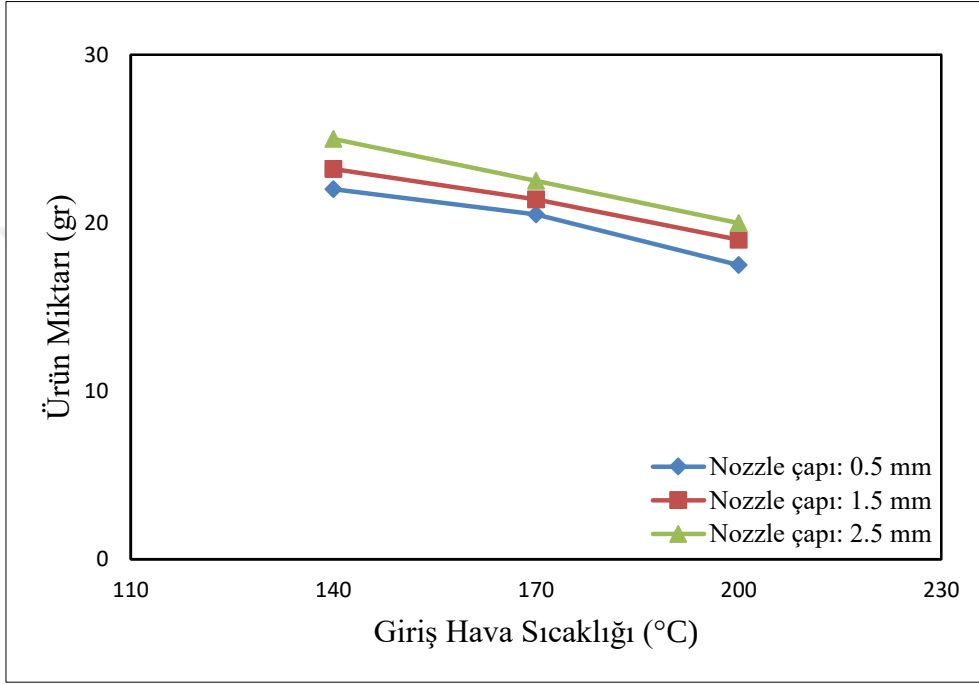
Şekil 3.5. Standart püskürtmeli kurutucudaki kurutma ve ürün odası duvarları



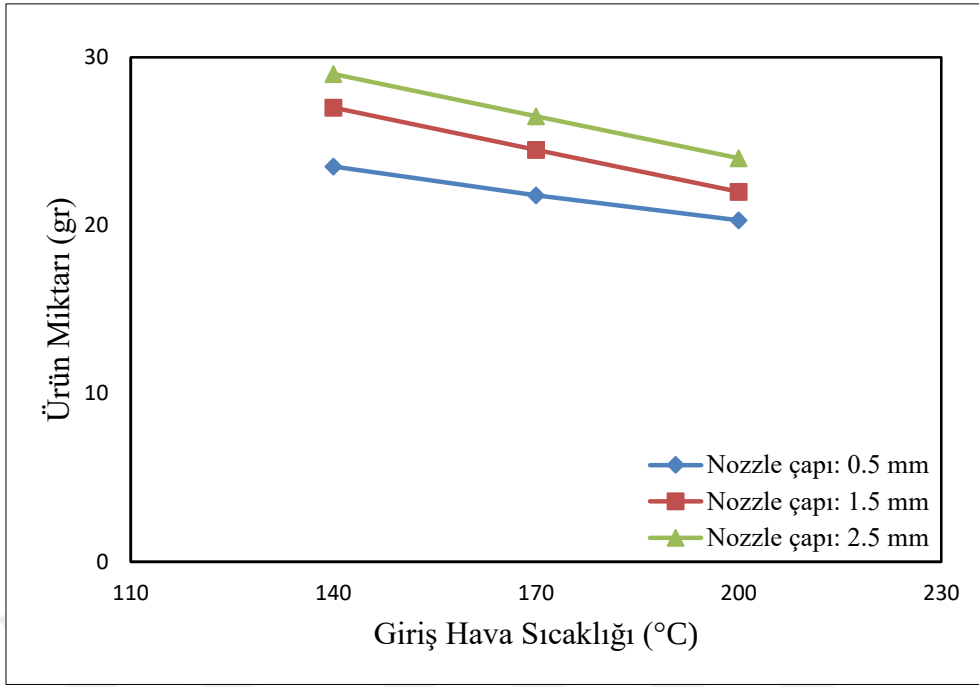
Şekil 3.6. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucudaki kurutma ve ürün odası duvarları

Domates suyu tozu elde etmek için; giriş hava sıcaklığı 140 °C, 170 °C ve 200 °C’de sabit tutulup, 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm’de farklı nozul çapları kullanılmıştır. Değişen

nozül çapına ve giriş hava sıcaklığına göre taşıyıcı kullanılmadan toz ürün elde edilememiştir. Ancak standart ve geliştirilmiş kurutucuda duvarlara yapışmış olan kuru ürünün miktarındaki değişimi farklı parametrelere göre aşağıdaki Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmiştir. 1L domates suyundan maltodekstrin kullanılmadan maksimum toz kütlesi 2.5 mm nozül çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığında standart püskürtmeli kurutucuda 25 gram iken geliştirilmiş kurutucuda 29 gram olarak tartılmıştır.



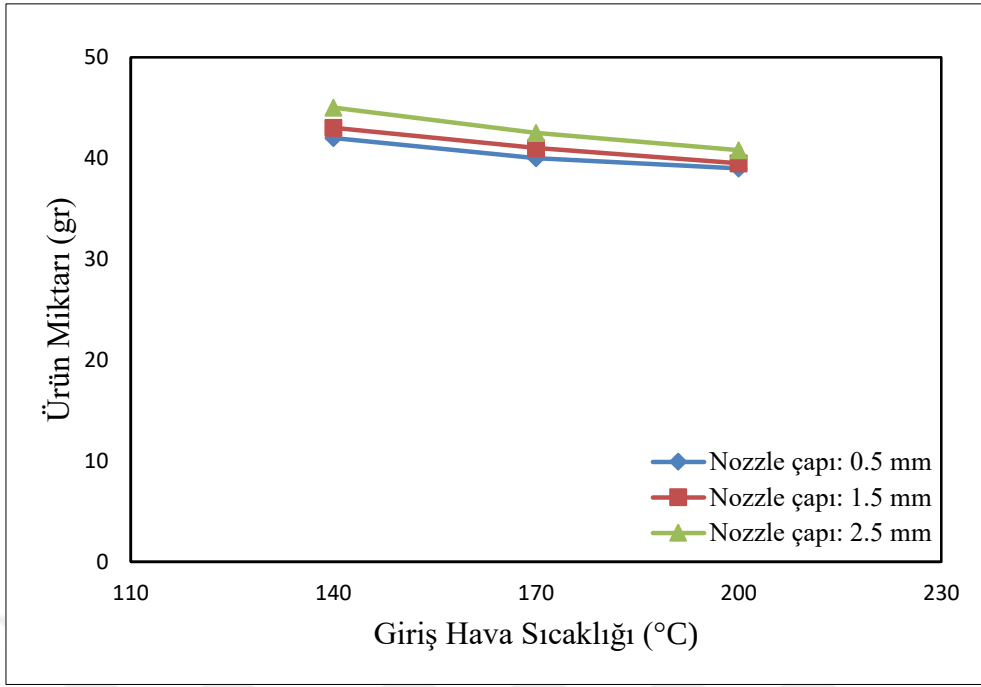
Şekil 3.7. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu)



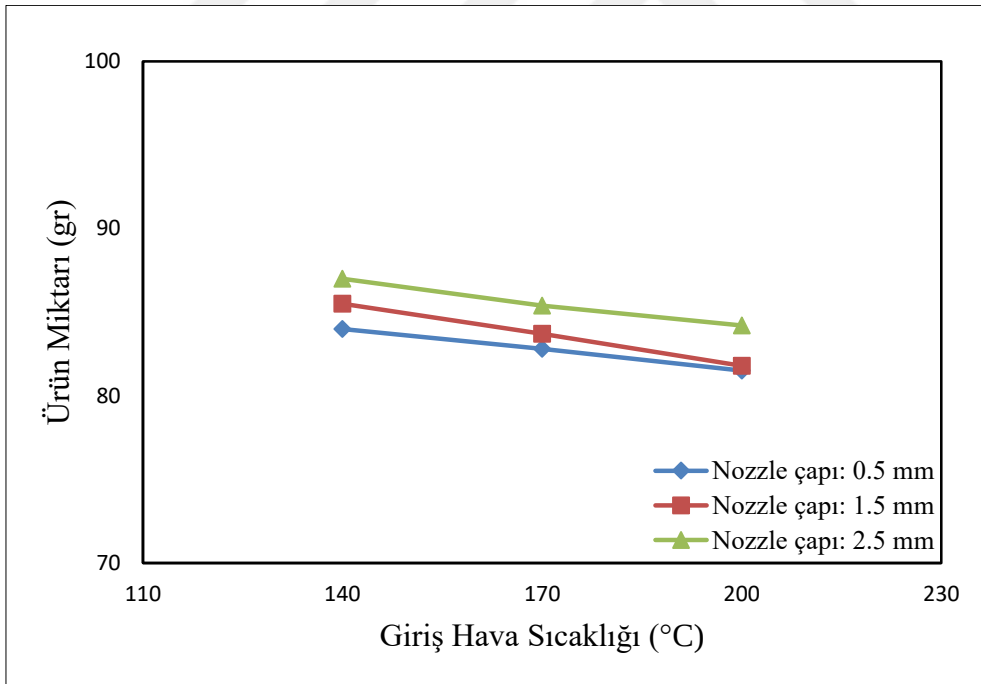
Şekil 3.8. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu)

Domates tozu elde edilirken cam yüzeyinde yapışmalar olmuş ve istenilen verimde toz elde edilememiştir. Bu nedenle standart ve geliştirilmiş kurutma sisteminde domates suyunun kurutulmasında taşıyıcı olarak maltodekstrin kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda aynı parametreler kullanılarak %25 maltodekstrin eklenmiş domates suyu kurutulmuştur. Elde edilen kuru ürün miktarındaki değişim Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da verilmiştir. Her iki tip kurutucuda da en yüksek miktarda domates tozlarının 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş sıcaklığı kullanıldığında elde edildiği görülmüştür. 1L domates suyundan bu parametrelerde standart püskürtmeli kurutucuda 45 gram domates tozu elde edilirken geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 87 gram domates tozu elde edilmiştir. Bu verilerden anlaşıldığı üzere domates suyu için elde edilen miktar bakımından en verimli kurutucu tipinin geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu olduğu belirlenmiştir.



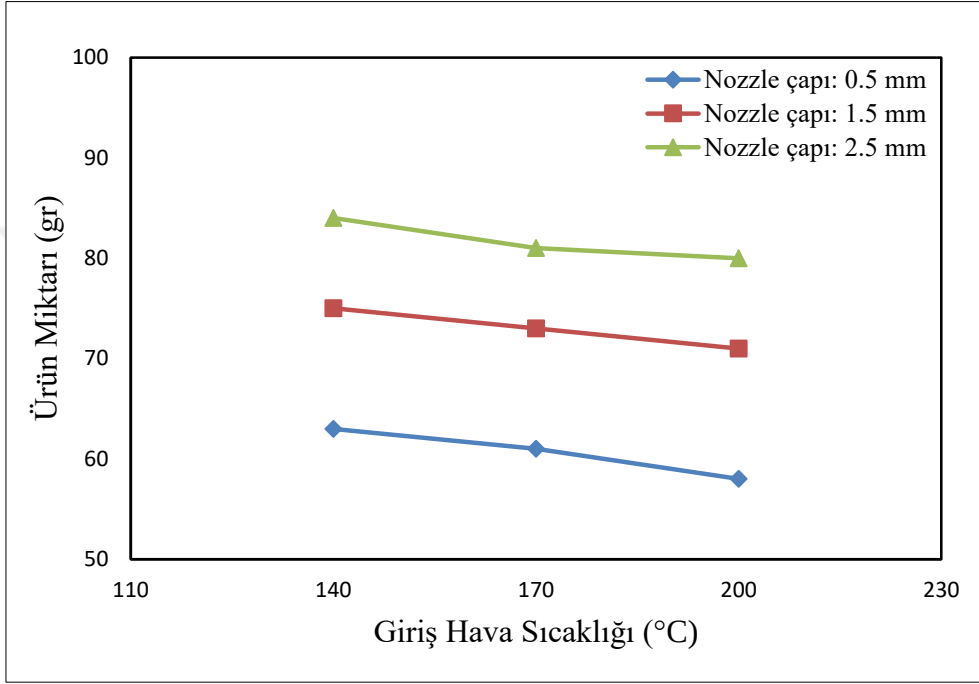
Şekil 3.9. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu)



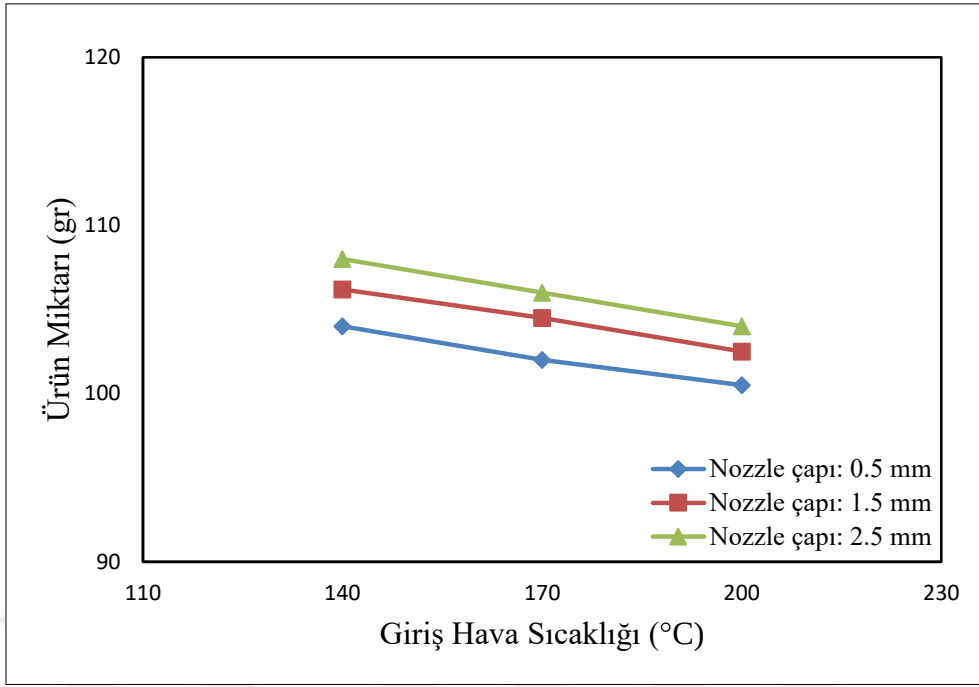
Şekil 3.10. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Domates suyu)

Elma suyu tozu elde etmek için, önceki veriler ile aynı parametreler kullanılmıştır. Nozul çapına göre taşıyıcı kullanılmadan elma suyu tozu elde edilmediği görülmüştür.

Duvarlara yapışmış olarak elde edilen ürünün miktarındaki değişim standart ve geliştirilmiş kurutma sistemleri için aşağıdaki Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir. 1 L elma suyundan maltodekstrin kullanılmadan elde edilen kütlelerin tartımına göre en fazla ürün 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığında elde edilmiştir. Bu parametrelerde standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen ürün miktarı 84 gram iken, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 108 gramdır.

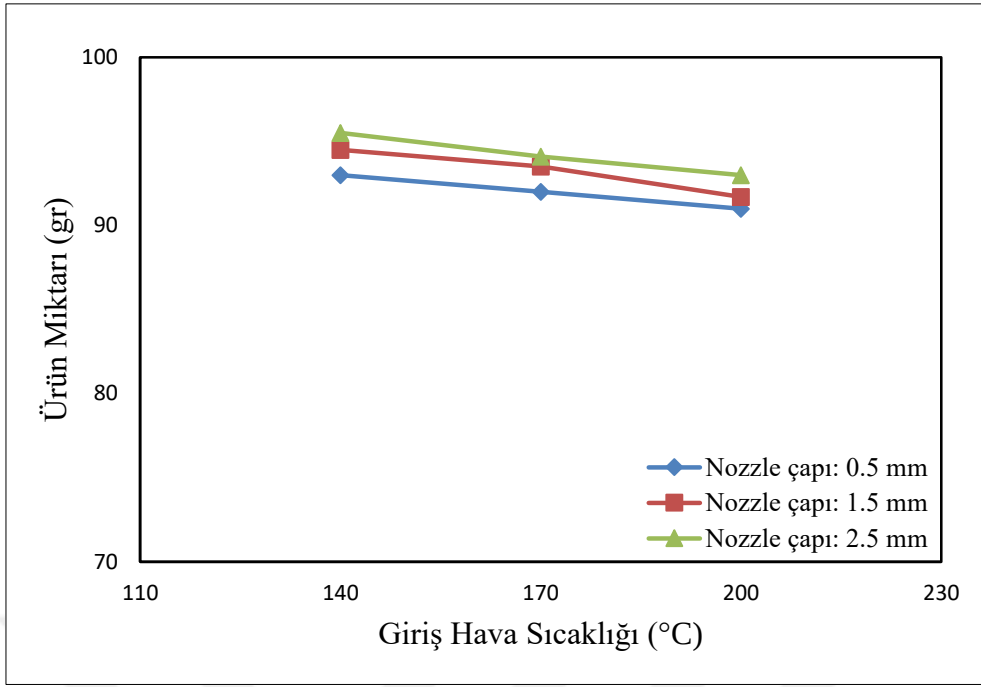


Şekil 3.11. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu)

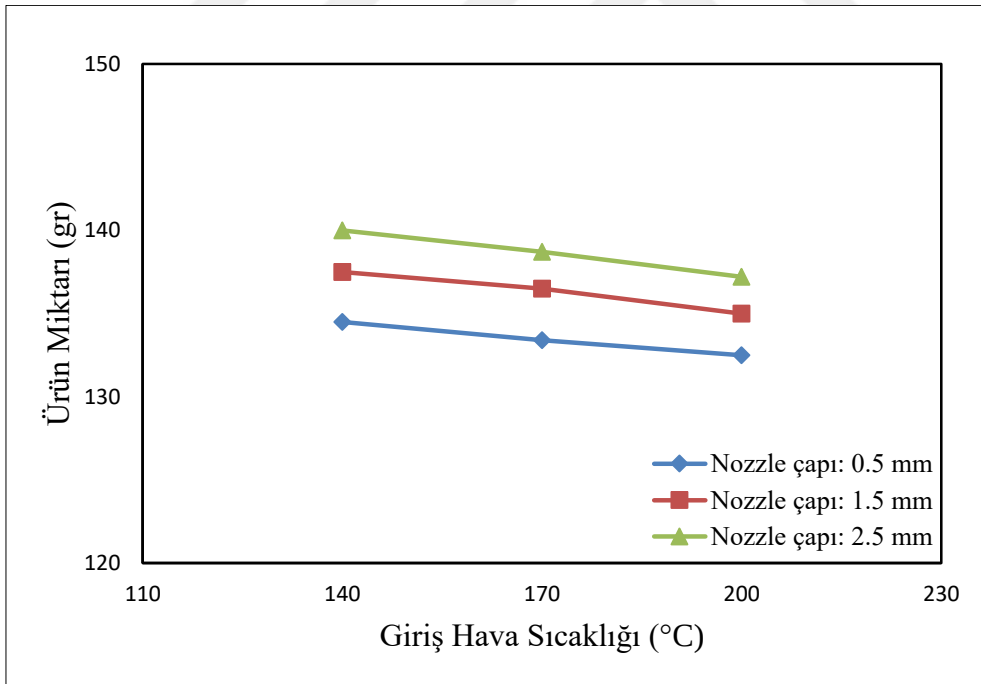


Şekil 3.12. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılmadan elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu)

Elma suyu da domates suyu gibi standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda %25, %60 ve %80 oranlarında maltodekstrin eklenerek deneyler yapılmıştır. Bunlardan %80 maltodekstrin eklenerek yapılan deneylerin daha verimli olduğu görülmüştür. Buna göre üç farklı nozul çapı (0.5; 1.5 ve 2.5 mm) ve giriş hava sıcaklığında yapılan deneylerdeki tartım sonuçlarına göre elde edilen toz ürün miktarları aşağıdaki Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te verilmiştir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, maltodekstrinli elma suyunun 1 litresinden en yüksek toz miktarı geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 140 gram ile 2.5 mm nozul ve 140 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Benzer şekilde aynı parametrelerde standart püskürtmeli kurutucuda 95.5 gram toz elde edilmiştir. Elma suyu için elde edilen miktar bakımından geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda daha fazla ürün elde edildiği görülmüştür.



Şekil 3.13. Standart püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu)



Şekil 3.14. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda taşıyıcı kullanılması durumunda elde edilen toz ürün miktarları (Elma suyu)

3.3. Kurutulmuş Tozların Karakterizasyonu

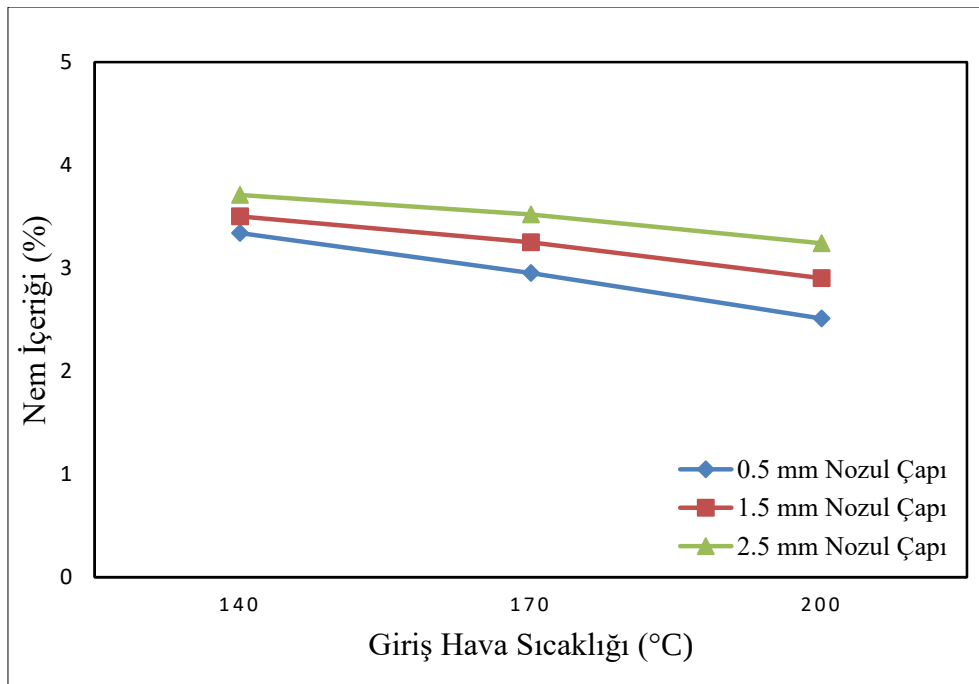
3.3.1. Tozların Nem İçeriği

Farklı parametrelerde üretilen süt tozlarının nem içerikleri ‘Denver Instrument IR-60 Moisture Analyzer cihazı’ ile yapılmış ve veriler aşağıda özetlenmiştir. Bu amaçla elde edilen toz numuneler belirli miktarlarda nem tayin cihazına bırakılmıştır. Nem tayin cihazında numuneler 105 °C’ye kadar infrared ışınlarla ısıtılarak numunelerin nem miktarları (%M) belirlenmiştir.

Buna göre üç farklı nozul çapı ve giriş hava sıcaklığında elde edilen süt tozlarının nem içerikleri aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibidir.

3.3.1.1. Süt Tozlarının Nem İçeriği

Şekil 3.15’te standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm olduğu durumda 140 °C, 170 °C ve 200 °C olmak üzere 3 farklı giriş hava sıcaklığı kullanılarak elde edilen süt tozlarının nem içerikleri verilmiştir. Süt tozu için giriş hava sıcaklığı 200 °C’de 0.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozları %2.51 M ile min. nem içeriğine sahiptir. %3.34 M ile max. nem içeriğine sahip toz ise sütün 140 °C giriş hava sıcaklığında elde edilmiştir.

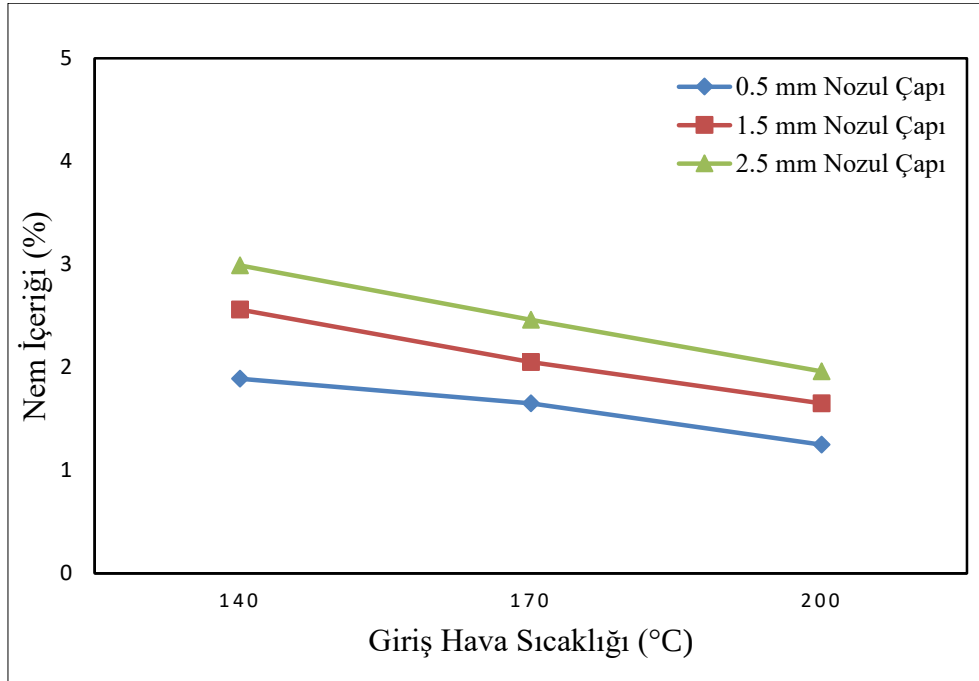


Şekil 3.15. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen süt tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi

1.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozlarından minimum nem içeriği %2.9 M olarak 200  C giriş hava sıcaklığında, maksimum nem içeriği ise %3.5 M ile 140  C giriş havası sıcaklığında elde edilmiştir. 2.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozlarından %3.24 M ile minimum nem içeriği giriş hava sıcaklığının 200  C olduğu durumda elde edilmiştir. %3.71 M ile max. nem içeriğine sahip toz ise 140  C giriş hava sıcaklığında elde edilmiştir.

Standart püskürtmeli kurutucudan elde edilen tozların nem içeriklerine bakıldığında ise minimum nem içeriklerine sahip tozlar 200  C giriş hava sıcaklığında sırasıyla 0.5 mm nozul çapında %2.51 M; 1.5 mm nozul çapında %2.9 M ve 2.5 mm nozul çapında %3.24 M olarak elde edilmiştir.

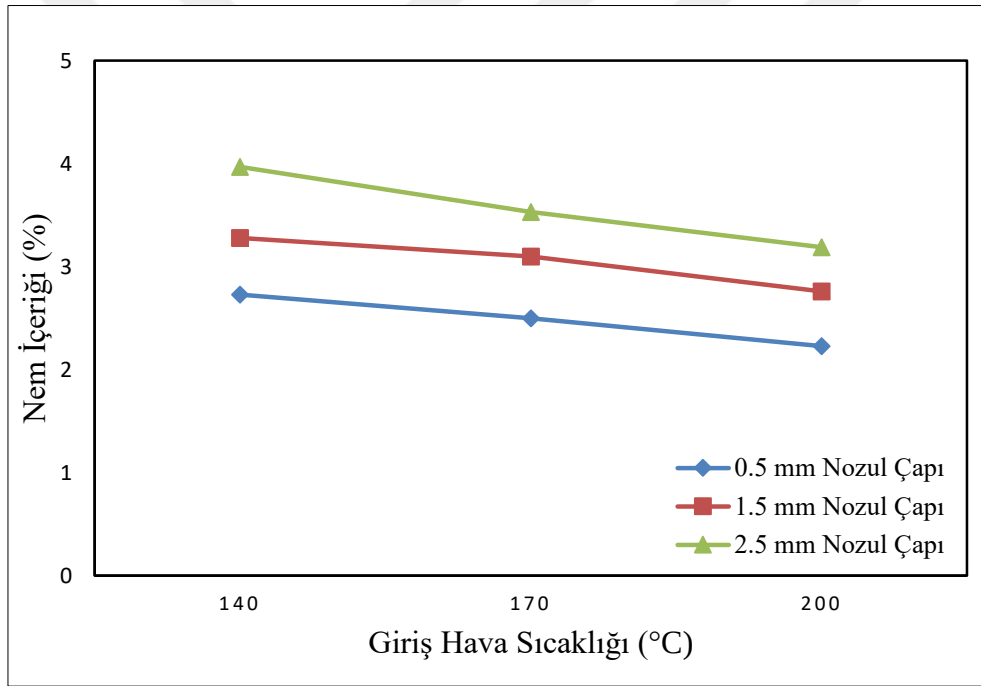
Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda da 3 farklı nozul çapı ve 3 farklı giriş havası sıcaklığında (140  C, 170  C ve 200  C) süt kurutulmuştur. Elde edilen süt tozlarının nem içerikleri farklı giriş havası sıcaklığına göre standart püskürtmeli kurutucuda olduğu gibi aşağıdaki şekil 3.16'da verilmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu 200  C'de %1.25 M ile minimum nem içeriğine sahip olduğu ve %2.99 M ile maximum nem içeriği ise 140  C giriş hava sıcaklığı ve 2.5 mm nozul çapında grlmştir. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucudan elde edilen tozların nem içerikleri kıyaslandığında, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen süt tozlarının nem içeriklerinin daha düşük olduğu grlmştir.



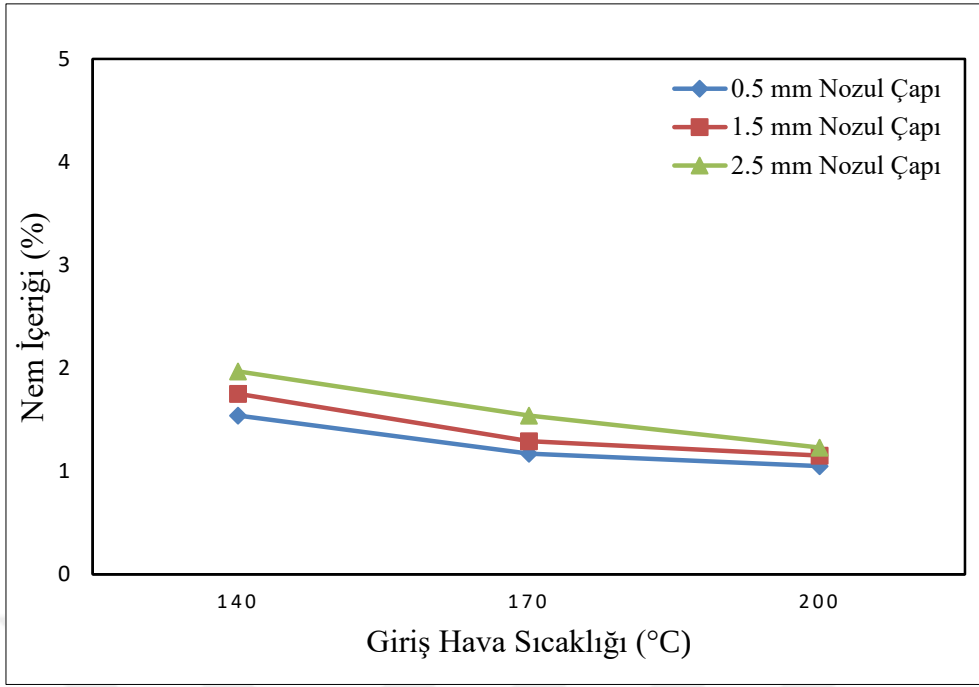
şekil 3.16. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen süt tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi

3.3.1.2. Domates Suyu Tozlarının Nem İçeriği

Domates suyuna %25 maltodekstrin katılarak, standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çapı ve 140 °C, 170 °C ve 200 °C giriş hava sıcaklığında kurutulmuştur. Elde edilen domates tozlarının nem içerikleri ölçülmüştür. Ölçüm sonucu aşağıdaki Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozlarının minimum nem içeriği %1.05 M ile 0,5 mm nozul çapı ve 200 °C giriş hava sıcaklığında elde edilmiştir. Aynı parametrelerde standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen tozların minimum nem içeriği ise %2.23 M’tür. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozlarının nem içeriklerinin daha düşük olduğu görülmüştür.



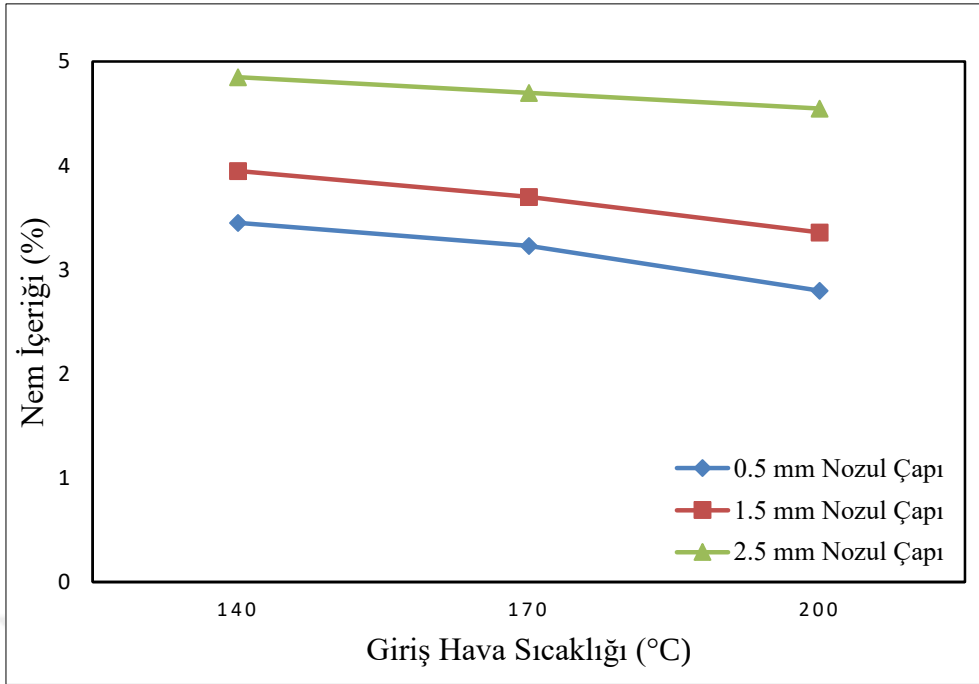
Şekil 3.17. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi



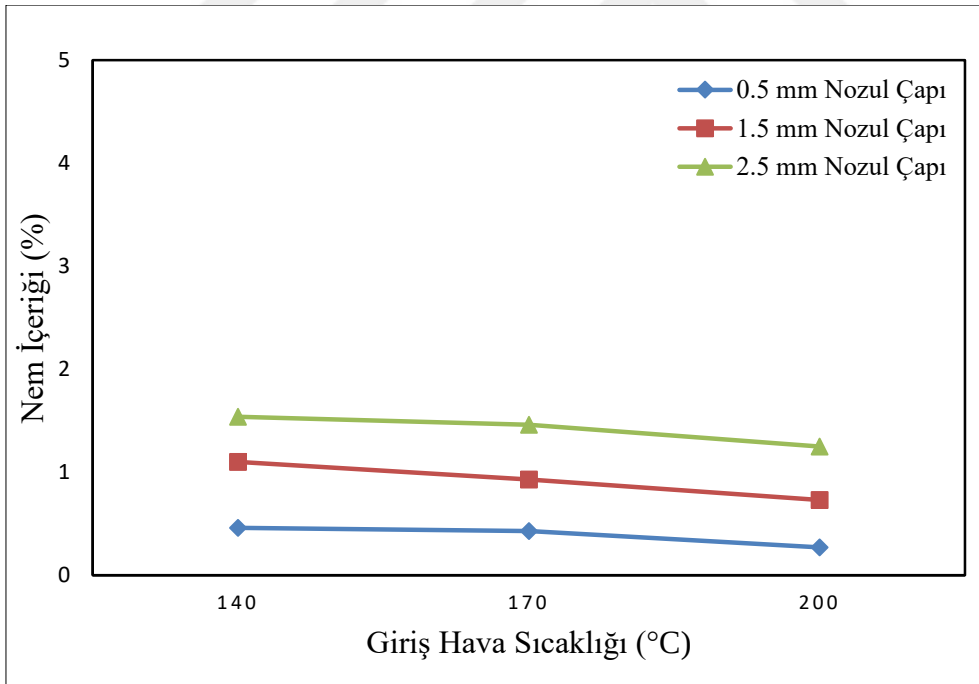
Şekil 3.18. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi

3.3.1.3. Elma Suyu Tozlarının Nem İçeriği

Elma suyu da %80 maltodekstrin katılarak aynı şekilde standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutulmuştur. Elde edilen elma tozlarının nem içerikleri ölçümü aşağıdaki Şekil 3.19 ve Şekil. 3.20’de verilmiştir. En düşük nem içerikleri standart ve geliştirilmiş kurutucuda elde edilen tozlar için sırasıyla %2.8 M ve %0.27 M ile 0.5 mm nozul çapı ve 200 °C giriş hava sıcaklığında elde edilmiştir. En düşük nem içeriğine sahip tozların geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.19. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen elma tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi



Şekil 3.20. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen elma tozlarının giriş hava sıcaklığına göre nem içeriklerinin değişimi

3.4. Püskürtmeli Kurutucuda Süt Kurutulması Sırasındaki Analizler

Süt, maltodekstrin ilave edilmeden kurutulmuştur. Kurutma işleminde 1000 ml'lik süt kullanılmıştır. 3 farklı nozul çapı (0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm) ve giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$: 140 °C, 170 °C ve 200 °C) kullanılarak standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutulmuştur. Elde edilen süt tozunun bir örneği aşağıdaki Şekil 3.21'de verilmiştir.



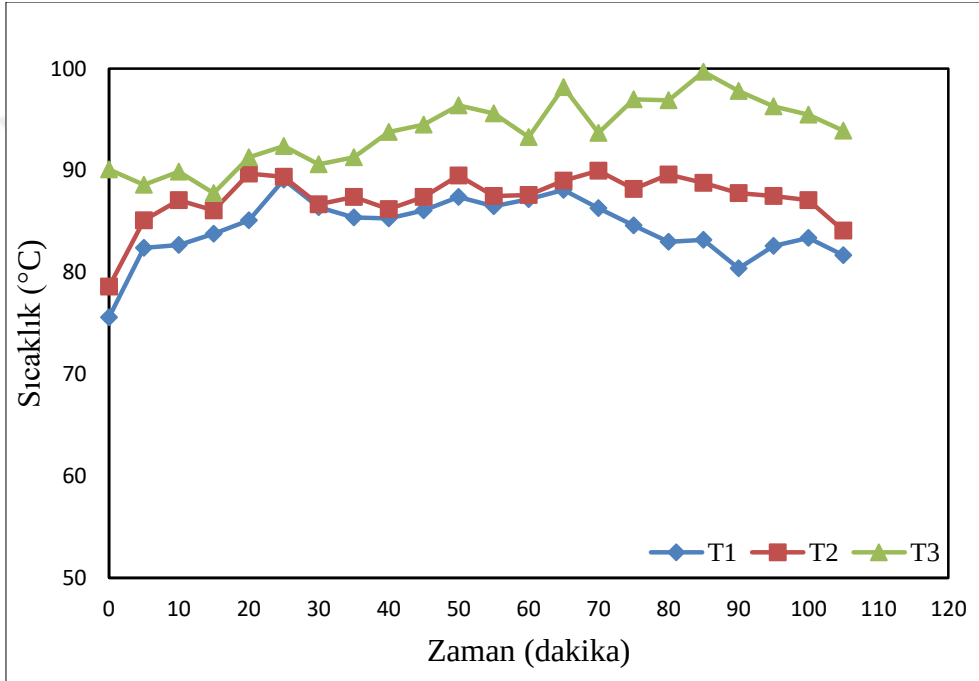
Şekil 3.21. Süt tozu

Standart püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm çapında nozul kullanılarak farklı giriş hava sıcaklıklarında kurutulan süt için yapılan analizlerden $T_{hava,g}$: 140 °C ve 170 °C'ye ait olanlar aşağıdaki şekillerde verildiği gibidir (Şekil 3.22-Şekil 3.29). Sütün standart püskürtmeli kurutucuda maltodekstrin ilave edilmeden kurutulmasında kurutma camına yapışma görülmemiştir.

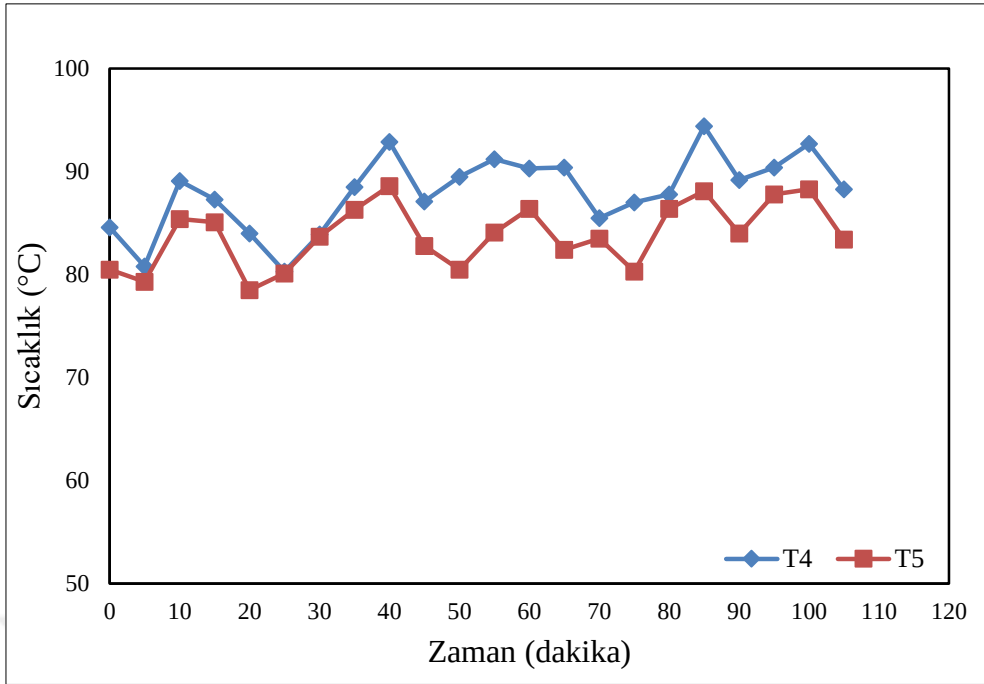
Standart püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm çapında nozul ve 140 °C giriş havası kullanıldığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, atomizere en yakın nokta olan 15. cm'de (T_3) 93.8 °C, 30. cm'deki T_2 'de 87.3 °C ve atomizere en uzak nokta olan 45. cm'de (T_1) 84.4 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.22). Ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, egzoz borusuna uzaklığı 20. cm'de bulunan T_4 noktasında 88.1 °C ve 32. cm'de bulunan T_5 noktasında 83.8 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.23). Ayrıca atomizere en yakın noktadaki kurutma odasının cam sıcaklığı 75.9 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.24 - Şekil 3.25).

Aynı şekilde 0.5 mm nozul çapı ve 170 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında ise kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_3 noktasında 131.6 °C, T_2 'de 125.8

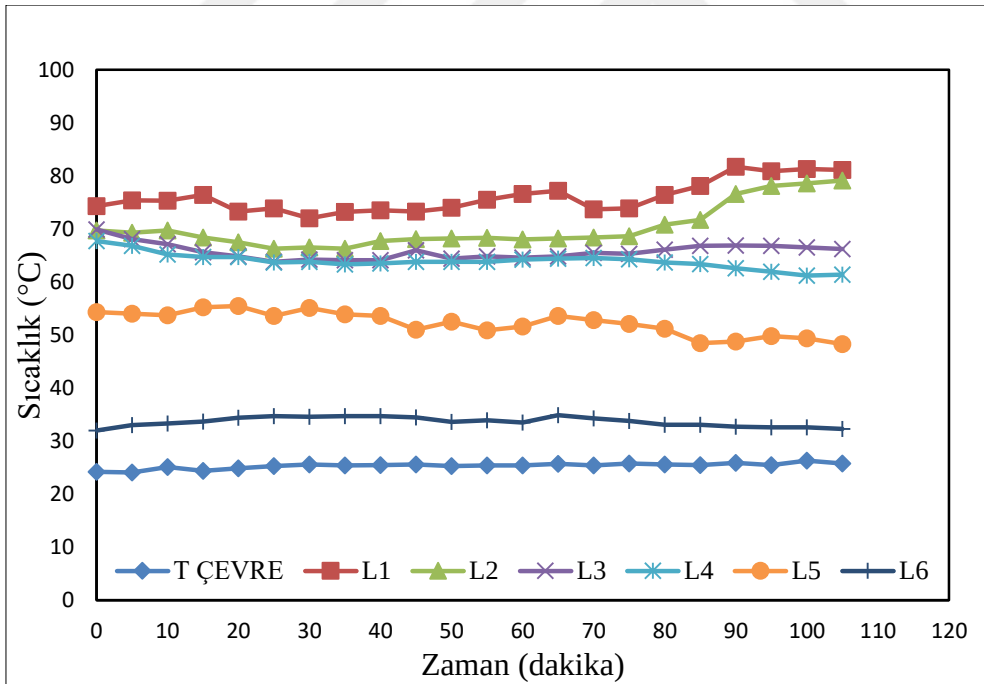
$^{\circ}\text{C}$ ve T_1 'de 123.8°C ; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, T_4 noktasında 121.4°C ve T_5 'te 116.7°C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26 – Şekil 3.27). Atomizere en yakın noktadaki kurutma odasının cam sıcaklığı ise 87.3°C ölçülmüştür (Şekil 3.28 – Şekil 3.29). 200°C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_3 'te 158.5°C , T_2 'de 152.5°C ve T_1 'de 147°C ; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, T_4 noktasında 150.9°C ve T_5 'te 144.9°C olarak ölçülmüştür. 200°C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutma odasının cam sıcaklığı atomizere en yakın noktada 100.6°C ölçülmüştür.



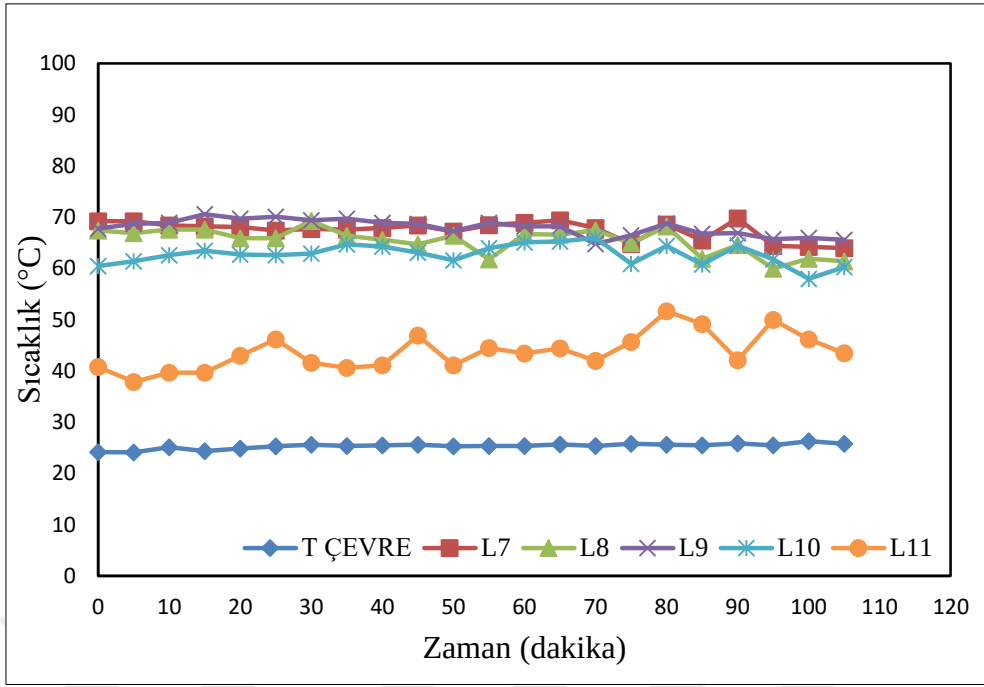
Şekil 3.22. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$): 140°C)



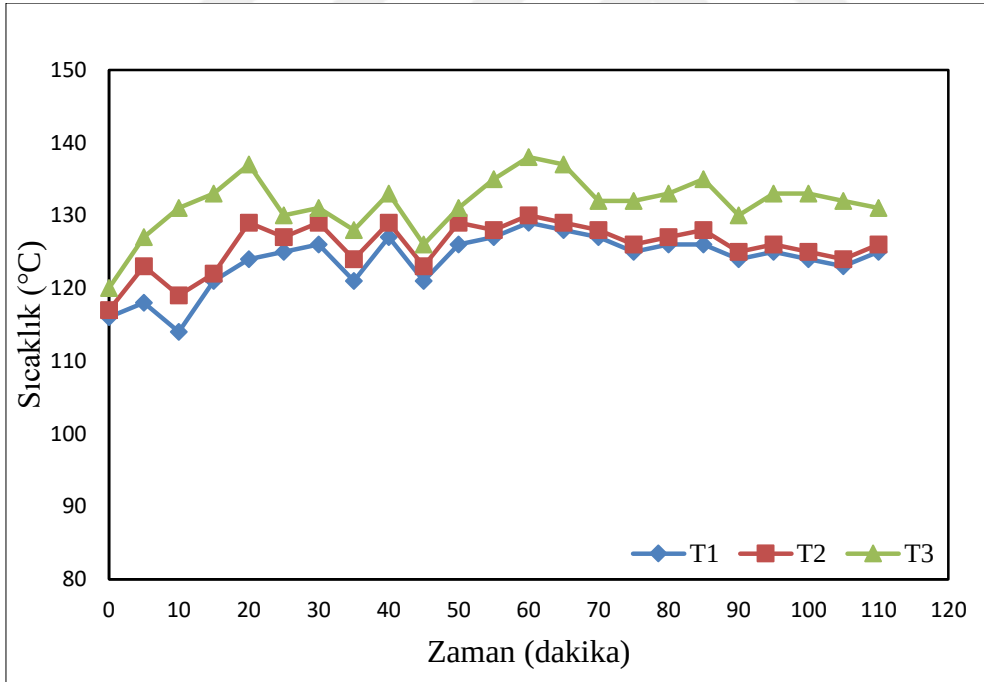
Şekil 3.23. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



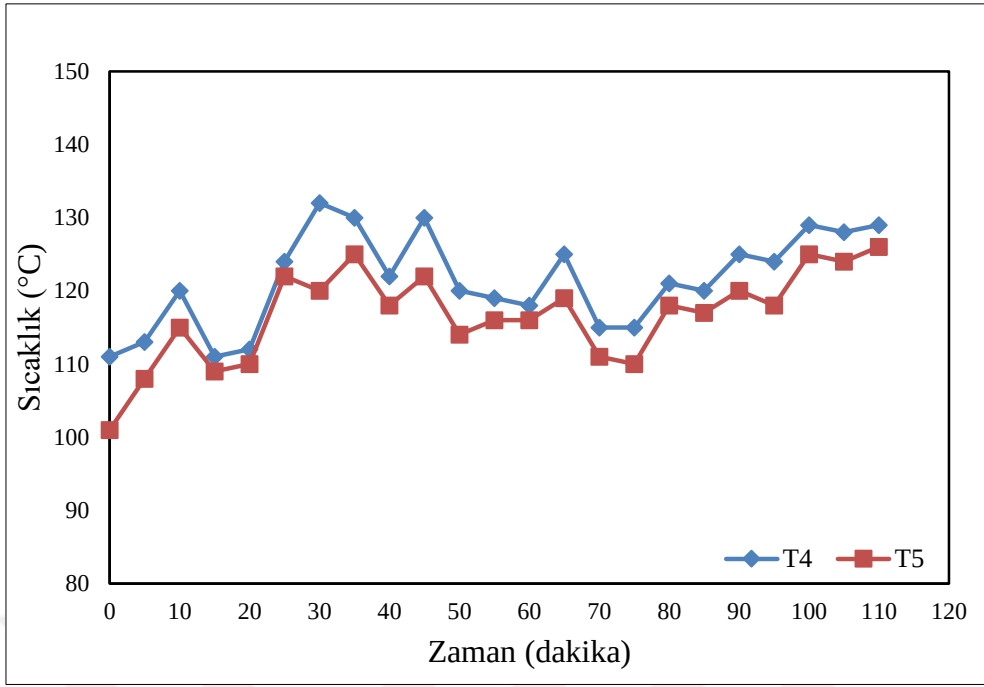
Şekil 3.24. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



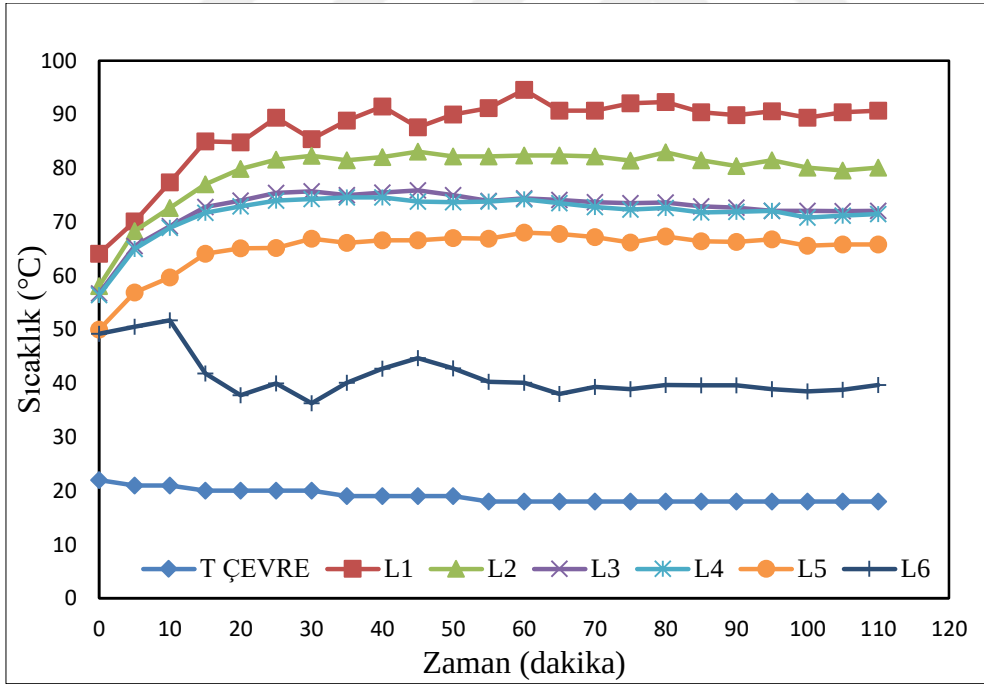
Şekil 3.25. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi
(Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):140 °C)



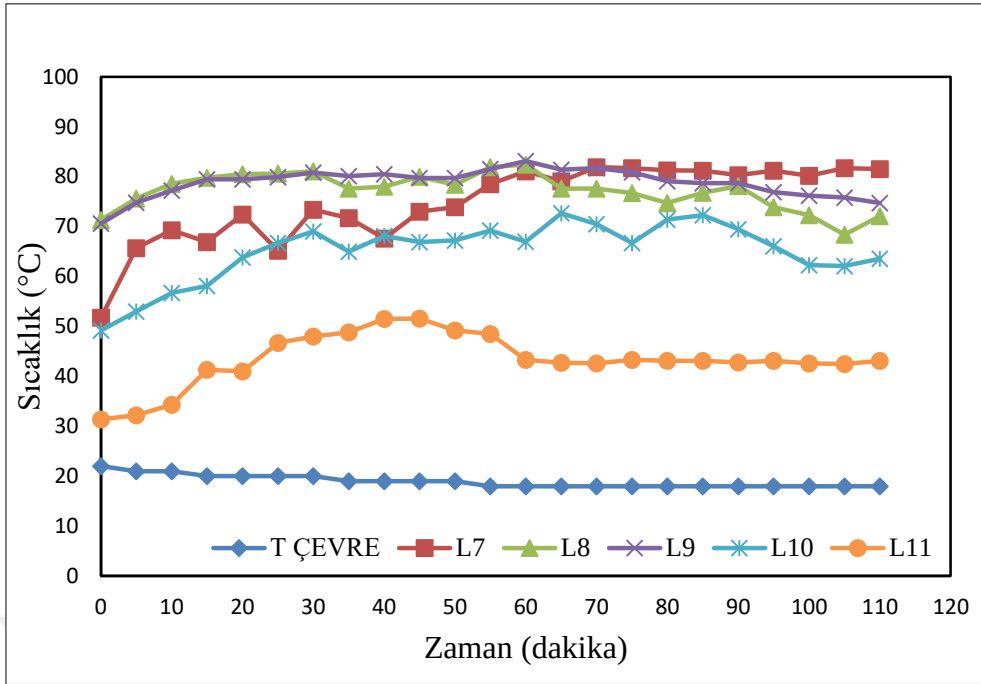
Şekil 3.26. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



Şekil 3.27. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



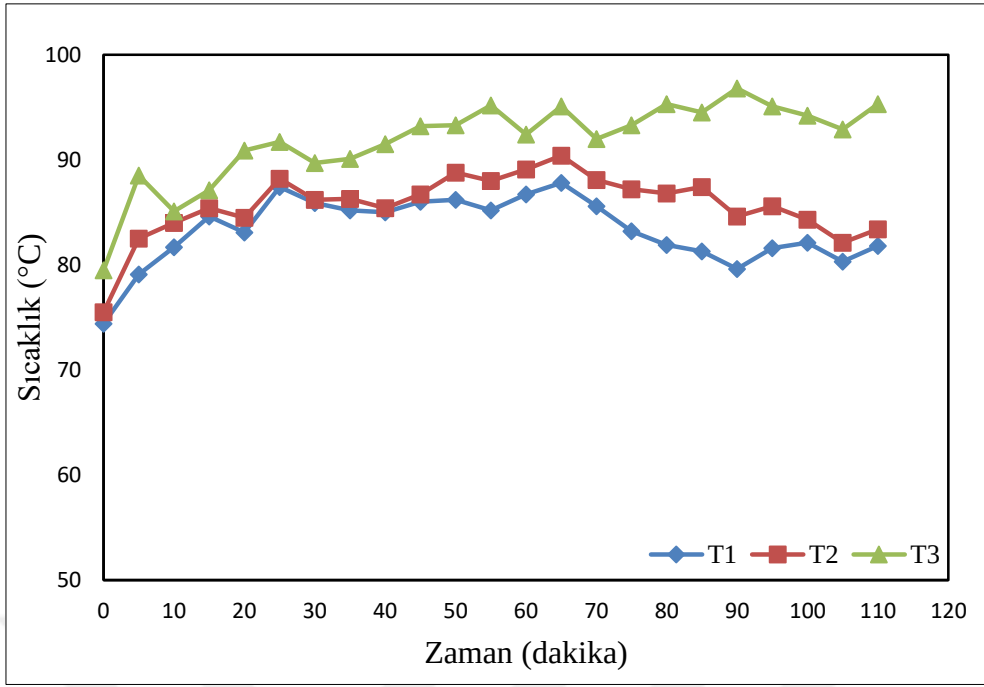
Şekil 3.28. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



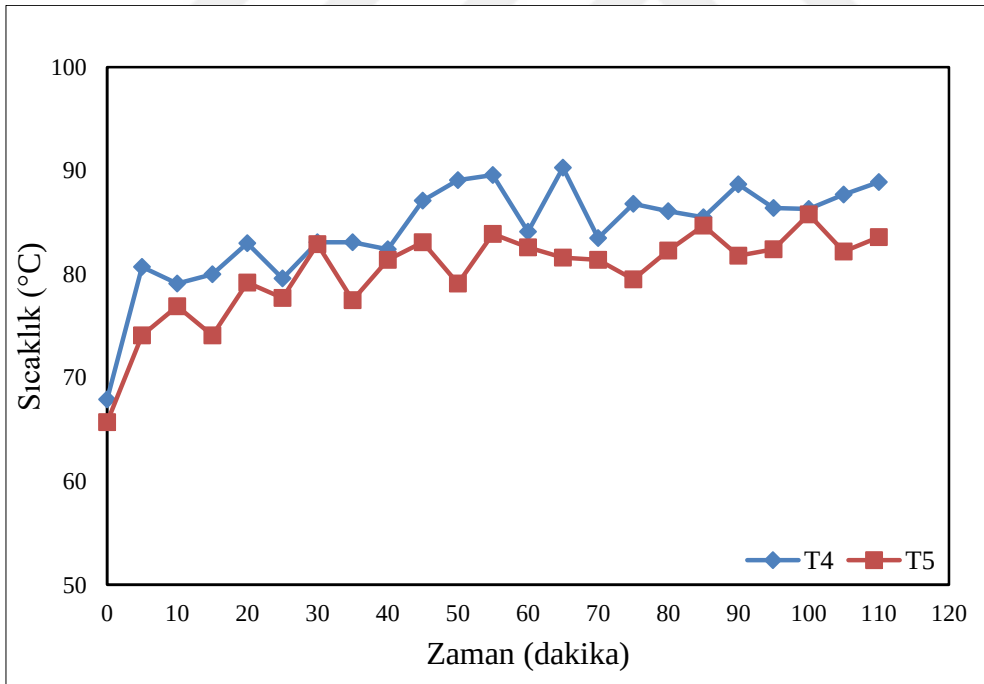
Şekil 3.29. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi
(Süt tozu, Nozul çapı: 0.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$): 170 °C)

Standart püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm çapında nozul kullanılarak farklı giriş hava sıcaklıklarında kurutulan süt için yapılan analizlerden $T_{hava,g}$: 140 °C ve 170 °C'ye ait olanlar aşağıdaki şekillerde verildiği gibidir (Şekil 3.30-Şekil 3.37).

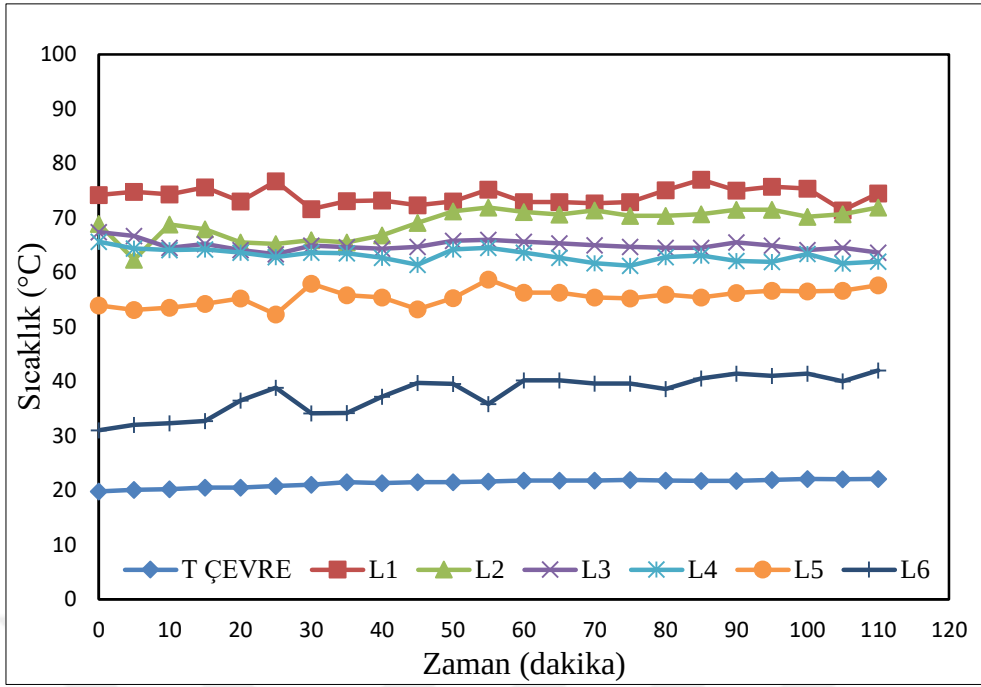
140 °C giriş havası sıcaklığında 1.5 mm nozul çapında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, atomizere en yakın nokta olan 15. cm'de (T_3) 91.9 °C, 30. cm'deki T_2 'de 85.1 °C ve atomizere en uzak nokta olan 45. cm'de (T_1) 83.3 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, egzoz borusuna uzaklığı 20. cm'de bulunan T_4 noktasında 84.5 °C ve 32. cm'de bulunan T_5 noktasında 80.1 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.30 – Şekil 3.31). Atomizere en yakın noktadaki kurutma odasının cam sıcaklığı 74 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.32 – Şekil 3.33). 170 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_3 noktasında 109.4 °C, T_2 'de 106.9 °C ve T_1 'de 104.6 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, T_4 noktasında 102.5 °C ve T_5 'te 98.3 °C ölçülmüştür (Şekil 3.34 – Şekil 3.35). Atomizere en yakın noktadaki kurutma odasının cam sıcaklığı 170 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında 84.1 °C ölçülmüştür (Şekil 3.36 – Şekil 3.37). 200 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_3 'te 127.9 °C, T_2 'de 125.5 °C ve T_1 'de 122.1 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, T_4 noktasında 118.1 °C ve T_5 'te 112.7 °C; atomizere en yakın noktadaki cam sıcaklığı ise 95.1 °C olarak ölçülmüştür.



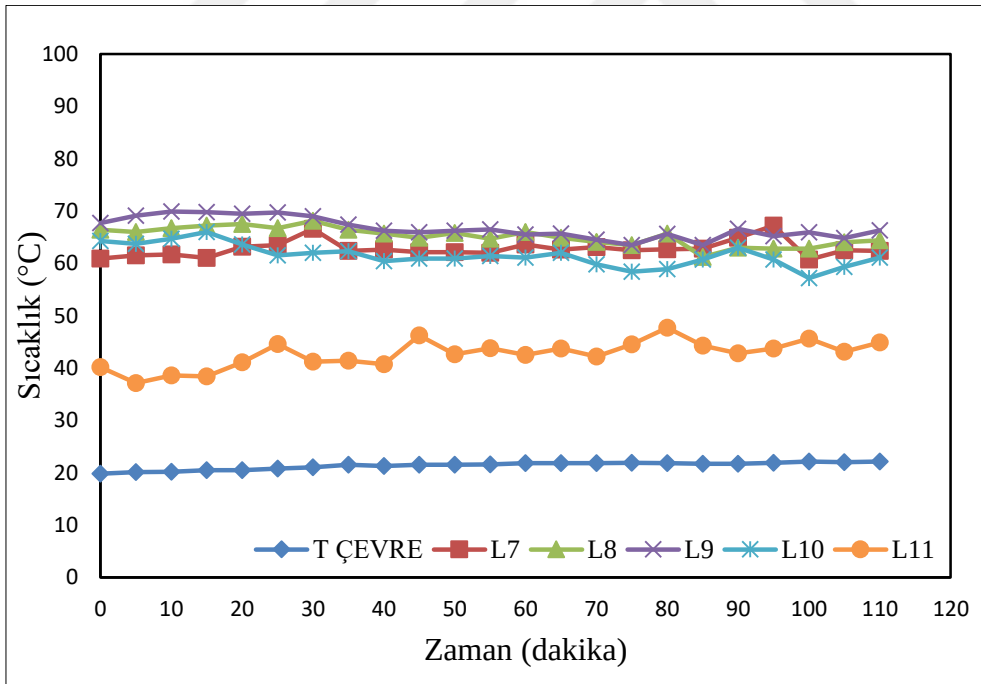
Şekil 3.30. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



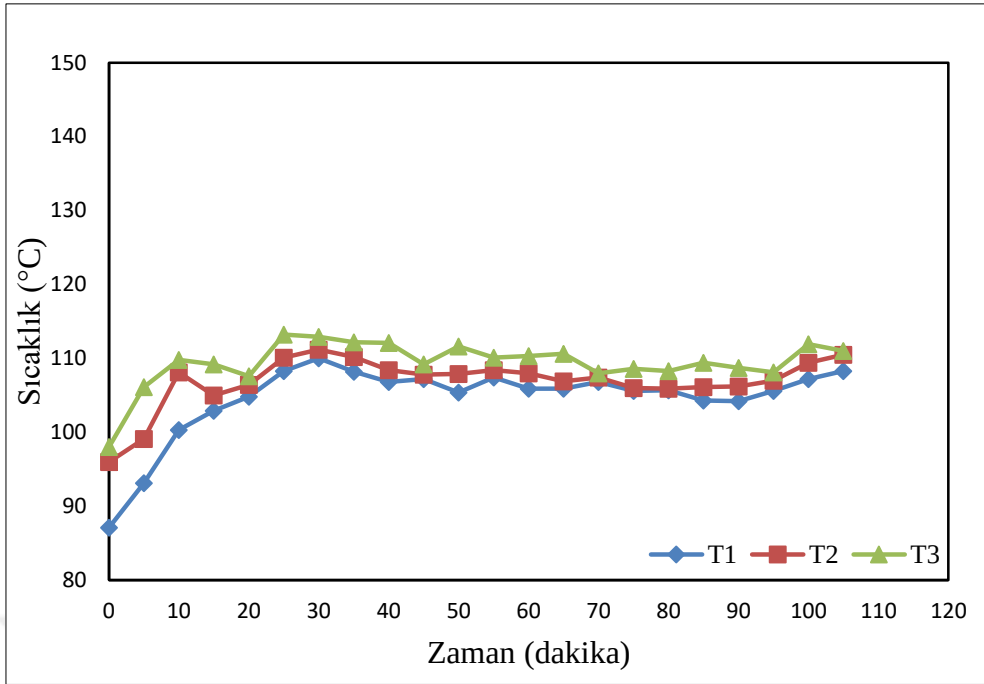
Şekil 3.31. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



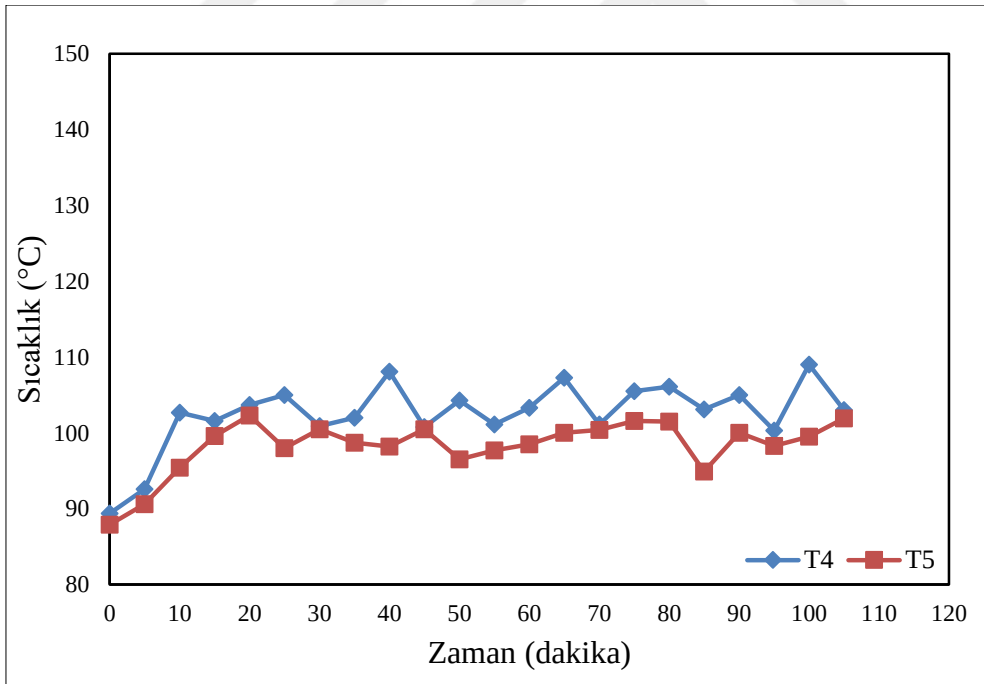
Şekil 3.32. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



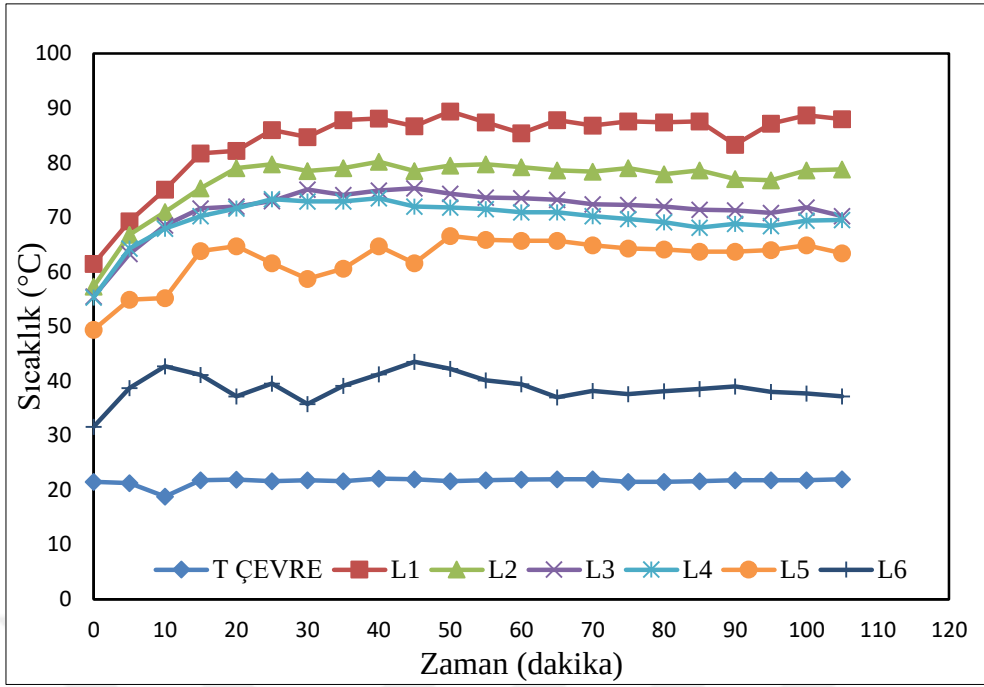
Şekil 3.33. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



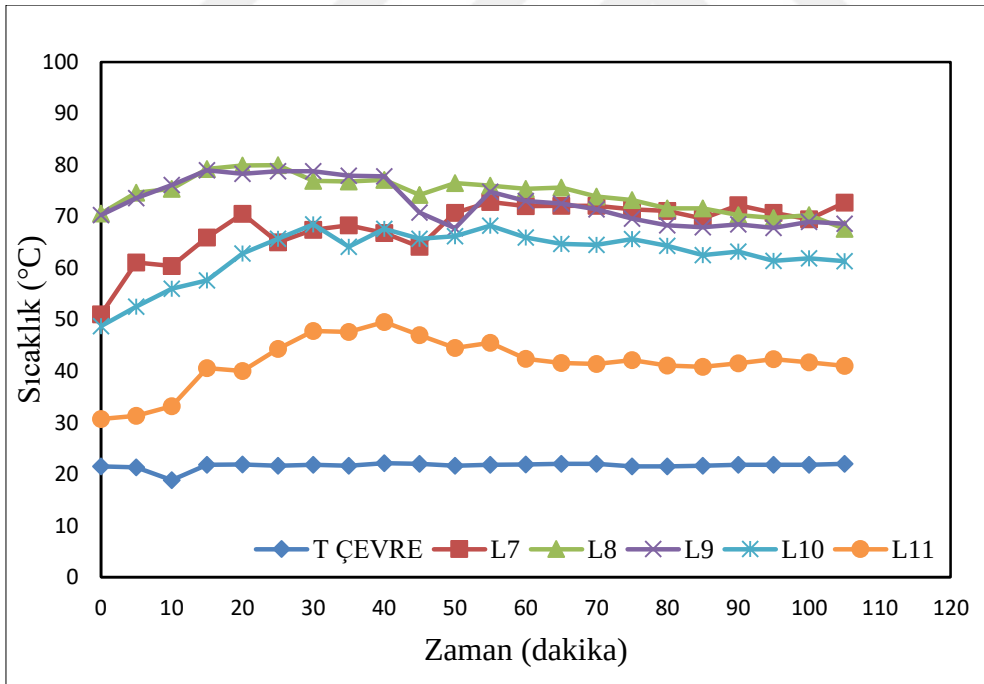
Şekil 3.34. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



Şekil 3.35. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



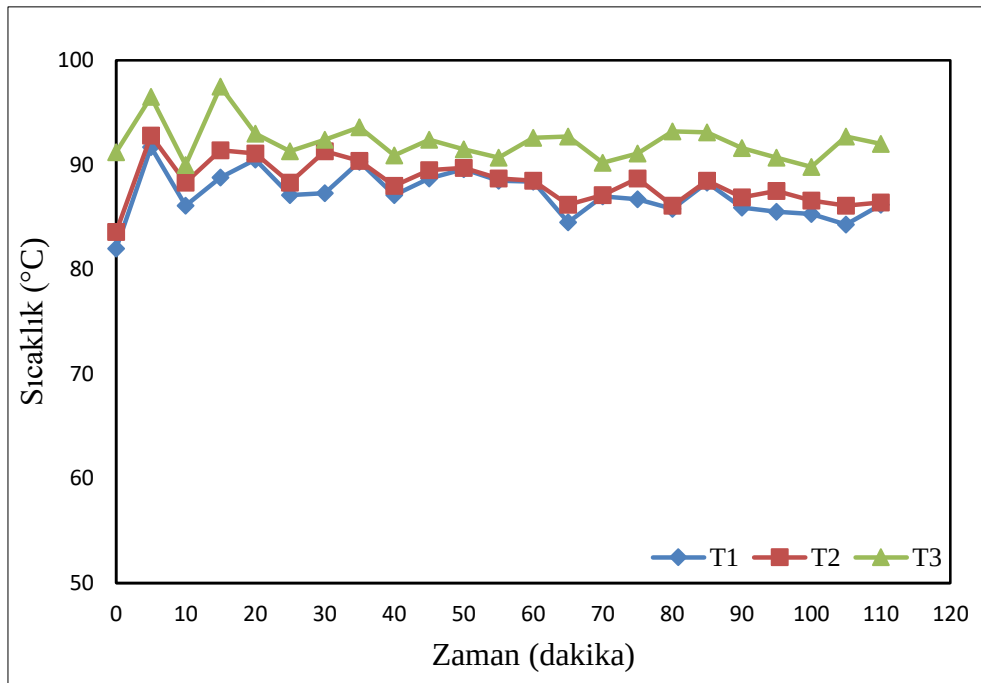
Şekil 3.36. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



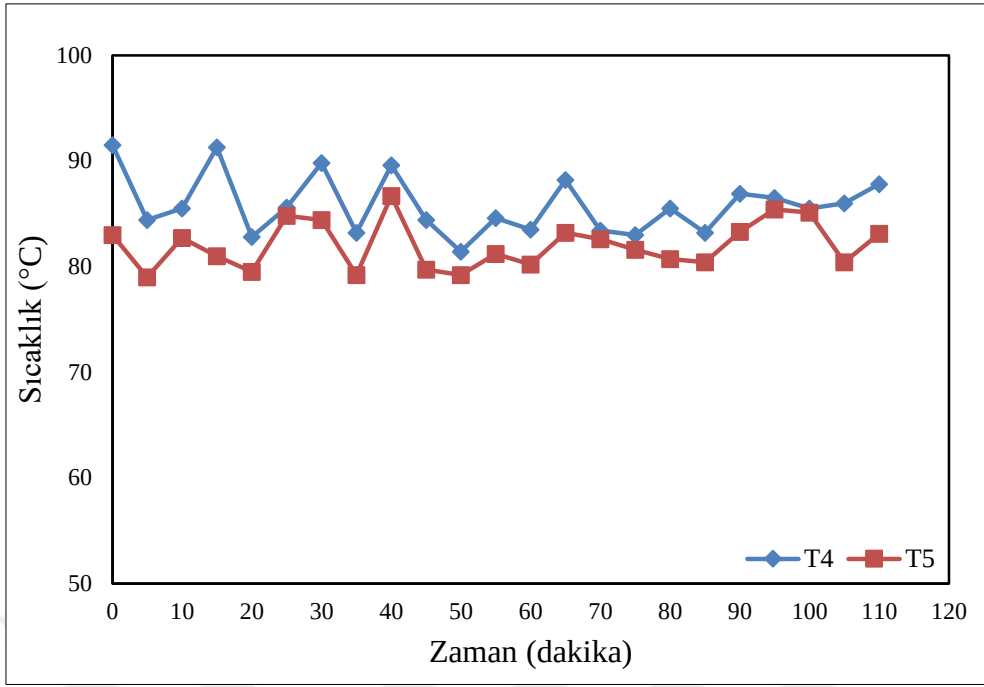
Şekil 3.37. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)

Standart püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapı ve farklı giriş hava sıcaklıkları kullanılarak kurutulan süt için yapılan analizlerden $T_{\text{hava,g}}$: 140 °C ve 170 °C'ye ait olanlar aşağıdaki şekillerde verildiği gibidir (Şekil 3.38-Şekil 3.45).

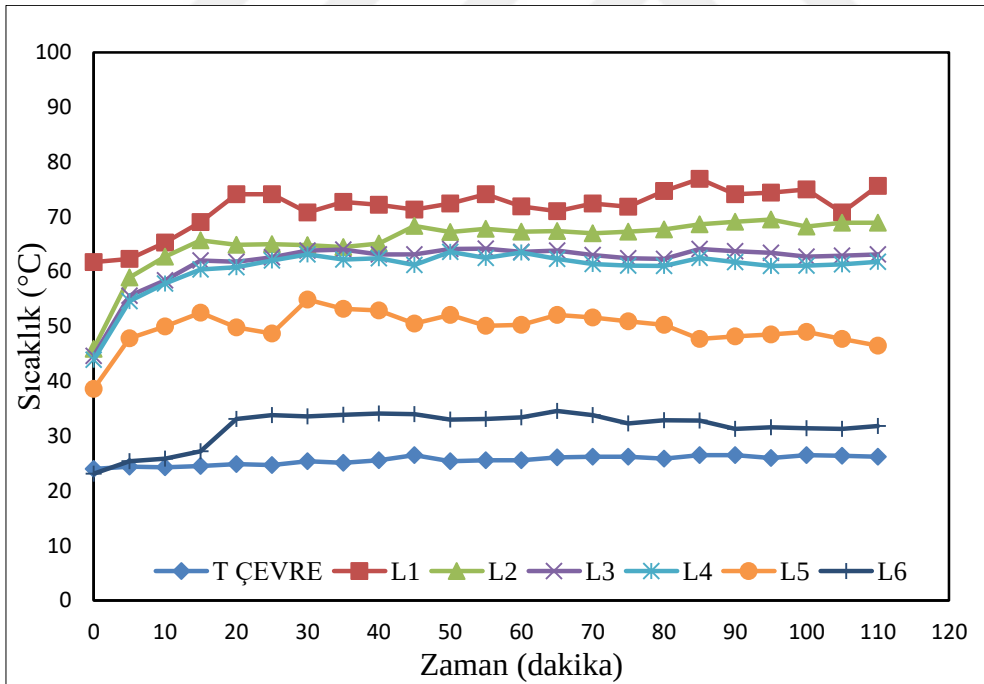
2.5 mm nozul çapında 140 °C giriş havası sıcaklığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, atomizörden 15 cm uzaklığında (T_3) 92.2 °C, 30 cm uzaklığında (T_2) 88.3 °C ve 45 cm uzaklığında (T_1) 87.2 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, egzoz borusuna uzaklığı 20 cm olan T_4 noktasında 85.8 °C ve 32. cm'de bulunan T_5 noktasında 82 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.38 – Şekil 3.39). 140 °C giriş havası sıcaklığı kullanıldığında atomizere en yakın noktadaki kurutma odasının cam sıcaklığı 71.7 °C ölçülmüştür (Şekil 3.40 – Şekil 3.41). 170 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_3 'te 107.9 °C, T_2 'de 105.3 °C ve T_1 'de 103.3 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_4 'te 100.4 °C ve T_5 'te 97 °C; atomizere en yakın noktanın cam sıcaklığı ise 81.3 °C ölçülmüştür (Şekil 3.42 - Şekil 3.45). 200 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_3 'te 127 °C, T_2 'de 124.3 °C ve T_1 'de 120.7 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, T_4 'te 116.7 °C ve T_5 'te 111 °C; atomizere en yakın noktadaki cam sıcaklığı ise 93.7 °C olarak ölçülmüştür.



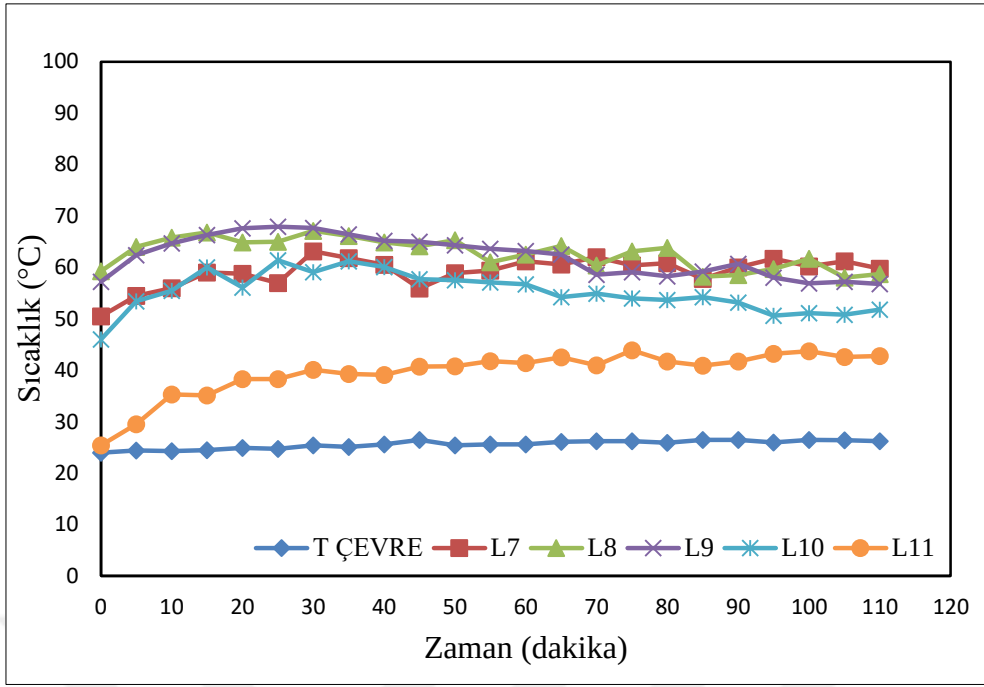
Şekil 3.38. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):140 °C)



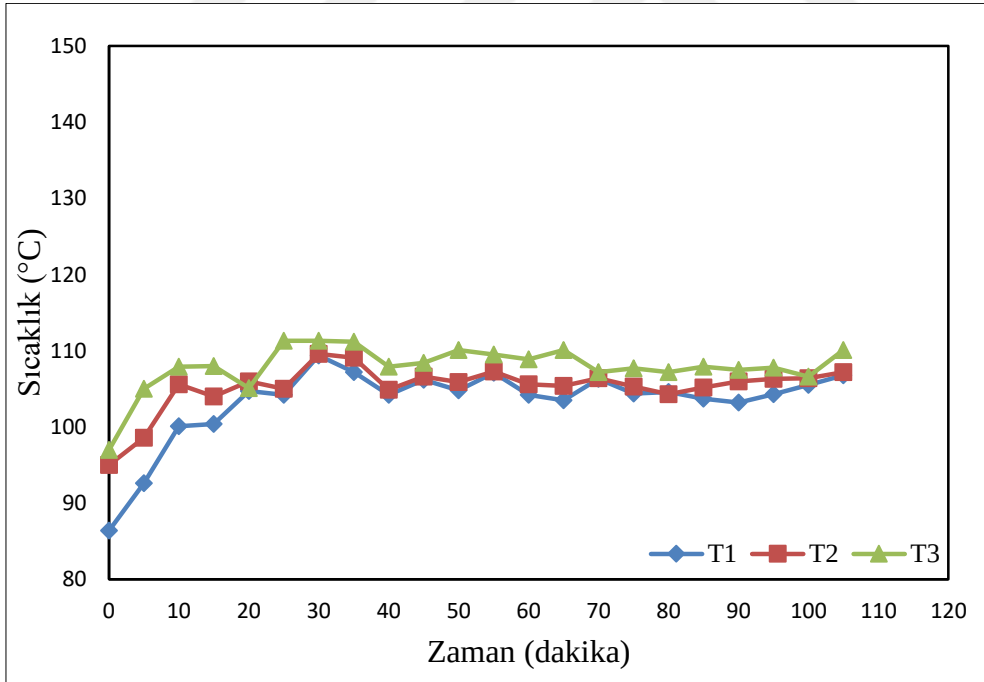
Şekil 3.39. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



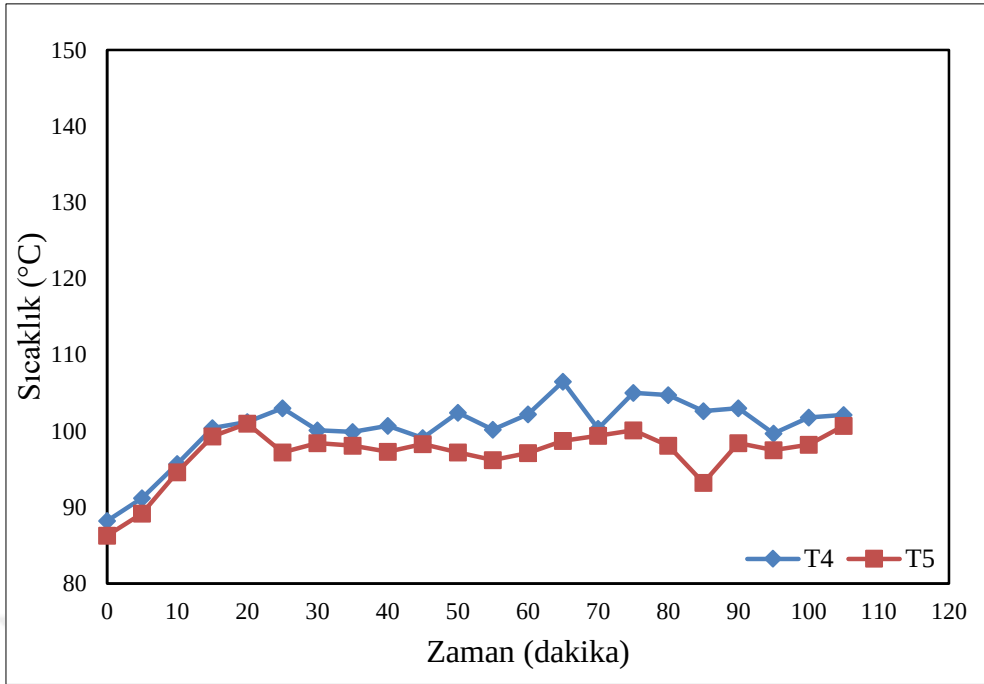
Şekil 3.40. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



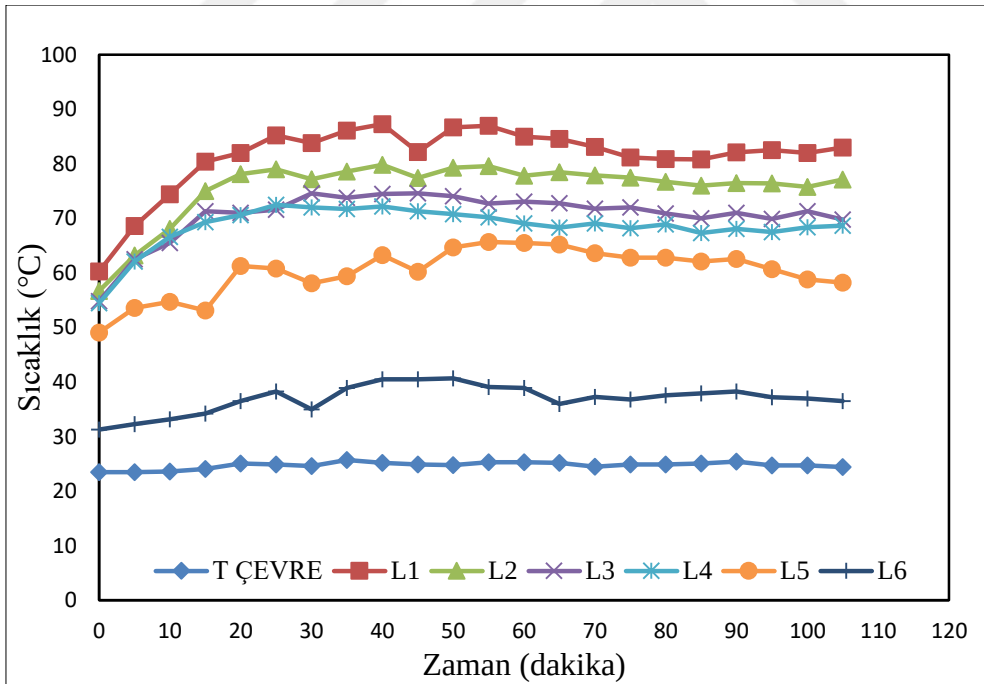
Şekil 3.41. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



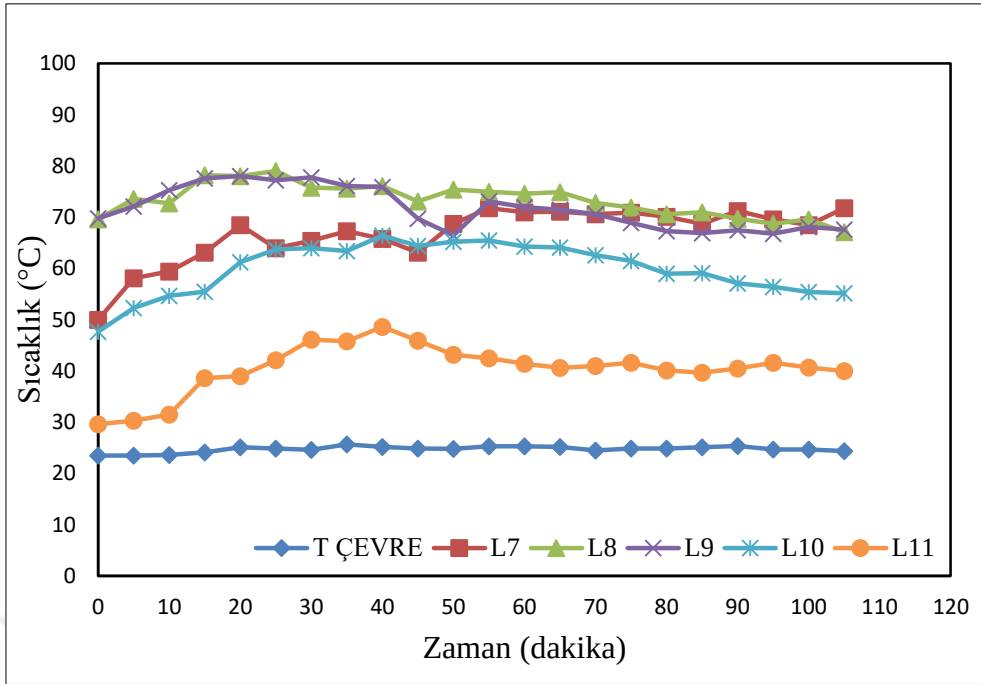
Şekil 3.42. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



Şekil 3.43. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



Şekil 3.44. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



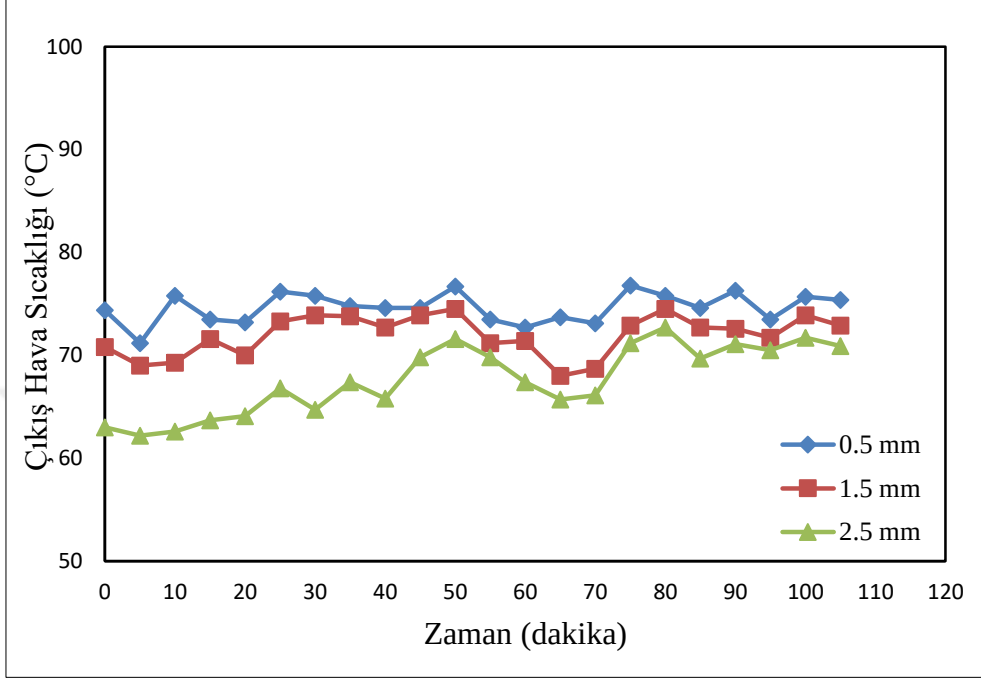
Şekil 3.45. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi
(Süt tozu, Nozul çapı: 2.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$): 170 °C)

Standart püskürtmeli kurutucuda süt kurutulmasında giriş hava sıcaklığı ve nozul çapına bağlı olarak çıkış havasının sıcaklığı, nemi ve hızları belirlenmiştir. Bunlardan süt için 140 °C ve 170 °C giriş hava sıcaklığına ait grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 3.46 - Şekil 3.51).

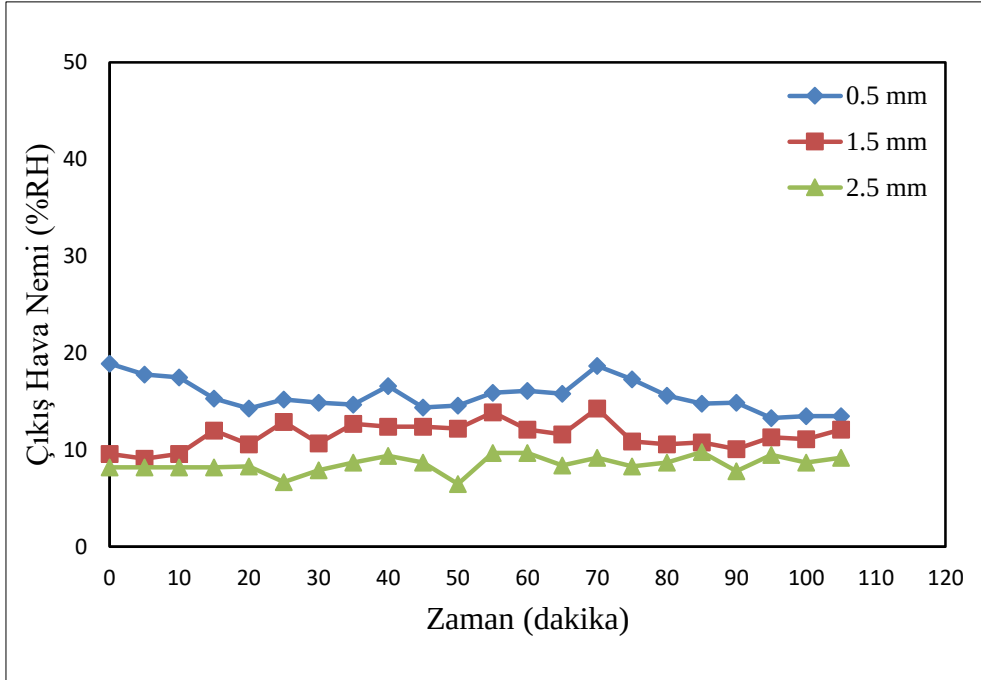
140 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutucudan çıkan havanın ortalama sıcaklığı 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 74.6 °C, 72 °C ve 67.7 °C'dir (Şekil 3.46). Kurutucudan çıkan havanın nemi; 0.5 mm çapında nozul kullanıldığında 15.6 %RH, 1.5 mm çapında 11.5 %RH ve 2.5 mm çapında 8.5 %RH elde edilmiştir (Şekil 3.47). Çıkış havasının hızı; 0.5 mm çapında 6 m/s, 1.5 mm çapında 7.7 m/s ve 2.5 mm çapında 9.3 m/s'dir (Şekil 3.48). 170 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutucudan çıkan havanın ortalama sıcaklığı 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 86.6 °C, 81 °C ve 76.7 °C'dir (Şekil 3.49). Kurutucudan çıkan havanın nemi; 0.5 mm çapında nozul kullanıldığında 13.4 %RH, 1.5 mm çapında 12.4 %RH ve 2.5 mm çapında 10 %RH elde edilmiştir (Şekil 3.50). Çıkış havasının hızı; 0.5 mm çapında 6.7 m/s, 1.5 mm çapında 9.2 m/s ve 2.5 mm çapında 11.8 m/s'dir (Şekil 3.51). 200 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında kurutucudan çıkan havanın ortalama sıcaklığı 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 103.1 °C, 94.6 °C ve 81.9 °C'dir. Kurutucudan çıkan havanın nemi; 0.5 mm çapında nozul kullanıldığında 12.5 %RH, 1.5 mm çapında 9.2 %RH ve 2.5 mm çapında 7.2

%RH elde edilmiştir. Çıkış havasının hızı; 0.5 mm çapında 4.3 m/s, 1.5 mm çapında 7.9 m/s ve 2.5 mm çapında 11.1 m/s'dir.

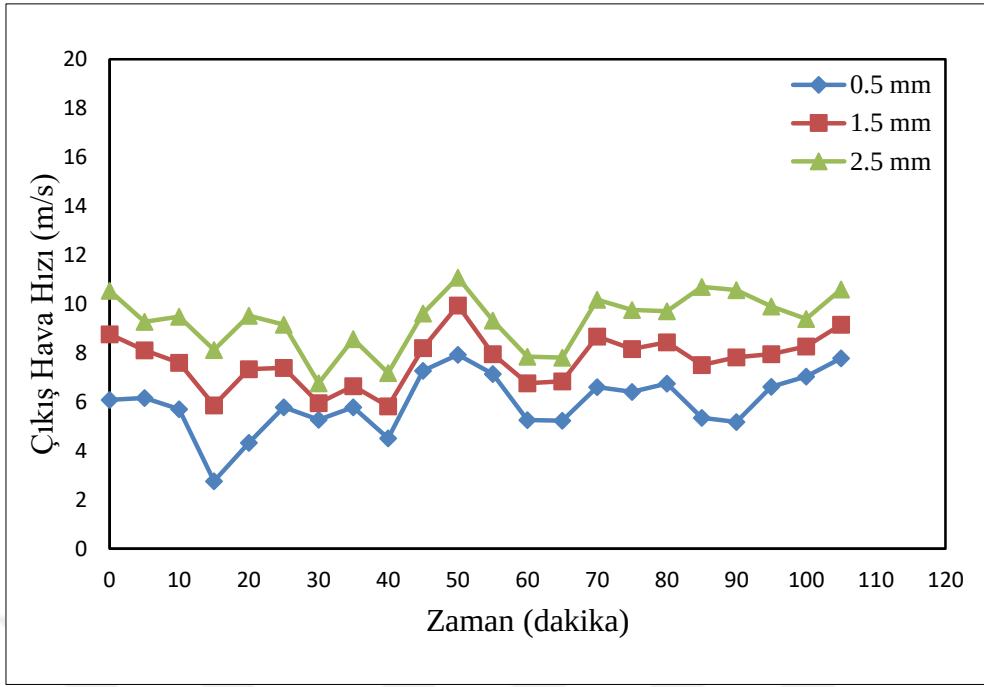
Kullanılan giriş hava sıcaklığına göre nozul çapının artışı ile çıkış havası sıcaklığı ve nemi azalırken, çıkış hava hızının arttığı gözlemlenmiştir.



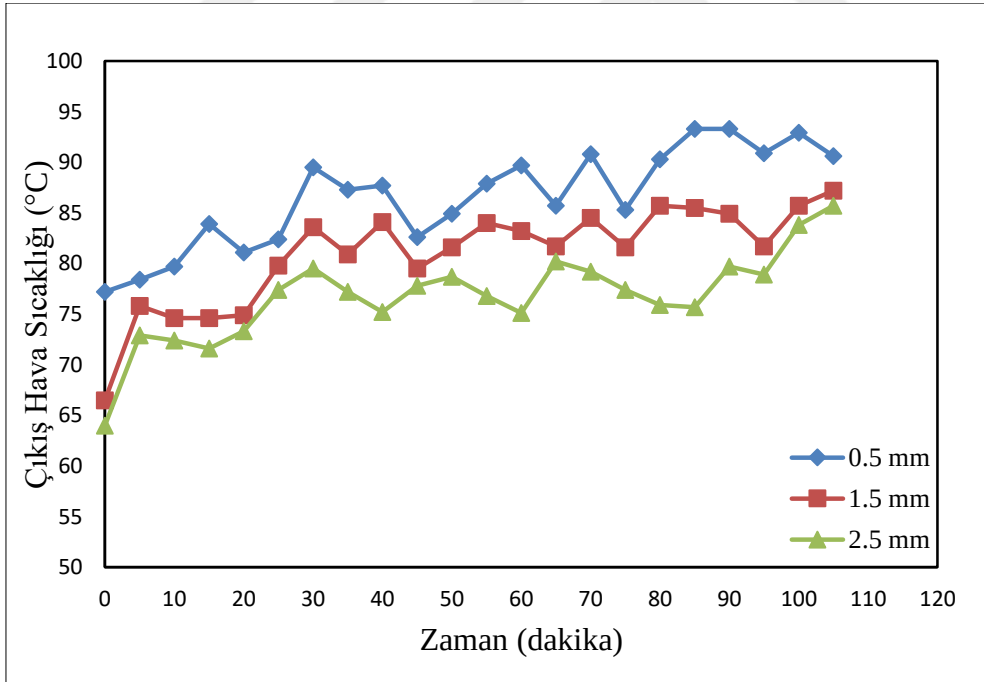
Şekil 3.46. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava sıcaklıklarının zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



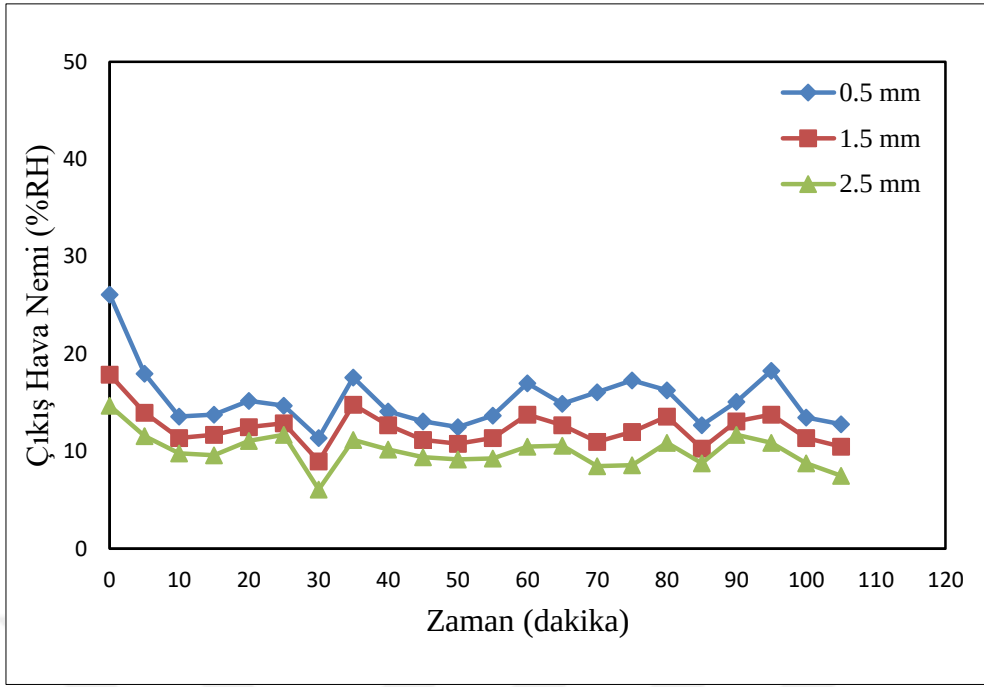
Şekil 3.47. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava neminin zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



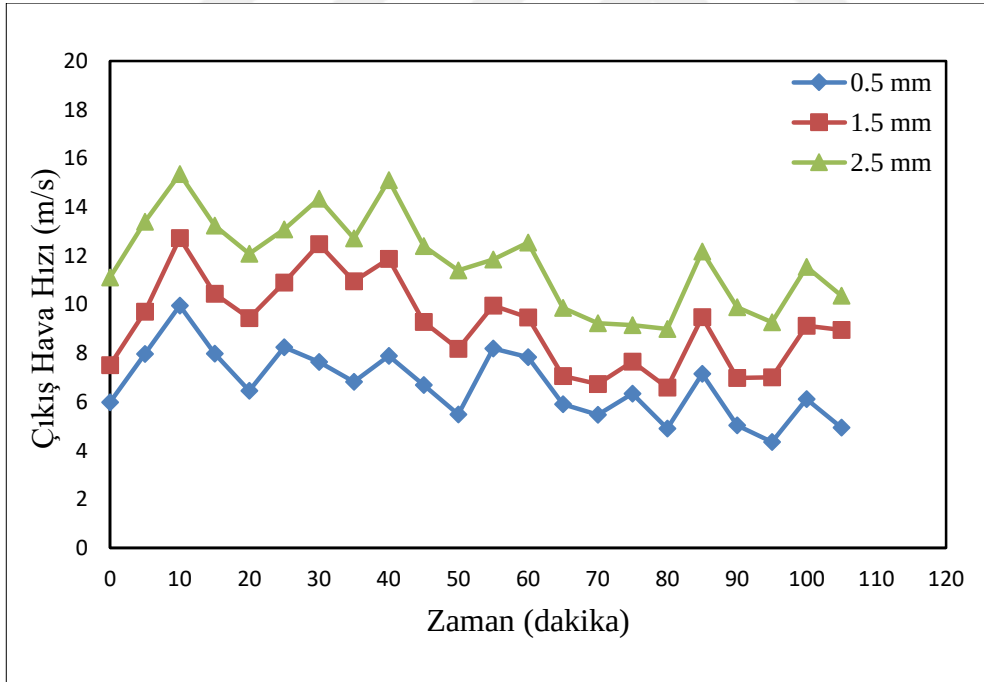
Şekil 3.48. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava hızının zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):140 °C)



Şekil 3.49. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava sıcaklıklarının zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



Şekil 3.50. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava neminin zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



Şekil 3.51. Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış hava hızının zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)

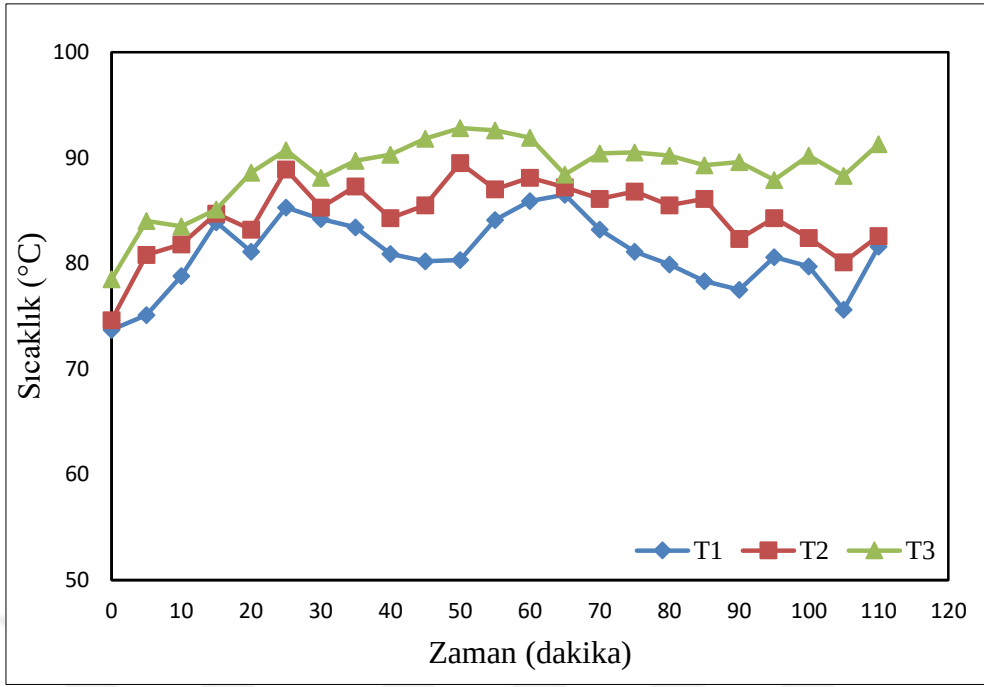
3.4.1. Geliştirilmiş Püskürtmeli Kurutucuda Elde Edilen Süt Tozu Analizleri

Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda süt kurutulması giriş sıcaklıkları 140 °C, 170 °C ve 200 °C değeri için ve 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çapları için belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan kurutma sıcaklığı 140 °C'ye ait grafikler 1.5 mm nozul çapı için aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

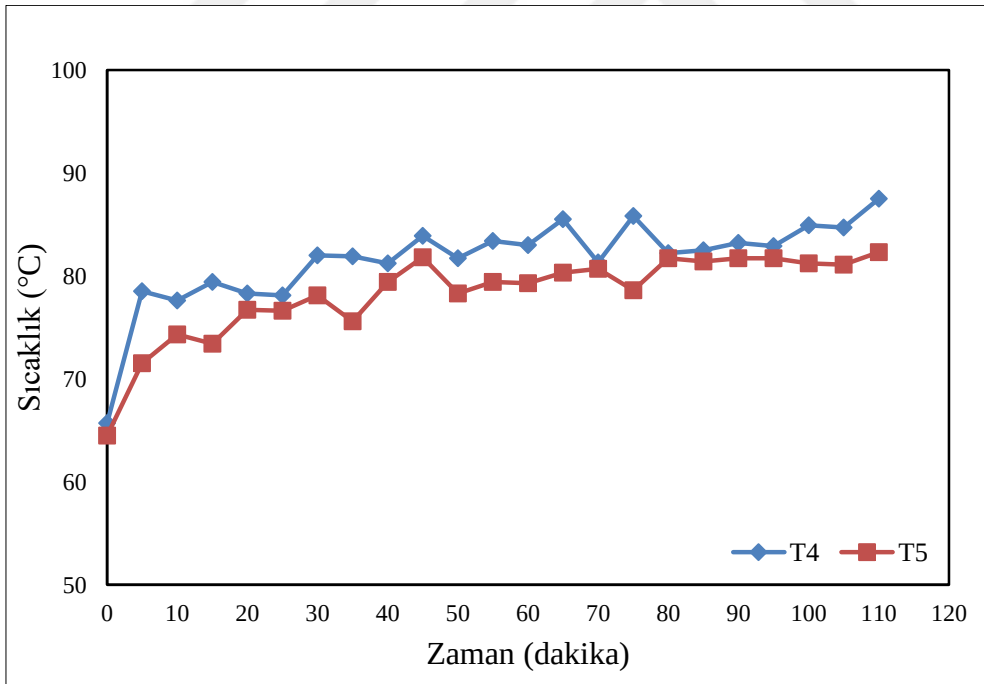
Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığında süt kurutulurken kurutma ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının değişimi Şekil 3.52 - Şekil 3.55 arasında verilmiştir. Kurutma odasındaki ortalama hava sıcaklıkları, atomizere yakınlığı 15. cm'de bulunan T₃ noktasında 88.9 °C, 30. cm'deki T₂'de 84.5 °C ve atomizere uzaklığı 45. cm'de olan T₁ noktasında ise 80.9 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T₄'te 81.3 °C ve T₅'te 78.2 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.52- Şekil 3.53). Kurutma odasında atomizere en yakın noktadaki cam sıcaklığının 71 °C olduğu görülmüştür (Şekil 3.54- Şekil 3.55).

Geliştirilmiş kurutucuda 140 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında farklı nozul çaplarına göre kurutucudan çıkan havanın sıcaklığı, nemi ve hızı Şekil 3.56 - Şekil 3.58 arasında verilmiştir. Çıkış havası sıcaklığının ortalama değerleri 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 71.9 °C, 69.5 °C ve 64 °C'dir (Şekil 3.56). Kurutucudan çıkan havanın nemi; 0.5 mm çapında nozul çapında 28.5 %RH, 1.5 mm çapında 24.3 %RH ve 2.5 mm çapında 13.9 %RH olarak ölçülmüştür (Şekil 3.57). Çıkış havasının hızı; 0.5 mm çapında 8.2 m/s, 1.5 mm çapında 10.3 m/s ve 2.5 mm çapında 12.1 m/s olarak elde edilmiştir (Şekil 3.58).

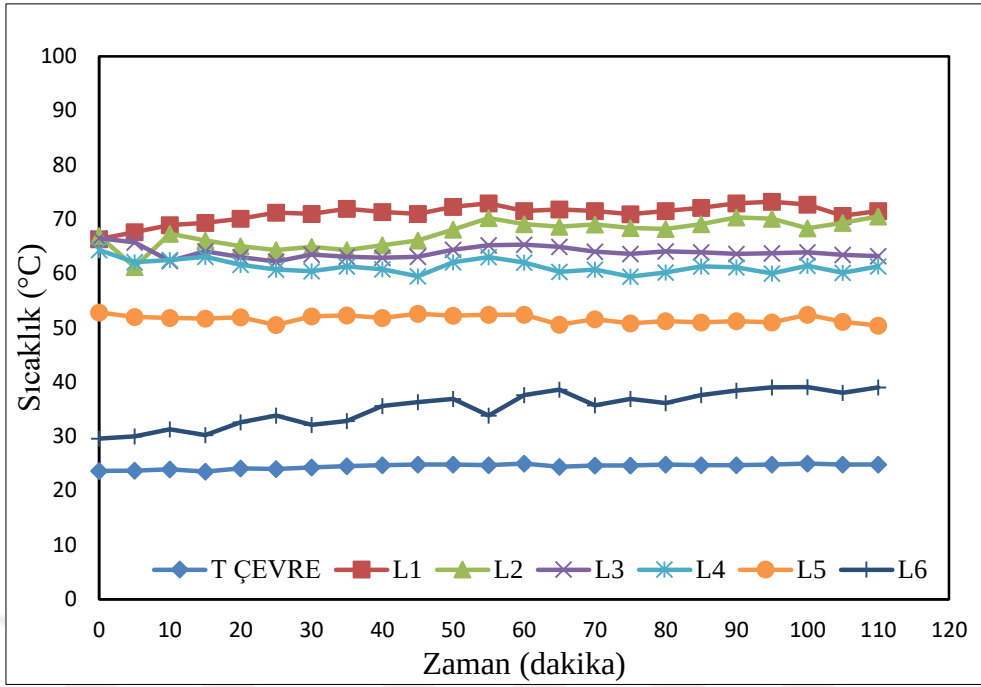
Süt kurutma işleminde standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu karşılaştırıldığında, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kullanılan pervanelerin kurutma havası sıcaklıklarını ve cam sıcaklıklarını etkilediği gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma ve ürün odası cam sıcaklıklarının, standart püskürtmeli kurutucudaki cam sıcaklıklarından daha düşük olduğu görülmüştür. Kurutma odasında kullanılan pervaneler kurutucudaki hava ve cam sıcaklıklarını düşürmüştür. Bu da geliştirilmiş kurutucuda süt tozu parçacıklarının cam duvarlara ve birbirlerine yapışmasını görünür şekilde azaltmıştır. Bu şekilde geliştirilmiş kurutucuda daha verimli, kaliteli ve düşük çapa sahip süt tozları elde edilmiştir.



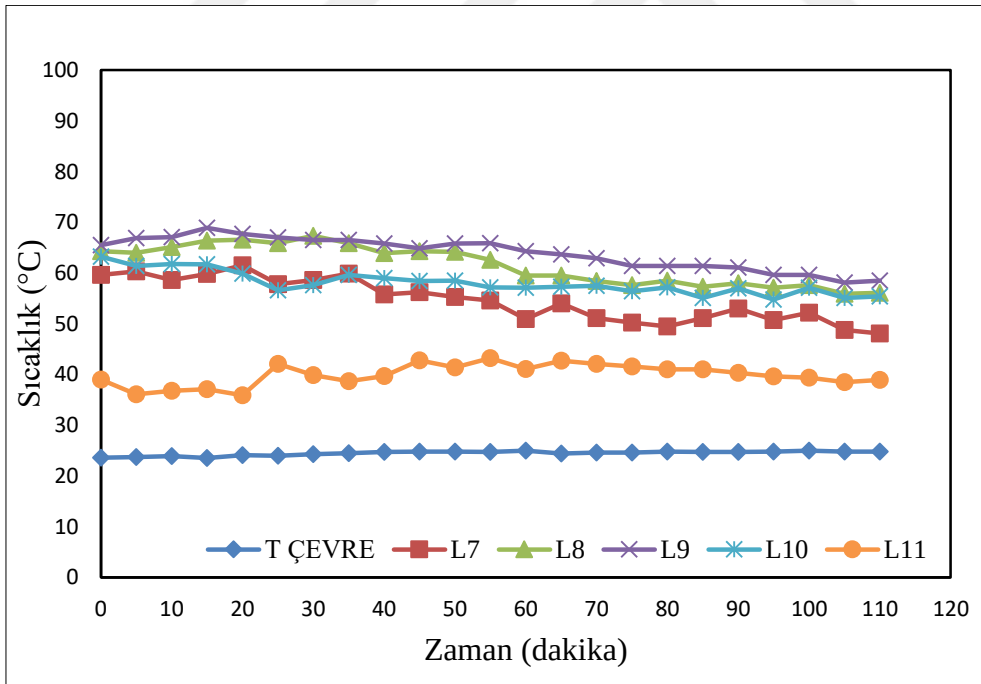
Şekil 3.52. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



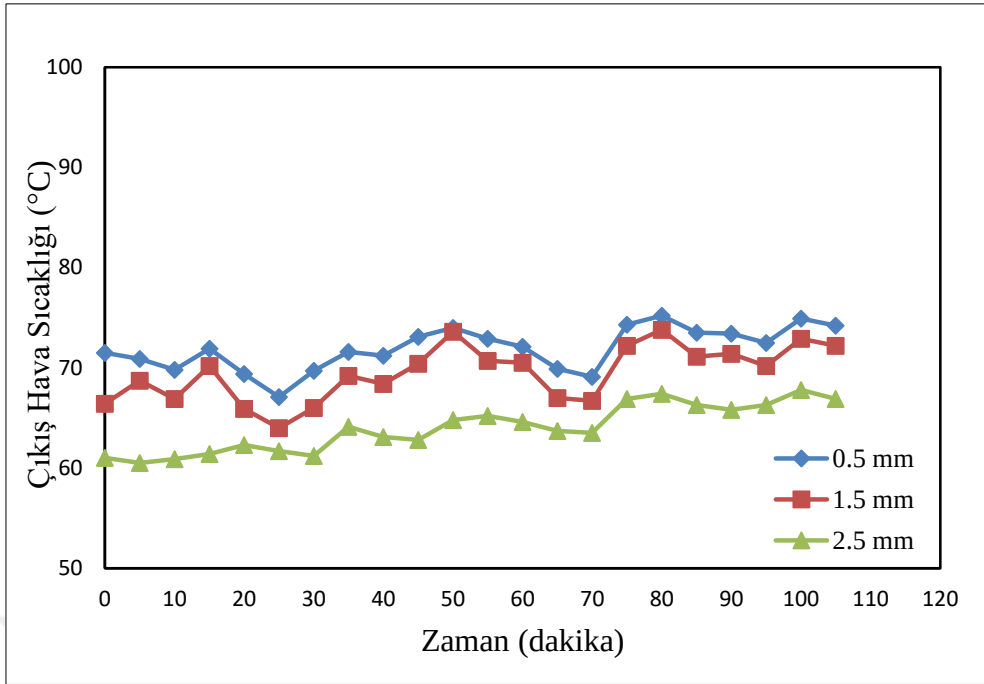
Şekil 3.53. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



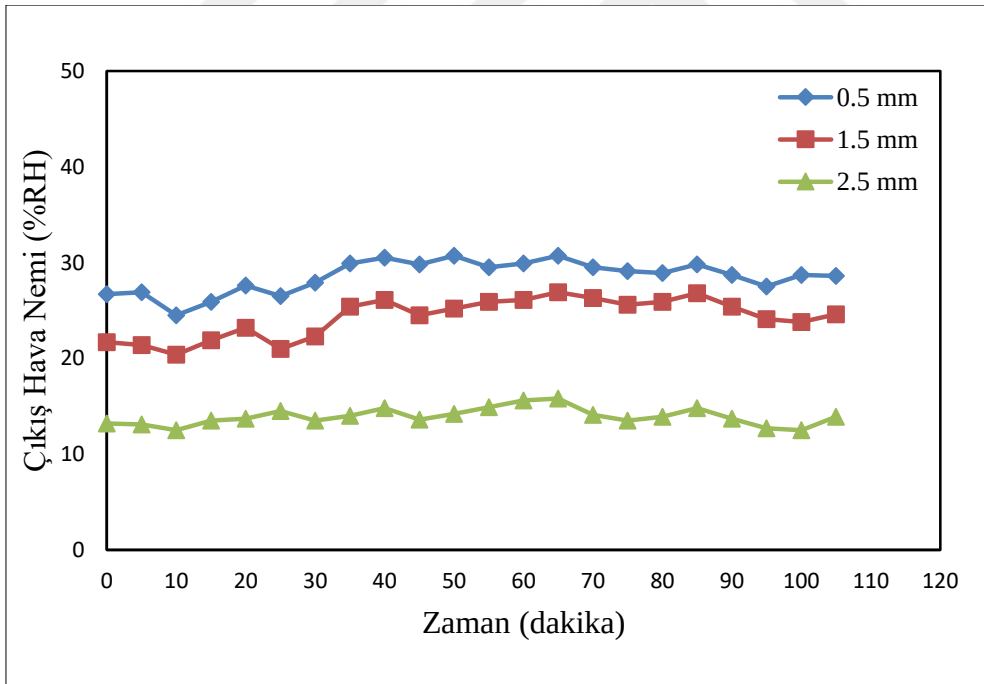
Şekil 3.54. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



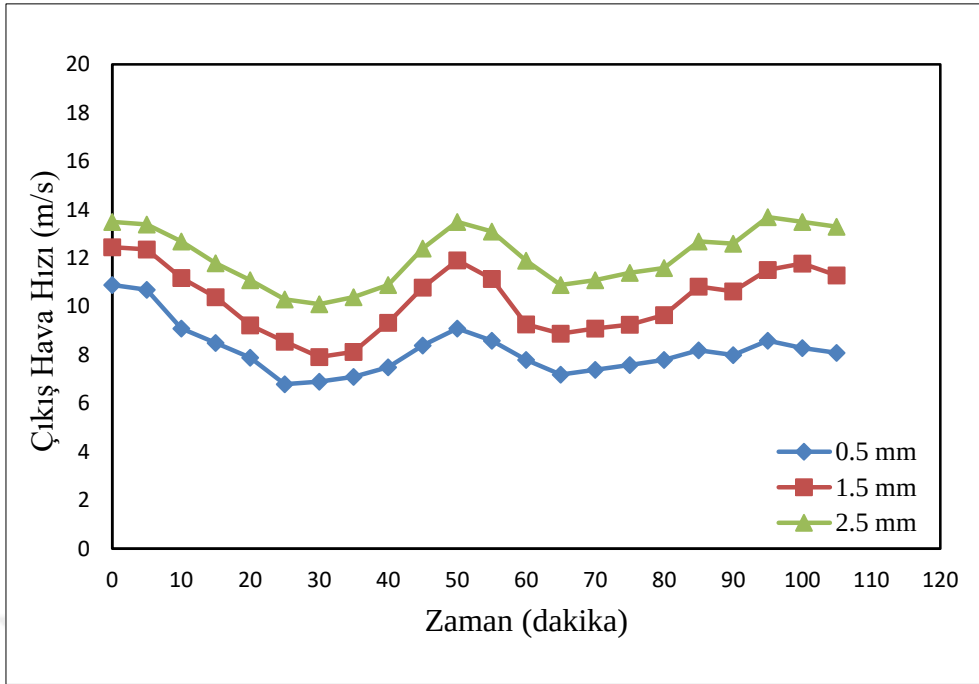
Şekil 3.55. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Süt tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):140 °C)



Şekil 3.56. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çıkış hava sıcaklığının zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):140 °C)



Şekil 3.57. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çıkış hava neminin zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):140 °C)



Şekil 3.58. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda çıkış hava hızının zamanla değişimi
(Süt tozu, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$): 140 °C)

3.5. Standart ve Geliştirilmiş Püskürtmeli Kurutucuda Domates Suyu Kurutulması Sırasındaki Analizler

Domates suyunun maltodekstrin ilave edilmeden yapılan kurutma işlemi sırasında 1000 ml'lik domates suyu 3 farklı nozul çapı kullanılarak püskürtmeli kurutucuda kurutulmuştur.

Kurutma işlemi süresince, 170 °C sıcaklıkta verilen giriş havasının kurutma ve ürün odası içerisinde hareket ederken hava sıcaklıklarının ve neminin değişimi incelenmiştir. Domates suyunun maltodekstrin ilave edilmeden kurutulmasında, domates suyunun standart püskürtmeli kurutucuda yoğun olarak cam yüzeyine yapıştığı görülmüştür. Benzer şekilde yapılan geliştirilmiş kurutucudaki domates suyunun kurutulması işleminde cam yüzeyinde yapışma olduğu ancak meydana gelen yapışma miktarının standart püskürtmeli kurutucuya göre daha az olduğu görülmüştür. Geliştirilmiş kurutucuda toz ürün miktarında standart kurutucuya göre çalışma şartlarına bağlı olarak %20-25 arasında bir ürün artışı olduğu görülmüştür. Ancak, iyi bir verim ile toz ürün elde etmek amacıyla domates suyuna %25 oranında taşıyıcı olarak maltodekstrin ilave edilerek deneyler yapılmıştır.

Aşağıdaki şekillerde 1.5 mm çapında nozul kullanılarak ve giriş havasının sıcaklığı 170 °C'de sabit tutularak standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucudaki hava sıcaklıkları, nemi, hızı ve cam sıcaklıklarının analizleri yapılmıştır. Standart püskürtmeli kurutucuda

kurutma ve ürün odası içerisindeki hava ve cam sıcaklıkları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Kurutma odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, atomizere en yakın nokta olan 15. cm’de (T_3) 109.2 °C, 30. cm’deki T_2 ’de 104.7 °C ve atomizere en uzak nokta olan 45. cm’de (T_1) 102.6 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.59). Ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları ise, egzoz borusuna uzaklığı 20. cm’de bulunan T_4 noktasında 102.3 °C ve 32. cm’de bulunan T_5 noktasında 93 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.60). Ayrıca atomizere en yakın noktadaki kurutma odasının cam sıcaklığı 87.4 °C ölçülmüştür (Şekil 3.61-Şekil 3.62).

Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda aynı şekilde 1.5 mm nozul çapı ve 170 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında, kurutma ve ürün odası içerisindeki hava ve cam sıcaklıkları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Kurutma odasındaki ortalama hava sıcaklıkları, atomizere yakınlığı 15. cm’de bulunan T_3 noktasında 106.8 °C, 30. cm’deki T_2 ’de 102.8 °C ve atomizere uzaklığı 45. cm’de olan T_1 noktasında ise 97.8 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.66). Ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T_4 noktasında 99.2 °C ve T_5 noktasında 91.2 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.67). Kurutma odasında atomizere en yakın noktadaki cam sıcaklığının 83 °C olduğu görülmüştür (Şekil 3.68-Şekil 3.69).

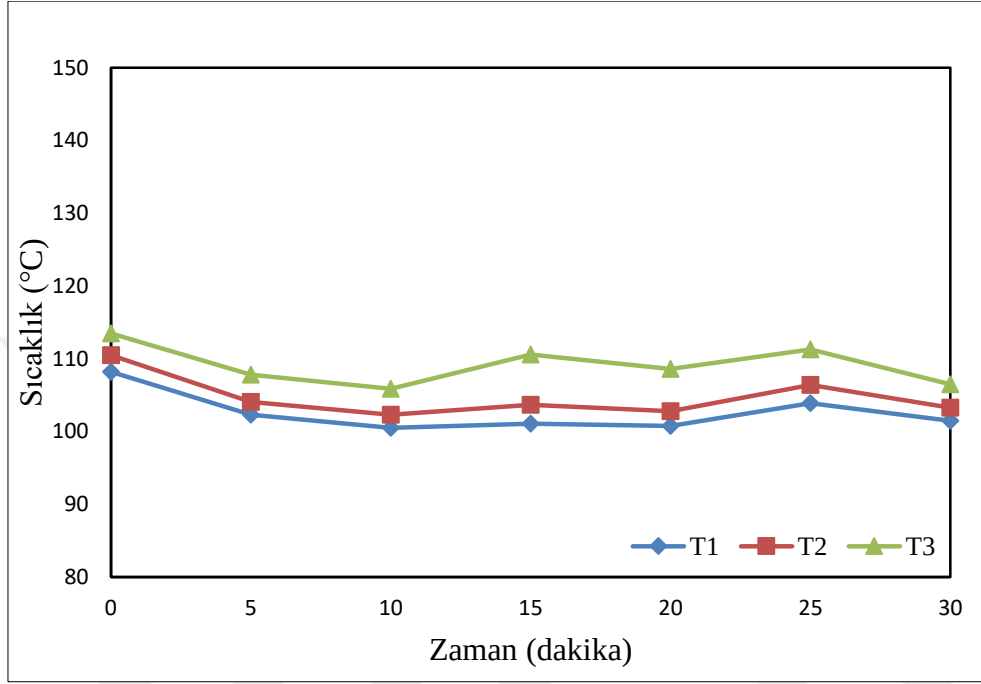
Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu karşılaştırıldığında, odaların içerisindeki hava ve cam sıcaklığının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Fakat, geliştirilmiş kurutucuda kurutma ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının standart kurutucudan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş kurutucuda, kurutma ve ürün odasının cam sıcaklıkları standart kurutucudakinden daha düşük çıkmıştır. Geliştirilmiş kurutucuda kurutma odasında kullanılan pervanelerin hava ve cam sıcaklıklarını etkilediği gözlemlenmiştir. Pervanelerin oda içerisindeki havayı dağıtarak cam sıcaklığını düşürmeye yönelik etkisi olmuştur. Bu da kurutma sırasında toz parçacıklarının birbirlerine ve duvarlara yapışmasını oldukça engellemiştir.

Kurutucudan çıkan havanın ortalama sıcaklığı, standart kurutucuda 81.6 °C iken geliştirilmiş kurutucuda 76.5 °C’dir (Şekil 3.63). Standart püskürtmeli kurutucuda çıkış havasının nemi ve hızı sırasıyla 19.2 %RH ve 12.59 m/s’dir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ise çıkış havasının nemi ve hızı sırasıyla 24.5 %RH ve 18 m/s’dir (Şekil 3.64 - Şekil 3.65).

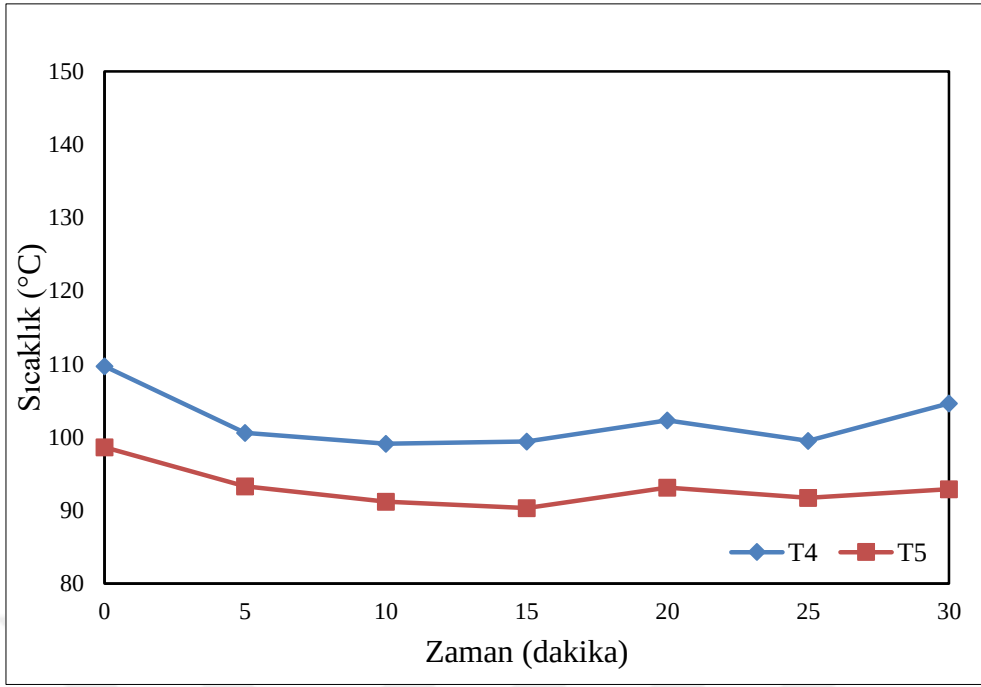
Nozul çapının 0.5 mm ve 2.5 mm olması durumunda kurutucu çıkış hava sıcaklıklarının kısa bir zaman aralığında dengeye geldiği görülmüştür. Nozul çapının 0.5 mm olması ile 2.5 mm olması durumunda çıkış hava sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu ve 0.5 mm çapında nozul kullanıldığında çıkış hava sıcaklığının ve neminin biraz daha yüksek olduğu

belirlenmiştir. Çıkış hava hızının ise 0.5 mm çapında nozul kullanıldığında daha düşük olduğu görülmüştür.

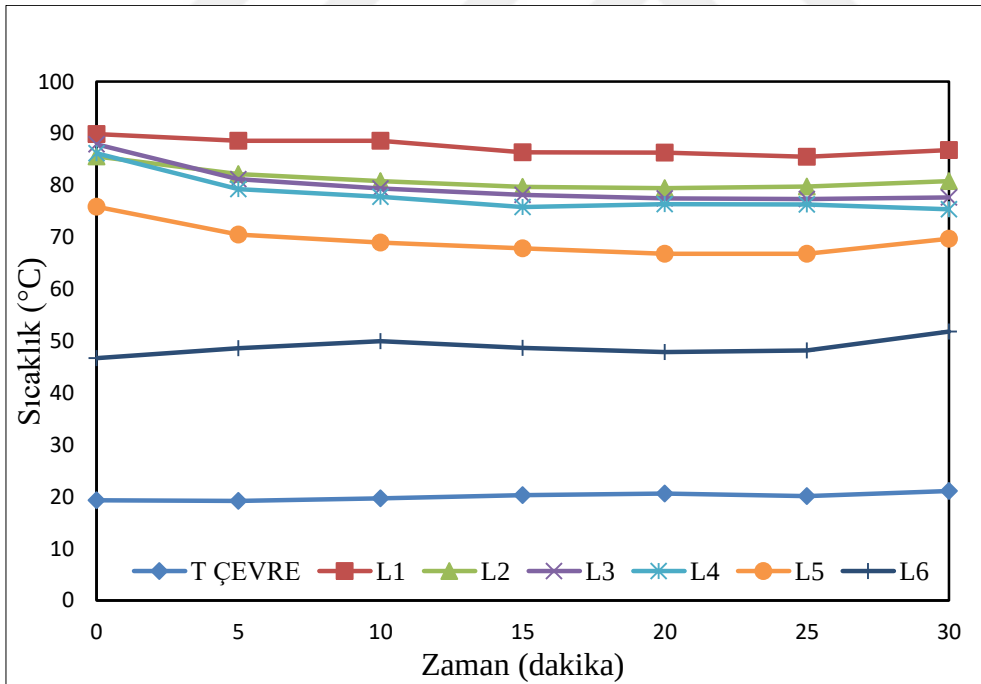
Buna göre domates suyunun kurutulmasında %25 maltodekstrin eklenerek standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen veriler aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



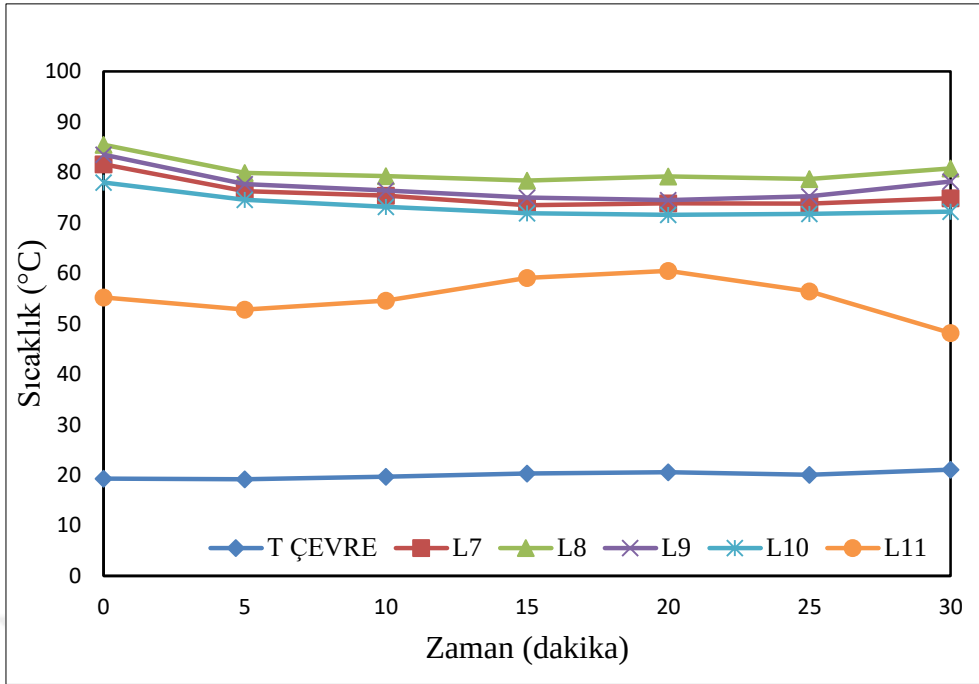
Şekil 3.59. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



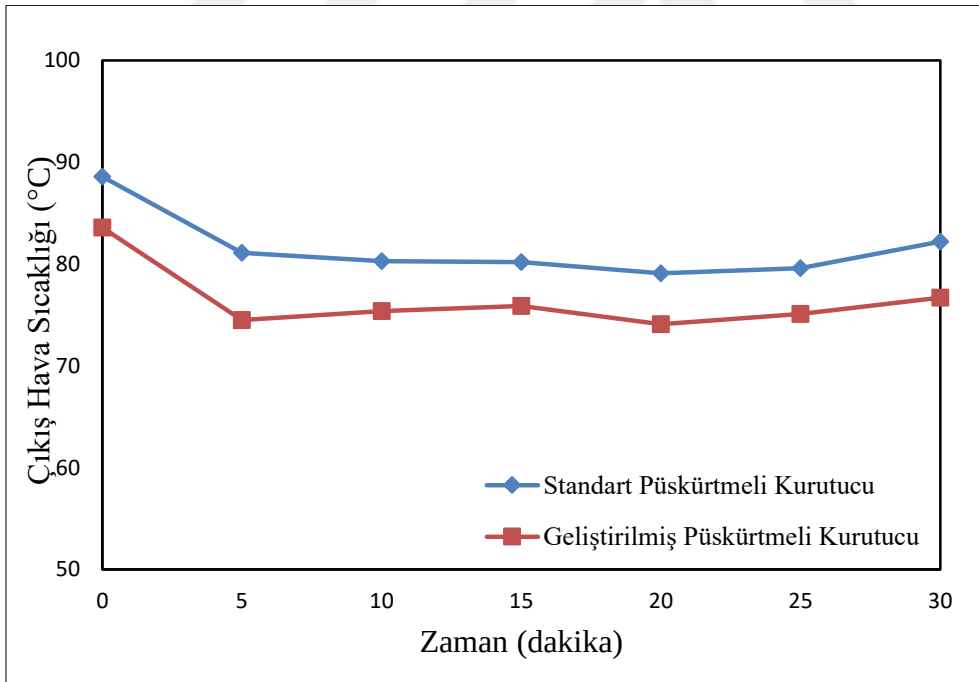
Şekil 3.60. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



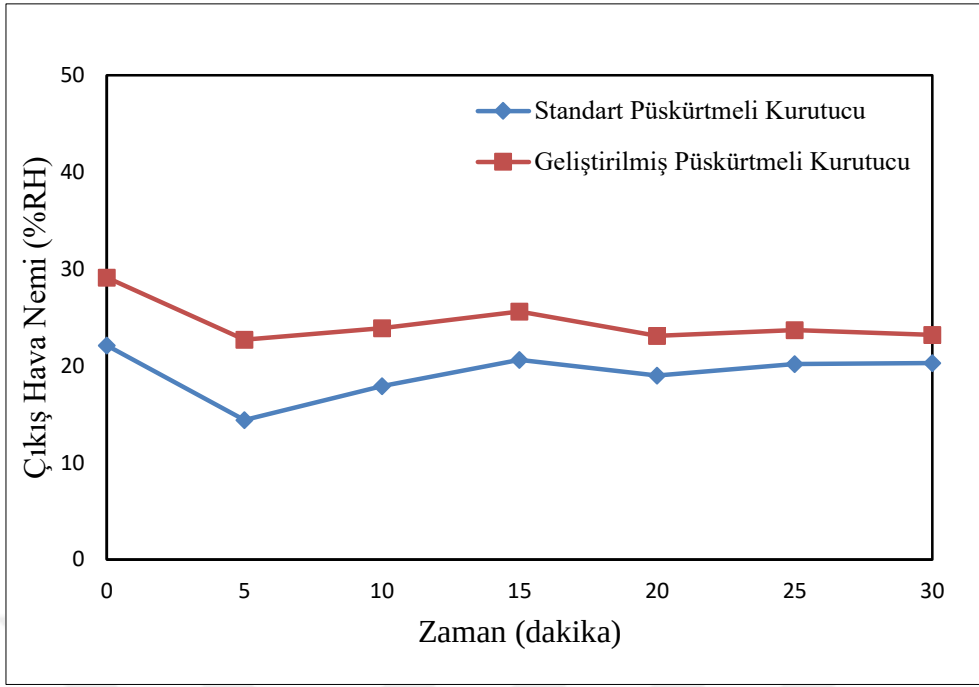
Şekil 3.61. Standart püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



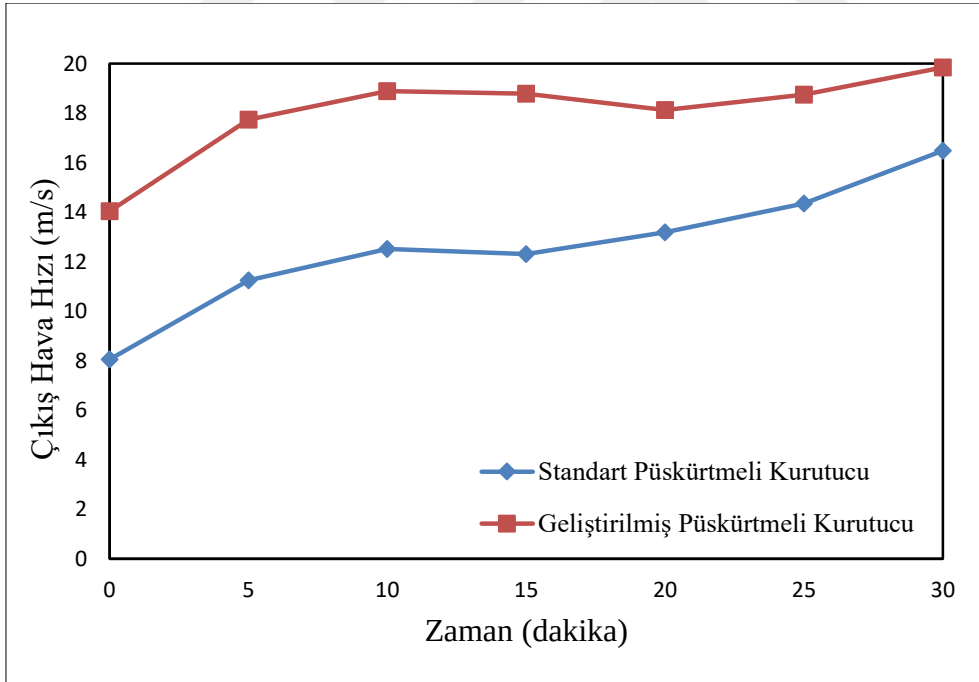
Şekil 3.62. Standart püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



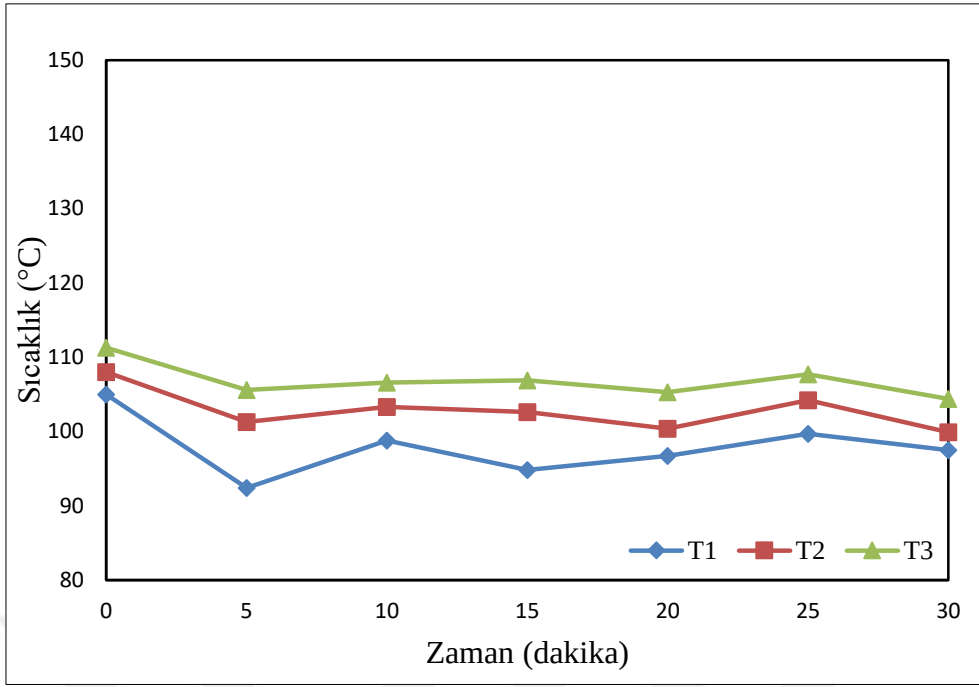
Şekil 3.63. Çıkış hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



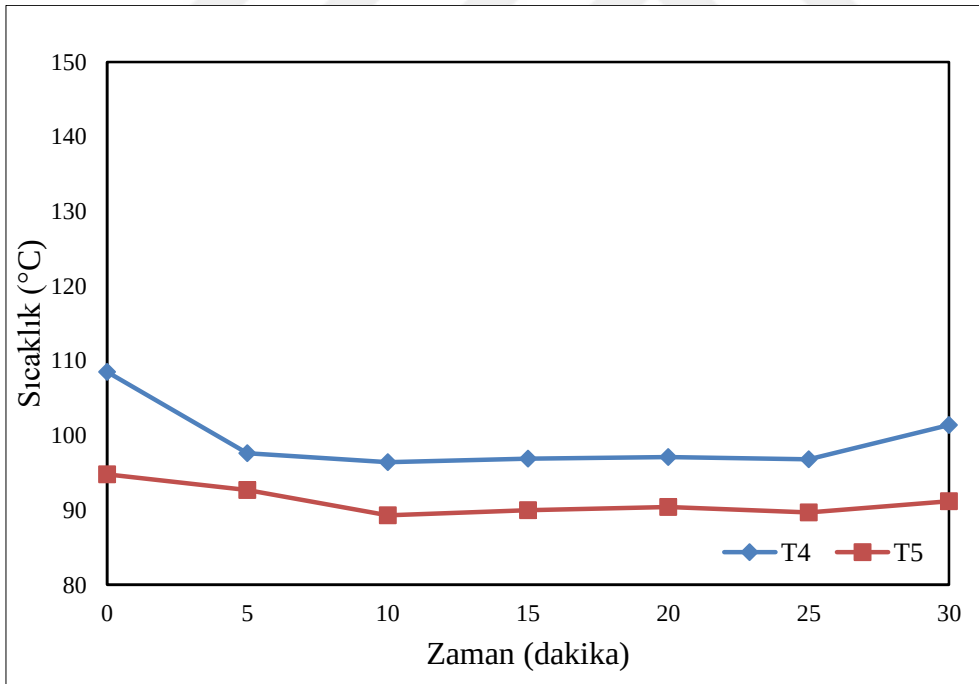
Şekil 3.64. Çıkış hava neminin zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



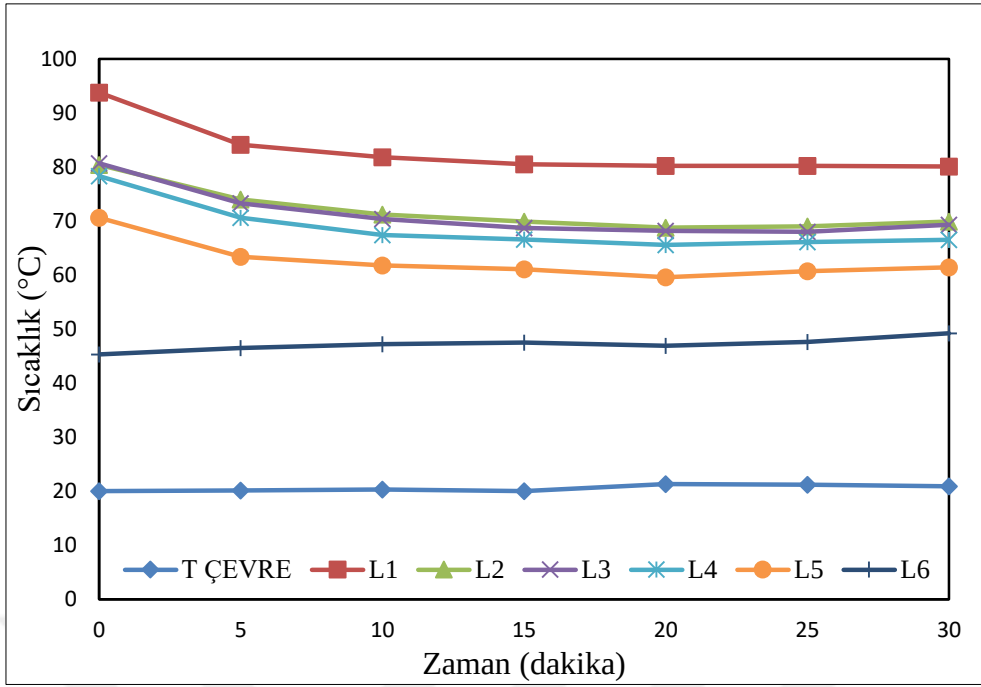
Şekil 3.65. Çıkış hava hızının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{\text{hava,g}}$):170 °C)



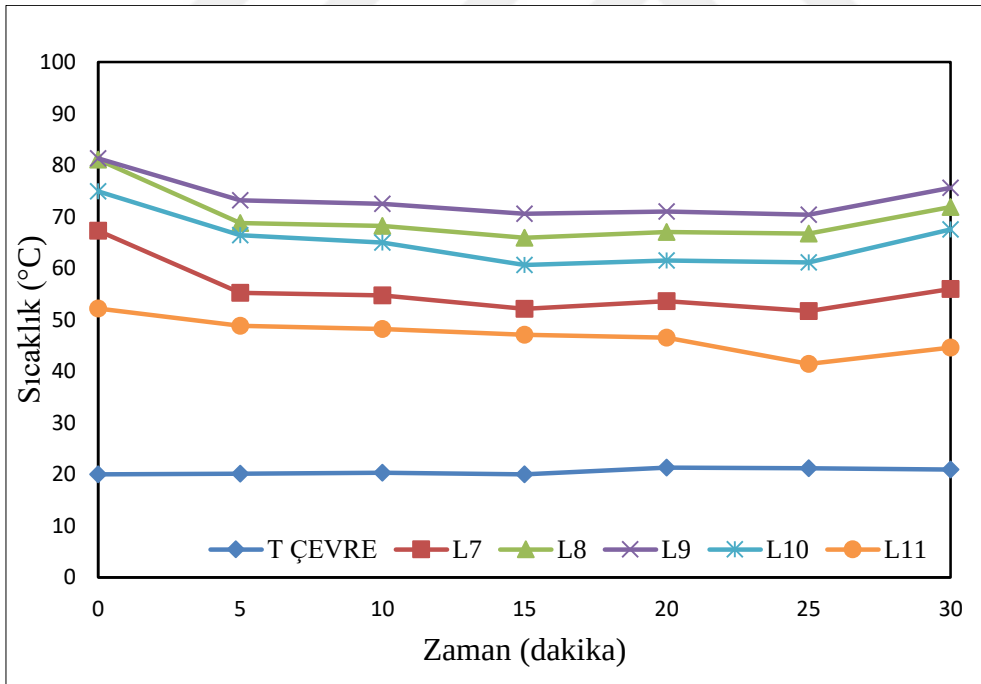
Şekil 3.66. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



Şekil 3.67. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



Şekil 3.68. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)



Şekil 3.69. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda ürün odasındaki cam sıcaklıklarının zamanla değişimi (Domates tozu, Nozul çapı: 1.5 mm, Giriş hava sıcaklığı ($T_{hava,g}$):170 °C)

3.6. Standart ve Geliştirilmiş Püskürtmeli Kurutucuda Elma Suyu Kurutulması Sırasındaki Analizler

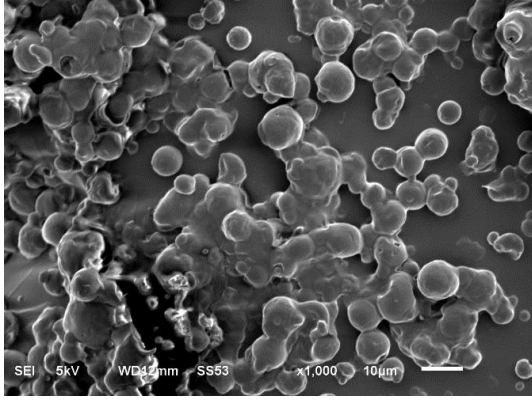
Elma suyuna maltodekstrin ilave edilmeden standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucularda kurutulması farklı nozul çapları ve giriş sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda taşıyıcısız olarak elma suyunun tüm nozul çapları ve sıcaklıklarda standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutma işleminde cam yüzeyine yapıştığı gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda yapışmanın %10 civarında daha az olduğu görülmüştür. Ancak, taşıyıcısız elma suyundan istenilen verimle toz ürün eldesi için taşıyıcı olarak belli oranlarda maltodekstrin katılarak deneyler yapılmıştır.

Buna göre elma suyuna çeşitli miktarlarda maltodekstrin katılarak elde edilen tozlar incelenmeye çalışılmıştır. Toplam hacim 1 litre olacak şekilde elma suyuna %25, %60 ve %80 oranlarında maltodekstrin eklenerek deneyler yapılmıştır. Elma suyu içerdiği şeker miktarının fazlalığından dolayı toz ürün şeklinde kurutulması çok zor olan meyvelerden biridir. Bu nedenle, elma suyundan toz elde edebilmek için maltodekstrin oranının çok önemli olduğu görülmüştür. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda yapılan deneylerde elma suyuna %25 maltodekstrin ilavesinin toz ürün eldesinde fazla bir değişiklik sağlamadığı görülmüştür. %60 maltodekstrin ilavesinde toz ürün miktarında bir miktar artış görülmüştür. Fakat %80 maltodekstrin ilave edildiğinde elma tozu miktarının daha fazla arttığı görülmüştür. İlave edilen maltodekstrin oranının artmasıyla elde edilen toz ürünün daha açık bir renkte olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde, elma suyuna yüksek oranda maltodekstrin katılması gerektiği görülmüştür. Deneylerde kullanılan elma suyunun sıcaklığı 18.1 °C olarak ölçülmüştür.

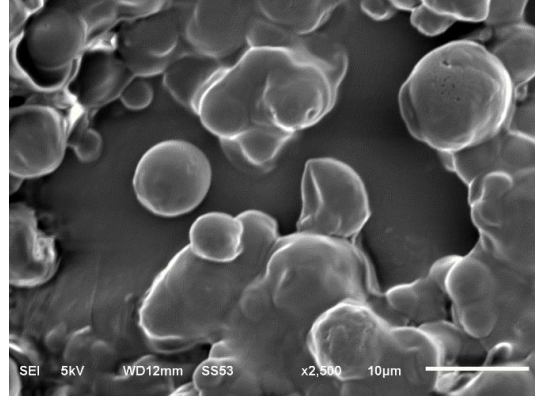
3.7. Parçacık Morfolojisi

3.7.1. Toz Ürünlerin SEM Görüntüleri

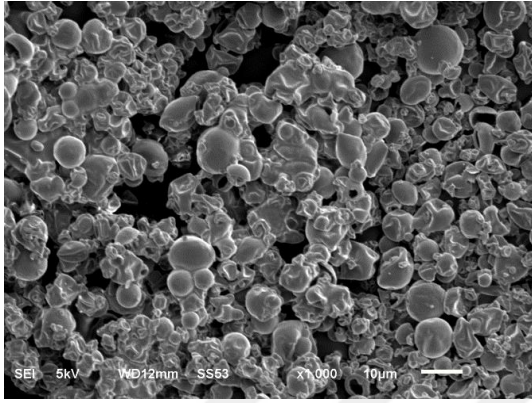
0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çaplarında kullanılan nozullar için farklı hava giriş sıcaklıklarında standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen süt tozlarının SEM (Scanning Electron Microscopy) mikrografları Şekil 3.70, Şekil 3.71 ve Şekil 3.72’de gösterilmiştir. Toz parçacıklarının SEM görüntüleri 1000x ve 2500x büyütülerek alınmıştır. SEM görüntüsü alınarak toz parçacıklarının morfolojik yapısı ve taneciklerin çapları belirlenmiştir. Şekillerden de anlaşıldığı gibi, püskürtmeyle kurutma sonucunda genellikle küresel parçacıklar elde edilmiştir.



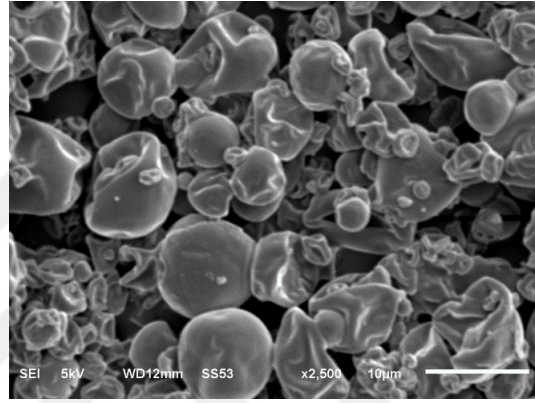
(a)



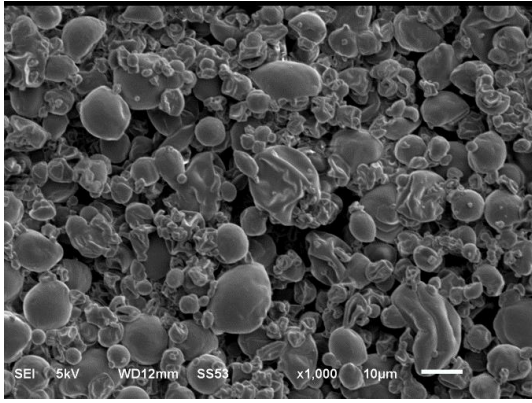
(b)



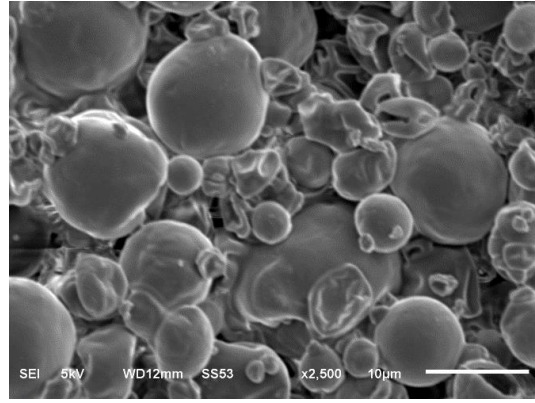
(c)



(d)

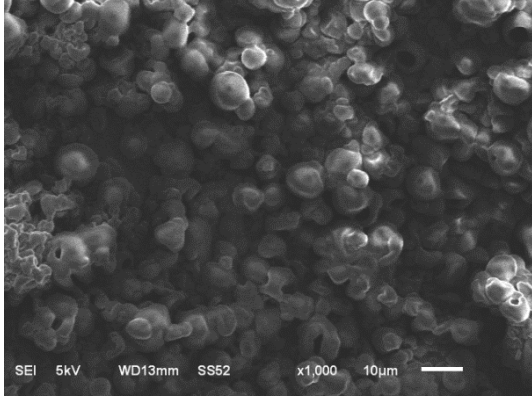


(e)

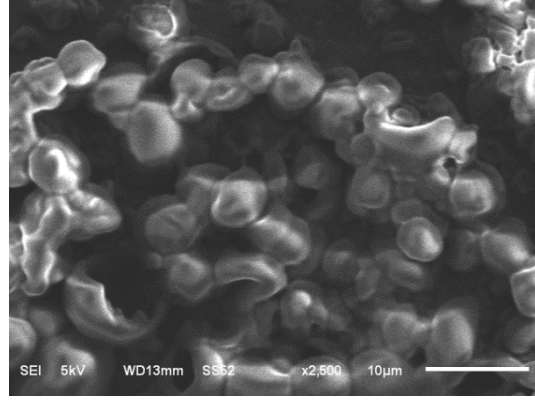


(f)

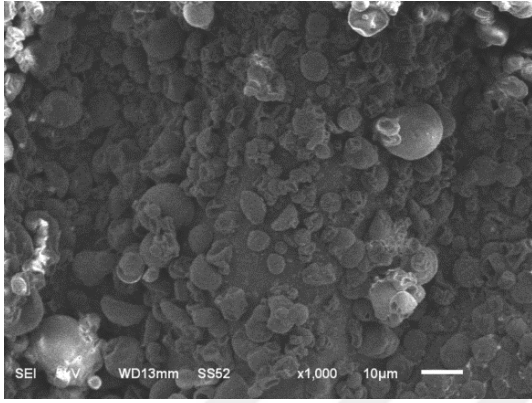
Şekil 3.70. Standart püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x; c) 170 °C, 1000x; d) 170 °C, 2500x; e) 200 °C, 1000x; f) 200 °C, 2500x



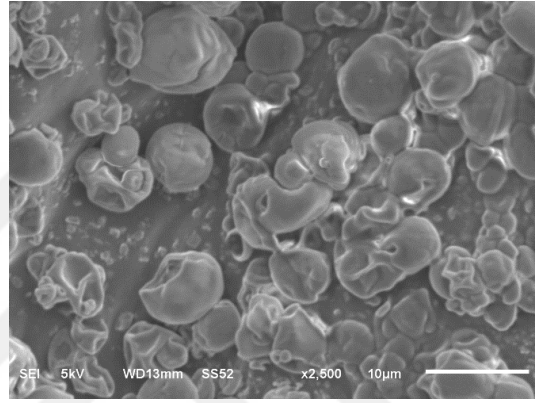
(a)



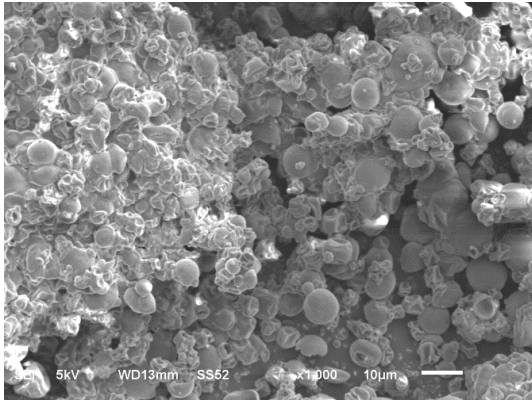
(b)



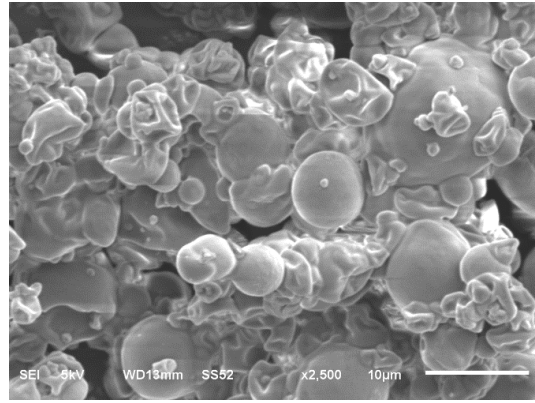
(c)



(d)

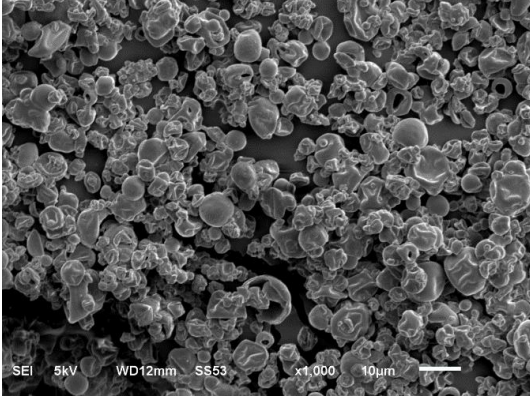


(e)

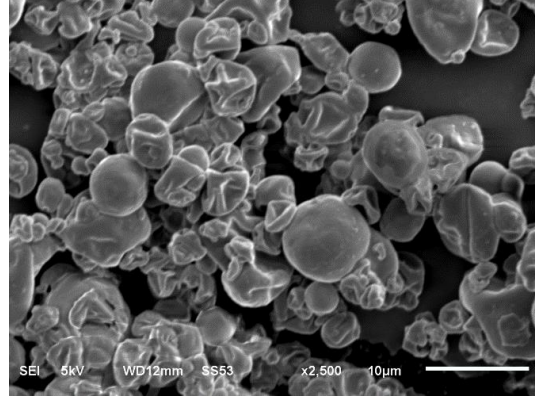


(f)

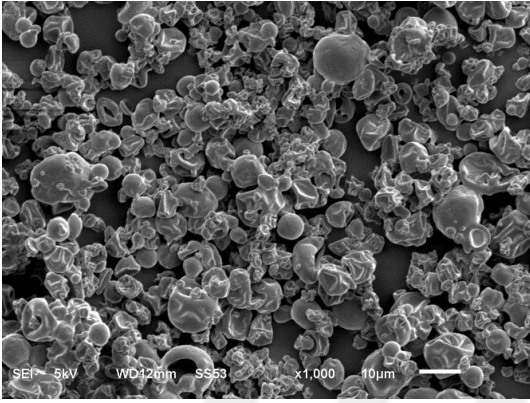
Şekil 3.71. Standart püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x; c) 170 °C, 1000x; d) 170 °C, 2500x; e) 200 °C, 1000x; f) 200 °C, 2500x



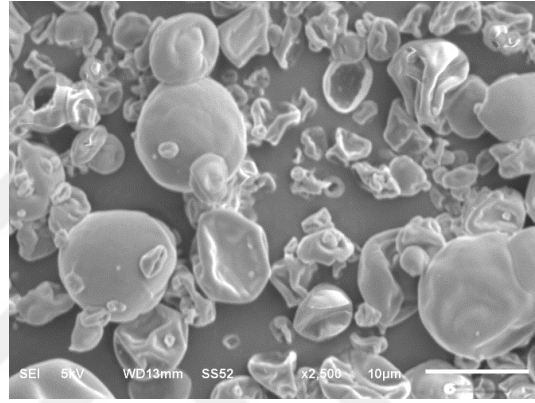
(a)



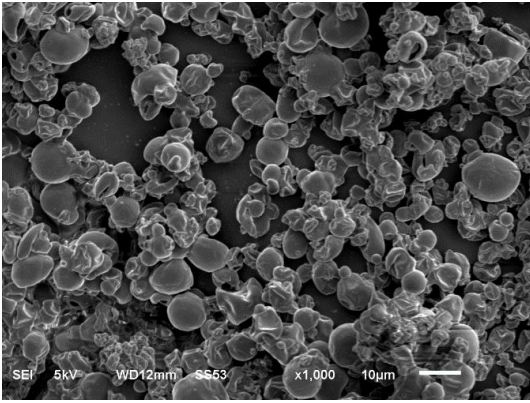
(b)



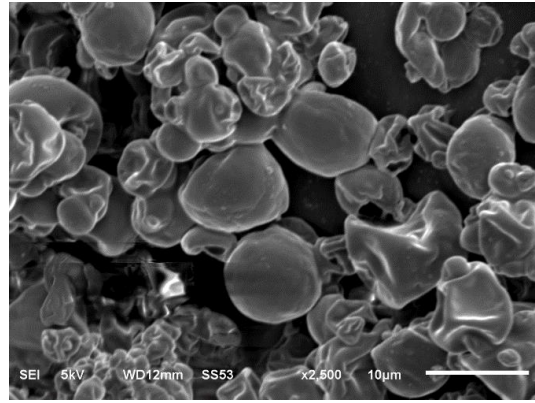
(c)



(d)



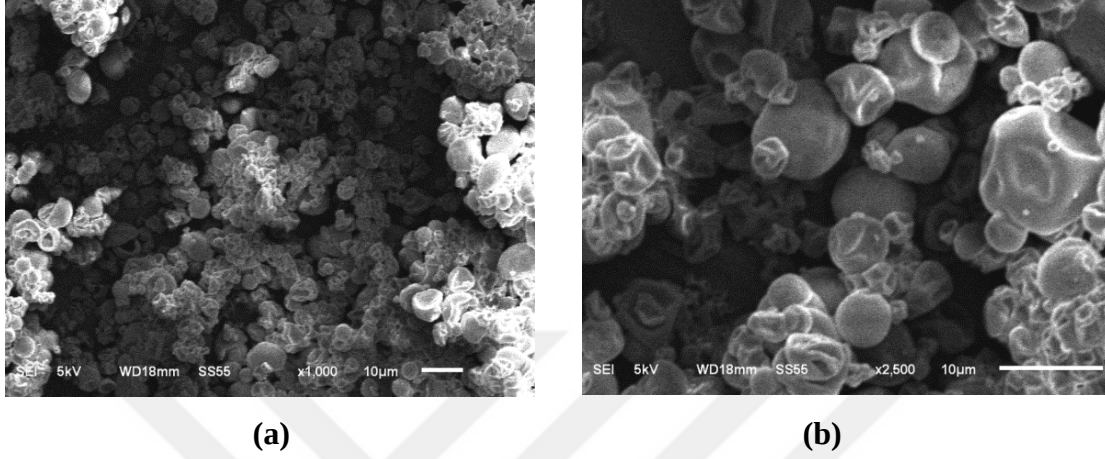
(e)



(f)

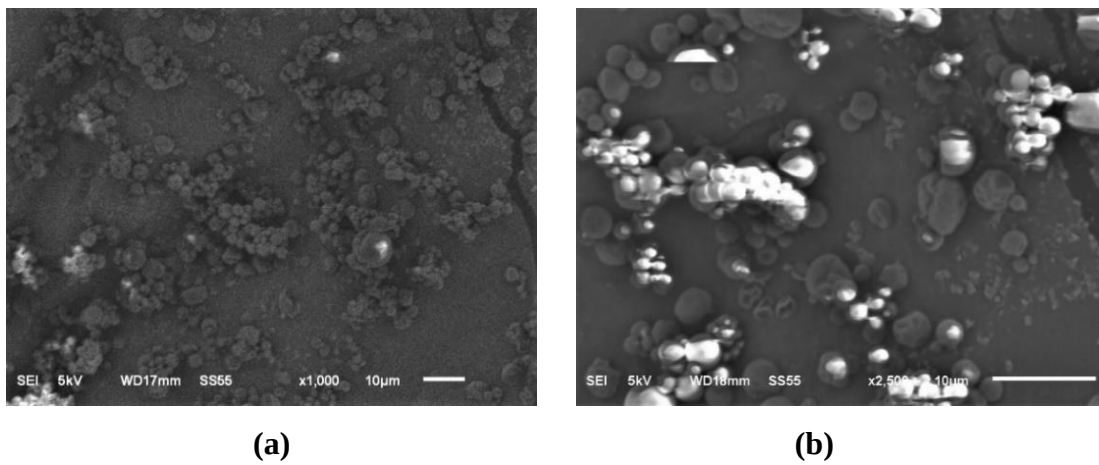
Şekil 3.72. Standart püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x; c) 170 °C, 1000x; d) 170 °C, 2500x; e) 200 °C, 1000x; f) 200 °C, 2500x

Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen ürünlerin SEM görüntüleri alınmış ve seçilen örnek değerler için görüntüler aşağıda verilmiştir. Buna göre 1.5 mm nozul çapında ve 140 °C giriş hava sıcaklığında, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutularak elde edilen süt tozlarının parçacık morfolojisi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.73).

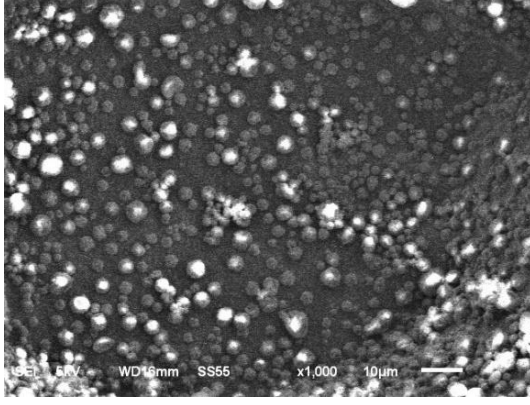


Şekil 3.73. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında elde edilen süt tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 140 °C, 1000x; b) 140 °C, 2500x

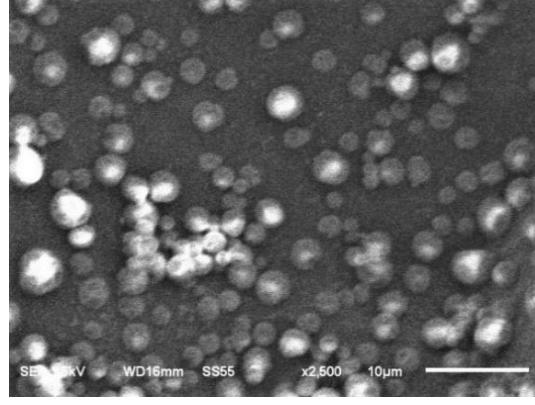
Benzer şekilde standart ve geliştirilmiş kurutucunun belli nozul çapları sıcaklıkları için seçilen örnek SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. Buna göre 1.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında, %25 maltodekstrin ilave edilerek standart ve püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozu parçacıklarının morfolojisi aşağıdaki Şekil 3.74 ve Şekil 3.75'te verilmiştir.



Şekil 3.74. Standart püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen domates tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x



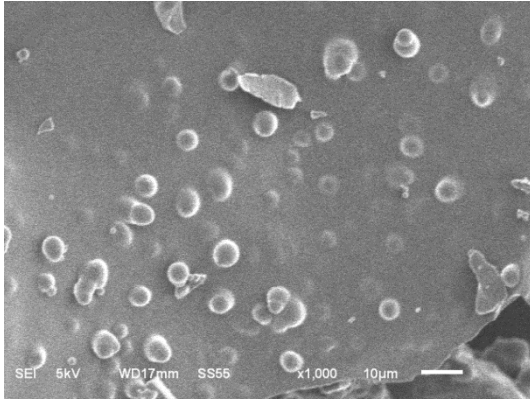
(a)



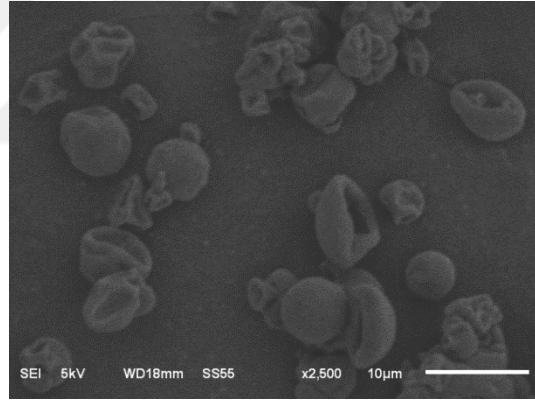
(b)

Şekil 3.75. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 1.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen domates tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x

Aynı şekilde 2.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında, %80 maltodekstrin ilave edilerek standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen elma tozu parçacıklarının morfolojisi aşağıdaki Şekil 3.76 ve Şekil 3.77’de verilmiştir.

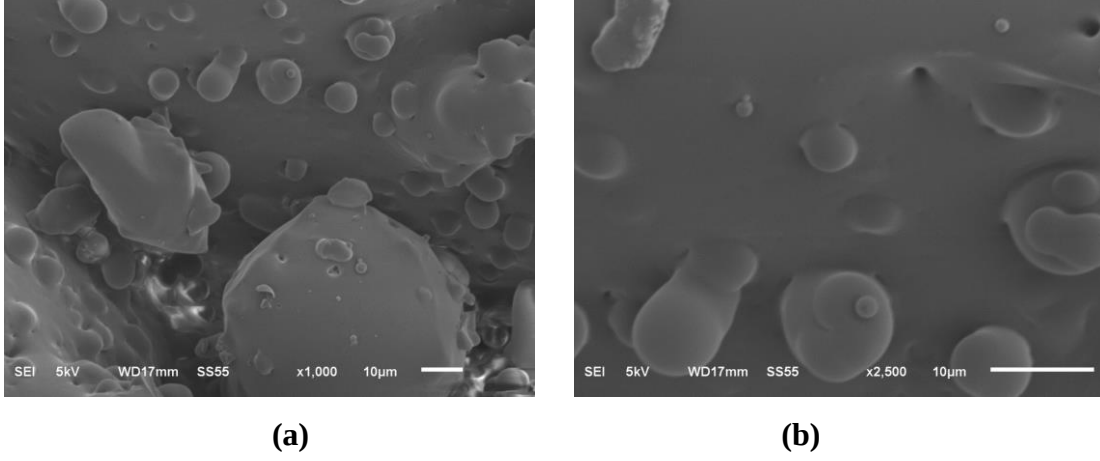


(a)



(b)

Şekil 3.76. Standart püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen elma tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x



Şekil 3.77. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında ve 170 °C giriş hava sıcaklığında elde edilen elma tozu parçacıklarının SEM görüntüleri a) 170 °C, 1000x; b) 170 °C, 2500x

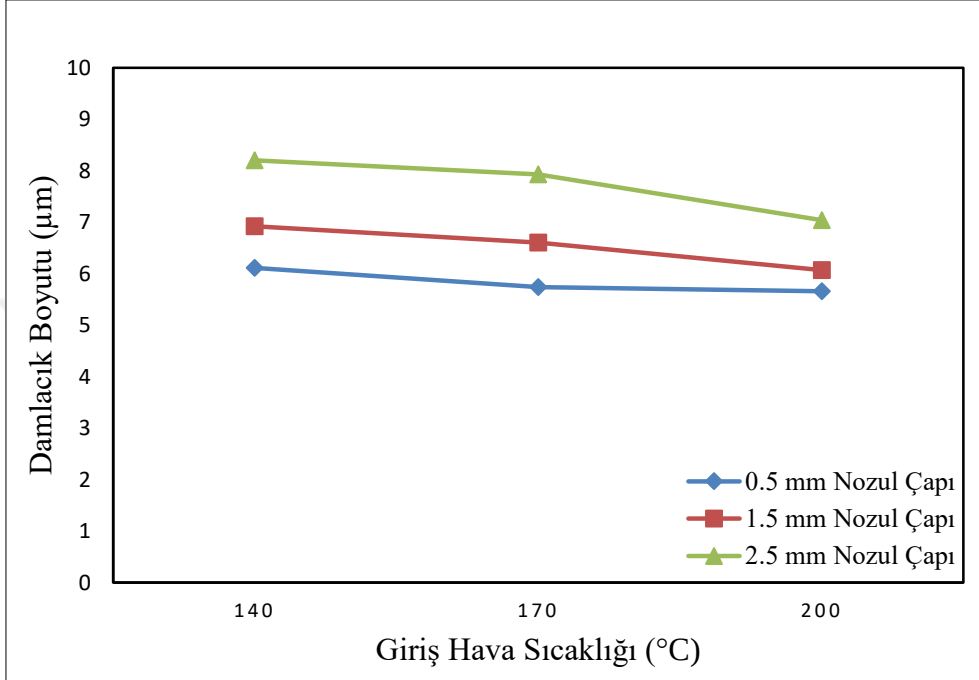
Şekillerden püskürtülerek kurutulmuş süt tozu parçacıklarının morfolojisi üzerinde nozul çapının ve giriş hava sıcaklığının etkisi görülmüştür. Buna göre sıcaklıkların ve nozul çaplarının artmasıyla tanecikler üzerinde pürüzlülük ve kırışıklıklar gözlemlenmiştir. Kuruma sırasında parçacıkların duvarında kabuklu bir tabaka oluştuğu ve nem kaybına bağlı olarak parçacık duvarının buruşuk bir hale geldiği görülmüştür.

3.7.2. Toz Ürün Damlacık Boyutları

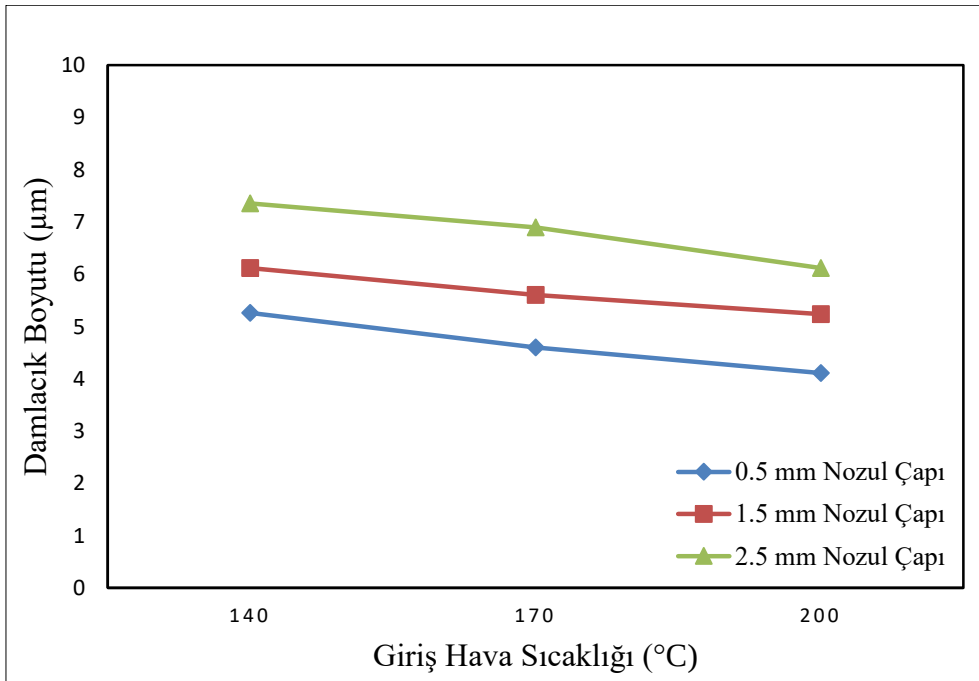
Püskürtmeli kurutucularda elde edilen ürünlerin damlacık boyutlarının giriş hava sıcaklığına göre değişimi aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekillerden, kullanılan nozul çapının ve giriş hava sıcaklığının damlacık boyutu üzerinde önemli etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır. Giriş hava sıcaklığının artması, damlacık içerisinde mevcut olan nemin azalmasına neden olacaktır. Bu da, toz parçacıklarının boyutunu küçültecektir.

Standart püskürtmeli kurutucuda kurutulan süt tozunun parçacık boyutu min. $T_{hava,g}:200$ °C’de elde edilmiştir. Elde edilen min. parçacık boyutları 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çaplarında sırasıyla 5.660 µm, 6.071 µm ve 7.038 µm olarak ölçülmüştür. Genel olarak standart püskürtmeli kurutucuda farklı nozul çapı ve giriş hava sıcaklığında kurutulan süt tozları ortalama 5.5 ile 8.5 µm arasında damlacık boyutlarına sahiptir (Şekil 3.78). Aynı şekilde geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutulan süt tozlarının $T_{hava,g}:200$ °C’de min. damlacık boyutları 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çaplarında sırasıyla 4.110 µm, 5.234 µm ve 6.117 µm olarak elde edilmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen damlacık boyutları ise ortalama 4 ile 7.5 µm arasındadır (Şekil 3.79).

Damlacık boyutlarının ortalama olarak 10 μm 'den düşük olduğu ve sonuçların literatür değerlerine uygun olduğu görölmüştür. Thybo vd. 2008, laboratuvar ölçekli püskürtmeli kurutucuda iki akışkanlı nozul kullanıldığında damlacık çaplarının 15 μm 'den daha az olduğunu belirtmişlerdir [134]. Ayrıca bu değerlerin değışen deney parametreleriyle değıştiği de belirtilmiştir.

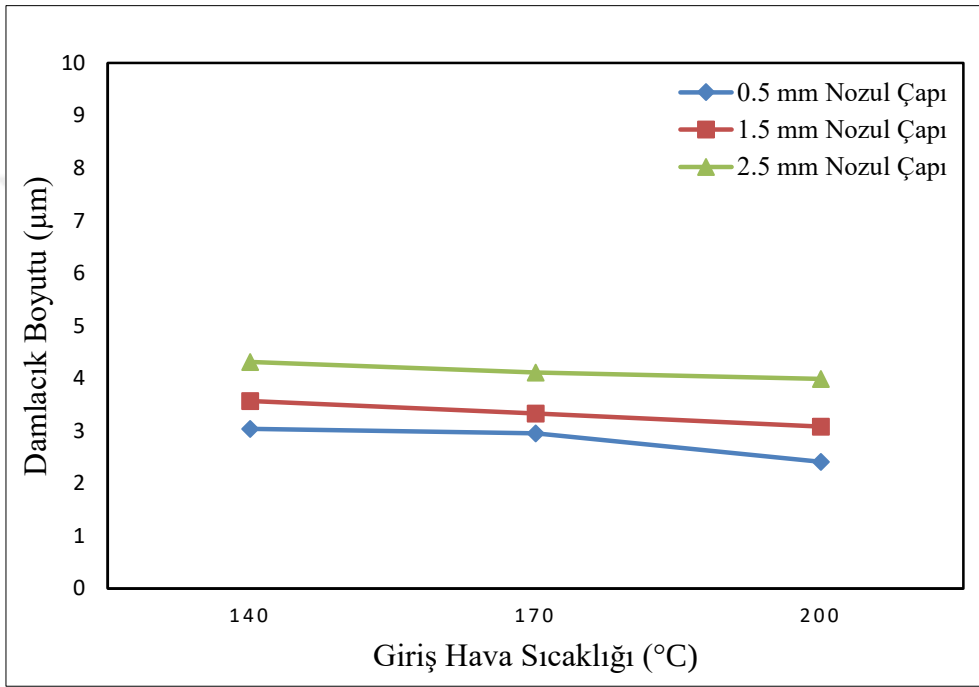


Şekil 3.78. Standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değışimi (Süt tozu)

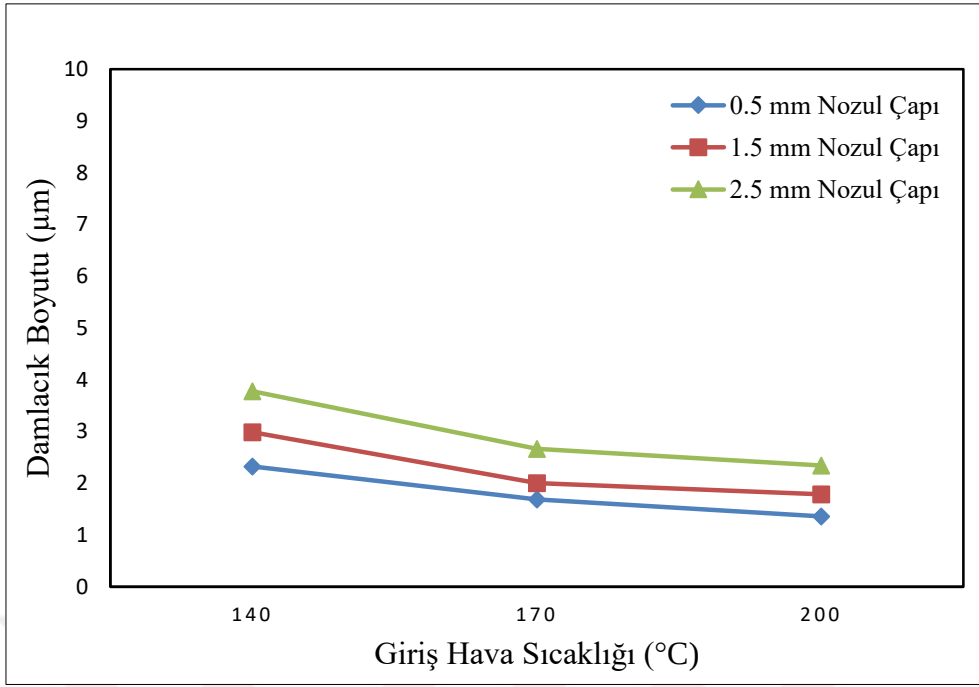


Şekil 3.79. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değışimi (Süt tozu)

Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda %25 maltodekstrin eklenerek kurutulan domates suyundan elde edilen domates tozu parçacıklarının damlacık boyutları Şekil 3.80 ve Şekil 3.81’de verilmiştir. Kullanılan parametrelerde standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozu parçacıklarının boyutları birbirlerine yakın ancak geliştirilmiş kurutucuda daha düşük boyutlara sahip toz parçacıkları elde edilmiştir. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozu parçacıklarının ortalama 1 μm ile 4.5 μm çapları arasında olduğu görülmüştür.



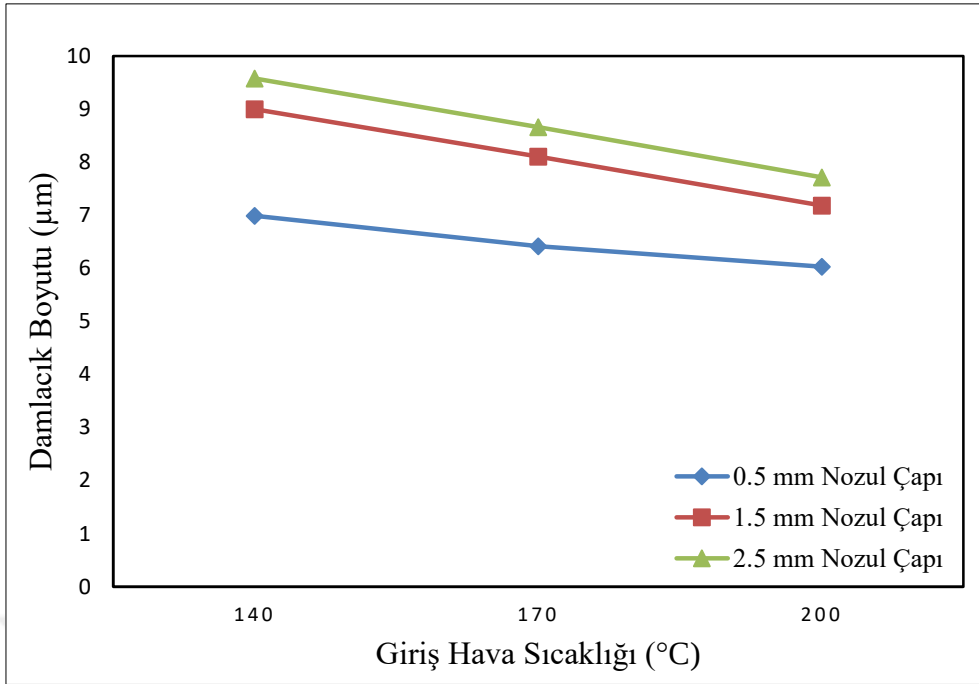
Şekil 3.80. Standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Domates tozu)



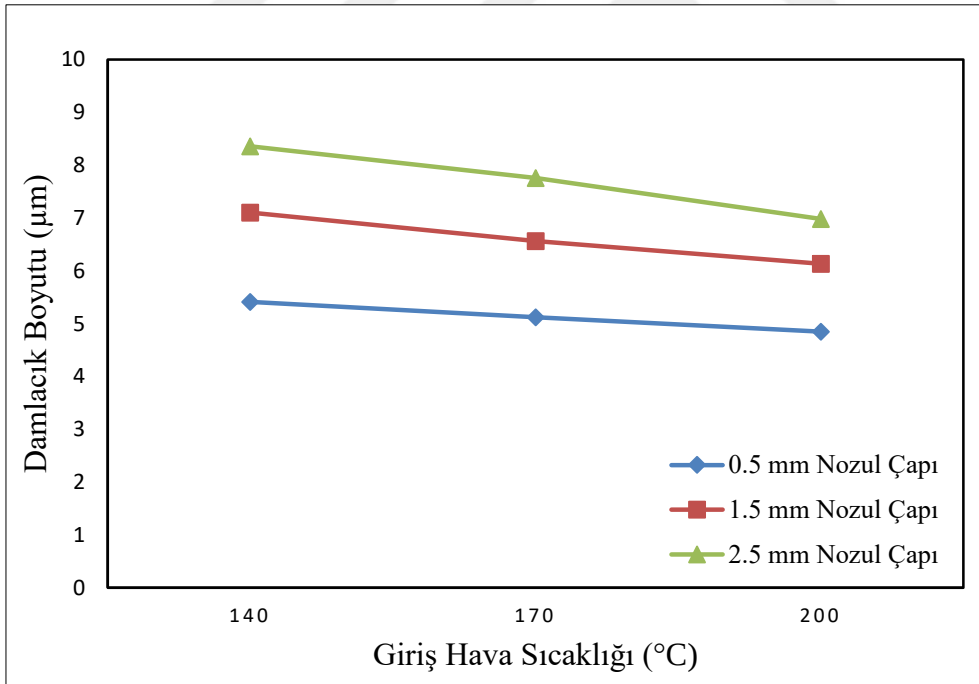
Şekil 3.81. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Domates tozu)

Elma suyu, standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda %80 maltodekstrin eklenerek kurutulmuştur. Elde edilen elma tozu parçacıklarının damlacık boyutları Şekil 3.82 ve Şekil 3.83'te verilmiştir. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen elma tozu parçacıkları ortalama çaplarının 4.5 µm ile 9.5 µm arasında olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlardan, genel olarak geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutulan sıvı ürünlerin tanecik çaplarının standart püskürtmeli kurutucuda kurutulana göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.82. Standart püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Elma tozu)



Şekil 3.83. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çapı ve sıcaklıklara bağlı olarak damlacık boyutlarının değişimi (Elma tozu)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sıvı ürünlerin daha verimli kurutulması amacıyla yeni tip bir kurutma odası tasarlanmıştır. Bu amaçla kurutma odası içerisine atomizörden üflenene hava ile rahatlıkla dönebilecek pervaneler yerleştirilmiştir. Deneyler 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm nozul çaplarında ve 140 °C, 170 °C ve 200 °C sıcaklıklarında yapılmıştır. Sıvı ürün olarak süt, domates suyu ve elma suyu seçilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Deneylerde değişen parametrelerde kurutucuların ısı verimleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışma yapılan sıvıların tümünde kurutucunun ısı verimliliklerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Buna göre örnek olarak süt kurutma işleminde standart püskürtmeli kurutucuda giriş hava sıcaklığı 140 °C’de en yüksek ısı verim 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında %61.8 elde edilmiştir. Giriş hava sıcaklığı 170 °C’de sabit tutulduğu zaman en yüksek ısı verim 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında %63.47 elde edilmiştir. Giriş hava sıcaklığı 200 °C’de sabit tutulduğu zaman ise en yüksek ısı verim 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında %66.72 değeri elde edilmiştir.

Aynı parametreler altında geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda sütün kurutulması sırasında ısı verimlilikler hesaplanmıştır. Buna göre geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği en fazla %68.97 ile 2.5 mm nozul çapı ve 200 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında elde edilmiştir. Giriş hava sıcaklığı 170 °C’de sabit tutulduğunda ise %66.35 ile en fazla 2.5 mm nozul çapında elde edilmiştir. 140 °C’de sabit tutulan giriş hava sıcaklığında ise 2.5 mm nozul çapı kullanıldığında geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun ısı verimliliği maksimum %63.9 olarak hesaplanmıştır.

Toplamda her iki tip kurutucu için de en yüksek ısı verim 200 °C giriş hava sıcaklığında görülmektedir. Fakat bu sıcaklık sütü kurutma sırasında hem kurutma odalarını hem de tozun içeriğini olumsuz olarak etkilemektedir. 200 °C giriş hava sıcaklığında tozlar kurutma odası camına ve birbirlerine çok daha fazla yapışmıştır. Ayrıca bu sıcaklıkta kurutulan süt tozlarının renginde koyulaşma olduğu ve tozların yandığı görülmüştür. Bu nedende sütü kuruturken diğer yüksek ısı verimliliğin elde edildiği 170 °C giriş hava sıcaklığının daha uygun olduğu belirlenmiştir. En uygun nozulun ise 1.5 mm çapta olduğu görülmüştür.

Çok yüksek giriş sıcaklığında yapılan kurutma işlemleri süt tozuna zarar vermiştir. Süt tozları yanmış ve rengi koyu sarı bir şekilde elde edilmiştir. 200 °C giriş hava sıcaklığı kullanıldığında ürünün kurutma odasındaki cama daha fazla yapıştığı gözlemlenmiştir.

Süt kurutma işleminde standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu karşılaştırıldığında, geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kullanılan pervanelerin kurutma havası sıcaklıklarını ve cam sıcaklıklarını etkilediği gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutma ve ürün odası cam sıcaklıkları, standart püskürtmeli kurutucudaki cam sıcaklıklarından daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu kullanıldığında daha düşük çıkış hava sıcaklıkları elde edilmiştir. Kurutma odasında kullanılan pervaneler kurutucudaki hava ve cam sıcaklıklarını düşürmüştür. Bu da geliştirilmiş kurutucuda süt tozu parçacıklarının cam duvarlara ve birbirlerine yapışmasını görünür şekilde azaltmıştır. Bu şekilde geliştirilmiş kurutucuda daha verimli, kaliteli ve düşük çapa sahip süt tozları elde edilmiştir.

1 litre süt kullanılarak standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda farklı parametrelerde elde edilen süt tozu miktarları belirlenmiştir. Standart kurutucuda 1 litre süttten 1.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığında 99.5 g süt tozu elde edilirken, aynı parametrede geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 112 g toz ürün elde edilmiştir.

Elde edilen süt tozunun pürüzsüzlüğü ve damlacık boyutu gibi özellikler açısından geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Geliştirilmiş kurutucuda, kurutma sırasında süt tozu partikülleri birbirlerine ve kurutucu camına daha az yapışma özelliği göstermiştir. İşlem sonunda kurutucunun temizlenmesi cama yapışmalar az olduğundan geliştirilmiş kurutucuda daha kolay olmuştur.

1 litre domates suyu %25 maltodekstrin eklenerek üç farklı nozul çapında ve giriş hava sıcaklığında standart ve geliştirilmiş kurutucuda püskürtülerek kurutulmuştur. İki farklı kurutucuda da en yüksek domates tozu miktarı 2.5 mm nozul çapı ve $T_{hava,g}:140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de elde edilmiştir. Geliştirilmiş kurutucuda elde edilen domates tozu miktarı standart kurutucuda elde edilen toz miktarının yaklaşık iki katı kadardır. 2.5 mm'lik nozul kullanıldığında standart kurutucuda 45 gram domates tozu elde edilirken, geliştirilmiş kurutucuda 87 gram toz elde edilmiştir. Domates suyunun kurutulması sırasında geliştirilmiş püskürtmeli kurutucunun daha avantajlı olduğu görülmüştür.

1 litre elma suyu için aynı parametreler kullanılarak deney yapılmıştır. %80 maltodekstrin eklenerek 170 °C giriş hava sıcaklığında kurutulan 1 litrelik elma suyundan en fazla elma tozu 2.5 mm nozul kullanıldığında elde edilmiştir. 2.5 mm nozul çapında geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu kullanıldığında 138.7 gram, standart kurutucu kullanıldığında ise 94.1 gram elma tozu elde edilmiştir.

Farklı parametrelerde elde edilen süt tozlarının nem içerikleri ölçülmüştür. Standart püskürtmeli kurutucu kullanılarak elde edilen en düşük nem içeriğine sahip süt tozu %2.51 M ile 0.5 mm nozul çapında $T_{hava,g}$: 200 °C’de elde edilmiştir. Aynı parametreler kullanılarak geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilen tozun nem içeriği ise %1.25 M olarak ölçülmüştür.

Genel olarak hesaplamalardan da anlaşıldığı üzere standart ve geliştirilmiş kurutucuda elde edilen süt, domates ve elma suyu tozlarının nem içeriğinin %0.2-5 arasında olduğu görülmüştür.

1.5 mm nozul çapı ve 170 °C giriş hava sıcaklığında standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda %25 maltodekstrin eklenerek kurutulan domates suyundan elde edilen domates tozlarının %1.29 M ile en düşük nem içeriği geliştirilmiş kurutucuda elde edilmiştir. Standart püskürtmeli kurutucuda elde edilen domates tozunun nem içeriği ise %3.1 M’dür.

Domates suyu en uygun kurutma sıcaklığı olan 170 °C’de 3 farklı nozul çapı kullanılarak standart ve geliştirilmiş kurutucuda maltodekstrin ilave edilerek ve maltodekstrin ilave edilmeden kurutulmuştur. Kurutma işlemi süresince kurutma ve ürün odası içerisindeki hareket eden havanın sıcaklıklarının ve neminin değişimi incelenmiştir. Maltodekstrin ilave edilmeden kurutulan domates suyunun, standart püskürtmeli kurutucuda yaygın olarak kurutma camının yüzeyine yapıştığı görülmüştür. Geliştirilmiş kurutucuda kurutulan domates suyunda da aynı şekilde cam yüzeyinde yapışma olduğu ancak meydana gelen yapışma miktarının standart kurutucudakinden daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, daha verimli toz ürün elde etmek için domates suyuna %25 oranında maltodekstrin ilave edilmiştir.

Domates suyunun maltodekstrin ilave edilerek standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutulması kıyaslandığında, odaların içerisindeki hava sıcaklıklarının birbirlerine yakın olduğu ancak geliştirilmiş kurutucuda kurutma ve ürün odası içerisindeki hava sıcaklıklarının standarttakinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş kurutucuda, kurutma ve ürün odası cam sıcaklıkları standart kurutucudakinden daha düşük çıkmıştır. Bu da geliştirilmiş kurutucuda kullanılan pervanelerin hava ve cam sıcaklıklarını etkilediğini, oda içerisindeki havayı dağıtarak cam sıcaklığını düşürdüğünü göstermiştir. Sonuçta, geliştirilmiş kurutucuda kurutma sırasında toz parçacıklarının birbirlerine ve kurutma duvarlarına yapışması azaltılmıştır.

Aynı şekilde iki farklı tip kurutucuda %80 maltodekstrin eklenerek 0.5 mm nozul çapı ve 200 °C giriş sıcaklığında kurutulan elma suyunun %0.27 M ile en düşük nem içeriği geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda elde edilmiştir. Standart püskürtmeli kurutucuda aynı parametrede elde edilen elma tozunun nem içeriği ise %2.8 M'dür.

Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapında nozul kullanıldığında kurutma ve ürün odasındaki değişimler belirlenmiştir. Buna göre tüm nozul çapları ve giriş hava sıcaklıklarında atomizere en yakın bölgede sıcaklıklar daha yüksek olup, bu sıcaklıklar kademeli olarak atomizere uzaklaştıkça azalmıştır. Ürün odasında ise egzoz çıkışına yakın bölgede sıcaklığın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda nozul çaplarına ve giriş hava sıcaklığına bağlı olarak cam yüzey sıcaklıkları atomizere en yakın noktadan itibaren çıkış noktasına doğru azalmıştır. Yüksek giriş sıcaklıklarında cam yüzey sıcaklıkları, düşük giriş sıcaklıklarına göre daha yüksek olmuştur. Ayrıca nozul çaplarının büyümesi ile fazla değişim olmamakla birlikte çapın artmasıyla cam sıcaklıklarının düştüğü görülmüştür.

Standart püskürtmeli kurutucuda süt için uygun sıcaklık değeri olarak seçilen giriş hava sıcaklığında nozul çapına bağlı olarak çıkış havası sıcaklığı, nemi ve hızları belirlenmiştir. Kurutucudaki çıkış hava sıcaklığının ortalama değerleri 140 °C giriş hava sıcaklığında 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 74.6 °C, 72 °C ve 67.7 °C'dir. Kurutucudan çıkan havanın nemi 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 15.6 %RH, 11.5 %RH ve 8.5 %RH elde edilmiştir. Çıkış hava hızı 0.5 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm çapındaki nozullar için sırasıyla 6 m/s, 7.7 m/s ve 9.3 m/s'dir. Benzer şekilde geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda kurutulan sütün 1.5 mm nozul çapı ve 140 °C giriş hava sıcaklığındaki analizlerine bakıldığında; kurutma odasındaki ortalama hava sıcaklıkları, atomizere yakınlığı 15. cm'de bulunan T₃ noktasında 88.9 °C, 30. cm'deki T₂'de 84.3 °C ve atomizere uzaklığı 45. cm'de olan T₁ noktasında ise 80.9 °C; ürün odası içerisindeki ortalama hava sıcaklıkları, T₄'te 81.3 °C ve T₅'te 78.2 °C olarak ölçülmüştür. Kurutma odasında atomizere en yakın noktadaki cam sıcaklığının 71 °C olduğu görülmüştür. Ayrıca çıkan hava sıcaklığı, nemi ve hızı sırasıyla ortalama 69.6 °C, 25.4 %RH ve 10.5 m/s olarak elde edilmiştir.

Standart püskürtmeli kurutucuda püskürtülerek kurutulan süt damlacıklarının ortalama çapları 5.5 µm ile 8.5 µm arasında iken geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 4 µm ile 7.5 µm arasında ölçülmüştür.

Örnek olarak, 1.5 mm nozul çapı ve $T_{hava,g}:140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kurutularak elde edilen süt tozlarının ortalama damlacık çapının standart kurutucuda $6.922\text{ }\mu\text{m}$ iken geliştirilmiş kurutucuda bu değerin $6.117\text{ }\mu\text{m}$ olduğu görülmüştür.

Domates suyu, 1.5 mm nozul çapında $T_{hava,g}:170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve %25 maltodekstrin eklenerek iki farklı tip püskürtmeli kurutucuda kurutulmuştur. Elde edilen domates tozlarının ortalama damlacık çapı, standart püskürtmeli kurutucuda $3.330\text{ }\mu\text{m}$ iken geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda $2.004\text{ }\mu\text{m}$ 'dir.

Aynı şekilde, standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucuda 2.5 mm nozul çapında $T_{hava,g}:170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de %80 maltodekstrin eklenerek elma suyu kurutulmuştur. Deney sonucunda standart kurutucuda ortalama $8.658\text{ }\mu\text{m}$ çapında elma tozu parçacığı elde edilirken geliştirilmiş kurutucuda ortalama $7.760\text{ }\mu\text{m}$ çapında parçacıklar elde edilmiştir.

Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, genel olarak geliştirilmiş tip püskürtmeli kurutucuda daha küçük çapta toz parçacıkları elde edilmiştir.

Meyve ve sebzeler, kurutma yardımcı maddesi olmadan püskürtülerek kurutulduklarında tozların tümünün cama yapıştığı gözlemlenmiştir. Ürünün içerisindeki su buharlaştıktan sonra ürün macun şeklinde elde edilmiştir. Bu da kurutma yardımcı maddesi olmadan püskürtülerek kurutulan sebze ve meyve sularından toz ürünün elde edilemeyeceğini göstermektedir.

Çalışmada, domates tozu elde etmek için maltodekstrin ilave etmeden ve %25 maltodekstrin DE20 ilave edilerek deney yapılmıştır. Domates suyuna maltodekstrin ilave edilmeden yapılan deneyde domates tozu elde edilmediği görülmüştür. Aynı şekilde elma suyu için de maltodekstrin ilave etmeden ve %25, 60 ve 80 oranlarında maltodekstrin DE20 ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Maltodekstrin ilave edilmeden püskürtülerek kurutulan elma suyundan toz elde edilememiştir. Şeker içeriği yüksek olan elma suyuna düşük oranlarda maltodekstrin ilave edildiğinde de verimli bir şekilde elma tozu elde edilememiştir. Elma suyuna %80 oranında maltodekstrin ilave edildiğinde kurutma duvarına yapışmanın az olduğu ve elma tozu elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, maltodekstrin oranı arttıkça daha açık renkte tozlar oluşmuştur.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada, yeni tip püskürtmeli kurutucu imal edilerek kurutma sisteminin veriminin artırılması ve yapışmanın azaltılması amaçlanmıştır. Standart ve geliştirilmiş püskürtmeli kurutucu olmak üzere iki tip kurutucu deneyler yapılarak karşılaştırılmış ve sonuçlar ortaya konulmuştur.

Kurutma sistemleri arasında sıvı ürünleri muhafaza etmek için toz ürünler çok fazla tercih edilmektedir. Toz ürün elde etmek için en fazla tercih edilen yöntem, püskürtmeli kurutma tekniğidir. Bu nedenle püskürtmeli kurutucular yardımıyla kurutulan ürün verimliliği için püskürtmeli kurutucuların verimliliği artacak şekilde tasarımlar yapılmalıdır.

Mevcut püskürtmeli kurutmanın verimini etkileyen en önemli faktör toz yapışkanlığıdır. Bu nedenle toz yapışkanlığını önlemeye yönelik çalışmaların yapılması önem taşımaktadır. Örnek olarak püskürtmeli kurutucunun duvarları yapışmaz bir malzeme ile kaplanarak tozların kurutucu duvarına yapışması önlenabilir. Bununla birlikte, sıvı ürünlerin kurutulmasında yapışmayı önlemek amacıyla kullanılan organik taşıyıcılar üzerinde çalışmalar yapılarak daha az miktardaki taşıyıcılarla daha verimli bir kurutma sağlanabilir. Ayrıca, püskürtmeli kurutucularda daha fazla işlem parametreleri denenerek her ürün için optimum işlem koşulu elde edilebilir. Püskürtmeli kurutucudan çıkan egzoz havasından yararlanılması ile kurutma için gerekli enerjiden tasarruf edilerek sistemin ısı verimi artırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Lin, T. M., Durance, T. D. and Scaman, C. H.,** 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices, *Food Research International*, 31(2), 111-117.
- [2] **Chen, X. D. and Mujumdar, A. S.,** 2009. Drying technologies in food processing, *John Wiley & Sons*.
- [3] **Prakash, S., Jha, S. and Datta, N.,** 2004. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers, *Journal of Food Engineering*, 62(3), 305-313.
- [4] **Cemeroğlu, B.,** 1986. Kurutma teknolojisi, Meyve ve sebze işleme teknolojisi, *Gıda Teknolojisi Derneği*, Yayın no:6, Böl: 9, Ankara.
- [5] **Mc Rea, R., Robinson, R.K. and Sadler, M.J.,** 1993. Encyclopedia of food science food technology and nutrition, *Academic Press*, 1, 1469-1476, NY.
- [6] **Hall, C. W.,** 1996. Expanding opportunities in drying research and development, *Drying technology*, 14(6), 1419-1427.
- [7] **Geankoplis, C. J.,** 1983. Transport Processes and Unit Operations, 2nd ed., *Allyn and Bacon Series in Engineering*, USA.
- [8] **Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L. and Anderson, L. B.,** 1976. Principles of Unit Operations, 2nd ed., *John Willey and Sons, Inc USA*.
- [9] **Santre, M. M. and Agashe, S. D.,** 2014. Dynamics of spray dryer, *InConvergence of Technology (I2CT), 2014 International Conference for*, 1-4, IEEE.
- [10] **Verma, A. and Singh, S. V.,** 2015. Spray drying of fruit and vegetable juices-a review, *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(5), 701-719.
- [11] **Phisut, N.,** 2012. Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product, *International Food Research Journal*, 19(4), 1297-1306.
- [12] **Parveen, S., Dhananchezhiyan, P., Thirupathi, V. and Suganya, P.,** 2013. Investigation of effect of spray drying on quality characteristics of probiotic apple juice powder, *Madras Agricultural Journal*, 100(4-6), 637-642.
- [13] **Bhandari, B. R., Datta, N. and Howes, T.,** 1997. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. *Drying technology*, 15(2), 671-684.
- [14] **Liu, W., Chen, X. D. and Selomulya, C.,** 2015. On the spray drying of uniform functional microparticles. *Particuology*, 22, 1-12.

- [15] **Keshani, S., Daud, W. R. W., Nourouzi, M. M., Namvar, F. and Ghasemi, M.,** 2015. Spray drying: an overview on wall deposition, process and modeling. *Journal of Food Engineering*, 146, 152-162.
- [16] **Bhandari, B. R., Datta, N., Crooks, R., Howes, T. and Rigby, S.,** 1997. A semi-empirical approach to optimise the quantity of drying aids required to spray dry sugar-rich foods. *Drying Technology*, 15(10), 2509-2525.
- [17] **Mani, S., Jaya, S. and Das, H.,** 2002. Sticky issues on spray drying of fruit juices, *ASAE/CSAE (The Society for Eng. in Agric, Food and Biological Systems) Meeting*, Paper no: MBSK 02-201, Saskatoon, Saskatchewan, Kanada.
- [18] **Walton, D. E. and Mumford, C. J.,** 1999 Spray dried products-characterization of particle morphology, *Chemical Engineering Research and Design*, 77(1), 21-38.
- [19] **Walton, D. E. and Mumford, C. J.,** 1999. The morphology of spray-dried particles: the effect of process variables upon the morphology of spray-dried particles, *Chemical Engineering Research and Design*, 77(5), 442-460.
- [20] **Truong, V., Bhandari, B. R. and Howes, T.,** 2005. Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods, Part I-Moisture and glass transition temperature profile during drying, *Journal of Food Engineering*, 71(1), 55-65.
- [21] **Borges, S.V., Reis, A. L. S. H., Jorge, E. C., Pinto, P. R. and Oliveira, V.,** 2002. Dehidration of tropical fruit juices by spray drying, *Alimentaria*, 334, 125-130.
- [22] **Abadio, F. D. B., Domingues, A. M., Borges, S. V. And Oliveira, V. M.,** 2004. Physical properties of powdered pineapple juice; effect of maltodekstrin concentration and atomization speed, *Journal of Food Engineering*, 64: 285-287.
- [23] **Rodriguez-Hernandez, G. R., Gonzales-Garcia, R., Grajales-Lagunes, A. and Ruiz-Cabrera, M.,** 2005. Spray-Drying of Cactus Pear Juice: Effect on the Physicochemical Properties of Powder and Reconstituted Product, *Drying Technology*, 23, 955-973.
- [24] **Can Karaca, A., Guzel, O. and Ak, M. M.,** 2015. Effects of processing conditions and formulation on spray drying of sour cherry juice concentrate, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(2), 449-455.
- [25] **Shrestha, A. K., Ua-Arak, T., Adhikari, B. P., Howes, T. and Bhandari, B. R.,** 2007. Glass transition behavior of spray dried orange juice powder measured by differential scanning calorimetry (DSC) and thermal mechanical compression test (TMCT), *International Journal of Food Properties*, 10(3), 661-673.

- [26] **Bielecka, M. and Majkowska, A.**, 2000. Effect of spray drying temperature of yoghurt on the survival of starter cultures, moisture content and sensoric properties of yoghurt powder. *Nahrung*, 4, 257-260.
- [27] **Osman, A. F. A. and Endut, N.**, 2009. Spray drying of roselle-pineapple juice effects of inlet temperature and maltodextrin on the physical properties. In *Environmental and Computer Science, ICECS'09. Second International Conference on*, 267-270, IEEE.
- [28] **Mestry, A. P., Mujumdar, A. S. and Thorat, B. N.**, 2011. Optimization of spray drying of an innovative functional food: fermented mixed juice of carrot and watermelon, *Drying Technology*, 29(10), 1121-1131.
- [29] **Fazaeli, M., Zahra, E.D., Ashtari, A.K. and Omid, M.**, 2012. Effect of process conditions and carrier concentration for improving drying yield and other quality attributes of spray dried black mulberry (*Morus nigra*) juice, *International Journal of Food Engineering*, 8(1), 1-20.
- [30] **Kemp, I. C., Wadley, R., Hartwig, T., Cocchini, U., See-Toh, Y., Gorringe, L., Fordham, K. and Ricard, F.**, 2013. Experimental study of spray drying and atomization with a two-fluid nozzle to produce inhalable particles, *Drying Technology*, 31(8), 930-941.
- [31] **Quek, S. Y., Chok, N. K. and Swedlund, P.**, 2007. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386-392.
- [32] **Souza, A. S., Borges, S. V., Magalhães, N. F., Ricardo, H. V., Cereda, M. P. and Daiuto, E. R.**, 2009. Influence of spray drying conditions on the physical properties of dried pulp tomato, *Food Science and Technology (Campinas)*, 29(2), 291-294.
- [33] **Roustapour, O. R., Hosseinalipour, M. and Ghobadian, B.**, 2006. An experimental investigation of lime juice drying in a pilot plant spray dryer, *Drying technology*, 24(2), 181-188.
- [34] **Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z. and Mousavi, S. M.**, 2011. Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum L.*), *Journal of food science and technology*, 48(6), 677-684.
- [35] **Goula, A. M. and Adamopoulos, K. G.**, 2003. Influence of spray drying conditions on tomato powder moisture, In *Proceedings of the third international symposium of food rheology and structure*, Zurich, Switzerland.

- [36] **Mishra, P., Mishra, S. and Mahanta, C. L.,** 2014. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder, *Food and Bioproducts Processing*, 92(3), 252-258.
- [37] **Goula, A. M. and Adamopoulos, K. G.,** 2010. A new technique for spray drying orange juice concentrate, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(2), 342-351.
- [38] **Chegini, G. R. and Ghobadian, B.,** 2007. Spray dryer parameters for fruit juice drying, *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 230-236.
- [39] **Tan, S. P., Tuyen, C. K., Parks, S. E., Stathopoulos, C. E. and Roach, P. D.,** 2015. Effects of the spray-drying temperatures on the physiochemical properties of an encapsulated bitter melon aqueous extract powder, *Powder Technology*, 281, 65-75.
- [40] **Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M. and Cal-Vidal, J.,** 2005. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6(4), 420-428.
- [41] **Elez Garofulić, I., Zorić, Z., Pedisić, S. and Dragović-Uzelac, V.,** 2016. Optimization of sour cherry juice spray drying as affected by carrier material and temperature, *Food Technology and Biotechnology*, 54(4), 441-449.
- [42] **Fang, Z. and Bhandari, B.,** 2012. Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice, *Food Research International*, 48(2), 478-483.
- [43] **Bhandari, B. R., Senoussi, A., Dumoulin, E. D. and Lebert, A.,** 1993. Spray drying of concentrated fruit juices, *Drying Technology*, 11(5), 1081-1092.
- [44] **Khalilian Movahhed, M. and Mohebbi, M.,** 2015. Spray drying and process optimization of carrot–celery juice, *Journal of Food Processing and Preservation*.
- [45] **Caliskan, G. and Dirim, S. N.,** 2013. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract, *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 539-548.
- [46] **Koca, N., Erbay, Z. and Kaymak Ertekin, F.,** 2015. Effects of spray-drying conditions on the chemical, physical, and sensory properties of cheese powder, *Journal of dairy science*, 98(5), 2934-2943.

- [47] **Barbosa, J., Borges, S., Amorim, M., Pereira, M. J., Oliveira, A., Pintado, M. E. and Teixeira, P.,** 2015. Comparison of spray drying, freeze drying and convective hot air drying for the production of a probiotic orange powder, *Journal of Functional Foods*, 17, 340-351.
- [48] **Zareifard, M. R., Niakousari, M., Shokrollahi, Z. and Javadian, S.,** 2012. A feasibility study on the drying of lime juice: the relationship between the key operating parameters of a small laboratory spray dryer and product quality, *Food and Bioprocess Technology*, 5(5), 1896-1906.
- [49] **Papadakis, S. E., Gardeli, C. and Tzia, C.,** 2006. Spray drying of raisin juice concentrate, *Drying Technology*, 24(2), 173-180.
- [50] **Caparino, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R. and Fellman, J. K.,** 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder, *Journal of Food Engineering*, 111(1), 135-148.
- [51] **Goula, A. M. and Adamopoulos, K. G.,** 2005. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. The effect on product recovery, *Journal of Food Engineering*, 66(1), 25-34.
- [52] **Dharshini, A. S., Paul, V. S., Bensely, A. and Asirvatham G. L.,** 2008. Heat and mass transfer study in the spray drying of tomato juice, 5th WSEAS Int. Conf. On Heat and Mass transfer (HMT'08), Acapulco, Mexico, January 25-27.
- [53] **Liang, H., Shinohara, K., Minoshima, H. and Matsushima, K.,** 2001. Analysis of constant rate period of spray drying of slurry, *Chemical Engineering Science*, 56(6), 2205-2213.
- [54] **Volkov, R. S., Vysokomornaya, O. V., Kuznetsov, G. V. and Strizhak, P. A.,** 2014. Investigation of regularities of heat and mass transfer and phase transitions during water droplets motion through high-temperature gases, *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 865856.
- [55] **Zbicinski, I., Grad, J. and Strumillo, C.,** 1996. Effect of turbulence on heat and mass transfer in the atomization zone, *Drying technology*, 14(2), 231-244.
- [56] **Ren, Z., Hao, Y. and Wang, B.,** 2011. Experimental analysis on spiral pressure nozzle and spray angle control in the spray dryer, *In 2011 International Conference on Internet Computing and Information Services*, 163-165, IEEE.

- [57] **Tan, L. W., Taip, F. S., Ibrahim, M. N. and Kamil, R.,** 2011. Empirical modeling and control for spray drying of orange juice powder, In *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011 4th International Conference on*, 1-6, IEEE.
- [58] **Zhijun, Z., Shiwei, Z. and Chenghai, X.,** 2010. Notice of retraction the pressure effect on gas-liquid two-phase flow in spray drying process, In *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on*, 2, 88-92, IEEE.
- [59] **Choi, J. and Son, G.,** 2008. Numerical study of droplet motion in a microchannel with different contact angles, *Journal of mechanical science and technology*, 22(12), 2590-2599.
- [60] **Yoon, S. H., Kim, D. K. and Kim, B. H.,** 2011. Effect of nozzle geometry for swirl type twin-fluid water mist nozzle on the spray characteristic, *Journal of mechanical science and technology*, 25(7), 1761-1766.
- [61] **Yan, Y., Zhang, L., Pan, W. and Pu, G.,** 2014. Experimental investigation of atomizing performance of low pressure swirl nozzle, *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 782064.
- [62] **Rahman, K., Ko, J. B., Khan, S., Kim, D. S. and Choi, K. H.,** 2010. Simulation of droplet generation through electrostatic forces, *Journal of mechanical science and technology*, 24(1), 307-310.
- [63] **Schmid, K., Arpagaus, C. and Friess, W.,** 2011. Evaluation of the Nano Spray Dryer B-90 for pharmaceutical applications, *Pharmaceutical Development and Technology*, 16(4), 287-294.
- [64] **Shi, H. and Kleinstreuer, C.,** 2007. Simulation and analysis of high-speed droplet spray Dynamics, *Journal of fluids engineering*, 129(5), 621-633.
- [65] **Gimbun, J., Muhammad, N. I. S. and Law, W. P.,** 2015. Unsteady RANS and detached eddy simulation of the multiphase flow in a co-current spray drying, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(9), 1421-1428.
- [66] **Wang, Z., Wen, J. Z., Wang, J. and Dong, Q.,** 2014. PDPA investigation on an electrostatically-assisted twin-fluid atomization flow, *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 402747.
- [67] **Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H., Movahednejad, E. and Ommi, F.,** 2016. Application of maximum entropy principle for estimation of droplet-size distribution

- using internal flow analysis of a swirl injector, *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 8(3), 205-216.
- [68] **Deventer, H. V., Houben, R. and Koldeweij, R.**, 2013. New atomization nozzle for spray drying, *Drying Technology*, 31(8), 891–897.
- [69] **Mezhericher, M., Levy, A. and Borde, I.**, 2010. Spray drying modelling based on advanced droplet drying kinetics, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(11), 1205-1213.
- [70] **Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S. and Madadlou, A.**, 2012. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation, *Biosystems Engineering*, 111(2), 229-241.
- [71] **Kajiyama, T. and Park, K. J.**, 2011. Influence of feed parameters on spray drying energy consumption, *Journal of Food Process Engineering*, 34(2), 414-426.
- [72] **Tsotsas, E.**, 2012. Influence of drying kinetics on particle formation: A personal perspective, *Drying Technology*, 30(11-12), 1167-1175.
- [73] **Mezhericher, M., Levy, A. and Borde, I.**, 2012. Three-dimensional spray-drying model based on comprehensive formulation of drying kinetics, *Drying Technology*, 30(11-12), 1256-1273.
- [74] **Erbay, Z. and Koca, N.**, 2012. Energetic, exergetic, and exergoeconomic analyses of spray-drying process during white cheese powder production, *Drying Technology*, 30(4), 435-444.
- [75] **Ai, S., Wang, B., Li, X. and Shi, W.**, 2016. Analysis of a heat recovery system of the spray-drying process in a soy protein powder plant, *Applied Thermal Engineering*, 103, 1022-1030.
- [76] **Sagar, V. R. and Kumar, P. S.**, 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review, *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26.
- [77] **Kutlu, N., İşçi, A. ve Demirkol, Ö. Ş.**, 2015. Gıdalarda İnce Tabaka Kurutma Modelleri, *The Journal of Food*, 40(1), 39-46.
- [78] **Güngör, A. ve Özbalta, N.**, 2009. Kurutmanın temelleri ve endüstriyel kurutucular kurs notları, *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir.
- [79] **Onwude, D. I., Hashim, N. and Chen, G.**, 2016. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops, *Trends in Food Science & Technology*, 57, 132-145.

- [80] **Karel, M. and Lund, D. B.**, 2003. Physical principles of food preservation, New York, Marcel Dekker Inc.639.
- [81] **Ersöz, M. A. and Doğan, H.**, 2009. Isı geri kazanımlı akışkan yatak sürekli kurutucu tasarımı, imalatı ve tuz kurutulmasında incelenmesi, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- [82] **Günerhan, H.**, 2005. Endüstriyel kurutma sistemleri, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36(13), 1-10, Mart-Nisan.
- [83] **Yüzgeç, U.**, 2005. Kurutma sürecinin modellenmesi ve akıllı öngörülü denetimi, *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-35.
- [84] **Nguyen, T. K., Mondor, M. and Ratti, C.**, 2018. Shrinkage of cellular food during air drying, *Journal of Food Engineering*, 230, 8-17.
- [85] **Saha, B., Bucknall, M., Arcot, J. and Driscoll, R.**, 2018. Derivation of two layer drying model with shrinkage and analysis of volatile depletion during drying of banana, *Journal of Food Engineering*, 226, 42-52.
- [86] **Jangam, S. V., Law, C. L. and Mujumdar, A. S.**, 2010. Drying of foods, vegetables and fruits, *Singapur: Universidade Internacional de Singapur*.
- [87] **Sette, P., Salvatori, D. and Schebor, C.**, 2016. Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying, *Food and Bioproducts Processing*, 100, 156-171.
- [88] **Yılmaz, H. N., Güngör, A. ve Özbalt, N.**, 1998. Tarımsal kurutucular, domates kurutma, kurutulmuş domatesin dünya ve ülke pazarındaki yeri, *Tarımsal Mekanizasyon 18. Ulusal Kongresi, Tekirdağ*, 663-672.
- [89] **Güngör A. ve Özbalt N.**, 1997. Endüstriyel Kurutma Sistemleri, 3. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, Bildiriler Kitabı, C 2, Yayın No 203/2, 737-747, 20-23 Kasım.
- [90] **Başaran B., Bitlisli O., Güngör A., Özbalt N. ve Sarı Ö.**, 2004. Deri Kurutulmasında Yeni Teknolojiler: Isı Pompalı Kurutucular, 1. *Ulusal Deri Sempozyumu*, 633-648, 7-8 Ekim, İzmir.
- [91] **Schlünder, E. U.**, 1983. Dryers, Chapter 3.13, Hemisphere Publ. Comp.
- [92] **Mujumdar, A.S.**, 1987. *Handbook of Industrial Drying*, New York: Marcel Dekker.
- [93] **Masters, K.**, 1985. Spray Drying Handbook, *John Wiley*, vol. 4th ed.
- [94] **Keey, R. B.**, 1978. *Introduction to industrial drying operations*, 1st ed., Pergamon Press, Oxford.

- [95] **Sharma, S. R., Arora, S. and Chand, T.,** 2011. Air drying kinetics of pomegranate seeds, *International journal of food engineering*, 7(2).
- [96] **Panchariya, P. C., Popovic, D. and Sharma, A. L.,** 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process, *Journal of food engineering*, 52(4), 349-357.
- [97] **Doymaz, İ.,** 2012. Prediction of drying characteristics of pomegranate arils, *Food Analytical Methods*, 5(4), 841-848.
- [98] **Mujumdar, A. S.,** 2006. Handbook of Industrial Drying, Engineering and Technology, CRC Press.
- [99] **Kessler, H.G.,** 1981. Food Engineering and Dairy Technology, *Verlag A. Kessler, Germany*, chaps. 8–10.
- [100] **Ashworth, J.C.,** 1978. Use of bench scale tests for dryer design, *Industrial Drying Short Course*, Department of Chemical Engineering, McGill University.
- [101] **Strumillo, C. and Kudra, T.,** 1986. Drying: Principles, application and Design, *Gordon and Breach Science Publishers*, New York.
- [102] **Orsat, V., Raghavan, V. and Meda, V.,** 2005. Microwave technology for food processing: an overview, In *The microwave processing of foods*, 105-118, Wood-head Publishing, Cambridge, UK.
- [103] **Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V. and Mujumdar, A. S.,** 1995. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz-I: Drying kinetics, *Drying Technology*, 13(8-9), 1949-1971.
- [104] **Chou, S. K. and Chua, K. J.,** 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs, *Trends in Food Science and Technology*, 12(10), 359-369.
- [105] **Tatemoto, Y., Yano, S., Mawatari, Y., Noda, K. and Komatsu, N.,** 2007. Drying characteristics of porous material immersed in a bed of glass beads fluidized by superheated steam under reduced pressure, *Chemical Engineering Science*, 62(1-2), 471-480.
- [106] **Okos M. R., Narsimhan S. R. K. and Weitnauer A. C.,** 1992. Food dehydration. In: *Handbook of food engineering*, Heldman DR, Lund DB (ed), Marcel Dekker Inc, New York, 437–562.
- [107] **Brown M.,** 1999. Focusing on freeze drying. *Food Manuf*, 76(9), 34–36.
- [108] **Yongsawatdigul J.,** 1995. Microwave-Vacuum Drying of Cranberries: Part II. Quality Evaluation.

- [109] **Erbay, B. ve Küçüköner, E.**, 2008. Gıda endüstrisinde kullanılan farklı kurutma sistemleri, *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, Erzurum, 1045-1048.
- [110] **Erle, U.**, 2005. Drying using microwave processing, In the microwave processing of foods, *Schubert H, Regier M (ed)*, Woodhead Publ, Cambridge, England, 142–152.
- [111] **Soysal, Y., Öztekin, S. and Eren, Ö.**, 2006. Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects, *Biosystems Engineering*, 93(4), 403-413.
- [112] **Beaudry, C., Raghavan, G. S. V. and Rennie, T. J.**, 2003. Microwave finish drying of osmotically dehydrated cranberries, *Drying Technology*, 21(9), 1797-1810.
- [113] **Murugesan, R. and Orsat, V.**, 2012. Spray drying for the production of nutraceutical ingredients- a review, *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 3-14, 2012.
- [114] **Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. and Saurel, R.**, 2007. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview, *Food research international*, 40(9), 1107-1121.
- [115] **Masters, K.**, 1991. Spray drying handbook, 5th ed., Wiley, New York.
- [116] **Filkova, I. and Mujumdar, A. S.**, 1995. Industrial spray drying systems, *Handbook of industrial drying*, 1, 263-308.
- [117] **Masters, K.**, 2004. Current market-driven spray drying development activities, *Drying technology*, 22(6), 1351-1370.
- [118] **Sharma A., Sharma S.D. and Buddhi D.**, 2002. Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications, *Energy Conversion and Management*, 43(14), 1923- 1930.
- [119] **Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M. and Fernández-López, J. A.**, 2009. Production of a red–purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems, *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471-479.
- [120] **Tonon, R. V., Brabet, C. and Hubinger, M. D.**, 2008. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying, *Journal of Food Engineering*, 88(3), 411-418.
- [121] **Masters, K.**, 1976. *Spray Drying: An Introduction to Principles, Operational Practice and Applications*, Wiley.
- [122] **Nijdam, J. and Langrish, T.**, 2006. The effect of surface composition on the functional properties of milk powders, *Journal of Food Engineering*, 77(4), 919-925.

- [123] **Chegini, G. R., Khazaei, J., Ghobadian, B. and Goudarzi, A. M.,** 2008. Prediction of process and product parameters in an orange juice spray dryer using artificial neural networks, *Journal of food engineering*, 84(4), 534-543.
- [124] **Masters, K.,** 1968. Spray Drying—The Unit Operation Today, *Industrial & Engineering Chemistry*, 60(10), 53-63.
- [125] **Patel, R., Patel, M. and Suthar, A.,** 2009. Spray drying technology: an overview, *Indian Journal of Science and Technology*, 2(10), 44-47.
- [126] **Parikh, D. M.,** 2005. *Handbook of pharmaceutical granulation technology*, New York, NY: Informa Healthcare.
- [127] **Broadhead, J., Edmond Rouan, S. and Rhodes, C.,** 1992. The spray drying of pharmaceuticals, *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 18(11-12), 1169-1206.
- [128] **Okuyama, K., Abdullah, M., Lenggoro, I. W. and Iskandar, F.,** 2006. Preparation of functional nanostructured particles by spray drying, *Advanced Powder Technology*, 17(6), 587-611.
- [129] **Rama Rao, G. V., López, G. P., Bravo, J., Pham, H., Datye, A. K., Xu, H. F. and Ward, T. L.,** 2002. Monodisperse mesoporous silica microspheres formed by evaporation-induced self assembly of surfactant templates in aerosols, *Advanced materials*, 14(18), 1301-1304.
- [130] **Pisecky, J.,** 1978. Bulk density of milk powders, *Dairy Industries International*.
- [131] **Jinapong, N., Suphantharika, M. and Jamnong, P.,** 2008. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration, *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194-205.
- [132] **Keogh, M. K., Murray, C. A. and O’Kennedy, B. T.,** 2003. Effects of ultrafiltration of whole milk on some properties of spray-dried milk powders, *International Dairy Journal*, 13(12), 995-1002.
- [133] **Masters, K.,** 2002. Spray drying in practice, *SprayDryConsul International ApS*, Denmark.
- [134] **Thybo, P., Hovgaard, L., Andersen, S. K. and Lindeløv, J. S.,** 2008. Droplet size measurements for spray dryer scale-up, *Pharmaceutical development and technology*, 13(2), 93-104.
- [135] **Chegini, G. and Ghobadian, B.,** 2005. Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder, *Drying Technology*, 23(3), 657-668.

- [136] **Handscomb, C. S., Kraft, M. and Bayly, A. E.**, 2009. A new model for the drying of droplets containing suspended solids, *Chemical engineering science*, 64(4), 628-637.
- [137] **Filková, I., Huang, L. X. and Mujumdar, A. S.**, 2006. Industrial spray drying systems, In *Handbook of industrial drying*, 215-254, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [138] **Crowe, C. T.**, 2005. Multiphase Flow Handbook, *CRC Pres, Taylor Francis Group*, Boca Raton, USA.
- [139] **Djamarani, K. M. and Clark, I. M.**, 1997. Characterization of particle size based on fine and coarse fractions, *Powder Technology*, 93(2), 101-108.
- [140] **Nath, S. and Satpathy, G. R.**, 1998. A systematic approach for investigation of spray drying processes, *Drying Technology*, 16(6), 1173-1193.
- [141] **I Ré, M.**, 1998. Microencapsulation by spray drying, *Drying technology*, 16(6), 1195-1236.
- [142] **Huang, D.**, 2011. Modeling of particle formation during spray drying, in *Eurodrying'11, Palma, Spain*.
- [143] **Jittanit, W., Niti-Att, S. and Techanuntachaikul, O.**, 2010. Study of spray drying of pineapple juice using maltodextrin as an adjunct, *Chiang Mai Journal of Science*, 37(3), 498-506.
- [144] **Finney, J., Buffo, R. and Reineccius, G. A.**, 2002. Effects of type of atomization and processing temperatures on the physical properties and stability of spray-dried flavors, *Journal of Food Science*, 67(3), 1108-1114.
- [145] **Dolinsky, A. A.**, 2001. High-temperature spray drying, *Drying Technology*, 19(5), 785-806.
- [146] **Dolinsky, A., Maletskaya, K. and Snezhkin, Y.**, 2000. Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods, *Drying Technology*, 18(3), 747-758.
- [147] **Reineccius, G. A.**, 2001. The spray drying of food ingredients, In *The Encapsulation of Food Ingredients*, 151-184.
- [148] **Tonon, R. V., Freitas, S. S. and Hubinger, M. D.**, 2011. Spray drying of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) juice: effect of inlet air temperature and type of carrier agent, *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(5), 691-700.

- [149] **Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi Ashtari, A. and Omid, M.,** 2012. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder, *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 667-675.
- [150] **Alexander K. and Judson King C.,** 1985. Factors governing surface morphology of spray-dried amorphous substances, *Drying Technology*, 3(3), 321-348.
- [151] **Littringer, E. M., Mescher, A., Eckhard, S., Schröttner, H., Langes, C., Fries, M. and Urbanetz, N. A.,** 2012. Spray drying of mannitol as a drug carrier-the impact of process parameters on product properties, *Drying technology*, 30(1), 114-124.
- [152] **Maury, M., Murphy, K., Kumar, S., Shi, L. and Lee, G.,** 2005. Effects of process variables on the powder yield of spray-dried trehalose on a laboratory spray-dryer, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 59(3), 565-573.
- [153] **Masters, K.,** 1979. Spray-air contact (mixing and flow), *Spray drying handbook*, New York: Halsted Press., 4(3), 286-290.
- [154] **Papadakis, S., Gardeli, C. and Tzia, C.,** 1998. Raisin extract powder: Production, physical and sensory properties, in *Proc. 11th International Drying Symposium IDS'98*, Halkidiki, Greece, 98, 1207-1213.
- [155] **Knipschildt, M.,** 1986. Recent developments in spray drying of milk, *Concentration and Drying of Foods*, Elsevier Applied Sciences Publishers, Essex, England, 221-270.
- [156] **Adhikari, B., Howes, T., Wood, B.J. and Bhandari, B. R.,** 2009a. The effect of low molecular weight surfactants and proteins on surface stickiness of sucrose during powder formation through spray drying, *Journal of Food Engineering*, 94(2), 135-143.
- [157] **Goula, A.M. and Adamopoulos, K.G.,** 2008a. Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. Drying kinetics and product recovery, *Drying Technology*, 26(6), 714-725.
- [158] **Cemeroğlu, B.,** 2004b. Meyve ve sebze işleme teknolojisi, *Kurutma Teknolojisi*, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Başkent, Klise Matbaacılık, 628s., Ankara.
- [159] **Ke, L., Lixing, Z. and Chan, C.,** 2014. Large-eddy simulation of ethanol spray-air combustion and its experimental validation, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22(2), 214-220.
- [160] **Barbosa-Cánovas, G. V. and Vega-Mercado, H.,** 2000. *Deshidratación de alimentos*, no. 664.80204 B3.

- [161] **Ranz, W. E. and Marshall, W. R.**, 1952. Evaporation from drops, *Chem. Eng. Prog.*, 48(3), 141-146.
- [162] **Charm, S.**, 1978. Dehydration of Foods: in the Fundamental of Foods Engineering, ed: AVI Publishing, Westport, CT.
- [163] **Baker, C. G. J. and McKenzie, K. A.**, 2005. Energy consumption of industrial spray dryers, *Drying Technology*, 23(1-2), 365-386.
- [164] **Al-Mansour, H. E., Al-Busairi, B. H. and Baker, C. G. J.**, 2011. Energy consumption of a pilot-scale spray dryer, *Drying Technology*, 29(16), 1901-1910.
- [165] **Kavak Akpınar, E.**, 2005. Deneysel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: kurutma deneylerindeki hata analizi, *Mühendis ve Makina*, 46(540), 41-48.



ÖZGEÇMİŞ

Sinem IŞIK, 1989 yılında Diyarbakır'ın Ergani ilçesine doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı yerde tamamladı. 2006 yılında Ergani Süleyman Nazif Lisesi'nden mezun oldu. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında birincilikle bitirdi. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. Aynı yıl Amasya Üniversitesi Taşova Yüksel Akın MYO'da Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 2017 yılında Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.