

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEBZE YÜKLÜ SOĞUTULAN BİR HACİM İÇERİSİNDE DOĞAL TAŞINIM
İLE ISI-KÜTLE TRANSFERİNİN İLGİLİ GIDA KALİTE PARAMETRELERİ
İLE BİRLİKTE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Işıl USLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEBZE YÜKLÜ SOĞUTULAN BİR HACİM İÇERİSİNDE DOĞAL TAŞINIM
İLE ISI-KÜTLE TRANSFERİNİN İLGİLİ GIDA KALİTE PARAMETRELERİ
İLE BİRLİKTE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Işıl USLU

(503111114)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Lütfullah KUDDUSİ

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111114 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Işıl USLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SEBZE YÜKLÜ SOĞUTULAN BİR HACİM İÇERİSİNDE DOĞAL TAŞINIM İLE ISI-KÜTLE TRANSFERİNİN İLGİLİ GIDA KALİTE PARAMETRELERİ İLE BİRLİKTE İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Lütfullah KUDDUSİ

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Özden AĞRA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16 Aralık 2013

Savunma Tarihi : 20 Ocak 2014

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, farklı sebze grupları için saklama koşullarına ilişkin fiziksel parametrelerin doğal taşınım ile ısı-kütle transferine etkisi irdelenmiş ve fiziksel parametreler ile gıda kalite parametreleri ilişkilendirilmiştir.

Bu yüksek lisans çalışmalarını yöneten, yönlendiren, değerli görüş ve eleştirileri ile tez çalışmalarımı destekleyen çok değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Lütfullah KUDDUSİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında bana gerekli desteklerini sunan, lisans ve yüksek lisans çalışma hayatımda ve tez çalışmalarım boyunca değerli görüşleri ile bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman eksik etmeyen Sn. Dr. Serdar KOCATÜRK'e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmasının gerçekleşmesini sağlayan ve bunun için imkân ve olanaklarını sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, Sn. Dr. Alper SOYSAL'a, deneysel çalışmalar için verdikleri desteklerden ötürü Sn. Sabahattin HOCAOĞLU, Sn. Faruk KOCABIYIK, Sn. Nihat KANDEMİR, Sn. Volkan ATEŞ, Sn. Yasin İĞİT'e ve gıda çalışmaları kapsamında verdikleri destekten ötürü Sn. Aylin MET ve Sn. Zülbiye EKİZKUYU' ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışma hayatımızı birlikte sürdüğümüz, desteklerini her zaman yakından hissettiğim çok kıymetli arkadaşlarım, Gönül ÇAVUŞOĞLU, Ezgi GÜNEŞ, Esen KUVVET, İpek ÜNVER, Mehmet Onur DİNÇER, Onur TEMEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteklerinden ve dostluklarından dolayı çok değerli arkadaşlarım, Elif ALOĞLU, Ali Can ARICI ve Mustafa HERGENÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her daim yanımda olan, bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli AİLEME ve saygıdeğer merhum AMCAMA teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2013

Işıl USLU

Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	3
2.1 Soğukta Saklanan Gıdalardan Soluma Kaynaklı Isı Transferi.....	3
2.2 Soğukta Saklanan Gıdalardan Terleme Kaynaklı Kütle Transferi.....	5
2.3 Doğal Taşınım.....	8
2.4 Psikrometrik Esaslar	21
2.5 Gıda Kalite Değerlendirmeleri.....	25
3. DENEY DÜZENEGİ	27
3.1 Fiziksel Parametreler	28
3.1.1 Saklama Sıcaklığı.....	28
3.1.2 Yüzeyler Arası Sıcaklık Farkı.....	28
3.1.3 Hava Giriş Hızı.....	29
3.1.4 Gıda Miktarı ve Yerleşimi	29
3.2 Deney Düzeneği Tasarımı	30
3.3 Hava Hızı Ölçümleri.....	33
3.4 Ölçüm ve Veri Toplama Sistemi.....	36
3.5 Sıcaklık Ölçüm Elemanları Kalibrasyonu	38
3.6 Bağıl Nem Ölçüm Elemanları Belirsizliği.....	39
3.7 Deney Düzeneği Belirsizlik Analizi.....	40

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
4.1 Deney Sonuçları Değerlendirme Yöntemi	43
4.2 Sebzelerin Terleme Katsayısının Deneysel Olarak Tespiti.....	48
4.3 Salatalık Yüklü Deneysel Çalışmalar.....	52
4.3.1 Kısmi açık sebzelerde yüzeyler arası sıcaklık farkı.....	54
4.3.2 Kapalı sebzelerde yüzeyler arası sıcaklık farkı	59
4.3.3 Hava Giriş Hızının Parametrik Etkisi	62
4.4 Brokoli Yüklü Deneysel Çalışmalar	65
4.4.1 Yüzeyler arası sıcaklık farkının parametrik etkisi	66
4.4.2 Hava giriş hızının parametrik etkisi	70
4.5 Marul Yüklü Deneysel Çalışmalar.....	73
4.5.1 Yüzeyler arası sıcaklık farkının parametrik etkisi	74
4.5.2 Hava giriş hızının parametrik etkisi	76
4.5.3 Yerleşim ve miktarın parametrik etkisi	78
4.6 Gıda Kalite Değerlendirmeleri	83
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	99
EKLER	103
ÖZGEÇMİŞ.....	113

KISALTMALAR

AA:	Askorbik Asit
DC:	Direct Current
KH:	Kontrol Hacmi
NF:	No-Frost
PIV:	Particle Image Velocimetry
RH:	Relative Humidity
SOR:	Successive Over Relaxation
SUR:	Successive Under Relaxation
TE:	Termo Elektrik
VPL :	Vapor Pressure Lowering Effect

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı sıcaklık aralıkları için tanımlanan katsayılar	24
Çizelge 2.4 : Farklı basınç aralıkları için tanımlanan katsayılar	25
Çizelge 3.1 : Diğer yüzeyler ve tavan yüzeyi çalışma sıcaklıkları.....	29
Çizelge 3.2 : Belirsizlik hesaplamalarında kullanılan değerler.....	41
Çizelge 3.3 : Farklı sıcaklık aralıkları için tanımlanan, sıcaklığa bağlı doyma basıncı ifadesi hesaplamasında kullanılan katsayılar.....	41
Çizelge 4.1 : Deneysel çalışma koşulları.....	43
Çizelge 4.2 : Brokoli, salatalık ve marul k_s değerleri	52
Çizelge 4.3 : Salatalık yüklü durum için gerçekleştirilen deney koşulları.....	54
Çizelge 4.4 : Saklama koşullarına ilişkin sıcaklık ve bağıl nem değerleri.....	55
Çizelge 4.5 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi R_a sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.....	55
Çizelge 4.6 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	56
Çizelge 4.7 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi R_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa bağlı değişimi.....	56
Çizelge 4.8 : Koşullara bağlı sıcaklık ve bağıl nem değişimleri.....	57
Çizelge 4.9 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi R_a sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.....	58
Çizelge 4.10 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	58
Çizelge 4.11 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi R_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa bağlı değişimi.....	58
Çizelge 4.12 : Koşullara bağlı sıcaklık ve bağıl nem değişimleri.....	59
Çizelge 4.13 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi R_a sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.....	59
Çizelge 4.14 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	60

Çizelge 4.15 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa bağılı değışimi.	60
Çizelge 4.16 : Yoğuşma değerlendirmesi.....	61
Çizelge 4.17 : Koşullara bağılı sıcaklık ve bağılı nem değışimleri.	63
Çizelge 4.18 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının giriş hava hızına bağılı değışimi.	63
Çizelge 4.19 : Toplam kütle geçiş katsayısının giriş hava hızına bağılı değışimi.	64
Çizelge 4.20 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının giriş hava hızına bağılı değışimi.	64
Çizelge 4.21 : Giriş hava hızının yoğuşma açısından değerlendirilmesi.	64
Çizelge 4.22 : Brokoli yüklü duruma ait deney koşulları.	66
Çizelge 4.23 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağılı nem değerleri.....	67
Çizelge 4.24 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değışimi. ..	67
Çizelge 4.25 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağılı değışimi.....	68
Çizelge 4.26 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa göre değışimi.	68
Çizelge 4.27 : Yoğuşma değerlendirmesi.....	70
Çizelge 4.28 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağılı nem değerleri.....	71
Çizelge 4.29 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değışimi. ...	71
Çizelge 4.30 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağılı değışimi.....	71
Çizelge 4.31 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının giriş hava hızına göre değışimi.	72
Çizelge 4.32 : Yoğuşma değerlendirmesi.....	73
Çizelge 4.33 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağılı nem değerleri.....	74
Çizelge 4.34 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değışimi ...	75
Çizelge 4.35 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağılı değışimi.....	75
Çizelge 4.36 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının sıcaklık farkına göre değışimi.	76
Çizelge 4.37 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağılı nem değerleri.....	76

Çizelge 4.38: Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının giriş hava hızına göre değişimi.....	77
Çizelge 4.39 : Toplam kütle geçiş katsayısının giriş hava hızına bağlı değişimi.	77
Çizelge 4.40 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının giriş hava hızına göre değişimi.	78
Çizelge 4.41 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	79
Çizelge 4.42 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının koşullara göre değişimi.	80
Çizelge 4.43 : Toplam kütle geçiş katsayısının koşullara bağlı değişimi.	80
Çizelge 4.44 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının koşullara göre değişimi.	81
Çizelge 4.45 : Terleme akısı.	82
Çizelge 4.46 : Birim zamandaki terleme miktarı $[M'_{ter}]$	82
Çizelge 4.47: Kütle transfer yüzey alanı.	82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sebze cinsine göre ‘f’ ve ‘g’ solunum katsayıları ve % su içeriği	4
Şekil 2.2 : ‘k _s ’ yüzey kütle geçiş katsayısı.....	6
Şekil 2.3 : Farklı sıcaklıklardaki plakalar arasındaki akışkan hareketi (a) kararlı olmayan sıcaklık gradyanı, (b) kararlı sıcaklık gradyanı.....	9
Şekil 2.4: Rejimler ile ilişkili sirkülasyon modelleri.....	11
Şekil 2.5: Alttan ısıtılan kavitelerde kritik Ra _H sayısına göre akış yapıları.....	12
Şekil 2.6 : Problem geometrisi.....	13
Şekil 2.7 : Sayısal modelde ele alınan fiziksel model, sınır koşulları ve boyutsal büyüklükler.....	15
Şekil 2.8 : Problem geometrisi.....	16
Şekil 2.9 : Problem geometrisi.....	16
Şekil 2.10 : Problem geometrisi.....	17
Şekil 2.11 : Problem geometrisi.....	18
Şekil 2.12 : Problem geometrisi.....	18
Şekil 2.13 : Problem geometrisi.....	19
Şekil 2.14 : Problem geometrisi.....	20
Şekil 2.15 : Problem geometrisi.....	21
Şekil 3.1 : Soğukta gıda saklama hacmi fiziksel modeli.....	27
Şekil 3.2 : Deney düzeneği genel görünüm.....	30
Şekil 3.3 : Deney düzeneği gıda saklama hacminin kesit görüntüsü.....	31
Şekil 3.4 : Çift cidarlı yapı.....	31
Şekil 3.5 : Su pompaları ve bağlantılar.....	32
Şekil 3.6 : Tavan yüzeyinin şartlandırılması.....	32
Şekil 3.7 : Hava giriş kanalı.....	33
Şekil 3.8 : Deney düzeneğinde kullanılan iki kapılı no-frost buzdolabı kabini.....	33
Şekil 3.9 : Giriş kanalındaki hava hızı dağılımının belirlenmesi.....	34
Şekil 3.10 : Sebzeliğe giriş kanalında farklı fan besleme gerilimleri için hava hızı dağılımı.....	34

Şekil 3.11 : Sebzelige giriş kanalında farklı fan besleme gerilimleri için hava hızı dağılımı kontur grafikleri.....	35
Şekil 3.12 : Sebzelige giriş hava hızının belirlenmesinde kullanılan sistem.....	35
Şekil 3.13 : Fan frekansı hava hızı arasındaki ilişki.	36
Şekil 3.14 : Sıcaklık ölçüm programı.....	36
Şekil 3.15 : Deney düzeneği sıcaklık ölçüm noktaları şematik gösterimi.	37
Şekil 3.16 : Hava kanalı sıcaklık ölçümleri.....	37
Şekil 3.17 : Sebzelik sıcaklık ölçümleri.	37
Şekil 3.18 : Nem ölçüm programı.	38
Şekil 3.19 : Termokupl kalibrasyon eğrisi.	39
Şekil 3.20 : Sensörlerin bağıl nem ölçüm belirsizliği.	39
Şekil 3.21 : Sensörlerin sıcaklık ölçüm doğruluğu.	40
Şekil 4.1 : k_s tespiti deney düzeneğinin şematik gösterimi	49
Şekil 4.2 : Gıda, TC, bağıl nem sensörlerinin yerleşimi ve ağırlık ölçümü	49
Şekil 4.3 : Brüksel Lahanası k_s değerleri.....	51
Şekil 4.4 : Elma k_s değerleri.	51
Şekil 4.5 : Domates k_s değerleri.	52
Şekil 4.6 : Deney düzeneği sebzeligine salatalık diziliş şekli.	53
Şekil 4.7 : Salatalık yüzeyi ile tavan yüzeyi arasında kalan mesafe.....	53
Şekil 4.8 : Farklı yüzey sıcaklık kombinasyonları için; ısı-kütle geçişine ilişkin büyüklükler ve dikey doğrultudaki hız değerleri.	57
Şekil 4.9 : Farklı yüzey sıcaklık kombinasyonları için; ısı-kütle geçişine ilişkin büyüklükler ve dikey doğrultudaki hız değerleri.	61
Şekil 4.10: Tavan yüzeyindeki yoğuşmanın $\Delta T'$ ye bağlı değişimi (a) $\Delta T=5,5K$, (b) $\Delta T=2,4K$, (c) $\Delta T=0,9K$	62
Şekil 4.11 : Deney düzeneği sebzeliginde brokoli yerleşimi.	65
Şekil 4.12 : Brokoli yüzeyi ile tavan yüzeyi arasında kalan mesafe.....	65
Şekil 4.13 : Ağırlık kaybının koşullara göre değişimi.	69
Şekil 4.14 : Yoğuşma yapısının sıcaklık koşullarına göre değişimi (a) $T_{yzy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$, (b) $T_{yzy}=5^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$, (b) $T_{yzy}=3^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	70
Şekil 4.15: Ağırlık kaybının koşullara bağlı değişimi.	72
Şekil 4.16: Tavan yüzeyindeki yoğuşma durumu (a) 0,02 m/s, (b) 0,04m/s.....	73
Şekil 4.17 : Marul yüzeyi ile tavan yüzeyi arasında kalan mesafe.	74
Şekil 4.18 : Deney koşulları.	79

Şekil 4.19 : Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin tüketilebilirliğe etkisi.	83
Şekil 4.20 : Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişiminin tüketilebilirliğe etkisi.	84
Şekil 4.21 : Soğuk zararlanması değerlendirmesi.	85
Şekil 4.22 : Salatalıklarda sertliğin koşullara bağlı olarak oransal değişimi.	85
Şekil 4.23 : Duyusal analiz doku değerlendirmesi.	86
Şekil 4.24 : Duyusal analiz tüketilebilirlik değerlendirmesi.	86
Şekil 4.25 : 0. gün salatalık görünüşü.	87
Şekil 4.26 : 10 °C koşullarında saklanan salatalıkların 7. gün görünüşü.	87
Şekil 4.27 : 3 °C koşullarında saklanan salatalıkların 7. gün görünüşü.	87
Şekil 4.28 : Brokolilerin deney düzeneği sebzeliği içerisine yerleşimi.	88
Şekil 4.29 : Koşullara bağlı olarak Vitamin C değerinin değişimi.	89
Şekil 4.30 : $T_{zy}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ _ $T_{tvnyzy}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$ koşulunda kümülatif CO ₂ üretimi.	90
Şekil 4.31 : $T_{zy}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ _ $T_{tvnyzy}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$ koşulunda kümülatif CO ₂ üretimi.	90
Şekil 4.32 : $T_{zy}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$ _ $T_{tvnyzy}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$ koşulunda kümülatif CO ₂ üretimi.	91
Şekil 4.33 : Koşullar ve gün bazında brokolilerde meydana gelen renk değişimi.	92
Şekil 4.34 : Duyusal analiz renk değerlendirmesi.	92
Şekil 4.35 : Duyusal analiz tüketilebilirlik değerlendirmesi.	93
Şekil 4.36 : Hava giriş hızının marul tüketilebilirlik parametresine etkisi.	93
Şekil 4.37 : Marul yerleşiminin tüketilebilirliğe etkisi.	94

SEMBOL LİSTESİ

A:	yüzey alanı
Ar:	en-boy oranı (aspect ratio)
C :	molar derişiklik
d :	kütlesel derişiklik
D :	kütlesel yayılım (difüzyon) katsayısı
Da :	Darcy gözeneklilik sayısı
D_{va} :	su buharı ile hava arasındaki ikili kütlesel yayılım katsayısı
f:	doğrusal solunum katsayısı
E:	enzim yoğunluğu
g:	üssel solunum katsayısı
g :	yerçekimi ivmesi; üssel solunum katsayısı; gıda alt indisi
Gr :	Grasshof sayısı
Gr_d :	Derişiklik Grasshof sayısı
H:	yükseklik, entalpi, sıcak taraf
k:	soluma oranı sabiti, ısı iletim katsayısı
k_s:	sentez oranı sabiti, gıda yüzeyinden terleme kaynaklı yayılımsal kütle geçiş katsayısı (gıda terleme katsayısı)
k_d:	ayırışma oranı sabiti
k_a :	hava tarafı taşınımsal kütle geçiş katsayısı
k_t :	gıda yüzeyinden havaya terleme ve taşınım kaynaklı toplam kütle
L:	boy
L_m:	su kaybı oranı
M:	ağırlık kaybı
m_{CO2}:	üretilen karbondioksit miktarı
Nu :	Nusselt Sayısı
P :	basınç

P_d :	doyma basıncı
P_s :	yüzeydeki doyma basıncı
Pr :	Prandtl Sayısı
P_v :	nemli hava içerisindeki su buharı kısmi basıncı
R:	solunma oranı, ideal gaz sabiti
Ra :	Rayleigh sayısı
Ra_d :	kütle transferi Rayleigh sayısı
Ra_m :	derişiklik ve sıcaklık etkilerinin bir arada bulunduğu değiştirilmiş Rayleigh sayısı
Re :	Reynolds sayısı
Q_r:	solunma ısısı
Sc :	Schmidt sayısı
Sh :	Sherwood sayısı
T_a:	ortam sıcaklığı
T_m:	gıda ortalama sıcaklığı
T_p:	gıda sıcaklığı
W:	ısı üretimi
α :	ısıl yayılım katsayısı
λ:	buharlaşma gizli ısısı
β :	ısıl genleşme katsayısı
β_d :	derişiklik genleşme katsayısı
Γ :	boyutsuz derişiklik
v :	özgül hacim
ω :	özgül (mutlak) nem
∂ :	kısmi diferansiyel
Φ, ϕ :	bağıl nem
μ :	dinamik viskozite
ν :	kinematik viskozite
ρ :	yoğunluk

**SEBZE YÜKLÜ SOĞUTULAN BİR HACİM İÇERİSİNDE DOĞAL
TAŞINIM İLE ISI-KÜTLE TRANSFERİNİN İLGİLİ GIDA KALİTE
PARAMETRELERİ İLE BİRLİKTE İNCELENMESİ**

ÖZET

Tez çalışması kapsamında, farklı sebze grupları için saklama koşullarına ilişkin fiziksel parametrelerin doğal taşınım ile ısı-kütle transferine etkisi irdelenmiş ve fiziksel parametreler ile gıda kalite parametreleri ilişkilendirilmiştir.

Sebzelik fiziksel modeli göz önünde bulundurulduğunda, sebzelikteki saklama koşullarını tayin eden, sebzelik tasarımına ilişkin başlıca fiziksel parametreler; saklama sıcaklığı, yüzeyler arası sıcaklık farkı, giriş hava hızı, gıda miktarı ve/veya konumu olarak belirlenmiştir. Sebzelik fiziksel modeli göz önünde bulundurularak belirlenen sebzelik tasarımına ilişkin fiziksel parametrelerin bağımsız değişkenler olarak kontrol edilebileceği bir parametrik deney düzeneği kurulmuştur. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği gıdalar; neme duyarlı sebzeler, düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler ve soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler olmak üzere üç ayrı grup altında incelenmiştir. Neme duyarlı sebzeler grubunu temsilen marul ile, düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler grubunu temsilen brokoli ile, soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler grubunu temsilen salatalık ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında kurulan deney düzeneğinde, sıcaklık ve bağıl nem değerleri deneysel olarak ölçülmekte, deneysel verilerden yola çıkılarak, özgül nem, derişiklik değerleri ile ısı transferi ve kütle transferi Ra sayıları, ısı transfer katsayısı ve kütle transfer katsayısı, doğal taşınım korelasyonları kullanılarak hesaplanmaktadır. Fiziksel parametrelerin etkisi ile oluşan deneysel koşulların, hesaplanan büyüklüklere etkisi ve bu büyüklüklerin değişimleri verilmiştir. Söz konusu fiziksel parametrelerin hesaplanan büyüklüklere etkisinin yanısıra gıda kalitesine etkisi de irdelenmiştir. Bu kapsamda, deneysel koşullar altında saklanan gıdalar ile gıda analizleri gerçekleştirilmiş ve fiziksel parametreler ile gıda kalite parametreleri ilişkilendirilmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, soğukta saklanan gıdalardan soluma kaynaklı ısı transferi ile terleme kaynaklı kütle transferine ilişkin literatür incelemesine, doğal taşınım denklemleri, kapalı kavitede doğal taşınım ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalara, problem geometrileri ve elde edilen korelasyonlara yer verilmiştir. Bununla birlikte, hesaplamalarda kullanılacak olan psikrometrik tanımlar ve bağıntılar da bulunmaktadır. Bu bölümde ayrıca, gıda kalite değerlendirmeleri kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara da yer verilmiştir.

İkinci bölümde, deneysel çalışmalarda irdelenen fiziksel parametrelerin tanıtımı, deney düzeneği tasarımı, ölçüm ve veri toplama sistemi ile ölçüm elemanlarının kalibrasyon eğrileri ve belirsizlik hesaplaması yer almaktadır.

Üçüncü ve son bölümde, deney sonuçları değerlendirme yöntemi matematiksel modeli, terleme katsayısı tespiti ile gıda yüklü deneysel çalışmaların sonuçları ve deneysel çalışma sonuçları kullanılarak hesaplanan büyüklükler, gıda cinsine göre gruplandırılarak verilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilirken, deneysel olarak ölçülen büyüklüklerden yola çıkılarak hesaplamalar yapılmıştır. Nihai çıktılarından biri olan toplam kütle transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılan gıda yüzey kütle geçiş katsayısı yardımcı deneysel çalışmalar kapsamında tespit edilmiştir. Gıda yüklü deneysel çalışmalar, gıda cinsine göre sırasıyla, salatalık, brokoli ve marul için gerçekleştirilmiştir. Her bir sebze grubu için, yüzeyler arası sıcaklık farkı ve giriş hava hızının etkisi ve marul için ayrıca yerleşim ve miktarın etkisi ısı-kütle transferi açısından irdelenmiştir. Son olarak, fiziksel parametreler sebze grupları özelinde gıda kalite parametreleri ile birlikte incelenmiştir.

**INVESTIGATION OF NATURAL CONVECTION PARAMETERS
REGARDING HEAT AND MASS TRANSFER IN A REFRIGERATED
SPACE WITH FOOD LOAD, AND ASSOCIATION WITH THE FOOD
QUALITY**

SUMMARY

In this thesis, effects of physical parameters which are related with storage conditions for different vegetable groups to the heat and mass transfer with natural convection is examined and physical parameters and food quality parameters are associated.

The basic physical parameters related with crisper design which specifies the storage conditions in crisper is storage temperature, temperature difference between the surfaces, air velocity at the inlet cross section, food-load occupancy rate. Physical parameters have been determined by taking into consideration crisper physical model. An experimental set up has been set to control physical parameters as independent variables.

For experimental studies vegetables are classed on three main group which are moisture sensitive vegetables, vegetables which should be storage in low temperature and chilling injury sensitive vegetables. Experimental studies has been performed with lettuce, broccoli, cucumber respectively.

Temperature and relative humidity values has been measured experimentally with experimental set-up, based on these measurements, relative humidity, concentration, heat transfer and mass transfer Ra numbers, heat transfer coefficient and mass transfer coefficient have been calculated within usage of natural convection correlations. Effect of considered physical parameters to the calculated parameters and food quality has been examined. Within this scope, food analysis completed with representative vegetables which has been storage under experimental conditions.

First section is entrance of thesis and second section of thesis includes literature research for heat transfer caused by the respiration of the vegetables stored under cooling conditions and mass transfer caused by transpiration, natural convection equations, studies has been realized related with natural convection, problem geometries and the correlations. Within these, psychrometry definitions and equations also covered. In this section, also food quality assessments have been researched.

In the third section, physical parameters are examined for experimental studies and experimental set-up is explained. System for measuring and data storing, calibration

curves of the measurement equipments and uncertainty analysis about experimental set-up are presented.

In the fourth section, experimental study results and mathematical model for analysing this results are presented and experimental studies realized according to vegetable groups. Determination of surface mass transfer coefficient which has been used on calculation of total mass transfer coefficient is realized with independent experimental study. Food loaded experimental studies have been performed for type of vegetable in order of cucumber, broccoli and lettuce experiments. For each vegetable type effects of temperature difference, air inlet at the cross section and additionally for lettuce food load occupancy rate have been investigated. Physical parameters of vegetable storage on refrigerated space have been associated to food quality parameters for each vegetable groups.

In the final section, summary of results and suggestions are obtained. It is necessary that results sum up;

- ✓ In constant top surface temperature and changing of other surface temperatures case, temperature difference between food surface and top surface of cavity change in line with heat convection coefficient and heat transfer Ra number.
- ✓ In mass transfer assessments, decreasing of temperature difference effects concentration difference of surfaces correspondingly mass transfer Ra number, total mass transfer coefficient and %weight loss from vegetable decrease.
- ✓ Effects of temperature difference of surfaces on condensation is also evaluated in experimental studies. Amount of condensation is evaluated with concentration difference of top surface on saturation conditions and air film between food load and top surface. Increasing of temperature difference of surfaces cause increasing of condensation amount on top surface.
- ✓ Experimental studies about effect of temperature difference between surfaces in this thesis is in line with literature. Additionally, food quality assessments support the results of experimental studies about temperature difference between surfaces.
- ✓ Effect of air velocity on inlet of cavity is studied on constant temperature conditions. Heat transfer Ra number and heat convection coefficient values are same between different conditions due to constant temperature conditions.
- ✓ In mass transfer assessments, for broccoli and cucumber weight loss is much due to high air velocity values that cause high concentration difference between surfaces.
- ✓ In experimental studies with lettuce, high air velocity values cause lower concentration difference between surfaces. Therefore, lettuce weight loss is lower high air velocity values. This result subject for air velocities lower than 0,1 m/s.

- ✓ Location and amount effect on heat and mass transfer is tested with lettuce. Horizontal settlement cause less weight loss than vertical settlement of lettuce. Additionally, for same characteristic length, less amount cause more weight loss of lettuce.
- ✓ Physical parameters related with crisper design which specifies the storage conditions in crisper is storage temperature, temperature difference between the surfaces, air velocity at the inlet cross section, food-load occupancy rate and food quality parameters are associated.
- ✓ In food quality assessments; chilling injury, chlorophyll, weight loss are obtained as indicative tests for cucumber, broccoli, lettuce respectively.

For future studies, some suggestions are given below:

- ✓ Temperature and relative humidity measuring locations and data storing should be improved, in this way heat and mass transfer correlations will be determined.
- ✓ In respiration rate measuring method of vegetables, sample is taken from storage conditions and placed in a closed cavity for measuring in this study. Respiration rate measuring should be done from storage condition and place of sample without taking from there so measuring system will be studied.
- ✓ For the purpose of present of transpiration mechanism of refrigerated vegetables, transpiration flux should be evaluated instead of cumulative transpiration amount. Therefore transpiration flux measuring system and test conditions from refrigerated vegetables will be studied.
- ✓ In addition to temperature and relative humidity measuring in experimental studies, gas compositions related with food respiration should be measured and changing rate of gas compositions will be used for food quality assessments.

1. GİRİŞ

Sebze-meyvelerin ideal saklama koşulları, sebze-meyve cinsine göre farklılıklar göstermektedir. Saklama koşullarındaki fark temel olarak saklama sıcaklığından ileri gelmektedir, bağıl nem değeri genel bir çoğunluk için %90-95 değerindedir. Soğutulan hacimdeki bağıl nem değeri, nemli havanın içeriğindeki kısmi buhar basıncının, söz konusu saklama sıcaklığındaki havanın doyma basıncına oranının bir ifadesidir. Sebze-meyveler yüksek su içeriğine sahip olduğundan, nem kaybının önlenmesi için saklama hacmini oluşturan havanın nem içeriğinin sebze-meyve özelliklerine yakın olması gerekmektedir. Düşük bağıl nem değerinde havadaki kısmi buhar basıncı da daha düşük olacağı için sözkonusu koşullar altında sebze-meyvelerden nem kaybı daha yüksek olacaktır. Bu sebeple ideal saklama koşullarında yüksek bağıl nem değerleri sağlanmalıdır. Sebze-meyve saklama hacminde yüksek bağıl nem değerlerinin sağlanmasının en önemli dezavantajı yoğuşma oluşma riskidir. Sebze-meyve saklama hacminin soğuk iç yüzeylerinde ve sebze-meyve yüzeylerindeki yoğuşma, sebze-meyvelerin çürümesine neden olacaktır. Dolayısıyla hem yoğuşma oluşumu açısından hem de nem kaybı açısından, saklama hacmine ait yüzeylerin sıcaklıkları ve bu sıcaklıkların kontrolü önem taşımaktadır. Yoğuşmanın kontrol altına alındığı saklama hacminde, sebze-meyvelerin yüksek bağıl nemde ideal sıcaklıklarında saklanması, gıda kalitesi ve gıda raf ömrü açısından iyileşme sağlayacaktır.

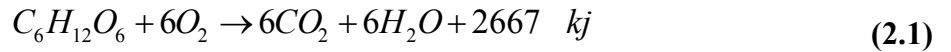
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Soğukta Saklanan Gıdalardan Soluma Kaynaklı Isı Transferi

Soluma, şeker ve oksijenin yakılarak, karbondioksit, su ve ısıyı açığa çıkardığı kimyasal bir olaydır. Gıda cinsine bağlı olarak, soluma sonucunda açığa çıkan ısı miktarı değişmektedir.

Becker ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [1], soğutulan gıdaya ilişkin termofiziksel özellikler ile hava akışına ilişkin parametrelerin ısı-kütle transferi temelinde teorik modelleme esasları anlatılmıştır. Gıdaya ilişkin termofiziksel özellikler kapsamında terleme ve soluma mekanizmaları, hava akışına ilişkin parametreler kapsamında da psikrometrik özellikler ve ısı-kütle transfer katsayıları ele alınmıştır. Bu çalışmada; CO₂ üretim miktarı ortalama sıcaklığa ve gıda cinsine bağlı olarak tanımlanan ‘f’ ve ‘g’ solunum katsayılarına bağlı olarak verilmiştir. Gıda cinsine göre verilen ‘f’ ve ‘g’ solunum katsayıları verilmiştir.

Solunum denkleminde göre (2.1), her 6 mol CO₂ üretimi için 2667 kJ ısı açığa çıkmaktadır. Buna göre her 1 mg CO₂ için açığa çıkan ısı miktarı 10,7 J olmaktadır. Bu çalışmada ayrıca, soluma esnasında gıdanın birim kütlesi için ısı üretim miktarı da verilmiştir.



$$\dot{m}_{CO_2} = f \left(\frac{9T_m}{5} + 32 \right)^g \quad (2.2)$$

$$W = 10,7 \dot{m}_{CO_2} \quad (2.3)$$

Ürün	Solunum Katsayıları		% Su İçeriği
	<i>f</i>	<i>g</i>	
Armut	6,3614 x 10 ⁻⁵	3,2037	83,2
Brüksel Lahanası	2,7238 x 10 ⁻³	2,5728	84,9
Çay Üzümlü	7,2520 x 10 ⁻⁵	3,2584	83,2
Çilek	3,6683 x 10 ⁻⁴	3,0330	89,9
Domates	3,0074 x 10 ⁻⁴	2,8350	93,0
Elma	5,6871 x 10 ⁻⁴	2,5977	84,1
Erik	8,6080 x 10 ⁻⁵	2,9720	86,6
Fasulye (Taze)	3,2828 x 10 ⁻³	2,5077	88,9
Fasulye (Kuru)	9,1051 x 10 ⁻⁴	2,8480	66,5
Greyfrut	3,5828 x 10 ⁻³	1,9982	89,1
Havuç	5,0018 x 10 ⁻²	1,7926	88,2
İhlamur	2,9834 x 10 ⁻⁸	4,7329	89,3
Kabak	6,0803 x 10 ⁻⁴	2,6183	92,4
Limon	1,1192 x 10 ⁻²	1,7740	87,4
Patates	1,7090 x 10 ⁻²	1,7690	79,5
Portakal	2,8050 x 10 ⁻⁴	2,6840	86,4
San Turp	1,6524 x 10 ⁻⁴	2,9039	89,1
Soğan	3,6680 x 10 ⁻⁴	2,5380	87,5
Şeftali	1,2996 x 10 ⁻⁵	3,6417	89,1
Şeker Pancarı	8,5913 x 10 ⁻³	1,8880	87,6
Üzüm	7,0560 x 10 ⁻⁵	3,0330	81,9
Yeşil Biber	3,5104 x 10 ⁻⁴	2,7414	92,4

USDA(1986)

Şekil 2.1 : Sebze cinsine göre ‘*f*’ ve ‘*g*’ solunum katsayıları ve % su içeriği [1].

Uchino ve diğerleri tarafından yayınlanan çalışmada [2], taze gıdalardan meydana gelen soluma oranının, zamana ve sıcaklığa bağlı olarak incelendiği bir matematiksel model geliştirilmiş ve bu model deneysel çalışmalarla valide edilmiştir. Matematiksel model hem zamana hem de sıcaklığa bağlı olarak geliştirilmiştir. Geliştirilen soluma denklemi aşağıda verilmiştir.

$$R_C = K_1 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \{1 + K_2 \exp(-k_d t)\} \quad (2.4)$$

$$K_1 = \frac{k_s}{k_d} A \quad (2.5)$$

$$K_2 = \frac{k_d}{k_s} [E]_0 - 1 \quad (2.6)$$

Matematiksel modeli doğrulamak amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda, farklı sıcaklıklarda, farklı zaman aralıkları için patlıcan, kuşkonmaz ve brokolinin soluma

oranları ölçülmüş ve deneysel ve teorik sonuçlar arasında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Techavuthiporn ve diğerleri tarafından yayınlanan çalışmada [3], saklama koşullarındaki brokolilerde, askorbik asit miktarı (AA) ile soluma arasındaki ilişki; farklı sıcaklık koşulları, O₂ konsantrasyonları, kültür bitkileri ve brokoli türleri (işlenmiş / işlenmemiş) için incelenmiştir. Yapılan deneylerde, AA miktarının, biriken CO₂ miktarı (AR_{CO2}) ile düştüğü görülmüştür. Deneysel testler için, işlenmiş brokoliler, sıcaklık salınımlı koşullarda ve modifiye atmosfer koşullarında saklanmıştır. Bu çalışma ile iki farklı proses olan soluma ve askorbik asit bozulması prosesleri arasında güçlü bir ilişki olduğu ortaya konmuştur.

2.2 Soğukta Saklanan Gıdalardan Terleme Kaynaklı Kütle Transferi

Terleme, sebze-meyvelerin canlı olduğunun bir göstergesidir ve taze gıdalardan gerçekleşen nem kaybı olarak tanımlanmaktadır. Terlemenin aşamaları; yüzey boyunca nemin kütleli taşınımı, yüzeyden nemin buharlaşması ve yüzeyden ortama taşınımsal kütle geçişidir. Kütle geçişine neden olan esas unsur, yüzey ile hava arasındaki su buharı derişiklik farkıdır. Yüzey ile hava arasındaki su buharı derişiklik farkı nedeniyle, yüzeydeki su buharı doyma basıncı ile havadaki kısmi buhar basıncı arasında bir fark oluşmaktadır. Buna göre, birim gıda yüzeyinden terleme kaynaklı kütleli akı; k_t terleme ile toplam kütle geçiş katsayısı ve P_s yüzeydeki su buharı doyma basıncı ile P_a havadaki su buharı kısmi basıncı arasındaki farka bağlı olarak tanımlanmaktadır [1].

$$\dot{m} = k_t \cdot (P_s - P_a) \quad (2.7)$$

k_t terleme katsayısı, hava tarafı taşınımsal kütle geçiş katsayısı ' k_a ' ve yüzey kütle geçiş katsayısına ' k_s ' bağlı olarak verilmiştir. k_a , hava debisinin bir fonksiyonu olup gıda yüzeyinden taşınımsal kütle geçişini tanımlamaktadır. k_s ise, yüzeyin nem taşınımına karşı yüzeyin kütleli yayılımını (difüzyon) ifade etmektedir.[1]

$$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_s} \quad (2.8)$$

k_s ,yüzey kütle transfer katsayısı, gıda gözenekliliğine bağlı olarak deneysel olarak tespit edilmektedir. Chau ve diğ.(1987) ve Gan&Woods (1989) tarafından hazırlanan tabloda, farklı gıda türleri için yüzey kütle transfer katsayıları ve gıda içeriğinin buhar basıncını düşürme etkisi (VPL) bulunmaktadır.

Ürün	"k _s " Yüzey Kütle Geçiş Katsayısı [g/(m ² .s.Mpa)]				
	Düşük Değer	Ortalama Değ.	Yüksek Değer	Std.Sapma	VPL
Armut	0,523	0,686	1,200	0,149	0,98
Brüksel Lahanası	9,64	13,30	18,60	2,44	0,99
Çay Üzümlü	0,955	2,190	3,390	0,640	0,98
Çilek	3,95	13,60	26,50	4,80	0,99
Domates	0,217	1,100	2,430	0,670	0,99
Elma	0,111	0,167	0,227	0,030	0,98
Erik	-	1,378	-	-	0,98
Fasulye (Taze)	3,46	5,64	10,00	1,77	0,99
Fasulye (Kuru)	3,27	4,33	5,72	0,59	0,99
Greyfrut	1,09	1,68	2,22	0,33	0,99
Havuç	31,8	156,0	361,0	75,9	0,99
İhlamur	1,04	2,22	3,48	0,56	0,98
Kabak	2,50	6,72	13,00	2,84	0,99
Limon	1,09	2,08	3,50	0,64	0,98
Patates	-	0,635	-	-	0,98
Portakal	1,38	1,72	2,14	0,21	0,98
Sarı Turp	-	116,6	-	-	0,99
Soğan	-	0,888	-	-	0,98
Şeftali	1,36	14,20	45,90	5,20	0,99
Şeker Pancarı	9,09	33,60	87,30	20,10	0,96
Üzüm	-	0,402	-	-	0,98
Yeşil Biber	0,545	2,159	4,360	0,710	0,99

Chau ve diğ.(1987); Gan&Woods(1989)

Şekil 2.2 : 'k_s' yüzey kütle geçiş katsayısı.

Hava filmi kütle transfer katsayısı, Sh-Re-Sc korelasyonları kullanılarak tespit edilmektedir. k_a ' derişiklik ve buhar basıncı arasındaki ilişkiye göre dönüştürülmüş kütle geçiş katsayısıdır, Sh sayısının dönüştürülmüş kütle geçiş katsayısına bağlı ifadesi (2.9)' da verilmiştir.

$$Sh = \frac{k'_a \cdot d}{D} \quad (2.9)$$

$$k_a = \frac{1}{R_{H_2O} \cdot T} \cdot k'_a \quad (2.10)$$

Mahajan ve diğerleri tarafından yayınlanan çalışmada [4], farklı sıcaklık ve nem koşullarında mantarlardan meydana gelen kütle kaybının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bütün deneysel koşullar için, mantarların kütle kaybı ölçülmüş ve terleme oranları hesaplanmıştır. 4, 10 ve 16 °C sıcaklık değerleri ve %76, %86 ve %96 nem değerlerinin bütün kombinasyonları için terleme oranı hesaplanmış ve terleme oranı için 0,14 - 2,5 mg/cm²h aralığı elde edilmiştir. Sıcaklık ve nem değeri

ile su kaybının gelişimi arasındaki ilişkinin ortaya konabilmesi için matematiksel model geliştirilmiştir. Buna göre, hem sıcaklık hem de nem değerinin mantarlar için terleme oranına etki ettiği görülmüştür. 4 °C' de saklama bölmesinin bağıl nem değeri, %76'dan %96' ya arttırıldığında, terleme oranının %87 azaldığı, bağıl nem değerinin %96 olduğu saklama bölümünde, sıcaklık değeri 16 °C' den 4 °C' ye düşürüldüğünde, terleme oranının %61 azaldığı görülmüştür.

Kang diğerleri tarafından yayınlanan çalışmada [5], taze gıdaların normal saklama koşullarında ve kontrollü atmosferde nem kaybını belirlemek için gıda ile gıdanın bulunduğu ortam arasındaki kütle ve ısı transferi dengeleri üzerine bir terleme modeli geliştirilmiş ve deneysel testler yapılmıştır. Terleme ile suyun gıdadan transferi, zamandan bağımsız olarak ısı transferi ile ilişkilendirilmiştir. Buna göre, ortam havasında doğal konveksiyon ile açığa çıkan ısı ile gıda soluması kaynaklı ortaya çıkan ısıların toplamının, gıda yüzeyinden nemin buharlaştırılmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Soluma ısısı, O₂ tüketimi ve CO₂ üretimi ölçülerek soluma oranından elde edilmiştir. Taşınım ile ısı transferi de, doğal taşınım için oluşturulan ampirik formülasyon ile hesaplanmıştır ve bu hesaplamada gıda sıcaklığı yaş termometre sıcaklığı olarak alınmıştır.

Kütle transferinin, gıda soluması ve taşınımsal ısı transferi ile ilişkilendirildiği enerji dengesi denkleminde, soluma kaynaklı ısı ve taşınımsal ısı transferi toplamı, gıdanın buharlaşma gizli ısısı ve gıda sıcaklık değişiminden kaynaklanan duyulur ısının toplamına eşitlenmiştir. Zamana bağlı olarak verilen gıda sıcaklığı, saklama koşullarının zamandan bağımsız olması kabulü ile ihmal edilmiştir.

$$Q_r W + hA(T_a - T_p) = L_m \lambda + WC_p \left(\frac{dT_p}{dt} \right) \quad (2.11)$$

Doğal taşınım ile ısı transfer katsayısı, laminar bölge, yatay silindir ve küre kabulleri ile ifade edilmiştir.

$$h = (3600 \times 1,32) \times \left(\frac{T_a - T_p}{d} \right)^{0,25} \quad (2.12)$$

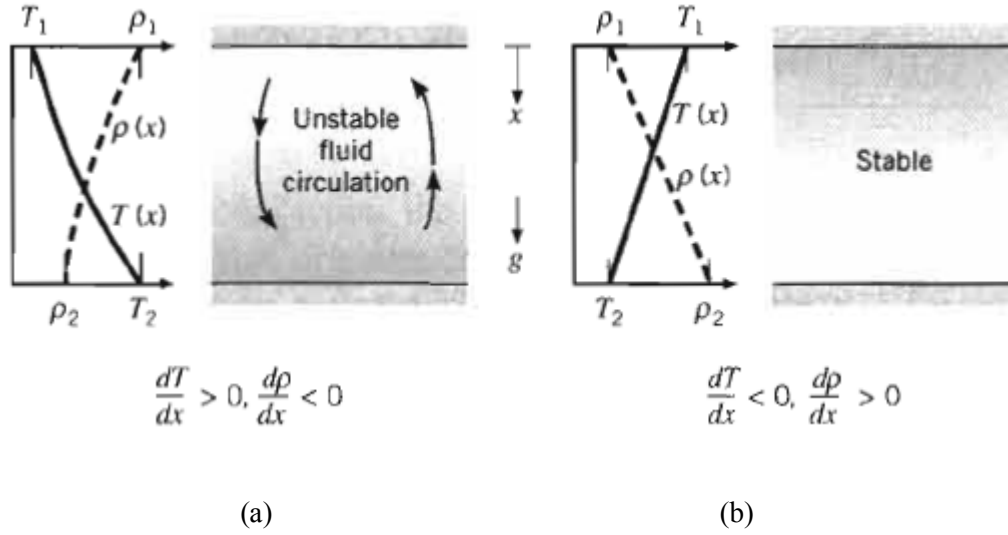
$$h = \frac{k(2 + 0,39Gr^{0,25})}{d} \quad (2.13)$$

2.3 Doğal Taşınım

Doğal taşınımında akışkan hareketi, akışkan içindeki kaldırma kuvvetleri ile oluşmaktadır, zorlanmış taşınımında ise dış etkiler tarafından yaratılmaktadır. Doğal taşınımın etkili olduğu, pratikte pek çok uygulama bulunmaktadır. Doğal taşınım, elektronik cihazlardan, borulardan ve dağıtım hatlarından olan ısı geçişini etkilemektedir. Elektrikli ısıtıcılardan veya radyatörlerden oda havasına aktarılan ısı, bir soğutma ünitesinin yoğuşturucu serpantininden çevreye verilen ısı, doğal taşınımın etkisi ile oluşan olaylardır [6].

Doğal taşınımında kaldırma etkisi, akışkan içerisindeki yoğunluk gradyanı ile, yoğunlukla orantılı bir gövde kuvvetinin birlikte olmalarının sonucu doğmaktadır. Gövde kuvveti genellikle yer çekimi etkisidir. Bir akışkan içinde yoğunluk gradyanını ortaya çıkarabilecek farklı durumlar olmakla birlikte en genel olanı bir sıcaklık gradyanına bağlı yoğunluk farklılığıdır [6]. Yoğunluk gradyanının sıcaklık farklılığından kaynaklandığı ve gövde kuvvetinin yerçekimsel olduğu doğal taşınım problemi ele alındığında, kararlı ve kararsız koşulların oluştuğu iki farklı durum söz konusu olacaktır. Alt levhanın sıcaklığının üst levhanın sıcaklığından daha yüksek olduğu, farklı sıcaklıktaki iki büyük yatay levha arasında bulunan akışkanda yoğunluk yerçekimi kuvvetinin yönünde azalacaktır. Eğer levhalar arasındaki sıcaklık farkı, kritik bir değeri geçerse, koşullar kararsız olmakta ve kaldırma kuvvetleri sürtünme kuvvetlerinin engelleyici etkisini yenmeye başlamaktadır. Üst tabakalardaki daha yoğun akışkan üzerine etkiyen yerçekimi kuvveti, alt tabakalardaki daha hafif akışkan üzerine etkiyen kuvvete baskın gelmekte ve dolaşım hareketi başlamaktadır (Şekil 2.3). Ağır akışkan aşağıya doğru inerek ısınmaya başlamakta ve hafif akışkan yükselerek soğumaya başlamaktadır. Bu durumda, ısı geçişi alt yüzeyden üst yüzeye doğru doğal taşınım ile gerçekleşmektedir [6].

Üst levhanın alt levhadan daha yüksek sıcaklıkta olduğu durumda, yoğunluk yerçekimi kuvveti yönünde azalacaktır. Bu durumda, koşullar kararlıdır ve akışkan hareketi söz konusu değildir. Isı geçişi, üstten aşağıya doğru iletim ile gerçekleşmektedir [6].



Şekil 2.3 : Farklı sıcaklıklardaki plakalar arasındaki akışkan hareketi (a) kararlı olmayan sıcaklık gradyanı, (b) kararlı sıcaklık gradyanı [6].

Doğal taşınım ayrıca, akışın bir yüzeyle sınırlandırılması durumuna göre; yakında bir yüzey olmaması durumu (serbest sınır akışı) ve bir yüzey tarafından sınırlanan akış olarak da sınıflandırılabilir.

Doğal taşınımında temel boyutsuz sayı, Grashof ‘Gr’ sayısıdır. Doğal taşınımında, Gr sayısı, akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını ifade etmektedir. Gr sayısının ısı geçişi için Pr sayısı ile kütle geçişi için Sc sayısı ile çarpılması sonucunda, sırasıyla ısı transferi Ra sayısı ve kütle transferi Ra sayısı elde edilmektedir. Doğal taşınımında, farklı akış türlerinde ısı ve kütle geçişi için tanımlanan korelasyonlar genel olarak Ra sayısına bağlı olarak verilmektedir. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş için tanımlanan kritik Ra sayısı ‘ $Ra_c=10^9$ ’ dur.

Doğal taşınımında, kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri aşağıdaki gibidir:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

x-momentum denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.15)$$

y-momentum denklemi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g[1 - \beta(T - T_0)] \quad (1.16)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1.17)$$

y-momentum denkleminde, denklemin sağ tarafında kaldırma kuvveti terimi yer almaktadır. Kaldırma kuvveti terimi, akış yoğunluğunun değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu değişim, hacimsel ısı genleşme katsayısı ‘ β ’ ile ifade edilmektedir. Hacimsel ısı genleşme katsayısı, yoğunluğun sabit basınçta sıcaklığa göre değişimini göstermektedir. Hacimsel ısı genleşme katsayısı, Bousinesq yaklaşımı ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.18)$$

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_\infty - \rho}{T_c - T} \quad (2.19)$$

$$(\rho_\infty - \rho) \approx \rho \beta (T - T_c) \quad (2.20)$$

Doğal taşınım etkileri hacimsel genleşme katsayısı β ’ ya bağlıdır ve β akışkan türüne bağlı olarak belirlenmektedir. Mükemmel gaz için, yoğunluk $\rho = P/RT$ şeklinde ifade edilmekte, dolayısıyla β sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmaktadır.

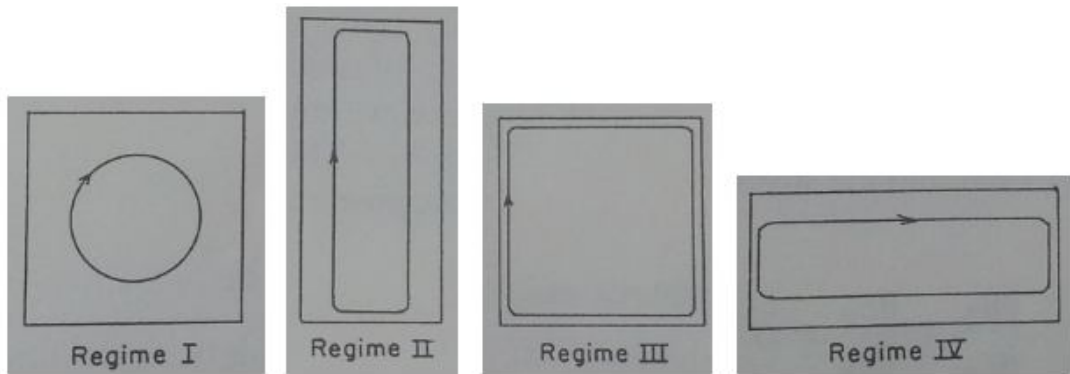
$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{\rho} \frac{P}{RT^2} = \frac{1}{T} \quad (2.21)$$

Kapalı Kavitede Doğal Taşınım

Kapalı kavitede doğal taşınım, sonlu boyutta bir akışkanın, akışkanı çevreleyen bütün yüzeyler ile ısı olarak ilişkide olduğu karmaşık bir etkileşim söz konusudur. Dış akışta doğal taşınım ise sınır tabaka, tek bir yüzey ile geniş bir akışkanın etkileşimi sonucunda oluşmaktadır. [7]

Bejan, kapalı kavitede doğal taşınımı genel olarak, yandan ısıtılan kapalı kaviteler ve alttan ısıtılan kapalı kaviteler olmak üzere iki gruba ayırmıştır.

Yandan ısıtılan kapalı kavite: H yüksekliğinde ve L boyunda, yan duvarlardan bir tanesinin ısıtıldığı, diğerinin soğutulduğu ve alt ve üst duvarların adyabatik olduğu kapalı bir kavite ele alındığında, farklı termal tabakalar için iki kriter [$H/L < Ra_H^{1/4}$] ve [$H/L > Ra_H^{-1/4}$] ve taşınım ısı transfer koşulu [$Ra_H > 1$] ile doğal taşınım için dört farklı ısı transfer rejimi görülmektedir.



Şekil 2.4: Rejimler ile ilişkili sirkülasyon modelleri [7].

I. İletim sınırı: Kavite boyunca sıcaklık lineer olarak değişmektedir. Bu sebeple, iki yan duvar arasındaki ısı transfer oranı, $kH\Delta T/L$ mertebesinde. Yatay sıcaklık gradyanı $\Delta T/L$ yavaşça artmakta ve saat yönünde sirkülasyon yapmaktadır, ancak bu akışın ısı transferine katkısı çok azdır.

II. Uzun kavite sınırı: Kavite yüksekliklerinin çoğunluğunda sıcaklık iki yan duvar arasında lineer olarak değişmektedir. Isı transferi oranı, iletim sınırındakine benzer şekilde $kH\Delta T/L$ mertebesinde. Saat yönündeki sirkülasyon modeli, alt ve üst duvarlar civarındaki ayrı tabakalar ile karakterize edilmektedir.

III. Yüksek Ra_H sınırı (Sınır tabaka rejimi): Dikey ısı sınır tabakalar, ısıtılan sınır tabakalar boyunca belirgin olarak şekillenmektedir. Kavite boyunca, ısı transfer oranı $(k/\delta_{T,f})H\Delta T$ olarak ölçülendirilir. Adyabatik yatay duvarlar ayrı termal tabakalar ile

şekillenmektedir. Kavite içerisindeki akışkanın büyük bir kısmı görece olarak durgun ve ısı olarak tabakalaşmış haldedir.

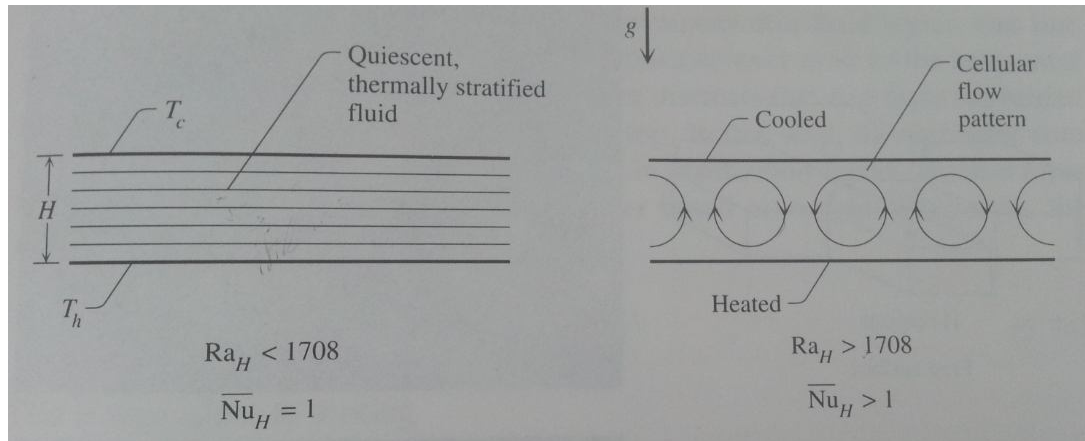
IV. Dar kavite sınırı: Isı transfer mekanizması, dikey ısı tabakaların varlığı ile yönetilmektedir ve $(k/\delta_{T,f})H\Delta T$ olarak ölçülendirilir. Bu ölçü üst sınırı temsil etmektedir. Kavitenin üst yatay bölümü izolasyon etkisi yaratmaktadır. Bu bölgede, iki yatay karşı akış ısı olarak ilişkilidir.

Alttan ısıtılan kapalı kavite: Yandan ısıtılan ve alttan ısıtılan kavite arasındaki temel fark, yandan ısıtılan kavitede, bouyancy etkisiyle akışın en küçük sıcaklık farkında dahi oluşmasıdır. Alttan ısıtılan kaviteelerde ise, akışkan hareketinin taşınım ısı transferinin gözlemlenebilmesi için sıcaklık farkı kritik bir değere ulaşmalıdır.

Yatay olarak uzun ve geniş kaviteelerde, taşınımın başlangıç durumunu tanımlayan kritik Ra sayısı aşağıda verilmiştir.

$$Ra_H \geq 1708 \quad (2.22)$$

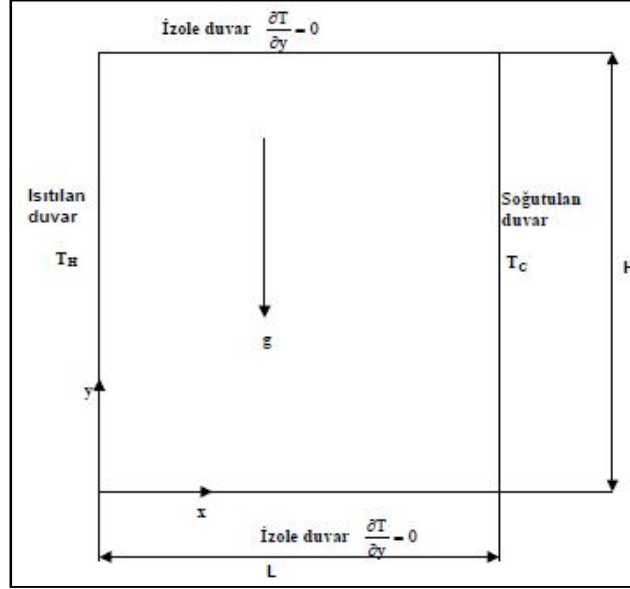
Ra sayısının 1708 değerinden yüksek olduğu durumda akış, ara kesiti kare olan iki boyutta sarmallardan oluşur. Bu akış yapıları ‘Bernard Hücreleri’ ya da ‘Bernard Taşınımı’ olarak bilinmektedir. Hücresel akış yapıları, kritik değerin (taşınım başlama değeri) üzerine çıktığında, daha karmaşık hale gelmektedir.



Şekil 2.5: Alttan ısıtılan kaviteelerde kritik Ra_H sayısına göre akış yapıları [7].

Şeker tarafından çalışmada Larder tipi, doğal taşınım prensibine göre çalışan buzdolaplarında, kapalı ve açık kavite durumlarında oluşan ısı ve kütle geçişi hem nümerik, hem de deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın nümerik kısmında, kapalı

ve açık kavite durumları için, hem laminar hem de türbülanslı akış durumları, sadece ısı geçişinin olduğu durum ile ısı ve kütle geçişinin bir arada olduğu durumlar incelenmiştir. Çalışmada ele alınan problemde, dikey duvarlarından birisi ısıtılırken diğeri soğutulan, yatay duvarları ise adyabatik olan iki boyutlu kapalı kavite ele alınmıştır [8].



Şekil 2.6 : Problem geometrisi [8].

Doğal taşınım durumunda, momentum denklemindeki basınç ifadesi, ısı geçişi durumunda Boussinesq yaklaşımı ile sıcaklık farkı cinsinden yazılmaktadır. Kütle ve ısı geçişinin birlikte incelendiği durum için Boussinesq yaklaşımı derişiklik farkını da göz önüne alacak şekilde genişletilerek ele alınmıştır [8].

$$\rho - \rho_\infty \approx \rho\beta(T - T_c) + \rho\beta_c(C - C_c) \quad (2.23)$$

Derişiklik genleşme katsayısı, $\beta_c \left[\frac{m^3}{kg} \right]$

$$\beta_c = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_p \quad (2.24)$$

Ayrıca, boyutsuz y momentum denklemi ve derişiklik Gr sayısı, aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. Derişiklik Gr sayısı fiziksel olarak derişiklik farkından kaynaklanan kaldırma kuvvetinin, sürtünme kuvvetine oranını ifade etmektedir.

$$\frac{\partial v'}{\partial t'} + u' \frac{\partial v'}{\partial x'} + v' \frac{\partial v'}{\partial y'} = - \frac{\partial p'}{\partial y'} + \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial y'^2} + Gr\theta + Gr_c \Gamma \quad (2.25)$$

$$Gr_c = \frac{g\beta_c(C_H - C_C)H^3}{v_\infty^2} \quad (2.26)$$

Isı ve kütle geçişinin bir arada olduğu durum için, derişiklik ve sıcaklık etkilerinin bir arada bulunduğu değıştirilmiş Ra sayısı (Ra_m) tanımlanmıştır. Çalışmada, derişiklik ve sıcaklığın etkisinin eşit olduğu kabulü ile çözümlmeler yapılmıştır [8].

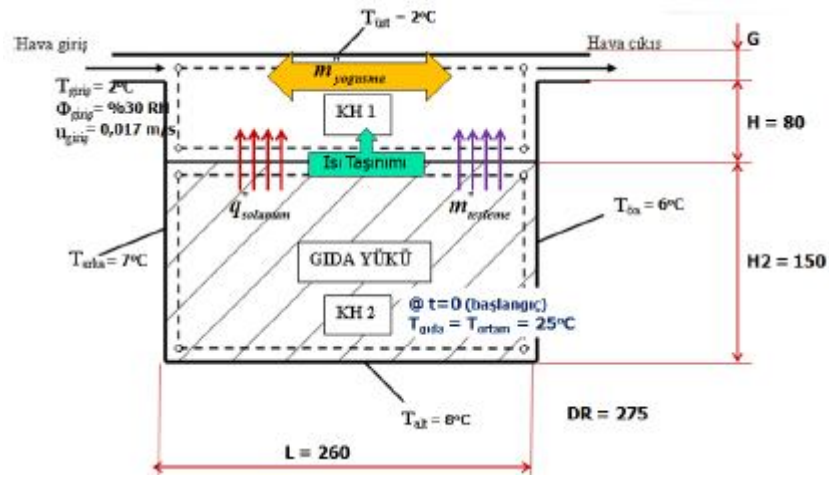
$$Ra_m = GrPr + Gr_c Sc \quad (2.27)$$

Değıştirilmiş Rayleigh sayısının $10^3 - 10^7$ aralığı için elde edilen ısı ve kütle transferi korelasyonları;

$$Nu = 0,2087 Ra_m^{0,2729} \quad (2.28)$$

$$Sh = 0,1308 Ra_m^{0,3140} \quad (2.29)$$

Kocatürk tarafından yapılan çalışmada, sebze-meyvelerin soğutulduğu hacim içerisindeki yüzey yoğuşması, gıdalara ilişkin ısı-kütle transferi ile birlikte, evsel tip bir soğutucu sebzeligi özelinde ele alınmıştır. Fortran programlama dili kullanılarak, cidarlarından soğutulan hacmin içerisindeki gıda yükü ve hava akış alanının iki ayrı kontrol hacmi olarak ele alınıp, eş zaman adımlarında birbirlerinin sınır koşullarını tayin edecek şekilde çözümlendiği bir sayısal model oluşturulmuş ve sebzelik içi doğal taşınım durumu parametrik olarak irdelenmiştir. Geliştirilen sayısal model kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde; saklama sıcaklığı, tavan ve diğer yüzeyler arası sıcaklık farkı, giriş kesitindeki hava hızı, yük doluluk oranı ve gıda cinsi fiziksel parametrelerin değışiminin, her iki kontrol hacmindeki momentum, ısı ve kütle transportuna, gıdaların terleme ile nem kaybına, tavan yüzeyindeki yoğuşma miktarına ve yoğuşmanın konumsal değışimine olan parametrik etkileri ortaya konmuştur [9].



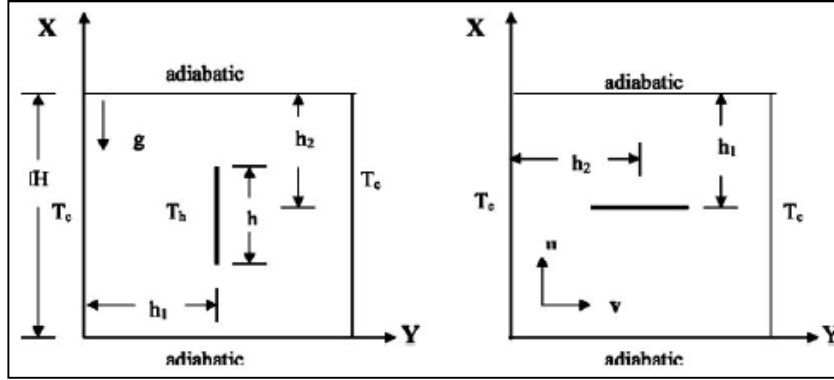
Şekil 2.7 : Sayısal modelde ele alınan fiziksel model, sınır koşulları ve boyutsal büyüklükler [9].

Çalışma kapsamında KH-1 ve KH-2 olmak üzere iki ayrı kontrol hacmi ele alınmış, eş zaman adımlarında birbirlerinin sınır koşullarını tayin edecek şekilde çözümlenmişlerdir. KH-1 hava akış alanının oluşturduğu kontrol hacmini, KH-2 ise belirli bir boşluk oranına sahip gıda yükünü temsil etmektedir. Sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı değerlerine ilişkin sınır ve başlangıç koşulları, evsel tip bir soğutucu sebzeliği çalışma koşullarını temsil eden deneysel verilerden yola çıkılarak belirlenmiştir. Söz konusu hacmin cidar yüzey sıcaklıkları sınır koşulu olarak alınmış ve tavan yüzey sıcaklığı ile birlikte, analizlerde değişken parametre olarak değerlendirilmiştir. Gıda solunumu kaynaklı ısı üretimi ve terleme kaynaklı nem üretimi, hava akış alanına ilişkin ısı ve kütle transport denklemlerindeki sınır koşullarını tayin eden kaynak terimleri olarak ele alınmışlardır. Diğer cidar yüzeylerine göre daha düşük sıcaklıkta tanımlanan tavan yüzeyindeki yoğunlaşma durumunun değerlendirildiği bir alt sayısal model geliştirilmiş ve ilgili kontrol hacminin üst sınır koşulunu tayin eden önemli bir etmen olarak ele alınmıştır.

Kandaswamy ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada alt ve üst duvarları adyabatik, iki dikey duvarı sabit sıcaklıkta olan bir kavite ele alınmıştır. Kavite içinde, belirli bir sıcaklıkta plaka bulunmaktadır. Plaka sıcaklığının dikey duvarların sıcaklıklarından yüksek olduğu belirtilmiştir. Akışın iki boyutlu olduğu kabul edilmiştir ve plaka pozisyonları, boyutsal oranları için 10^3 - 10^5 aralığındaki farklı Gr değerleri çalışılmıştır. Akışkan olarak hava ile çalışılmıştır ($Pr=0,71$) [10].

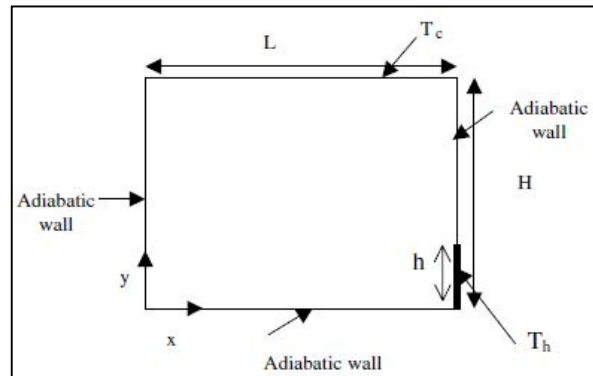
Gr sayısının artması ile plakanın yatay ve dikey pozisyonlarındaki ısı transferinin arttığı belirlenmiştir. İnce plakanın dikey durumundaki ısı transferinin, yatay duruma

göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. Plakanın en-boy oranının azalması ile ısı transferinin azalacağı belirtilmiştir.



Şekil 2.8 : Problem geometrisi [10].

Guizani ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tavanın soğutulduğu, dikey duvarların bölgesel olarak ısıtıldığı ve duvarların geriye kalan kısımların adiabatik olduğu, kapalı kavitede doğal konveksiyon ele alınmıştır. Isıtılan kısmın sıcaklığı ve pozisyonunun akışa, sıcaklık dağılımına ve ısı transferine etkisi incelenmiştir [11].



Şekil 2.9 : Problem geometrisi [11].

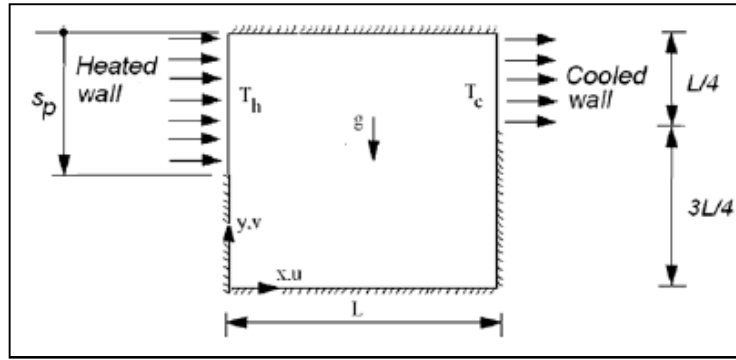
Isı ve sıcaklık dağılımları ve ısı transferi sonuçları, $Pr=0,71$, ısıtılan elemanın farklı pozisyon ve boyutları ve Ra aralığının 10^2-10^6 olması durumları için belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ile termal ve dinamik yapının pozisyona ve sıcak yüzey uzunluğuna bağlı olduğu görülmüştür. Isıtılan plaka yakınlarında izotermilerin dik gradyanlar şeklinde olduğu görülmektedir. Plaka yakınındaki sıcak akışkan yukarıya doğru taşınmaktadır ve yerini soğuk hava almaktadır. Düşük Ra sayıları için, izotermilerin tavan yakınlarında paralel olması ısı transferinin büyük bölümünün,

iletimle olduğunu göstermektedir. Ra arttıkça, izotermelerin deformasyonu artmaktadır ve ısı transfer mekanizması doğal konveksiyona kaymaktadır [11].

$Ra=10^6$ olması durumunda, termal sınır tabaka, sıcak yüzeye yakındır ve Ra sayısının daha da artması ile sınır tabaka inceler ve daha ayırt edilir hale gelmektedir [11].

Mobedi ve diğ. çalışmada, ısı transferinin difüzyon ve taşınım durumları için ayrı ısı fonksiyonu denklemleri (heatfunction) tespit edilmiştir. Toplam ısı fonksiyonu denklemleri, toplam ısı transferinin yörüngesini ve yoğunluğunu göstermektedir. Toplam ısı fonksiyonunun difüzyon ve taşınım olarak ayrılması, her bir durumda baskın olarak, ısı transferi yörüngesinin ve yoğunluğunun ayırt edilmesine yardımcı olmaktadır. Toplam ısı fonksiyon denkleminin difüzyon ve taşınım ısı fonksiyon denklemleri olarak ayrılmasında süper pozisyon kuralı kullanılmıştır. Kısmi ısıtılan kavitede, farklı Ra sayıları ve dört farklı ısı kaynağı boyu için, difüzyon, taşınım ve toplam ısı çizgileri grafik ile gösterilmiştir [12].



Şekil 2.10 : Problem geometrisi [12].

Nithyadevi ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, yan duvarlarının belli bir kısmı termal olarak aktif olan dikdörtgen bir kavitede en-boy oranının doğal taşınım etkisi çalışılmıştır. Kavitenin alt ve üst duvarları ile yan duvarların geri kalan kısımları adyabatik olarak alınmıştır. Aktif bölgelerin dokuz farklı pozisyonu çalışılmıştır. Denklemler, Successive Over Relaxation (SOR) yöntemi ile iteratif olarak çözülmüştür. Sonuçlar, akış ve sıcaklık dağılımında, 103-105 Gr sayısı aralığı ve en-boy oranının etkisi ve duvarlardan ısı transfer oranı olarak elde edilmiştir. Isı transfer oranı alt-üst aktif bölge konumunda yüksek, üst-alt aktif bölge konumunda düşüktür. Isı transfer oranının en-boy oranı arttıkça arttığı belirlenmiştir. $Ar \leq 1$ (aspect ratio) olması durumu için ısıtma/soğutma lokasyonları değiştirildiğinde, ısı transfer oranında önemsenecek değişiklik olmamaktadır. Sabit soğutma lokasyonu için ısıtma

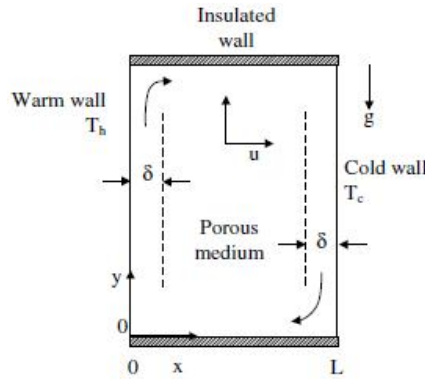
n gerçekleştirilen çalışmada, dikey duvarları adyabatik, yatay olarak ele alınmıştır. Çalışmada temel olarak, kapalı olarak yerleştirilen sonlu kalınlıktaki bir plaka yardımıyla, ısıma kuvvetlerinden kaynaklanan, doğal taşınım ısı transferini

sayısının farklı değerleri için, kapalı hacim içerisinde oluşan cıklık eğrileri çizilmiştir. Tüm Rayleigh sayıları için, hacim

içerisine yerleştirilen plakanın etrafında bir dönme merkezi oluşmaktadır. Artan Rayleigh sayısı ile birlikte akım fonksiyonunun mutlak değeri de artmaktadır. Artan Rayleigh sayısı ile birlikte ısı transferi ve akış şiddetinde artış gözlenmiştir. Isıl iletkenlik katsayısının artmasıyla, yerel ve ortalama Nusselt sayıları da artmıştır [14].

Laguerre ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, ele alınan buzdolabı modelinde soğuk duvar ile diğer duvarlar arasında doğal konveksiyon ile ısı transferi ele alınmıştır. Buzdolabı boş iken, sınır tabakalarda ve buzdolabı merkezindeki hava sıcaklığı profili incelenmiştir. Sıcaklık ve soğuk duvar yüzey alanının etkileri üzerine çalışılmıştır.

Sıcaklık salınımlarının etkisini incelemek amacıyla, buzdolabı modeli dört boş küre bloğu ile yüklenmiştir ve boş durumdaki sıcaklık profilleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Blokların bulunduğu durumda, her yerde hava sıcaklığının daha düşük olduğu ve blokların varlığının, soğuk duvar yakınlarında ısı transferini arttırdığı belirtilmiştir [15].



Şekil 2.13 : Problem geometrisi [15].

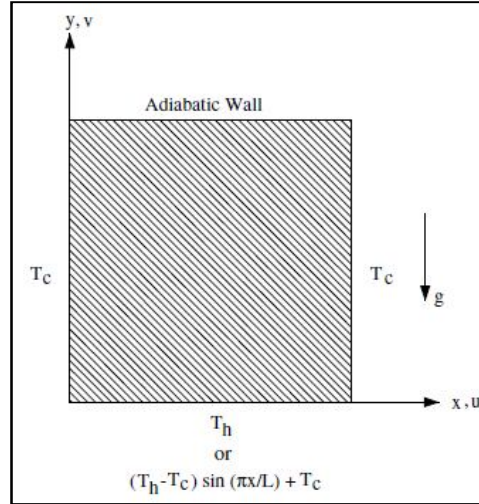
Doğal taşınım durumu için, kavitenin en-boy oranının ve kavite duvarları arasındaki sıcaklık farkının önemli olduğu belirtilmiş, doğal taşınım karakteristik boyutsuz sayısı;

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu} \quad (2.30)$$

Kavitenin tamamen ya da kısmen gözenekli ortam ile dolu olması durumu için tanımlanan Ra sayısı;

$$Ra = \frac{g\beta\Delta THK}{\alpha_p \nu} \quad (2.31)$$

Basak ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, alt duvarın ısıtıldığı, üst duvarın adyabatik kabul edildiği ve dikey yan duvarların sabit sıcaklıkta tutulduğu kare kavitede, kavitenin gözenekli yapı ile dolu olması durumunda doğal taşınım incelenmiştir. Gözenekli ortamda momentum transferini simule etmek için Darcy-Forchheimer modeli kullanılmıştır. Çalışma $10^3 < Ra < 10^6$, $10^{-5} < Da < 10^{-3}$ ve $0,71 < Pr < 10$ aralıklarındaki parametreler için yapılmıştır. Nümerik sonuçlar, akım fonksiyonu, sıcaklık profili ve Nu sayısı olarak ifade edilmiştir. Alt duvarın üniform olmayan şekilde ısıtılması durumundaki, alt duvarın merkezinden olan ısı transferi, bütün Ra sayıları için üniform ısıtılması durumuna göre daha fazladır. Fakat ortalama Nu sayısı, üniform olmayan ısıtma durumunda ısı transferinin daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, Ra ve Pr sayılarına bakılmaksızın, $Da \leq 10^{-5}$ değeri için ısı transferinin öncelikle iletimle gerçekleştiğini göstermektedir. Taşınımsal ısı transferi rejimi Ra sayısının bir fonksiyonudur ve $Da \geq 10^{-4}$ için incelenmiştir. İletimin baskın olduğu ısı transferi durumunda kritik Ra sayısı elde edilmiştir. Taşınımın baskın olduğu durum için ortalama Nu ve Ra sayıları arasında korelasyonlar çıkarılmıştır [16].



Şekil 2.14 : Problem geometrisi [16].

Momentum ve enerji denklemlerinin çözümünde Galerkin sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Süreklilik denklemi, basınç dağılımının saptanmasında kullanılmıştır. Elde edilen Nu korelasyonları aşağıda verilmiştir:

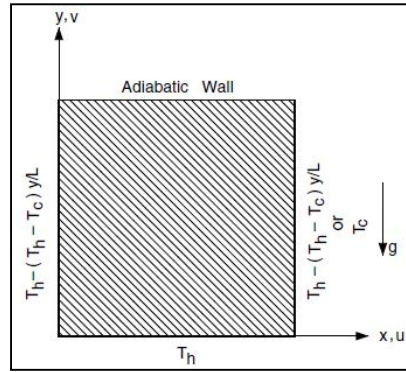
a) Uniform ısıtma;

$$\begin{aligned}\overline{Nu_b} &= 2\overline{Nu_s} \\ \overline{Nu_b} &= 0,150Ra^{0,280} \quad Ra \geq 5 \times 10^5, Da = 10^{-4} \\ \overline{Nu_b} &= 0,316Ra^{0,265} \quad Ra \geq 7 \times 10^4, Da = 10^{-3}\end{aligned} \quad (2.32)$$

b) Uniform olmayan ısıtma;

$$\begin{aligned}\overline{Nu_b} &= 2\overline{Nu_s} \\ \overline{Nu_b} &= 0,0022Ra^{0,543} \quad Ra \geq 5 \times 10^5, Da = 10^{-4} \\ \overline{Nu_b} &= 0,077Ra^{0,338} \quad Ra \geq 3 \times 10^5, Da = 10^{-3}\end{aligned} \quad (2.33)$$

Basak ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, gözenekli yapı ile dolu olan, alt duvarı üniform olarak ısıtılan, dikey duvarları doğrusal olarak ısıtılan ve üst duvarı adyabatik bir kare kavite ele alınmıştır. Gözenekli yapıyı temsil etmek için Darcy-Forchheimer modeli kullanılmıştır. Boyutsuz denklemlerin çözümünde, bi-kvadratik dikdörtgen elemanlar ile Penalty sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Nümerik sonuçlar, $10^3 \leq Ra \leq 10^6$, $10^{-5} \leq Da \leq 10^{-3}$ ve $0,2 \leq Pr \leq 100$ aralıkları için, akım fonksiyonu ve izoterm kontürleri ve yerel ve ortalama Nu sayıları cinsinden ifade edilmiştir.



Şekil 2.15 : Problem geometrisi [17].

Sonuçlar, yan duvarların lineer olarak ısıtılması ve sol duvarın lineer olarak ısıtılması ile sağ duvarın soğutulması olacak şekilde iki durum için, Da sayısının etkileri ve ısı transferi oranı olarak ortaya konmuştur [17].

2.4 Psikrometrik Esaslar

Psikrometri; nemli havanın termodinamik özellikleri ile, bu özellikleri kullanarak nemli havadaki işlemler ve şartlar ile ilgilenen, termodinamiğin bir dalıdır.

Kuru hava; içindeki su buharı tamamen alınmış atmosferik havadır. Kuru hava, izafi olarak sabit karışım oranına sahip birçok gazın karışımından meydana gelmektedir.

Nemli hava; kuru hava ile su buharının karışımı olarak kabul edilmektedir. Hava içindeki su buharının miktarı; kuru hava durumunda sıfırdan, sıcaklık ve basınca bağlı olarak doymuş durumdaki maksimum değerine kadar değişir. Doymuş hava, nemli hava ile yoğuşmuş suyun doğal denge halidir ve hava içinde suyun maksimum olduğu durumdur [18].

Havadaki su buharının ideal gaz olarak ele alınması kolaylık sağlamaktadır. 50 °C sıcaklıkta suyun doyma basıncı 12,3kPa'dır. Daha düşük basınçlarda, doymuş buhar halinde olsa bile, su buharı çok az bir hata ile (%0,2'den az) mükemmel gaz olarak ele alınabilmektedir. Böylelikle; nemli havanın içinde bulunan kuru hava ile birlikte su buharı, ayrı ayrı $P_v = R_v T$ mükemmel gaz denklemini sağlamaktadır. Bu durumda nemli hava, basıncı kuru havanın ve su buharının kısmi basınçlarının toplamı olan, mükemmel bir gaz karışımı olarak incelenebilmektedir.

$$P = P_a + P_v \quad (2.34)$$

Bir birim kuru hava kütleinde bulunan su buharı kütlesi, mutlak nem ya da özgül nem olarak adlandırılır. Özgül (mutlak) nem:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.35)$$

$P_v = R_v T$ ideal gaz denklemi, nemli hava içindeki her iki karışana da uygulanacak olursa; su buharı için $P_v V = m_v R_v T$, kuru hava için de $P_a V = m_a R_a T$ bağıntıları yazılabilir. Buna göre, özgül nemin kısmi basınçlar cinsinden ifadesi elde edilmektedir.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{R_a}{R_v} \times \frac{P_v}{P_a} = 0,622 \times \frac{P_v}{P_a} \quad (2.36)$$

$$\omega = \frac{0,622 \times P_v}{P - P_v} \quad (2.37)$$

Herhangi bir gaz karışımındaki “ i ” bileşeninin kütleel derişikliği (kısmi yoğunluğu) d_i , karışım içerisindeki “ i ” bileşeni kütleinin, karışım toplam hacmine oranına eşittir. Buna göre; özgül nem ifadesi, nemli hava içerisindeki su buharı ve kuru hava kütleel derişikliklerinin oranı şeklinde de yazılabilmektedir.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_v}{V} \frac{V}{m_a} = \frac{d_v}{d_a} \Rightarrow d_v = d_a \omega \quad (2.38)$$

Gaz karışımının yoğunluğu; karışımın toplam kütleinin toplam hacme oranına eşittir. Buna göre; nemli havanın karışım yoğunluğu, nemli hava içerisindeki su buharı ve kuru hava kütleel derişikliklerinin toplamı şeklinde ifade edilebilir.

$$\rho_m = \frac{m_{toplam}}{V} = \frac{m_v + m_a}{V} = \frac{m_v}{V} + \frac{m_a}{V} = d_v + d_a \Rightarrow \rho_m = d_v + d_a \quad (2.39)$$

Havadaki su buharı miktarının m_v , aynı sıcaklıktaki doymuş havada bulunabilecek en çok su buharı miktarına m_g oranı bağıl nem olarak tanımlanmaktadır. Burada suyun aynı sıcaklıktaki doyma basıncı P_g ile ifade edilmiştir. Bağıl nem (φ):

$$\varphi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} = \frac{x_v}{x_g} I_{T,P} \quad (2.40)$$

Bağıl nem ile özgül nem arasındaki ilişki denklem (2.41) ile verilmiştir.

$$\omega = \frac{0,622 \varphi P_g}{P - \varphi P_g} \quad (2.41)$$

Atmosferik hava, kuru hava ve su buharının bir karışımı olduğundan, nemli (atmosferik) havanın entalpisi kuru hava ve su buharının entalpileri ile ifade edilmektedir. Atmosferik havanın toplam entalpisi, kuru hava ve su buharının entalpilerinin toplamına eşittir.

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (2.42)$$

$$h = h_a + \omega h_v \quad (2.43)$$

Çiğ noktası sıcaklığı, hava sabit basınçta soğutulduğunda yoğuşmanın başladığı sıcaklık olarak tanımlanabilmektedir. Çiğ noktası sıcaklığı, mevcut koşullardaki havanın içinde bulunan su buharının basıncındaki doyma sıcaklığıdır.

Sıcaklığı ve bağıl nemi belirli olan bir ortamdaki çiğ noktası sıcaklığı; Ortam sıcaklığındaki su buharının doyma basıncının tespit edilmesi, basınç ve bağıl nem ilişkisi kullanılarak, nemli havanın içindeki su buharının kısmi basıncının hesaplanması ile bulunabilmektedir. Su buharının P_v kısmi basıncındaki doyma sıcaklığı, çiğ noktası sıcaklığına eşit olacaktır.

Sıcaklığa bağlı olarak doyma basıncının ve doyma basıncına bağlı olarak sıcaklığın tespit edilebileceği polinom ifadeleri aşağıda verilmektedir [19].

Farklı sıcaklık aralıkları için tanımlanan, sıcaklığa bağlı doyma basıncı ifadesi:

$$P_{doyma} = 1000 \exp(\alpha) \quad (2.44)$$

$$\alpha = AT^2 + BT + C + DT^{-1} \quad (2.45)$$

Çizelge 2.1 Farklı sıcaklık aralıkları için tanımlanan katsayılar [19]

	213,15<T<273,15	273,15<T<322,15	322,15<T<373,15	373,15<T<423,15	423,15<T<473,15
A	-7,2975937070E-06	1,2255001965E-05	1,2467321570E-05	1,2045076460E-05	1,0697301830E-05
B	5,3974207270E-03	-1,9235952890E-02	-1,9154658060E-02	-1,8666505530E-02	-1,6989657540E-02
C	2,0698806200E+01	2,7051018990E+01	2,7023883150E+01	2,6836294030E+01	2,6140732980E+01
D	-6,0422751280E+03	-6,3440115770E+03	-6,3409416390E+03	-6,3169720630E+03	-6,2207812300E+03

Farklı basınç aralıkları için tanımlanan doyma basıncına bağlı sıcaklık ifadesi:

$$\beta = \ln(P_{doyma}) \quad (2.46)$$

$$T = E\beta^4 + F\beta^3 + G\beta^2 + H\beta + K \quad (2.47)$$

Çizelge 2.2: Farklı basınç aralıkları için tanımlanan katsayılar [19]

	1<P<611	611<P<12350	12350<P<101420	101420<P<476207	476207<P<1555099
E	1,0049265340E-03	5,0310625030E-03	1,2095125170E-05	2,4672910160E-02	2,7484024840E-05
F	1,3929176330E-03	-8,8267793800E-02	-3,5455421050E-01	-9,3671128830E-01	-1,0686613070E+00
G	2,8151515740E-01	1,2436884460E+00	2,1258937340E+02	1,5141423340E+01	1,7429649620E+01
H	7,3116211190E+00	3,3885342960E+00	-2,0503010500E+01	-9,8824175010E+01	-1,1612085320E+02
K	2,1258937340E+02	2,1500779930E+02	2,7185854320E+02	4,9950929480E+02	5,4726181200E+02

2.5 Gıda Kalite Değerlendirmeleri

Abbott tarafından yapılan çalışmada, sebze meyve gıda kalitesinin irdelenebilmesi için kaliteyle ilişkili özelliklerin ölçülebilir olmasının gerekliliğini belirtilmiş ve elektromanyetik, mekanik ve kimyasal ölçüm yöntemlerini incelemiştir. Gıda kalitesinin, duyuşal özellik, besinsel değerler, kimyasal içerik, mekanik özellikler, fonksiyonel özellikler ve bozukluklardan oluştuğunu belirtmiştir. Elektromanyetik özelliklerin görünüş ile ilgili, mekanik özelliklerin tekstür ile ilgili ve kimyasal özelliklerin tat ve aroma ile ilgili bilgiler vereceği belirtilmiştir [20].

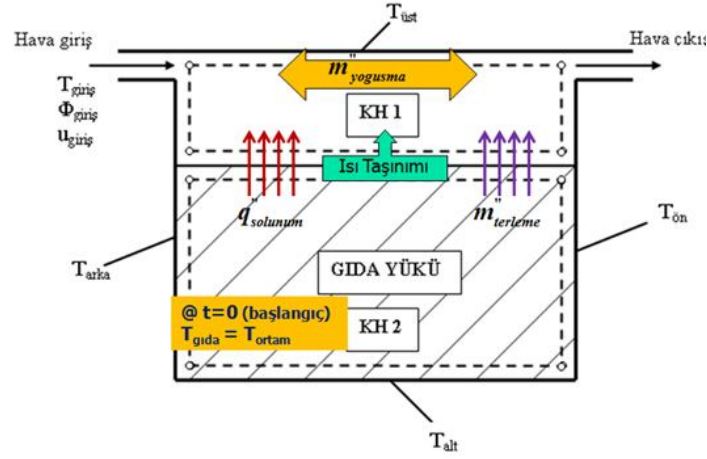
Agüero ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sabit saklama sıcaklığında bağıl nem değerinin değişiminin marul kalitesine etkisi ele alınmıştır. Saklama sıcaklığının 0-2 °C olduğu durum için, ideal koşul olarak %98-95 bağıl nem, düşük nemli olarak %70-72 bağıl nem değeri ele alınmıştır. Saklama koşullarının marul kalitesine olan etkisi, fiziksel açıdan ağırlık kaybı ve su içeriği; yeşillik açısından klorofil içeriği; mikrobiyolojik açıdan doğal mikroflora; besinsel açıdan askorbik asit miktarı; genel kalite açısından duyuşal kabul edilebilirlik ile değerlendirilmiştir. Ayrıca söz konusu kalite değerlendirmeleri; marulun iç, orta ve dış yaprakları olmak üzere üç ayrı bölge için incelenmiştir. Marul raf ömrünün önemli ölçüde bağıl nem değerinden etkilendiği belirtilmiştir. Düşük bağıl nemli saklama koşulunda, saklama süresinin ilk ve son günü arasında, ağırlık kaybında önemli değişimler meydana geldiği belirtilmiştir. Her iki bağıl nem değerinde de, iç ve orta yapraklarda klorofil değişimi görülmezken, dış yapraklarda görüldüğü belirtilmiştir. Askorbik asit bozulması tüm koşullarda görüldüğü belirtilmiştir. Mikrobiyal popülasyonun bağıl nemden önemli oranda etkilendiği ortaya konmuştur. Genel kalite değerlendirmesinde, düşük bağıl nem koşulundaki marullarda hızlı bir düşüş görüldüğü belirtilmiştir [21].

Javanmardi ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, domateslerin hasat sonrası saklama koşullarının likopen, antioksidan aktivite, toplam özölabilir katı miktarı ve ağırlık kaybına etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, domatesler 5 °C, 12 °C ve oda koşullarında 7 gün süreli olarak saklanmıştır. 12 °C' ye kıyasla 5 °C' de saklamada, likopen ve toplam özölabilir katı maddede iyileşme olurken, antioksidan aktivite arttığı belirtilmiştir.. Oda koşullarında saklanan domateslerde likopen ve ağırlık kaybı önemli oranda artış göstermiştir, fakat katı madde ve antioksidan aktivitede değışim görölmediğı belirtilmiştir. Sonuç olarak, toplam çözünür katı maddenin oda sıcaklığı ya da düşük sıcaklıktan etkilenmediğı ancak ağırlık kaybı, likopen içeriğı ve antioksidan aktivitenin önemli oranda etkilendiğı ortaya konmuştur [22].

3. DENEY DÜZENEĞİ

Tez çalışmaları kapsamında, doğal taşınım fiziksel parametrelerinin ısı ve kütle transferi açısından değerlendirilmesi ve fiziksel parametrelerin gıda kalitesine olan etkisinin incelenmesi amacıyla parametrik bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu kapsamda tasarlanan deney düzeneğinde, soğukta saklanan gıdalar ve saklama koşullarının oluşturduğu bir hacmin fiziksel modeli göz önünde bulundurulmuştur.

İçerisinde gıda yükü bulunan, belirli kesitlerde ve belirli şartlardaki havanın giriş-çıkışının sağlandığı, olabildiğince kapalı yapıdaki bir gıda saklama hacmine ilişkin fiziksel model Şekil 3.1’de verilmiştir [9].



Şekil 3.1 : Soğukta gıda saklama hacmi fiziksel modeli [9].

Gıda saklama hacmi fiziksel modeli göz önünde bulundurularak, sebzelikte gıda saklama koşullarını tayin eden başlıca fiziksel parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Saklama sıcaklığı,
- Yüzeyler arası sıcaklık farkı,
- Hava giriş hızı,
- Gıda miktarı ve/veya konumu

3.1 Fiziksel Parametreler

3.1.1 Saklama Sıcaklığı

Kaliteli ve uzun bir gıda saklama süresi sağlanabilmesi için, gıda cinsine bağlı olarak belirlenmiş ideal saklama koşulları söz konusudur [23]. Sebze-meyvelerin ideal saklama koşulları genel olarak, gıda saklamada iki önemli parametre olan sıcaklık ve bağıl nem değerleri ile tanımlanmaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, saklama sıcaklığı değiştirilebilir bağımsız bir parametre olarak irdelenirken, bağıl nem değeri; gıda cinsi ve saklama koşullarına bağlı olarak değişen bir çıktı olarak irdelenmiştir.

Saklama sıcaklığına bağlı olarak sebze-meyvelerde farklı fizyolojik ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında sebzeler, saklama koşulları açısından üç farklı grupta ele alınmıştır:

- Nem kaybına duyarlı sebzeler
- Düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler
- Soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler

Nem kaybına duyarlı sebzeler grubuna örnek olarak marul ile, düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler grubuna örnek olarak brokoli ile, soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler grubuna örnek olarak salatalık ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.1.2 Yüzeyler Arası Sıcaklık Farkı

Soğutulan bir gıda saklama hacminde, aralarında sıcaklık farkının söz konusu olabileceği potansiyel yüzeyler gıda yüzeyi ile taban, tavan ve yan yüzeylerden oluşan kavite yüzeyleridir. Doğal taşınımın baskın olduğu, tamamen kapalı ya da kısmi hava giriş-çıkışlarının bulunduğu bir kavitede hava hareketleri sıcaklık ve su buharı derişiklik farklarının etkisiyle meydana gelmektedir. Doğal taşınım boyutsuz sayısı olan Ra sayısı, ısı transferi değerlendirmelerinde sıcaklık farkı ile; kütle transferi değerlendirmelerinde derişiklik farkı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Deney düzeneği tasarımında, yüzeyler arası sıcaklık farkının kontrollü bir şekilde sağlanabilmesi amaçlanmıştır. Kavite yüzeylerinden tavan yüzeyinin, diğer yüzeylere göre farklı sıcaklıkta olmasını sağlayacak şekilde deney düzeneği tasarımı

gerçekleştirilmiştir. Tavan ve diğer yüzey sıcaklıklarının farklı kombinasyonları için, yüzeyler arası sıcaklık farkının parametrik etkileri irdelenmiştir.

Çizelge 3.1: Diğer yüzeyler ve tavan yüzeyi çalışma sıcaklıkları.

Diğer yüzey sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	Tavan yüzey sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
3	3
5	5
10	7

İçerisinde sebze gibi terleme ve soluma faaliyetleri gerçekleştiren bir gıda yükünün bulunduğu kavitede, çığ noktası sıcaklığının altında kalan yüzeylerde yoğuşma gerçekleşecektir. Yoğuşma oluşumunun da değerlendirme çıktısı olarak irdelenebilmesi amacıyla, kavite tavan yüzeyi en soğuk yüzey seçilmiş ve kontrollü olarak yoğuşmanın üst yüzeyde toplanması sağlanmıştır. Yoğuşmanın üst yüzeyde toplanması, yoğuşmanın görsellenmesi açısından da katkı sağlayacaktır.

3.1.3 Hava Giriş Hızı

Gıda yüklü deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği kavitede, kavitenin tamamen kapalı olduğu ve doğal taşınım baskın olacak şekilde kaviteye kısmi hava giriş-çıkışının olduğu iki farklı durumda koşullar, gıdadan kütleli nem kaybı ve yoğuşma açısından ele alınmıştır. Sıcaklık farkı bulunan yüzeyler arasında, farklı hava hızlarının etkisiyle derişiklik tabakaları farklılaşacaktır. Dolayısıyla, kavite hava giriş kesitinden belirli sıcaklık ve bağıl nemde, değiştirilebilir hızlarda hava gönderilmesi de deney düzeneği tasarım kriterlerinden biri olarak ele alınmıştır.

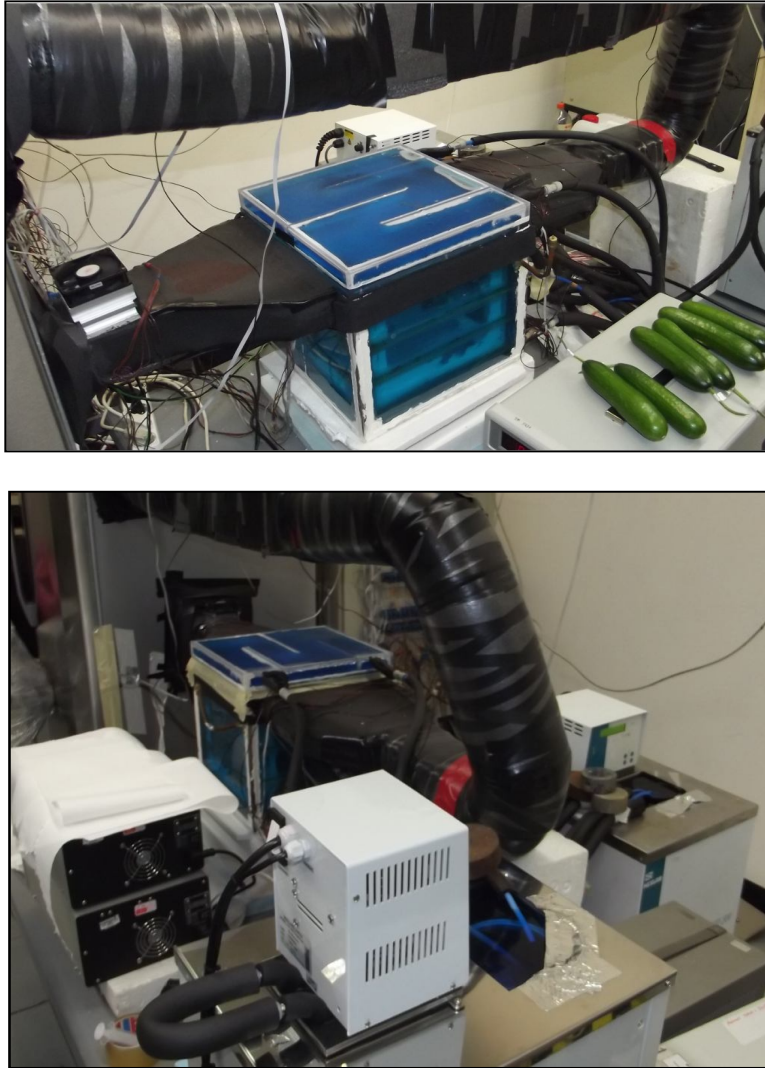
3.1.4 Gıda Miktarı ve Yerleşimi

Gıda yükünün yerleştirildiği kavitede yerleşim ve miktara bağılı olarak, sıcaklık farkının gerçekleştiği iki yüzey olan gıda yüzeyi ile tavan yüzeyi arasındaki mesafe, yani karakteristik uzunluk değişmektedir. Doğal taşınım boyutsuz Ra sayısı, karakteristik uzunluğun 3. kuvveti ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, ısı ve kütle transferi değerlendirmelerinde, gıda yüzeyi ile tavan yüzeyi arasındaki mesafe olarak tanımlanan karakteristik uzunluk, gıda miktarı ve yerleşim şekli ile değişecektir. Karakteristik uzunluğun değişiminin doğal taşınım ile ısı ve kütle transferine etkisinin

ortaya konması amacıyla, deneysel çalışmalarda, kavite içerisine yerleştirilen gıda miktarı ve gıda yerleşim şekli de fiziksel bir parametre olarak ele alınmıştır.

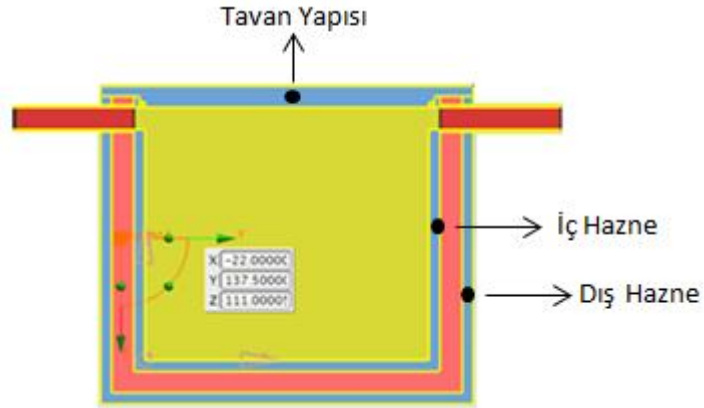
3.2 Deney Düzeneği Tasarımı

Gıda saklama hacmi fiziksel modelinde etkili olan fiziksel parametreler, saklama sıcaklığı, yüzeyler arası sıcaklık farkı, giriş hava hızı ve gıda miktarı/konumu olarak belirlenmiştir. Deneysel parametreler göz önünde bulundurularak, kısmi hava giriş-çıkış kesiti bulunan, giriş hava hızının, saklama sıcaklığı ve yüzeyler arası farklı sıcaklıkların ayarlanabilir olduğu bir gıda saklama hacmi oluşturulmuştur.



Şekil 3.2 : Deney düzeneği genel görünüm.

Gıda saklama hacmi, pleksiglas malzemeden iç hazne, dış hazne ve tavan yapısı olmak üzere üç parça halinde tasarlanmıştır.



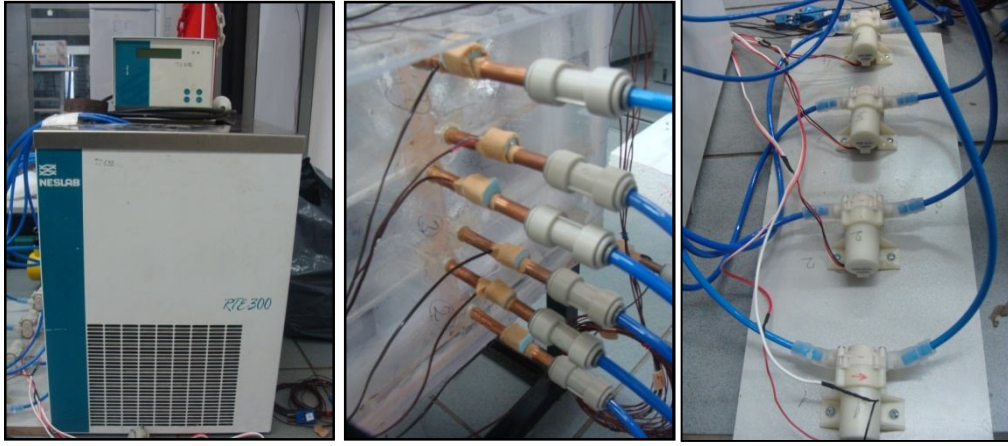
Şekil 3.3 : Deney düzeneği gıda saklama hacminin kesit görüntüsü.

Gıda saklama hacmi, su banyosunda şartlandırılmış su ile cidarlarından soğutulmaktadır. Tavan yüzeyi en soğuk yüzey olacak şekilde diğer yüzeylerden farklı sıcaklıkta koşullandırılmaktadır. Bu amaçla, tavan yüzeyinin ve kavitenin diğer yüzeylerinin ayrı sıcaklıklarda koşullandırılması amacıyla iki ayrı su banyosu kullanılmaktadır. Su banyosu ile kavite yüzeylerinin koşullandırılması amacıyla, iç içe geçmiş iki hazne ve iki hazne arasında suyun dolaştırıldığı hatların bulunduğu bir yapı oluşturulmuştur. Çift cidarlı yapıda suyun dolaştırıldığı kısım dört ayrı hacme ayrılmıştır.



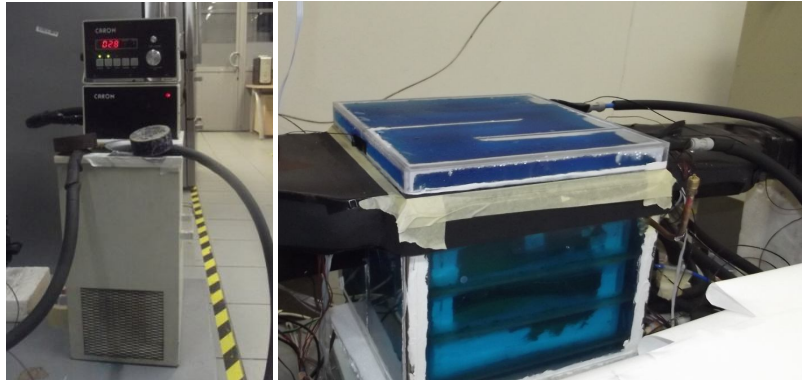
Şekil 3.4 : Çift cidarlı yapı.

Dört ayrı hacim için, aynı su kaynağından dört ayrı su pompasıyla su dolaşımı sağlanmaktadır. Su banyosunda şartlandırılan su, su pompaları ile kavite cidarlarında dolaştırılmakta ve yüzeylerin istenilen sıcaklığa gelmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.5 : Su pompaları ve bağlantılar.

Tavan yüzeyinin şartlandırılması amacıyla, içerisinde suyun dolaştırıldığı ayrı bir kapalı hazne oluşturulmuştur. Bu hazne deneyler esnasında tavan yüzeyinin üzerine yerleştirilmekte ve iletimle tavan yüzeyinin istenilen sıcaklığa gelmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.6 : Tavan yüzeyinin şartlandırılması.

Kavite içi saklama sıcaklığı temel olarak, kavitenin cidarlarından soğutulması ile sağlanmaktadır ve tavan, yoğuşmanın toplandığı, kavitenin en soğuk yüzeyi olarak belirlenmiştir.

Yoğuşma durumunun hem kaviteye hava giriş-çıkışının olmadığı durumda hem de kısmi hava giriş-çıkışı olduğu durumda incelenebilmesi amacıyla, kaviteye tavan yüzeyini süpürecek şekilde, $275 \times 20 \text{ mm}^2$ lik bir kesitten hava gönderilmektedir. Dolayısıyla, giriş hava hızı da deneysel olarak irdelenen bir parametredir. Kaviteye farklı hızlarda hava gönderilebilmesi amacıyla, bir kanal yapısı oluşturulmuş ve kanal girişine DC fan yerleştirilmiştir. Farklı fan frekanslarında, söz konusu yapıda giriş hava hızının değişiminin tespit edilmesi amacıyla PIV hava hızı ölçümleri

gerçekleştirilmiştir. Buzdolabı sebzelik koşullarının yansıtılması ve doğal taşınım baskın bir ortam elde etmek amacıyla hava hızının 0,1 m/s' nin altında olması hedeflenmiştir.



Şekil 3.7 : Hava giriş kanalı.

Oluşturulan gıda saklama hacmine, giriş havasının belirli bir değerde gönderilmesi amacıyla giriş havası, iki kapılı bir no-frost buzdolabı içerisinden alınmış ve termoelektrik modül ile de soğutma desteklenmiştir. Termoelektirik modül besleme gerilimi ve beraberinde kullanılan eksenel DC fanın gerilimi farklılaştırılarak, giriş havası debisi ve sıcaklığı kontrol edilmiştir.



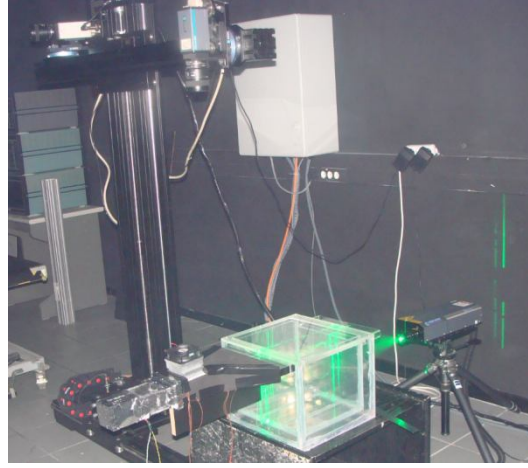
Şekil 3.8 : Deney düzeneğinde kullanılan iki kapılı no-frost buzdolabı kabini.

3.3 Hava Hızı Ölçümleri

Buzdolabı taze gıda bölmesi sebzeliğinden alınan soğuk ve kuru havanın, sebzeliğe gönderilmesi amacıyla tasarlanan hava giriş kanalında bulunan fan ile sebzeliğe

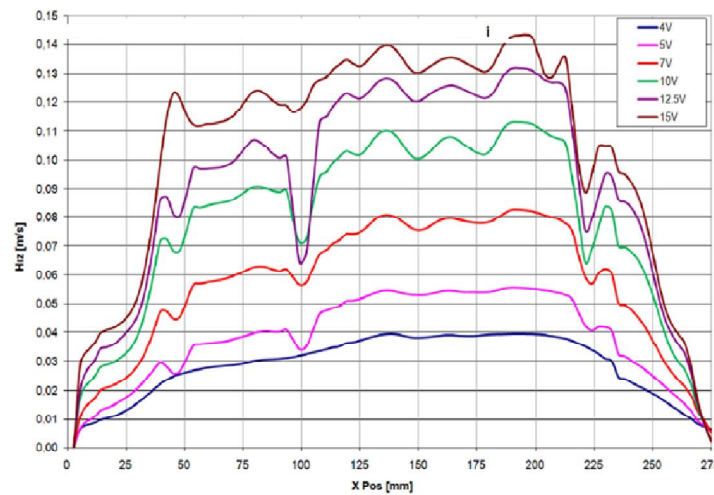
gönderilen hava hızı farklılaştırılmaktadır. Kanal girişinde bulunan fanın farklı frekansları için sebzelik girişinde elde edilen hava hızlarının belirlenmesi amacıyla parçacık görüntülemeli hız ölçümleri (PIV) gerçekleştirilmiştir.

Sebzelik girişindeki hız değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışma kapsamında öncül olarak, farklı fan gerilimlerinde sebzelik giriş kanalındaki hava hızı dağılımları ortaya konmuştur. Sebzelik giriş kesitine gönderilen lazer ve bir kamera ile alınan görüntüler işlenerek, giriş kesitindeki hız dağılımı ortaya konmuştur.

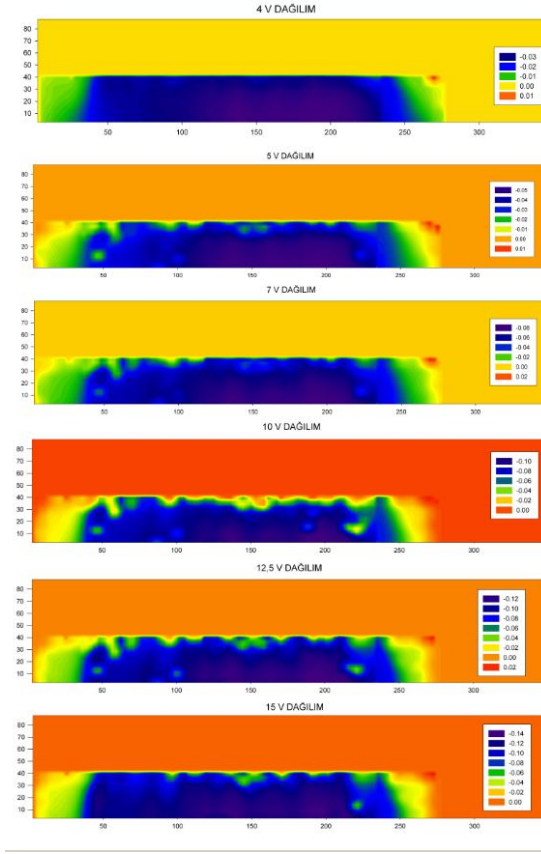


Şekil 3.9 : Giriş kanalındaki hava hızı dağılımının belirlenmesi.

Farklı fan besleme gerilimleri için, sebzelige giriş kanalı yatay mesafesindeki hava hızı değişimi Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’ de verilmektedir.

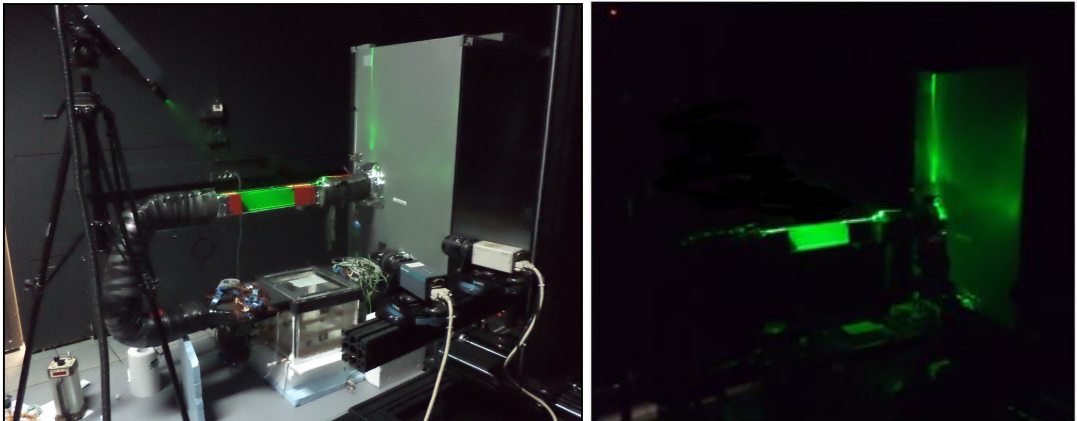


Şekil 3.10 : Sebzelige giriş kanalında farklı fan besleme gerilimleri için hava hızı dağılımı.



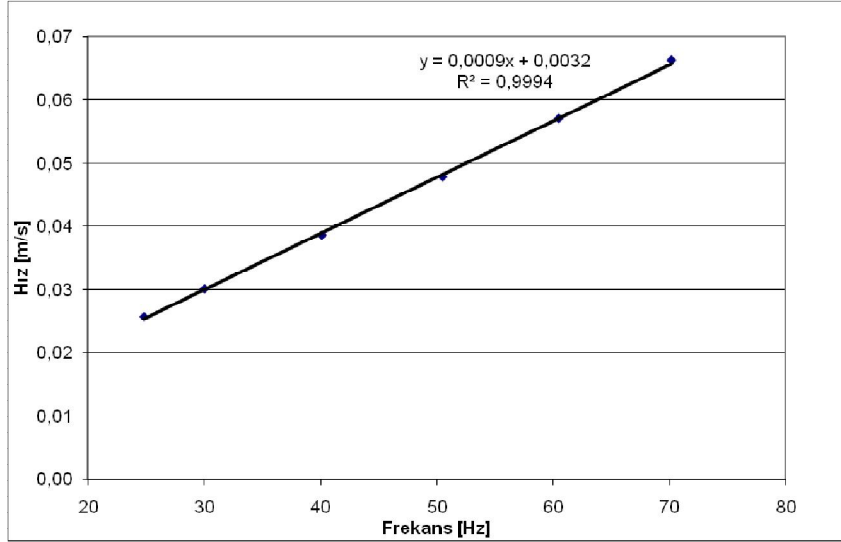
Şekil 3.11 : Sebzelige giriş kanalında farklı fan besleme gerilimleri için hava hızı dağılımı kontur grafikleri.

Sebzelik girişindeki hız değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışma kapsamında, deney düzeneğinin son hali için sebzelik giriş hava hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kapalı çevrim halinde bulunan hava kanalı yapısında, sistemdeki toplam debinin sabit olması kabulü ile hava hızı ölçümleri, görüntülemenin daha net yapılabildiği, hava kanalı yapısı üst kısmından gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12 : Sebzelige giriş hava hızının belirlenmesinde kullanılan sistem.

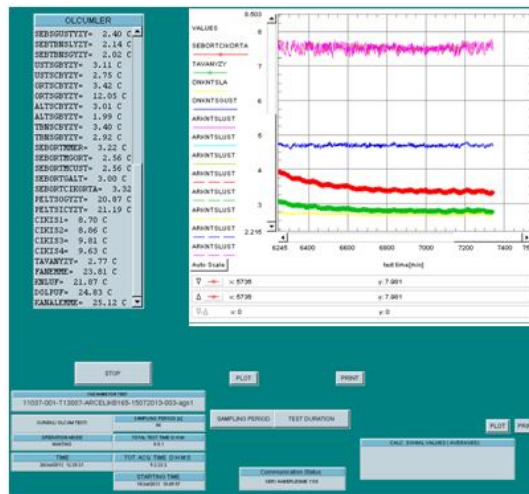
Hava kanalının, görüntüleme ve ölçüm işlemlerinin gerçekleştirildiği kısmı pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Parçacık görüntülemeli hava hızı ölçümleri sonucunda, farklı fan frekanslarında elde edilen hava hızları belirlenmiştir. Giriş fan frekansı-hava hızı arasındaki ilişki Şekil 3.13’ de verilmiştir.



Şekil 3.13 : Fan frekansı hava hızı arasındaki ilişki.

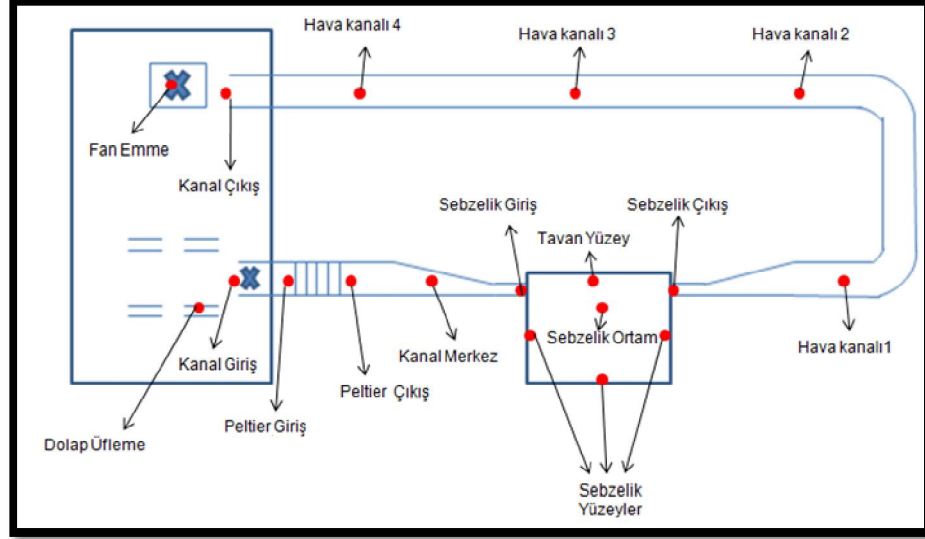
3.4 Ölçüm ve Veri Toplama Sistemi

Deney düzeneğinde, deney şartlarını kontrol etmek amacıyla sıcaklık ve nem ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu büyüklerinde ölçümlerinde, ölçüm elemanlarının oluşturdukları sinyaller bağlı bulundukları elektronik kartlar ile veri toplama cihazına aktarılmaktadır. Sıcaklık ölçümlerinde, ölçüm verileri değerlendirilerek HP VEE programı ile zamana bağlı olarak takip edilmektedir.

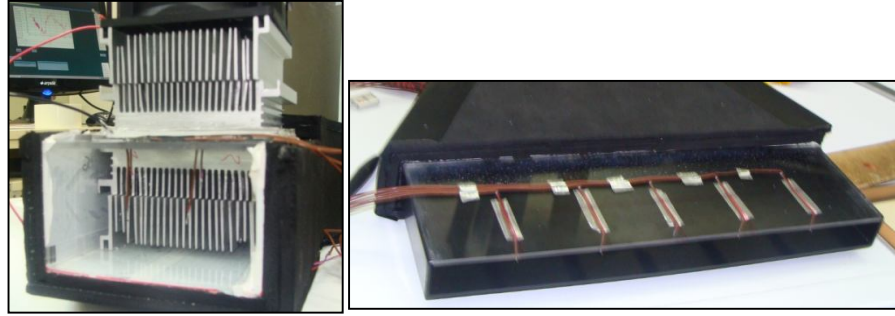


Şekil 3.14 : Sıcaklık ölçüm programı.

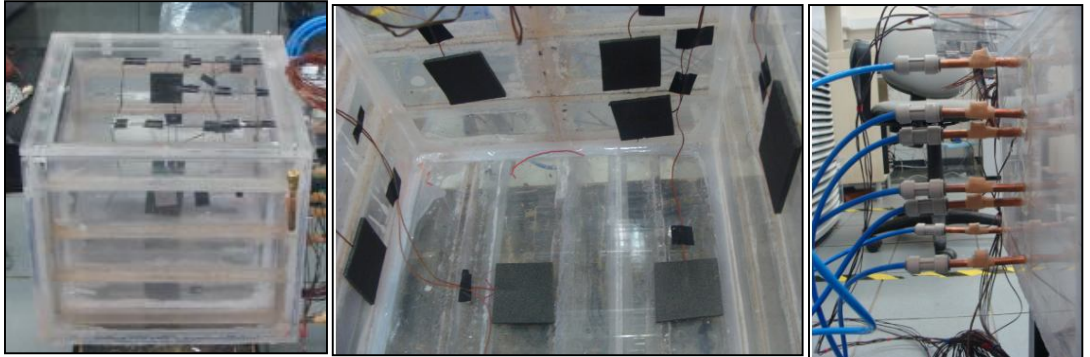
Deney düzeneğinde, sebzelik yüzey sıcaklıkları, sebzelik hava ve gıda sıcaklıkları, sebzelik hava giriş-çıkış sıcaklıkları, su giriş ve çıkış sıcaklıkları, peltier yüzey sıcaklıkları olmak üzere çok sayıda noktadan ısı çiftleri ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Deney düzeneği sıcaklık ölçüm noktaları şematik gösterimi.

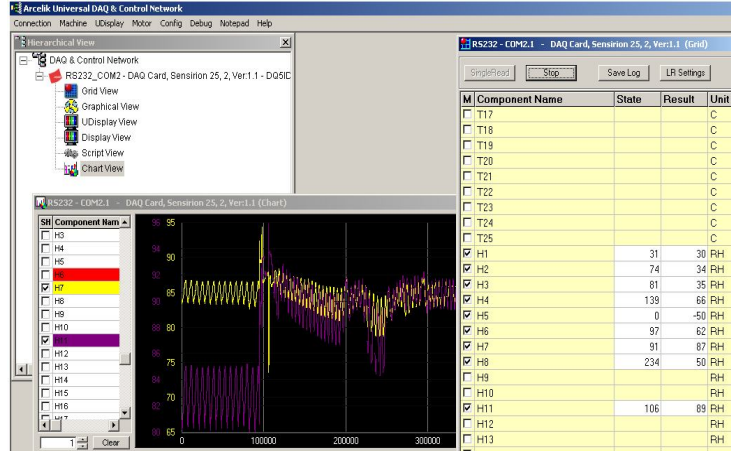


Şekil 3.16 : Hava kanalı sıcaklık ölçümleri.



Şekil 3.17 : Sebzelik sıcaklık ölçümleri.

Bağıl nem ölçümlerinde, ölçüm dataları değerlendirilerek UDAQ programı ile zamana bağlı olarak takip edilmektedir. Sebzelik hava giriş-çıkışında ve sebzelikte bağıl nem sensörleri kullanılarak veri alınmıştır.



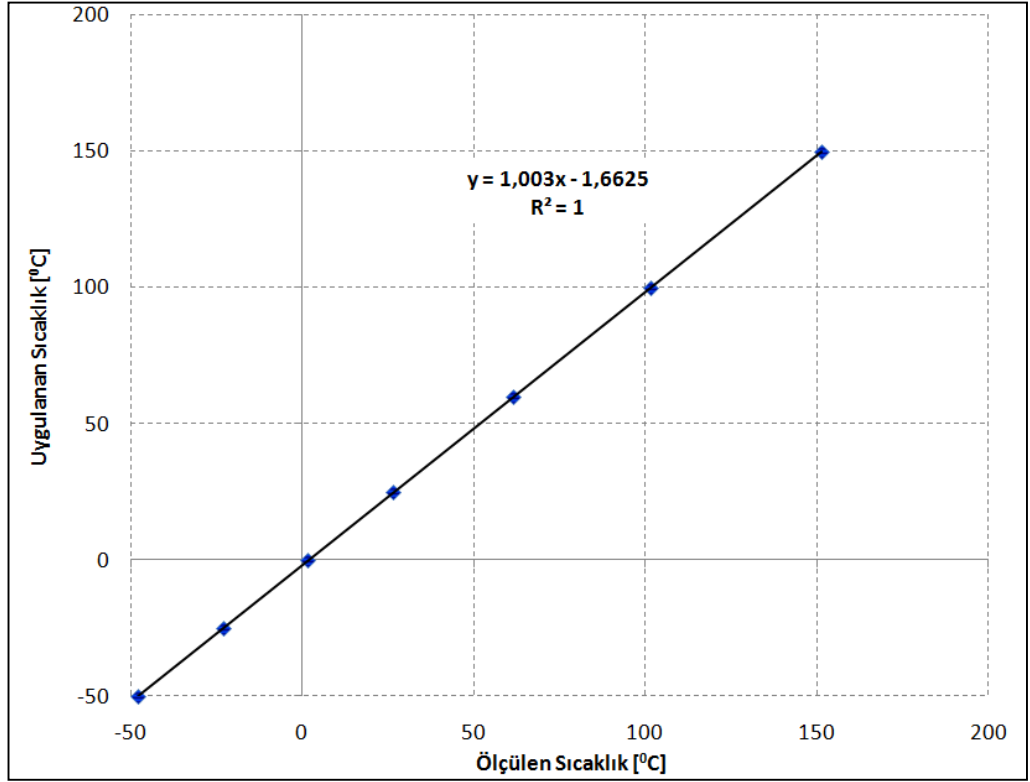
Şekil 3.18 : Nem ölçüm programı.

3.5 Sıcaklık Ölçüm Elemanları Kalibrasyonu

Kalibrasyon işlemi ölçüm elemanının ölçtüğü değeri o ölçüm şartında bilinen gerçek değere göre düzeltme işlemidir. Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm elemanlarının ölçüm hatalarını azaltmak ve toplam belirsizlik değerlerini tespit etmek amacıyla kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kalibrasyon işlemi için bir dizi ölçüm yapılarak gerçek değeri bilinen büyüklüklere karşılık, ölçüm elemanı ile tespit edilen sonuçların eğrisi çizdirilmektedir. Kalibrasyon sonucu oluşan $y = ax + b$ fonksiyonundaki katsayılar kullanılarak bilgisayara aktarılan ölçüm verileri düzeltilmektedirler.

Sıcaklık ölçüm elemanları için kalibrasyon işlemi, -50°C ile 150°C arasında yapılmıştır. Ölçülen sıcaklık ile uygulanan sıcaklık değerleri arasında $y = 1,003x - 1,6625$ şeklinde kalibrasyon eğrisi ortaya çıkmıştır. Uygulanan sıcaklık değeri için sistemdeki tüm termokupllardan ölçülen sıcaklık değerlerinin ortalama değerleri için elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 3.19’ de verilmektedir.



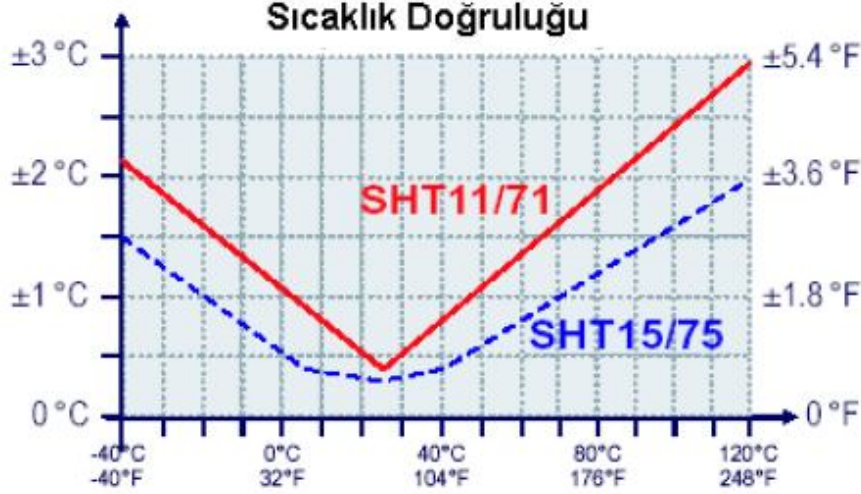
Şekil 3.19 : Termokupl kalibrasyon eğrisi.

3.6 Bağıl Nem Ölçüm Elemanları Belirsizliği

Deney düzeneği bağıl nem ölçümlerinde, eş zamanlı sıcaklık ve bağıl nem ölçümü yapabilen, doğrudan dijital çıkış veren Sensirion SHT75 nem-sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Sensörlerin bağıl nem ve sıcaklık ölçüm doğruluklarının, ölçüm aralıklarındaki değişimi sırasıyla Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’ de verilmiştir.



Şekil 3.20 : Sensörlerin bağıl nem ölçüm belirsizliği.



Şekil 3.21 : Sensörlerin sıcaklık ölçüm doğruluğu.

3.7 Deney Düzenegi Belirsizlik Analizi

Deney düzeneğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ölçüm belirsizliklerinin belirlenmesi ölçüm sistemi ve sonuçlarının güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple, ölçüm elemanları için belirsizlik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm belirsizliği hesabında Kline ve McClintock tarafından ileri sürülen yöntem kullanılmıştır [24]. Bu yöntemle göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ olsun. Bu durumda R büyüklüğü (3.1) eşitliğinde görüldüğü gibi ifade edilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik değerleri $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ ve R büyüklüğünün toplam belirsizliği w_R ise R büyüklüğünün belirsizliği (3.2) eşitliğinde sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [24].

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Tez çalışmaları kapsamında, termokupllar ile sebzelik yüzey, gıda, sebzelik hava sıcaklıkları, bağıl nem sensörleri ile sebzelik ortam bağıl değeri ölçülmüş ve ölçülen bu değerler ısı ve kütle transferi hesaplamalarında kullanılmıştır. Deney

düzenegi belirsizlik hesabı kapsamında, deneysel olarak ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerleri kullanılarak hesaplanan; kısmi basınç, özgül nem, derişiklik değerlerinin hata oranları hesaplanmıştır. Deney düzenegi belirsizlik hesabında, deneyler esnasında ölçülen en yüksek değerler kullanılmıştır, kullanılan değerler Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.2: Belirsizlik hesaplamalarında kullanılan değerler.

Sıcaklık [K]	Bağıl Nem [%]	ω [kgsb/kgkh]	Pv [Pa]
283	90	0,00679	1.08E+03

Çizelge 3.3: Farklı sıcaklık aralıkları için tanımlanan, sıcaklığa bağılı doyma basıncı ifadesi hesaplamasında kullanılan katsayılar.

A	B	C	D
1.23E-05	-1.92E-02	2.71E+01	-6.34E+03

Sıcaklık ölçüm belirsizliği; üretim ve bağlantıdan gelen belirsizlik $\pm 0,12$ °C, kalibrasyondan gelen belirsizlik $\pm 0,06$ °C ve ölçümden gelen belirsizlik $\pm 0,1$ °C olmak üzere;

$$w_T = \left[(\pm 0,12)^2 + (\pm 0,06)^2 + (\pm 0,1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$w_T = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

Bağıl nem ölçüm belirsizliği; %90 ve üzeri bağıl nem ölçümünde ± 3 , %90 ve altı bağıl nem ölçümünde $\pm 2-2,5$ olarak verilmiştir. Deney düzenegi belirsizlik hesabında, bağıl nem ölçüm belirsizliği $w_\varphi = 2,5$ olarak alınmıştır.

Deneylerde sebzeliğe yerleştirilen numunelerin ağırlık kaybının belirlenmesi amacıyla kullanılan hassas terazinin ölçüm doğruluğu ± 0.025 gramdır. Bu durumda kütle ölçümlerinin belirsizliği;

$$w_T = \left[(\pm 0,03)^2 \right]^{1/2} = 0.03g \quad (3.5)$$

Denklem 3.2' de verilen yaklaşım kullanılarak kısmi basınç hesabından gelen belirsizlik 34,5 Pa olarak hesaplanmıştır **(3.6)**.

$$w_{P_v} = \left[\left(1000 \rho e^{AT^2+BT+C+DT^{-1}} (2AT+B-DT^{-2}) w_T \right)^2 + \left((1000 \rho e^{AT^2+BT+C+DT^{-1}}) w_\phi \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Benzer yaklaşımla, aşağıdaki denklemler kullanılarak, özgül nem hesabından gelen belirsizlik 0,196 g/kg derişiklik hesabından gelen belirsizlik 0,2442 g/m³ olarak hesaplanmıştır.

$$w_\omega = \left[\left(\left(\frac{0,622P - 1,244P_v}{(P - P_v)^2} \right) w_{P_v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

$$w_{dv} = \left[\left(\frac{-218,84}{T^2} \left(\frac{\omega}{\omega + 0,622} \right) w_T \right)^2 + \left(\frac{218,84}{T} \left(\frac{0,622 + 2\omega}{(\omega + 0,622)^2} \right) w_\omega \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmaları kapsamında kurulan parametrik deney düzeneğinde, salatalık, brokoli ve marul ile; yüzeyler arası sıcaklık farkı, giriş hava hızı, miktar/yerleşim fiziksel parametrelerinin irdelendiği deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği fiziksel parametre değerleri sebze cinsine göre Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Deneysel çalışma koşulları.

Sebze Cinsi	$T_{\text{tvnyzy}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{diğ.yzyler}} [^{\circ}\text{C}]$	Kavite (Hava giriş-çıkışı)	Hava Hızı [m/s]	Miktar	Yerleşim
Salatalık	7	10	Kısmi Açık	0,02	4 sıra	-
	5	10	Kısmi Açık	0,02	4 sıra	-
	3	10	Kısmi Açık	0,02	4 sıra	-
	3	5	Kısmi Açık	0,02	4 sıra	-
	3	5	Kısmi Açık	0,04	4 sıra	-
	3	10	Kapalı	-	4 sıra	-
	3	5	Kapalı	-	4 sıra	-
	3	3	Kapalı	-	4 sıra	-
Brokoli	3	10	Kapalı	-	4 adet	-
	3	5	Kapalı	-	4 adet	-
	3	3	Kapalı	-	4 adet	-
	3	5	Kısmi Açık	0,04	4 adet	-
	3	5	Kısmi Açık	0,02	4 adet	-
Marul	3	10	Kısmi Açık	0,04	4 adet	Dikey
	3	5	Kısmi Açık	0,04	4 adet	Dikey
	3	10	Kısmi Açık	0,02	4 adet	Dikey
	3	10	Kısmi Açık	0,04	4 adet	Dikey
	3	10	Kısmi Açık	0,07	4 adet	Dikey
	3	5	Kısmi Açık	0,04	4 adet	Dikey
	3	5	Kısmi Açık	0,04	4 adet	Yatay
	3	5	Kısmi Açık	0,04	6 adet	Yatay
	3	5	Kısmi Açık	0,04	3 adet	Yatay
	3	5	Kısmi Açık	0,04	2 adet	Yatay

4.1 Deney Sonuçları Değerlendirme Yöntemi

Taze gıdalardan gerçekleşen nem kaybı terleme olarak tanımlanmaktadır. Terleme akısı; gıda yüzeyindeki su buharı doyma basıncı ile havadaki kısmi buhar basıncı arasındaki fark ve toplam kütle transfer katsayısına bağlıdır. k_t toplam kütle transfer

katsayısı, k_a hava tarafı taşınımsal kütle geçiş katsayısı ve k_s yüzey kütle geçiş katsayısına (terleme katsayısı) bağlıdır. k_a , hava debisinin bir fonksiyonu olup gıda yüzeyinden havaya taşınım ile kütle geçişini tanımlamaktadır. k_s ise, gıda yüzeyinden terleme ile gerçekleşen yayılımsal kütle geçişini ifade etmektedir.

$$\dot{m} = k_t (P_s - P_a) \quad [kg / m^2 s] \quad (4.1)$$

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_s}} \quad [kg / m^2 s Pa] \quad (4.2)$$

Sebzeler yüksek su içeriğine sahip olduklarından, gıdadan havaya kütle geçişi sözkonusudur. Kütle geçişi miktarı, nemli hava içeriğindeki su buharı miktarının artmasıyla, yani gıda yüzeyi ile hava arasındaki su buharı derişiklik farkı ile doğru orantılı olarak azalacaktır. Denk. (4.1)'de tanımlanan basınç farkı, gıda yüzeyi ile hava arasındaki su buharı derişiklik farkı nispetinde oluşmaktadır.

Deney düzeneği deneysel çalışmaları gerçekleştirilen, sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri matematiksel modelde kullanılarak, derişiklik, özgül nem, ısı-kütle transferi Ra sayıları çıktıların da içinde barındırarak toplam kütle transfer katsayısının hesaplanması amaçlanmıştır.

Öncelikle, sebzeli hava (ortam) sıcaklığı, tavan yüzey sıcaklığı, gıda sıcaklığı ile sebzeli bağıl nem değerlerinden yola çıkılarak hava, tavan ve gıda için özgül nem (ω) ve su buharı kütle derişiklik (d_v) değerleri hesaplanmıştır. Özgül nemin hesaplanmasında kullanılan basınç değerleri, (2.44), (2.45) denklemleri ve Çizelge 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\omega = \frac{0,622 \times P_v}{P - P_v} \quad [kg_{sb} / kg_{kh}] \quad (4.3)$$

Nemli havanın karışım yoğunluğu; özgül nem değerlerine bağılı olarak tanımlanan kuru hava ve su buharı mol oranları ile ilişkili olarak (4.4)'deki gibi tanımlanmaktadır [1]. (4.5) eşitliğinde verildiği gibi; nemli havanın karışım yoğunluğu, su buharı ve kuru havanın kütle derişikliklerinin toplamına eşittir. (4.4) ve (4.5) bağıntıları birlikte değerlendirildiğinde, nemli hava içerisindeki su buharı kütle derişikliği ile özgül nem arasındaki ilişki (4.6) 'da verildiği gibi olur.

$$\rho_m = \frac{28,9645P}{R_u T_{a,abs}} (x_a + 0,62198x_v) \quad R_u = 8,3144kJ / kgK \quad (4.4)$$

$$x_a = \frac{0,62198}{0,62198 + \omega}$$

$$x_v = \frac{\omega}{0,62198 + \omega}$$

$$\rho_m = d_v + d_a \Rightarrow \frac{218,84}{T_a} \left(\frac{1 + \omega}{0,62198 + \omega} \right) = d_v + \frac{d_v}{\omega} \quad (4.5)$$

$$d_v = f(\omega) = \frac{218,84}{T_a} \times \left(\frac{\omega}{0,622 + \omega} \right) \quad [kg / m^3] \quad (4.6)$$

Toplam kütle transfer katsayısını oluşturan hava tarafı kütle transfer katsayısını hesaplamak için kullanılacak olan Sh korelasyonlarının belirlenebilmesi amacıyla ilk olarak, sebzelik saklama hacminde farklı sıcaklık değerleri için, hava giriş-çıkışının olduğu durumda Gr/Re^2 oranı tespit edilmiştir. Hesaplamalarda karakteristik uzunluk gıda ile tavan yüzeyi arasındaki dikey mesafe olan ‘H’ yüksekliği alınmıştır.

Gr/Re^2 oranı ve doğal-zorlanmış taşınım arasındaki ilişki; ‘ $Gr / Re^2 \leq 1$ ’ ise zorlanmış taşınım, ‘ $Gr / Re^2 \geq 1$ ’ ise doğal taşınım baskındır, Gr/Re^2 sayısının 1 mertebelerinde olması durumunda karışık rejim söz konusudur [25] ve ‘‘ $Gr / Re^2 \ll 1$ ’’ olduğunda doğal taşınım ‘‘ $Gr / Re^2 \gg 1$ ’’ olduğunda ise zorlanmış taşınım ihmal edilebilir ve $Gr / Re^2 \approx 1$ olduğunda birlikte doğal ve zorlanmış taşınım rejimi mevcuttur [6] şeklinde verilmiştir. Deneysel koşullar göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirmelerde Gr/Re^2 oranı 5-100 aralığında bulunmuştur. Deneysel çalışmalar, düşük hava hızları ve kavitenin tamamen kapalı olması durumlarında gerçekleştirildiğinden, hesaplamalarda doğal taşınım baskın kabulü ile doğal taşınım denklemleri kullanılmıştır.

Hava tarafı kütle transfer katsayısı ‘ k_a ’, doğal taşınımı tetikleyen iki yüzey olan gıda ve tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkından yararlanılarak hesaplanmıştır. k_a ’nın hesaplanmasında, Şeker tarafından geliştirilen, doğal taşınım boyutsuz sayısı Ra sayısına bağlı olarak verilen Sh korelasyonları kullanılmıştır [8]. Burada, kütle transferi ve ısı transferi birlikte değerlendirilmiştir ve ısı transferi Ra sayısı ile kütle transferi Ra_d sayısının toplamı olarak Ra_m sayısı ifade edilmiştir (4.6).

$$Ra_m = Ra + Ra_d \quad (4.6)$$

$$Ra_d = \frac{g\beta_d [(d_v)_g - (d_v)_h] H^3}{\nu_m \alpha} \quad (4.7)$$

$$\beta_d = \frac{1}{(d_v)_g} \quad (4.8)$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_H - T_C) \cdot H^3}{\nu_m \alpha} \quad (4.9)$$

$$\beta = \frac{1}{T_g} \quad (4.10)$$

Sh korelasyonu Ra_m ' ye bağılı olarak hesaplanmakta ve buradan taşınımsal kütle geçiş katsayısına geçiş yapılmaktadır.

$$Sh = 0,1308.Ra_m^{0,314} \quad (4.11)$$

$$Sh = \frac{h_m H}{D_{va}} \quad (4.12)$$

h_m kütleli taşınım katsayısı [m/s] birimindedir. Toplam kütle transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılan k_a değeri [kg/m²sPa] cinsinden yazılmalıdır. Bu amaçla; [m/s]'den [kg/m²sPa]' ye geçişte kullanılacak birim dönüşümü katsayısı tespit edilmiştir **(4.13-4.16)**.

$$m_{ter} = h_m [(d_v)_s - (d_v)] = k_t (P_s - P_a) \quad (4.13)$$

$$k_t = k_a = \frac{h_m [(d_v)_s - (d_v)]}{(P_s - P_a)} \quad (4.14)$$

(4.14)' te derişiklik ifadesinin yerine, **(4.6)** yerleştirildiğinde ve ifade düzenlendiğinde **(4.16)** elde edilmektedir.

$$k_a = h_m \left[\frac{218,84}{P \cdot T_a} \right] = h_m \left[\frac{218,84}{100000 \cdot 278} \right] \quad (4.15)$$

$$k_a = h_m \cdot 7,871 \cdot 10^{-6} \quad (4.16)$$

Sh korelasyonu ile elde edilen k_a , gıda cinsine bağılı olarak değişen k_s ile birlikte toplam kütle transfer katsayısının elde edilmesinde kullanılmıştır. k_s değeri ile ilgili bilgiler ve gerçekleştirilen deneysel çalışmalar bölüm 4.2 'de verilmektedir.

Isı taşınım katsayısının tespit edilmesi amacıyla da Ra sayısına bağılı aşağıdaki Nu korelasyonu kullanılmıştır [8].

$$Nu = 0,1998.Ra^{0,2716} \quad (4.17)$$

$$Nu = \frac{h.H}{k} \quad (4.18)$$

Tez çalışmaları kapsamında sebzeler, ideal saklama koşullarına göre üç grupta incelenmektedir. Bu doğrultuda, ideal saklama koşullarına göre sebzeler; nem kaybına duyarlı sebzeler, düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler ve soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler olarak gruplandırılmıştır.

- Nem kaybına duyarlı sebzeler (%90 ve daha yüksek bağıl nem)
- Düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler (0-3 °C saklama sıcaklığı)
- Soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler (7-14 °C saklama sıcaklığı)

Deneysel çalışmalarda, nem kaybına duyarlı sebzeler grubuna örnek olarak marul, düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler grubuna örnek olarak brokoli, soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler grubuna örnek olarak salatalık ele alınmıştır ve sebzeler deney düzeneğinde marul, brokoli ve salatalık yüklü deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek, deneysel çıktılar ısı-kütle transferi açısından değerlendirilmiştir.

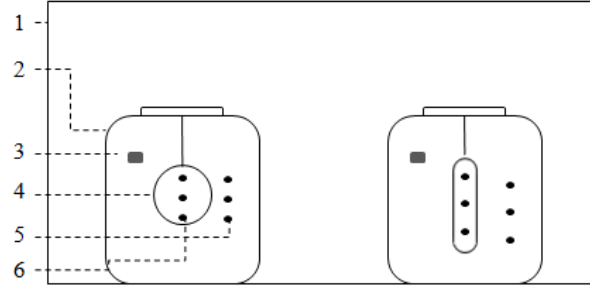
Gıda kalite değerlendirmeleri kapsamında, farklı saklama koşullarında gıdalarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler gıda analizleri ile ortaya konmuştur.

4.2 Sebzelerin Terleme Katsayısının Deneysel Olarak Tespiti

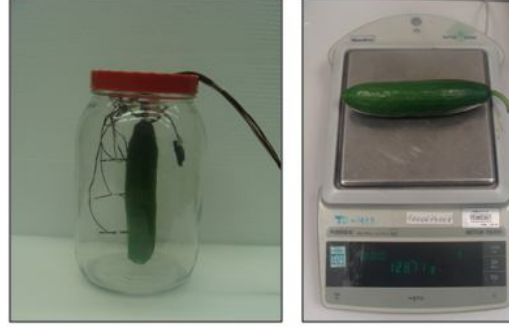
Deneysel çalışmaların değerlendirilmesi kapsamında hesaplanan toplam kütle transfer katsayısı ' k_t ', hava tarafı taşınımsal kütle geçiş katsayısı ' k_a ' ve yüzey kütle geçiş katsayısı ' k_s ' ye bağlıdır. Yüzey kütle geçiş katsayısı ' k_s ', sebze-meyve cinsine, yüzey alanına, gözenekliliğe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir ve deneysel olarak tespit edilmektedir. Literatürde farklı sebze-meyve türleri için tespit edilmiş yüzey kütle geçiş katsayısı değerleri bulunmaktadır (Şekil 2.2).

Literatürde bulunan ve sebze-meyveler için belirlenen ' k_s ' değerlerinin geniş bir aralıkta seyrettiği ve her sebze-meyve türünü içermediği görülmektedir. Ayrıca, sebze-meyvelerin yetiştirildiği coğrafyaya bağlı olarak terleme ve soluma gibi termofiziksel özelliklerinde de farklılıklar olabilecektir. Dolayısıyla, deney düzeneği sebzeliğinde, deneysel çalışmalarda incelenecek olan sebze türleri için terleme katsayısı tespiti gerçekleştirilmiştir. Terleme katsayısı tespiti deneyleri için, deney sistematığında belirlenen sebze gruplarını temsil eden sebzeler olarak; brokoli, salatalık ve marul numuneleri ile çalışılmıştır. Ayrıca ek olarak, domates, elma ve brüksel lahanası için de katsayı belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Taze sebze-meyvelerden terleme yoluyla ağırlık kaybı, toplam kütle transfer katsayısı ve gıda yüzeyindeki doyma basıncı ile havadaki kısmi buhar basıncı arasındaki fark etkisi ile gerçekleşmektedir. Bu doğrultuda, deney numuneleri terlemenin kontrollü olarak gerçekleştirileceği kapalı bir kavanoza yerleştirilmiştir. Kavanoz içerisine yerleştirilen numunenin yüzey sıcaklığı, kavanoz içi hava sıcaklığı, kavanoz içi havanın bağıl nem değeri, deneyler sırasında ölçülen büyüklüklerdir. Ayrıca, deney öncesi ve sonrasında deney numunesine ait ağırlık ölçümleri gerçekleştirilerek, deney boyunca meydana gelen ağırlık kaybı tayin edilmiştir. Deney numuneleri ve ekipmanları, deney başlatma öncesi sıcaklık kontrollü test odasında, deneyin gerçekleştirileceği sıcaklıkta rejime gelene kadar bekletilmişlerdir. Rejime gelen deney numunesinin ilk ağırlığı ölçülerek deney başlatılmıştır. Ağırlık kaybının meydana geldiği deney süresi gıda cinsine göre değişkenlik göstermektedir, öncül denemeler ile deney süresi 3-7 gün olarak belirlenmiştir. Deneyler sıcaklık kontrollü test odasında, 5 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 : k_s tespiti deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 4.2 : Gıda, TC, bağıl nem sensörlerinin yerleşimi ve ağırlık ölçümü

Terleme modeline göre, birim gıda yüzeyinden gerçekleşen terleme akısı toplam kütle transfer katsayısı ve gıda ile hava arasındaki basınç farkına bağlıdır. Toplam kütle transfer katsayısı da, gıda tarafını ve hava tarafını temsil eden iki ayrı kütle transfer katsayısı kullanılarak tanımlanmaktadır **(4.1),(4.2)**.

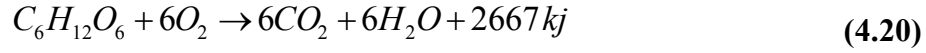
Deneyler sabit sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden hava hareketleri minimize edilmiş ve k_a ihmal edilerek, k_t sadece k_s ' ye bağlı hale getirilmiştir.

$$k_t = k_s \quad (4.19)$$

Gıda yüzeyinde doyma koşulları hakim olduğundan, gıda numunesi yüzey sıcaklığı kullanılarak yüzey doyma basıncı P_s , kavanoz içi hava sıcaklığı ve bağıl nemi kullanılarak havadaki kısmi basınç P_a denklem **(2.44)** ile hesaplanmıştır. Sıcaklığa bağlı doyma basıncının hesaplanmasında aşağıdaki polinom ifadesinden **(2.45)** ve Çizelge 2.1' den yararlanılmıştır.

Soğukta saklanan sebze-meyvelerden terleme kaynaklı su kaybının yanı sıra, soluma kaynaklı da bir miktar su kaybı gerçekleşmektedir. Sadece terleme kaynaklı ağırlık kaybının elde edilebilmesi amacıyla, soluma kaynaklı su kaybı hesaplanmış ve deney

başlangıcı ve sonunda gerçekleştirilen ağırlık ölçümleri ile elde edilen terleme miktarından çıkarılmıştır.



$$\dot{m}_{CO_2} = f \left(\frac{9T_m}{5} + 32 \right)^g \left[\frac{mg}{kgh} \right] \quad (4.21)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{18}{44} \dot{m}_{CO_2} \left[\frac{mg}{kgh} \right] \quad (4.22)$$

$$M_{sol} = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot \dot{M}_g \cdot t}{60000} [mg] \quad (4.23)$$

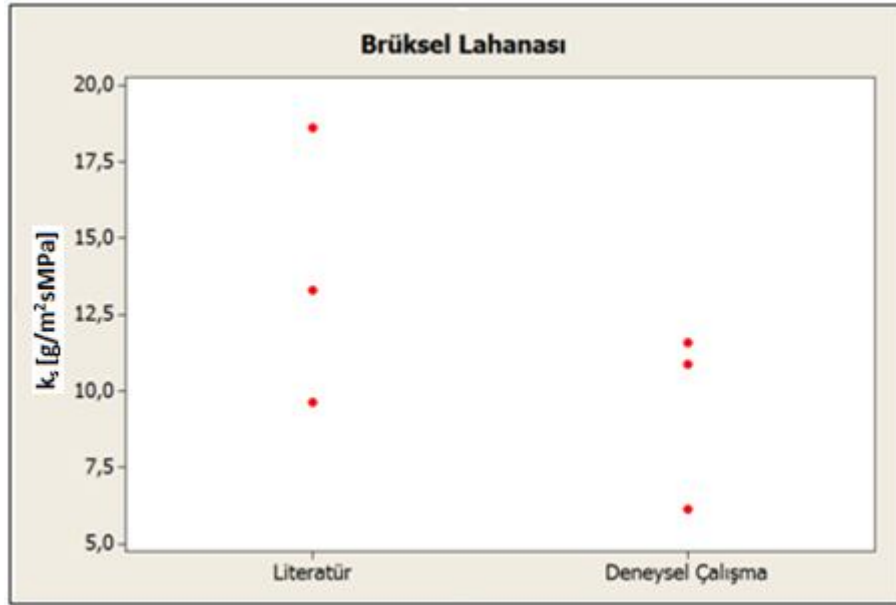
$$\dot{M}_T = \frac{M_T - M_{sol}}{1000} [g] \quad (4.24)$$

Toplam kütle transfer katsayısına eşit olan yüzey kütle geçiş katsayısı, terleme kaynaklı ağırlık kaybının, basınç farkı, numune yüzey alanı ve toplam deney süresine bölünmesiyle elde edilmektedir. Numune yüzey alanı hesaplanırken, geometrik formülasyonlar kullanılmıştır.

$$k_s = k_t = \frac{\dot{M}_T}{(P_s - P_v) \cdot A \cdot t} [g / m^2 s Pa] \quad (4.25)$$

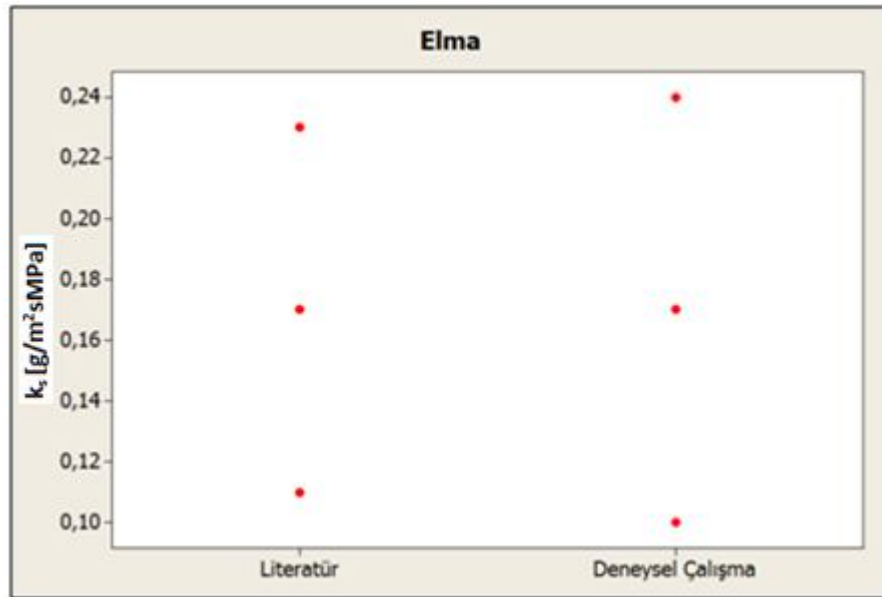
Deneysel çalışma değerleri ile literatür değerlerinin karşılaştırılması, literatürde ‘düşük değer’, ‘ortalama değer’ ve ‘yüksek değer’ bazında verilen brüksel lahanası, domates ve elma k_s değerleri ile yapılmıştır.

Brüksel lahanası için literatürde verilen k_s değerleri 9,6-18,6 g/m²sMPa aralığındadır. Bu çalışma kapsamında deneysel olarak tespit edilen değerler ise 6,1-11,6 g/m²sMPa olarak daha dar bir aralıkta bulunmuştur. Şekil 4.3’ te, deneysel değerler literatür ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

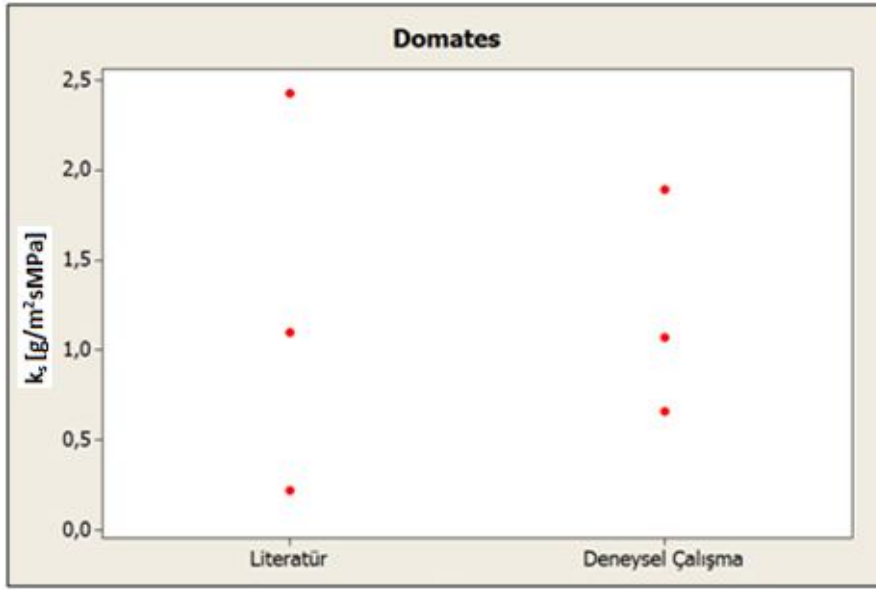


Şekil 4.3 : Brüksel Lahanası k_s değerleri.

Literatürde domates ve elma için verilen ortalama k_s değerleri sırasıyla 1,10 g/m²sMPa ve 0,167 g/m²sMPa' dir. Deneysel olarak çalışma kapsamında elde edilen ortalama değerler, sırasıyla domates ve elma için 1,07 g/m²sMPa ve 0,168 g/m²sMPa' dir. Elma ve domates, geometrik açıdan ve yüzey pürüzlülüğü açısından kütle transferinin meydana geldiği yüzey alanının hesaplanmasına daha uygun bir yapıdadır. Bu sayede, hem literatürde hem de bu çalışmada elde edilen k_s 'düşük-ortalama-yüksek' değerleri birbirine daha yakındır.



Şekil 4.4 : Elma k_s değerleri.



Şekil 4.5 : Domates k_s değerleri.

Literatürde k_s değeri yer almayan ve deneysel çalışmalarda kullanılacak olan brokoli, salatalık ve marul sebzelerine ait değerler de deneysel çalışmalar kapsamında tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında deneysel olarak tespit edilen ortalama k_s değerleri, brokoli, salatalık ve marul için sırasıyla 6,93 g/m².sMPa, 11,01 g/m².sMPa ve 6,66 g/m².sMPa' dır. Ayrıca, deneysel olarak tespit edilen diğer değerler Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Brokoli, salatalık ve marul k_s değerleri

Deney Numunesi	Düşük Değ.	Ortalama Değ.	Yüksek Değ.
Brokoli	5,26	6,93	7,59
Salatalık	9,33	11,01	21,09
Marul	3,64	6,66	8,07

4.3 Salatalık Yüklü Deneysel Çalışmalar

Salatalık, soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler grubuna örnek bir sebzedir ve görece yüksek sıcaklıkta saklanması gerekmektedir. Salatalık için farklı kaynaklarda ideal saklama koşulu 10-13 °C, %95 bağıl nem ve ideal saklama koşulundaki raf ömrü süresi 10-14 gün veya 14 günden az olarak belirtilmiştir. 10 °C' den daha

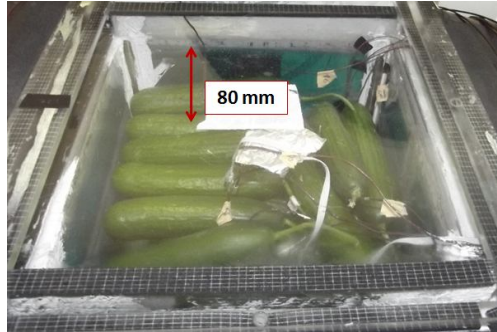
düşük sıcaklıkta saklanan salatalıklarda soğuk zararlanması görüldüğü belirtilmiştir [23,26].

Salatalık yüklü durum deneysel çalışmaları, salatalık yerleşim miktarı 4 sıra olarak sabit tutularak sıcaklık farkı ve giriş hava hızı parametreleri ısı ve kütle transferi açısından değerlendirilmiştir. Şekil 4.6’da deney düzeneği sebzeliğine salatalık yerleşimi aşamalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Deney düzeneği sebzeliğine salatalık diziliş şekli.

Doğal taşınım karakteristik uzunluğu ‘H’ salatalıklarının 4 sıra yüklenmesi durumunda 80 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Salatalık yüzeyi ile tavan yüzeyi arasında kalan mesafe

Salatalık deneysel çalışmaları, sıcaklık farkının etkisi tavan yüzey sıcaklığı sabit tutularak, diğer yüzey sıcaklıklarının değiştirilmesi ile sağlanan yüzeyler arası sıcaklık farkı ve diğer yüzey sıcaklıkları sabit tutularak tavan yüzey sıcaklığının değiştirilmesi ile sağlanan sıcaklık farkı olmak üzere iki farklı durumda ele alınmıştır. İki durum arasında, ısı ve kütle transferi açısından karşılaştırma yapılmıştır.

Sıcaklık farkının etkisine ek olarak, salatalık yüklü deneysel çalışmalar kapsamında, giriş hava hızının ve yükleme miktarının ısı-kütle transferi açısından parametrik etkisi irdelenmiştir. Salatalık yüklü duruma ait deney koşulları Çizelge 4.3’ de verilmektedir.

Çizelge 4.3 : Salatalık yüklü durum için gerçekleştirilen deney koşulları.

T_{tvnyzy} [°C]	$T_{\text{diğ.yzyler}}$ [°C]	Kavite (Hava giriş-çıkışı)	Hava Hızı [m/s]	Miktar
7	10	Kısmi Açık	0,02	4 sıra
5	10	Kısmi Açık	0,02	4 sıra
3	10	Kısmi Açık	0,02	4 sıra
3	5	Kısmi Açık	0,02	4 sıra
3	5	Kısmi Açık	0,04	4 sıra
3	10	Kapalı	-	4 sıra
3	5	Kapalı	-	4 sıra
3	3	Kapalı	-	4 sıra

Salatalık deneysel çalışmalarında, yüzeyler arası sıcaklık farkı ve giriş hava hızı parametrelerinin etkileri ısı-kütle transferi ve gıda kalitesi açısından değerlendirilmiştir.

4.3.1 Kısmi açık sebzeliğe yüzeyler arası sıcaklık farkı

Salatalık yüklü deneysel çalışmalarda, yüzeyler arası sıcaklık farkı, sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin parametrik etkisi ve sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişiminin parametrik etkisi olmak üzere iki farklı şekilde incelenmiştir.

Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin parametrik etkisi:

Sıcaklık farkının incelenmesi çalışmaları kapsamında, sebzeliğin tavan yüzeyi dışındaki diğer yüzeyleri 10 °C' ye getirilmiştir. Sabit diğer yüzey sıcaklığı için sebzeliğe en soğuk yüzey tavan yüzeyi olacak şekilde, tavan yüzeyi 3 °C, 5 °C ve 7 °C olmak üzere üç farklı sıcaklığa ayarlanmıştır. Sebzelik hava giriş-çıkış kesiti 20 mm açıklıkta ve giriş hava hızı 0,02 m/s değerindedir. Deneysel çalışmanın bu üç

koşulunda elde edilen, gıda, tavan, hava sıcaklıkları, sıcaklık farkı ve bağıl nem değerleri Çizelge 4.4’ de verilmiştir.

Sebzelik temel olarak cidarlarından soğutulduğundan, sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişimi, sebzelik içi hava sıcaklığını ve gıda sıcaklığını önemli oranda değiştirmemektedir. Sebzelik içi hava sıcaklığı $\sim 7^{\circ}\text{C}$, gıda sıcaklığı $\sim 8^{\circ}\text{C}$, sebzelik içi bağıl nemi %70-%80 aralığında elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 : Saklama koşullarına ilişkin sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Koşul	T_h [$^{\circ}\text{C}$]	T_{tn} [$^{\circ}\text{C}$]	T_g [$^{\circ}\text{C}$]	$\Delta T (T_g - T_{tn})$ [K]	% Φ
$T_{zy}=10^{\circ}\text{C} - T_{tnzy}=7^{\circ}\text{C}$	7,5	6,9	8,2	1,3	76
$T_{zy}=10^{\circ}\text{C} - T_{tnzy}=5^{\circ}\text{C}$	7,6	5,1	8,3	3,2	77
$T_{zy}=10^{\circ}\text{C} - T_{tnzy}=3^{\circ}\text{C}$	6,4	3,1	7,8	4,7	70

Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin etkisiyle salatalıklar ile tavan yüzeyi arasında üç farklı sıcaklık farkı oluşmaktadır. Sabit karakteristik uzunluk için sıcaklık farkının değişimi ile uyumlu olarak ısı transferi Ra sayısı da değişmektedir. Isı taşınım katsayısı ‘h’, ΔT ’ nin $\sim 1\text{ K}$, $\sim 3\text{ K}$, $\sim 5\text{ K}$ değerleri için sırasıyla $1,33\text{ W/m}^2\text{K}$, $1,70\text{ W/m}^2\text{K}$ ve $1,89\text{ W/m}^2\text{K}$ olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.

Koşul	$\Delta T (T_g - T_{tn})$ [K]	Ra	h [W/m ² K]
$T_{zy}=10^{\circ}\text{C} - T_{tnzy}=7^{\circ}\text{C}$	1	7,93E+04	1,33
$T_{zy}=10^{\circ}\text{C} - T_{tnzy}=5^{\circ}\text{C}$	3	1,95E+05	1,70
$T_{zy}=10^{\circ}\text{C} - T_{tnzy}=3^{\circ}\text{C}$	5	2,87E+05	1,89

Kütle transferi değerlendirmelerinde, hava tarafı kütle transfer katsayısı ‘ k_a ’ nın sıcaklık ve derişiklik farkı arttıkça arttığı ve koşullar arasında farklılık gösterdiği

görülmektedir, ancak gıda yüzey kütle geçiş katsayısı ' k_s ' nin de etkisiyle toplam kütle transfer katsayısı ' k_t ' değerleri birbirine yaklaşmıştır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.

Koşul	Ra_m	Sh	h_m [m/s]	k_a [g/m ² sMPa]	k_s [g/m ² sMPa]	k_t [g/m ² sMPa]
$T_{zy}=10^0C_T_{tvnyzy}=7^0C$	4,46E+06	16,02	0,0052	40,97	11,01	8,68
$T_{zy}=10^0C_T_{tvnyzy}=5^0C$	5,65E+06	17,25	0,0056	44,12	11,01	8,81
$T_{zy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	7,36E+06	18,74	0,0061	47,94	11,01	8,95

Deney düzeneği sebzeliğinde diğer yüzey sıcaklıklarının sabit tutularak, tavan yüzey sıcaklığının değiştirilmesi durumunda, derişiklik farkı ve su buharı kısmi basınçları arasındaki fark benzer mertebelerde kalmıştır. Bu nedenle, üç farklı tavan yüzey sıcaklığı durumunda, gıdadan havaya gerçekleşen terleme akısı ve toplam terleme miktarları da aynı mertebelerde kalmaktadır.

Çizelge 4.7 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa bağlı değişimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtvn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
$T_{zy}=10^0C_T_{tvnyzy}=7^0C$	2,49	4,46E+06	8,68	2,26	%2,79
$T_{zy}=10^0C_T_{tvnyzy}=5^0C$	3,12	5,65E+06	8,81	2,20	%2,46
$T_{zy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	3,92	7,36E+06	8,95	2,91	%2,80

Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değiştirilmesi ile kütle transferi açısından önemli etkiler görülmemektedir, deney düzeneği sebzeliği temel olarak cidarlarından soğutulduğundan, tavan yüzeyi dışında kalan diğer beş yüzeyin sıcaklıkları daha baskın olmaktadır.

Deneyisel verilerden elde edilen bu sonuçlar, Kocatürk tarafından gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmasında elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermektedir [9]. Sayısal analiz sonuçlarına göre de, sıcaklık farkının artışı ile birlikte derişiklik

farkının ve Ra_m sayısının arttığı; bununla birlikte k_t değerlerinin diğer değerlere göre daha düşük oranda değiştiği belirtilmiştir (Şekil 4.8).

$T_{dış,yzy.}$ [°C]	T_{tvn} [°C]	$(\Delta T)_{ort.}$ [K]	Δd_v [g/m ³]		$Ra_{ort.}$	$(Ra_m)_{ort.}$	$(k_t)_{ort.}$ [g/m ² s.Pa]	v [m/s]	
			Ort.	Maks.				Ort.	Maks.
7	6	1.54	1.107	5.504	6.079E+04	3.829E+06	1.13E-05	0.038	0.132
7	5	2.54	1.497	5.493	1.110E+05	4.252E+06	1.16E-05	0.044	0.133
7	3	4.57	2.245	5.470	2.124E+05	5.108E+06	1.20E-05	0.056	0.134
5	3	4.15	2.024	4.735	1.947E+05	4.951E+06	1.19E-05	0.054	0.129
5	2	5.16	2.367	4.726	2.455E+05	5.364E+06	1.21E-05	0.060	0.129
3	2	2.97	-	-	2.321E+05	5.307E+06	1.20E-05	-	-

Şekil 4.8 : Farklı yüzey sıcaklık kombinasyonları için; ısı-kütle geçişine ilişkin büyüklükler ve dikey doğrultudaki hız değerleri [9].

Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin k_t kütle transfer katsayısının ve gıda yüzeyi ile hava arasındaki su buharı kütleler derişiklik farkının değişiminine etkisinin minimum olması sebebiyle, deneysel çalışmalarda, sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının parametrik etkisi irdelenmiştir.

Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının parametrik etkisi:

Tavan yüzeyi sabit 3 °C tutularak, diğer yüzeylerin sıcaklıkları sırasıyla 10 °C ve 5 °C' ye getirildiğinde, ΔT sırasıyla, 4,7 K ve 2,2 K; T_g sırasıyla, 7,8 °C ve 5,1 °C olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.8: Koşullara bağlı sıcaklık ve bağıl nem değişimleri.

Koşul	T_h	T_{tvn}	T_g	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$	%Φ
	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	
$T_{yzy}=10^{\circ}\text{C}$ - $T_{tvnyzy}=3^{\circ}\text{C}$	6,4	3,1	7,8	4,7	70
$T_{yzy}=5^{\circ}\text{C}$ - $T_{tvnyzy}=3^{\circ}\text{C}$	4,5	2,9	5,1	2,2	73

Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi Çizelge 4.9' da verilmiştir. Isı transferi Ra sayısı ve h ısı taşınım katsayısının, sıcaklık farkı ile orantılı olarak değiştiği görülmektedir.

Çizelge 4.9: Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.

Koşul	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	Ra	h [W/m ² K]
$T_{yzy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	4,7	2,87E+05	1,89
$T_{yzy}=5^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	2,2	1,45E+05	1,55

DeneySEL çalışma koşulları kütle transferi açısından değerlendirildiğinde, gıda ve tavan arasındaki derişiklik farkı ile gıda ve hava arasındaki derişiklik farkı, ΔT ile birlikte azalmaktadır. Buna bağılı olarak kütle transferi Ra_m sayısı, kütle transfer katsayısı ve % terleme miktarı da azalmaktadır.

Deney düzeneğı sebzeliğinde diğER yüzey sıcaklıkları sabit tutularak, tavan yüzey sıcaklığının değıştirilmesi ile terleme miktarı koşullar arasında benzer kalırken, sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğER yüzeylerin sıcaklıkları değıştirildiğinde terleme miktarı farklılaşmaktadır.

Çizelge 4.10: Toplam kütle geğış katsayısının sıcaklığa bağılı değışimi.

Koşul	Ra_m	Sh	h_m [m/s]	k_a [g/m ² sMPa]	k_s [g/m ² sMPa]	k_t [g/m ² sMPa]
$T_{yzy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	7,36E+06	18,74	0,0061	47,94	11,01	8,95
$T_{yzy}=5^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	5,71E+06	17,31	0,0056	44,27	11,01	8,82

Çizelge 4.11: Doğal taşınım ile kütle geğışine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa bağılı değışimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtvn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
$T_{yzy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	3,92	7,36E+06	8,95	2,91	%2,80
$T_{yzy}=5^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	2,50	5,71E+06	8,82	2,02	%1,54

Deney düzeneği sebzeligi temel olarak cidarlarından soğutulduğundan, ağırlık kaybı açısından baskın etki diğer yüzey sıcaklıklarının farklılaştırılması durumu için görülmüş ve deneysel çalışmalarda sabit tavan yüzey sıcaklığı durumu ele alınmıştır.

4.3.2 Kapalı sebzelikte yüzeyler arası sıcaklık farkı

Sebzeliğe hava giriş-çıkışının olmadığı durum için, yüzeyler arası sıcaklık farkının parametrik etkisinin irdelendiği deneysel çalışmalarda, tavan yüzey sıcaklığının sabit 3 °C olduğu durum için, sebzelik diğer yüzey sıcaklıklarının sırasıyla, 10 °C, 5 °C, 3 °C olması durumları incelenmiştir.

Çizelge 4.12 : Koşullara bağlı sıcaklık ve bağıl nem değişimleri.

Koşul	T _h [°C]	T _{tvn} [°C]	T _g [°C]	ΔT (T _g -T _{tvn}) [K]	%Φ
T _{zy} =10°C_T _{tvnyzy} =3°C_kapalı	7,7	2,7	8,2	5,5	91
T _{zy} =5°C_T _{tvnyzy} =3°C_kapalı	5,7	3,0	5,4	2,4	92
T _{zy} =3°C_T _{tvnyzy} =3°C_kapalı	4,2	3	3,9	0,9	92

Çizelge 4.13 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.

Koşul	ΔT (T _g -T _{tvn}) [K]	Ra	h [W/m ² K]
T _{zy} =10°C_T _{tvnyzy} =3°C_kapalı	5,5	3,60E+05	1,98
T _{zy} =5°C_T _{tvnyzy} =3°C_kapalı	2,4	1,55E+05	1,57
T _{zy} =3°C_T _{tvnyzy} =3°C_kapalı	0,9	5,98E+04	1,22

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.15’ te görüldüğü gibi; en yüksek sıcaklık ve derişiklik farkları, tavan yüzeyi dışındaki diğer yüzey sıcaklıklarının 10 °C olması durumunda görülmektedir. Isı transferi Ra sayısı ve ‘h’ ısı taşınım katsayısı ΔT’ ye bağılı olarak

değişmektedir. Sebzelik hava giriş çıkışları kapalı olduğu için sebzelik içerisinde üç durum için de yaklaşık %90 bağıl nem elde edilmiştir. Bağıl nem değerleri koşullar arasında benzerlik gösterdiğinden, koşullar arasında derişiklik farkına yol açan temel sebep sıcaklık farkı olmuştur.

Çizelge 4.14 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağılı değişimi.

Koşul	Ra_m	Sh	h_m [m/s]	k_a [g/m ² sMPa]	k_s [g/m ² sMPa]	k_t [g/m ² sMPa]
$T_{zy}=10^0C_T_{vnyzy}=3^0C_kapalı$	4,83E+06	16,42	0,0053	42,02	11,01	8,72
$T_{zy}=5^0C_T_{vnyzy}=3^0C_kapalı$	2,34E+06	13,07	0,0042	33,44	11,01	8,28
$T_{zy}=3^0C_T_{vnyzy}=3^0C_kapalı$	2,03E+06	12,51	0,0041	32,01	11,01	8,19

Doğal taşınım ile kütle transferini tetikleyen, gıda-tavan arasındaki derişiklik farkı kullanılarak hesaplanan Ra_m ve toplam kütle transfer katsayısı ' k_t ' değerleri ile gıda-hava arasındaki derişiklik farkı değerleri paralellik göstermektedir. k_t ve gıda-hava arasındaki derişiklik farkının bileşik etkisi ile ortaya çıkan ve salatalıkların ağırlıkları ölçülerek saptanan %terleme miktarı da derişiklik farkı ve toplam kütle transfer katsayısı değerleri ile uyum göstermektedir. Çizelge 4.15'te verilen % M_{ter} , 5 günlük ağırlık kaybını ifade etmektedir.

Çizelge 4.15 : Doğal taşınımla kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa bağılı değişimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter} 5 günlük
$T_{zy}=10^0C_T_{vnyzy}=3^0C_kapalı$	2,51	4,83E+06	8,72	0,98	1,79%
$T_{zy}=5^0C_T_{vnyzy}=3^0C_kapalı$	1,02	2,34E+06	8,28	0,42	0,87%
$T_{zy}=3^0C_T_{vnyzy}=3^0C_kapalı$	0,84	2,03E+06	8,19	0,38	0,62%

Aynı tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının artması durumunda, Çizelge 4.15' te verilen deney sonuçları ile uyumlu olarak Kocatürk'ün sayısal analiz çalışmasında da [9], gıda ve hava sıcaklıkları arasındaki fark ile birlikte derişiklik farkı ve su buharı kısmi basınçları arasındaki fark artmaktadır. Bunun sonucunda;

aynı tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının artması ile birlikte, birim zamanda gıda kütesinden gerçekleşen terleme akısı ve toplam terleme miktarı belirgin bir şekilde artış göstermektedir.

$T_{diğ.yzy.}$ [°C]	T_{tvn} [°C]	$(\Delta T)_{ort.}$ [K]	Δd_v [g/m ³]		$Ra_{ort.}$	$(Ra_m)_{ort.}$	$(k_t)_{ort.}$ [g/m ² s.Pa]	v [m/s]	
			Ort.	Maks.				Ort.	Maks.
7	6	1.54	1.107	5.504	6.079E+04	3.829E+06	1.13E-05	0.038	0.132
7	5	2.54	1.497	5.493	1.110E+05	4.252E+06	1.16E-05	0.044	0.133
7	3	4.57	2.245	5.470	2.124E+05	5.108E+06	1.20E-05	0.056	0.134
5	3	4.15	2.024	4.735	1.947E+05	4.951E+06	1.19E-05	0.054	0.129
5	2	5.16	2.367	4.726	2.455E+05	5.364E+06	1.21E-05	0.060	0.129
3	2	2.97	-	-	2.321E+05	5.307E+06	1.20E-05	-	-

Şekil 4.9 : Farklı yüzey sıcaklık kombinasyonları için; ısı-kütle geçişine ilişkin büyüklükler ve dikey doğrultudaki hız değerleri [9].

Yüzeyler arası sıcaklık farkı, sebze saklamada iki önemli unsur olan terleme ve yoğunlaşma dinamikleri açısından incelenmiştir. Gıda-hava ve gıda-tavan arasındaki derişiklik farkı terleme ile kütle transferine, hava-tavan arasındaki derişiklik farkı ise yoğunlaşma oluşumuna etki etmektedir. Deneysel çalışmalarda yoğunlaşma, kontrollü bir şekilde sebzelik tavan yüzeyinde toplanmaktadır. Bu amaçla, tavan yüzeyi diğer yüzeylerden ayrı olarak koşullandırılmakta ve en soğuk yüzey olarak şartlandırılmaktadır. Sebzeliklerde yoğunlaşmaya neden olan temel unsur hava ile doyma koşullarındaki tavan yüzeyi arasındaki su buharı derişiklik farkıdır. Çizelge 4.16’ da hava ve tavan yüzeyine ait özgül nem ve derişiklik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.16 : Yoğunlaşma değerlendirmesi.

Koşul	ω_h [kg/kg]	$(d_v)_h$ [g/m ³]	ω_{tvn}	$(d_v)_{tvn}$	Δd_v $(d_{vh}-d_{vtvn})$ [g/m ³]
			[kg/kg] doyma koşulları	[g/m ³] doyma koşulları	
$T_{yzy}=10^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	0,0059	7,29	0,0045	5,76	1,53
$T_{yzy}=5^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	0,0052	6,47	0,0046	5,88	0,59
$T_{yzy}=3^0C_T_{tvnyzy}=3^0C$	0,0047	5,86	0,0046	5,88	-0,02

Hava ve doyma koşullarındaki tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkının en yüksek değeri, diğer yüzey sıcaklıklarının 10 °C olduğu durumda görölmektedir. Bu sıcaklık değeriinde, tüm tavan yüzeyini kaplayan, büyük damlacıklar şeklinde yoğuşma oluşmuştur. Diğer yüzey sıcaklıklarının 5 °C olduğu durum için hesaplanan derişiklik farkı değeri, 10 °C koşuluna göre daha düşüktür. 5 °C koşulunda, tavan yüzeyinde oluşan yoğuşma miktarı da daha az olmuştur. Ayrıca yoğuşma, daha küçük damlacıklar şeklinde meydana gelmiş ve tüm tavan yüzeyine yayılmıştır. Diğer yüzey sıcaklıklarının 3 °C olduğu durumda ise, derişiklik farkı değeri sıfıra çok yakın çıkmıştır. Bu koşulda, tavan yüzeyinin yanı sıra diğer yüzeylerde de yoğuşma görölmüştür. Sonuç olarak, 3 °C koşulundaki yoğuşma miktarı, 10 °C ve 5 °C koşulunda oluşan yoğuşma miktarlarından daha az olmuştur. Koşullara göre, tavan yüzeyinin 5 gün sonundaki yoğuşma durumu Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10: Tavan yüzeyindeki yoğuşmanın ΔT ’ ye bağlı değişimi (a) $\Delta T=5,5K$, (b) $\Delta T=2,4K$, (c) $\Delta T=0,9K$.

4.3.3 Hava Giriş Hızının Parametrik Etkisi

Giriş hava hızının iki farklı değerinin ele alındığı ve koşulların yoğuşma ve terleme miktarı açısından değerlendirildiği salatalık yüklü deneysel çalışmalar, sabit saklama sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, sebzeli tavan yüzey sıcaklığının 3 °C, diğer yüzey sıcaklıklarının 5 °C olduğu koşul için gerçekleştirilmiştir. Koşullara bağlı olarak değişen sıcaklık ve bağıl nem değerleri Çizelge 4.17’ de verilmiştir. Deney koşullarının ısı transferi açısından değerlendirilmesi amacıyla hesaplanan ısı taşınım katsayısı ve ısı transferi Ra sayısı

Çizelge 4.18’ de verilmiştir. Deneyler saklama sıcaklığı açısından aynı koşula sahip olduğundan, deney süresi boyunca gıda yükü ile tavan yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı aynı kalmıştır. Dolayısıyla, sıcaklık farkı kullanılarak hesaplanan ısı transferi

Ra sayısı ile ısı taşınım katsayısı değerlerinde, iki hava hızı için de benzer değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.17 : Koşullara bağlı sıcaklık ve bağıl nem değişimleri.

Koşul	T_h [°C]	T_{tvn} [°C]	T_g [°C]	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	%Φ
0,04	5,3	3,0	5,3	2,3	63
0,02	4,6	2,9	5,2	2,3	67

Çizelge 4.18 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının giriş hava hızına bağlı değişimi.

Koşul	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	Ra	h [W/m ² K]
0,04	2,3	1,52E+05	1,57
0,02	2,3	1,52E+05	1,57

Giriş hava hızına bağlı olarak, temel olarak sebzelik sıcaklıkları değil, sebzelik ortam bağıl nemi değişmektedir. Dolayısıyla, iki koşul için ortam bağıl nem değerinin farklılığından, gıda-tavan yüzeyi ile gıda-hava arasında derişiklik farkı meydana gelmektedir. Isı taşınım katsayısı iki koşul için de sabit kalırken, kütle transfer katsayısı ve %terleme miktarı derişiklik farkına bağlı olarak değişmektedir.

Hava hızının 0,04 m/s olduğu durumda, hem gıda ile tavan arasındaki derişiklik farkı, hem de gıda ile hava arasındaki derişiklik farkı, 0,02 m/s durumuna göre daha yüksek elde edilmiştir. Dolayısıyla 0,04 m/s koşulunda ağırlık kaybı daha yüksek olmuştur.

Çizelge 4.19 : Toplam kütle geçiş katsayısının giriş hava hızına bağlı değişimi.

Koşul	Ra_m	Sh	h_m [m/s]	k_a [g/m ² sMPa]	k_s [g/m ² sMPa]	k_t [g/m ² sMPa]
0,04	7,07E+06	18,51	0,0060	47,34	11,01	8,93
0,02	6,56E+06	18,07	0,0059	46,23	11,01	8,89

Çizelge 4.20 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının giriş hava hızına bağlı değişimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtvn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
0,04	3,15	7,07E+06	8,93	2,53	%2,30
0,02	2,89	6,56E+06	8,89	2,42	%1,97

İki farklı hava hızının irdelendiği deneysel çalışmalarda, koşullar yoğuşma açısından da değerlendirilmiştir. Yoğuşmanın oluşmasındaki temel etmen havanın su buharına doygunluk derecesidir. Nemli havanın su buharı içeriği, yoğuşmanın gerçekleşeceği yüzeyin doyma koşullarından yüksekse yoğuşma meydana gelecektir. Yoğuşma değerlendirmesi amacıyla hesaplanan özgül nem ve derişiklik değerleri Çizelge 4.21’ de verilmiştir. Hava ile doyma koşullarındaki tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkının negatif çıkması, tavan yüzeyinde yoğuşma olmadığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.21 : Giriş hava hızının yoğuşma açısından değerlendirilmesi.

Koşul	ω_h [kg/kg]	(d_v) _h [g/m ³]	ω_{tvn} [kg/kg] doyma koşulları	(d_v) _{tvn} [g/m ³] doyma koşulları	Δd_v ($d_{vh}-d_{vtvn}$) [g/m ³]
0,04	0,0034	4,31	0,0047	5,88	-1,56
0,02	0,0035	4,38	0,0046	5,84	-1,46

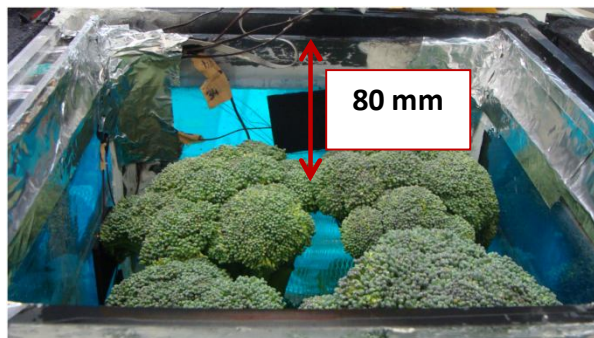
4.4 Brokoli Yüklü Deneysel Çalışmalar

Brokoli, düşük sıcaklıkta saklanması gereken sebzeler grubuna örnek bir sebzedir. Brokoli için farklı kaynaklarda öngörülen ideal saklama koşulları ve ideal saklama koşullarındaki raf ömrü süresi; 0 °C saklama sıcaklığı, %95-100 bağıl nem değerinde 10-14 gün ve 21-28 gün olarak belirtilmiştir [23,26].

Deney düzeneğinde gerçekleştirilen brokoli yüklü deneysel çalışmalarda, deney düzeneği sebzeliğine 300-400 g ağırlığında dört adet numune yerleştirilmiştir. Dört brokolinin sebzeliğe yerleştirildiği durumda, gıda yüzeyi ile tavan yüzeyi arasındaki mesafe olan doğal taşınım karakteristik uzunluğu, brokoli pürüzlü yüzeyi göz önünde bulundurulduğunda ~80 mm olmaktadır.



Şekil 4.11 : Deney düzeneği sebzeliğinde brokoli yerleşimi.



Şekil 4.12 : Brokoli yüzeyi ile tavan yüzeyi arasında kalan mesafe.

Doğal taşınımında, hava hareketlerinin oluşmasını sağlayan etken olan yüzeyler arası sıcaklık farkının kontrollü bir şekilde sağlandığı deneysel çalışmalarda, kavitenin en soğuk yüzeyi olarak seçilen tavan yüzeyi sabit 3 °C sıcaklıkta iken, kavitenin diğer yüzeylerinin üç farklı sıcaklıkta olması durumları incelenmiştir. Yüzeyler arası

sıcaklık farkının ısı-kütle transferi açısından etkisi, kavitenin kapalı olduğu durum için ortaya konmuştur. Ayrıca, sebzeliğe çok düşük hızlarda hava gönderilerek doğal taşınımın baskın olduğu durum için giriş hava hızının, ısı-kütle transferi açısından irdelendiği deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Brokoli yüklü duruma ait deney koşulları Çizelge 4.22’ de verilmiştir.

Çizelge 4.22: Brokoli yüklü duruma ait deney koşulları.

T_{tvnyzy} [°C]	$T_{\text{diğ.yzyler}}$ [°C]	Kavite (Hava giriş-çıkışı)
3	10	Kapalı
3	5	Kapalı
3	3	Kapalı
3	5	Kısmi Açık
3	5	Kısmi Açık

Deney düzeneği sebzeliğinde brokoli yüklü durum için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, yüzeyler arası sıcaklık farkı ve giriş hava hızının parametrik etkisi ısı-kütle transferi açısından irdelenmiştir.

4.4.1 Yüzeyler arası sıcaklık farkının parametrik etkisi

Tez çalışmaları kapsamında kurulan deney düzeneğinde, sebzelik taban ve yan yüzeyleri aynı su banyosu ile şarlandırılmakta; sebzelik tavan yüzeyi ayrı bir su banyosu ile şartlandırılmaktadır. Kontrollü bir şekilde sıcaklık farkının sağlandığı sebzelik hacmi içerisine yerleştirilen brokoli sıcaklıkları, sebzelik hava sıcaklığı ve tavan yüzey sıcaklığı T-tipi ısı çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Ayrıca, nem sensörü ile sebzelik içi bağıl nem değeri ölçülmüştür. Ölçüm değerleri Çizelge 4.23’te verilmiştir.

Sebzelik tavan yüzeyinin sabit 3 °C’ de tutulduğu durum için, sebzelik taban ve yan yüzeyleri sırasıyla 10 °C, 5 °C ve 3 °C’ ye getirilmiştir. Üç farklı sıcaklık durumu için sebzelik içi bağıl nem değeri %90 mertebelerinde olmuştur.

Çizelge 4.23 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Koşul	T_h [°C]	T_{tvn} [°C]	T_g [°C]	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	% Φ
$T_{zy}=10\text{ }^0\text{C}_-T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	9,5	3,0	7,3	4,3	93
$T_{zy}=5\text{ }^0\text{C}_-T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	5,2	3,0	4,8	1,8	89
$T_{zy}=3\text{ }^0\text{C}_-T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	3,7	3,0	3,8	0,8	91

Isı geçişi değerlendirmesinde, sıcaklık farkının en yüksek olduğu koşulda diğer koşullara kıyasla, ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısı en yüksek olmuştur. Isı taşınım katsayısı $\Delta T'$ nin ~4 K, ~2 K, 1 K olması durumları için sırasıyla 1,85 W/m²K, 1,46 W/m²K ve 1,17 W/m²K olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.24 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.

Koşul	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	Ra	h [W/m ² K]
$T_{zy}=10\text{ }^0\text{C}_-T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	4	2,630E+05	1,85
$T_{zy}=5\text{ }^0\text{C}_-T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	2	1,111E+05	1,46
$T_{zy}=3\text{ }^0\text{C}_-T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	1	4,956E+04	1,17

Kütle geçişi değerlendirmesinde, gıda ile tavan yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının en yüksek olduğu koşulda, bağıl nem değeri koşullar arasında farklılık göstermediğinden, derişiklik değeri de en yüksek olmaktadır. Sh korelasyonları kullanılarak hesaplanan h_m ve h_m değerinden birim dönüşümü ile hesaplanan k_a değerleri sıcaklık farkı değişimi ile paralellik göstermektedir. Hava tarafı ve gıda tarafının göz önünde bulundurularak k_t 'nin hesaplanmasında; gıda tarafı için yüzey kütle geçiş katsayısı deneylerinde brokoli için tespit edilen ortalama değer olan 6,93 g/m²MPa değeri kullanılmıştır. k_t değerleri de temel olarak, sıcaklık farkından kaynaklanan derişiklik farkı ile paralellik göstererek değişmektedir (Çizelge 4.25-Çizelge 4.26).

Çizelge 4.25 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.

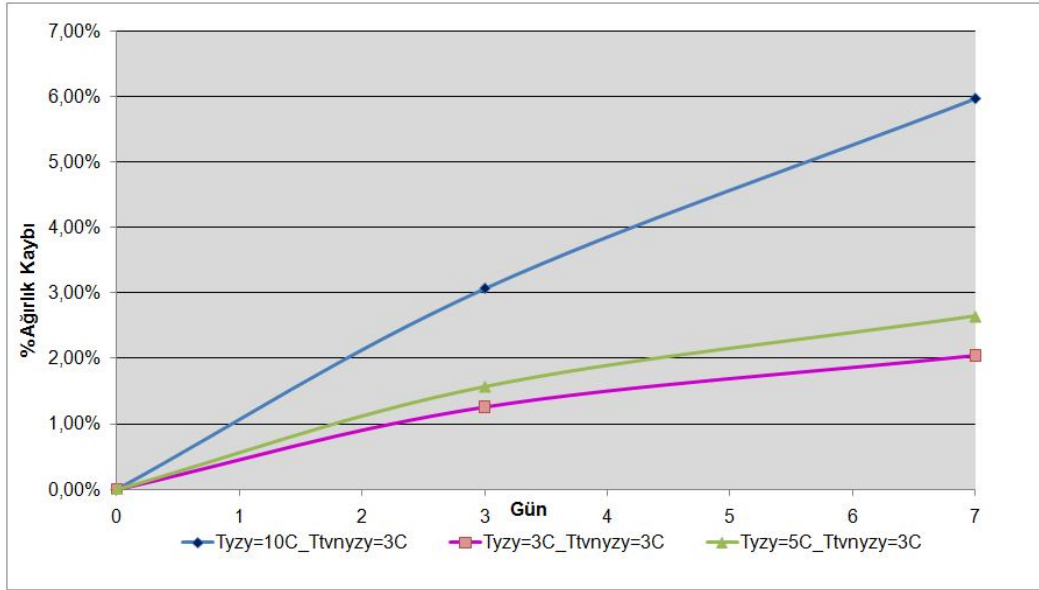
Koşul	Ra_m	Sh	h_m [m/s]	k_a [g/m ² sMPa]	k_s [g/m ² sMPa]	k_t [g/m ² sMPa]
$T_{zy}=10\text{ }^0C_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0C$	3,98E+06	15,45	0,0050	39,51	6,93	5,90
$T_{zy}=5\text{ }^0C_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0C$	2,88E+06	13,95	0,0045	35,70	6,93	5,80
$T_{zy}=3\text{ }^0C_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0C$	2,24E+06	12,90	0,0042	33,00	6,93	5,73

Gıdadan terleme yoluyla meydana gelen ağırlık kaybı, k_t ve gıda-hava arasındaki derişiklik farkı ve etkin kütle transfer yüzey alanının etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Deney başlangıcında ve sonunda brokolilerden alınan ağırlık ölçümleri sonunda ağırlık kaybı deney boyunca meydana gelen ağırlık kaybı elde edilmiş ve toplam ağırlık kaybının ilk ağırlığa oranlanması ile % M_{ter} elde edilmiştir. Ölçümsel olarak elde edilen % M_{ter} , mevcut deney koşulunda yedi gün saklama sonucunda elde edilen yüzde ağırlık kaybını temsil etmektedir.

Çizelge 4.26 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısı ve derişiklik farkının sıcaklığa göre değişimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
$T_{zy}=10\text{ }^0C_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0C$	2,33	3,976E+06	5,90	-0,55	%5,97
$T_{zy}=5\text{ }^0C_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0C$	1,29	2,877E+06	5,80	0,44	%2,64
$T_{zy}=3\text{ }^0C_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0C$	0,97	2,241E+06	5,73	0,72	%2,05

% M_{ter} , k_t ve $\Delta d_v(d_{vg}-d_{vh})$ 'nin koşullara göre değişimi göz önünde bulundurulduğunda, k_t 'nin derişiklik farkına göre ağırlık kaybında daha baskın etki gösterdiği görülmektedir. Sıcaklık farkı ve derişiklik farkı azaldıkça k_t ve % M_{ter} azalmaktadır.



Şekil 4.13 : Ağırlık kaybının koşullara göre değişimi.

Deney düzeneği gıda saklama haznesinde, gıdalardan soluma ve terleme yoluyla açığa çıkan su buharının, gıda saklama haznesinin en soğuk yüzey olan tavan yüzeyinde toplanması amaçlanmıştır. Saklama koşulunda mevcut hava sıcaklığı ve bağıl nem değerinde havada bulunan fazla su buharı miktarı, tavan yüzeyinde yoğunlaşacaktır. Yoğuşma, havadaki derişiklik değeri ile doyma koşullarındaki tavan yüzeyindeki derişiklik değeri arasındaki fark nispetinde oluşacaktır.

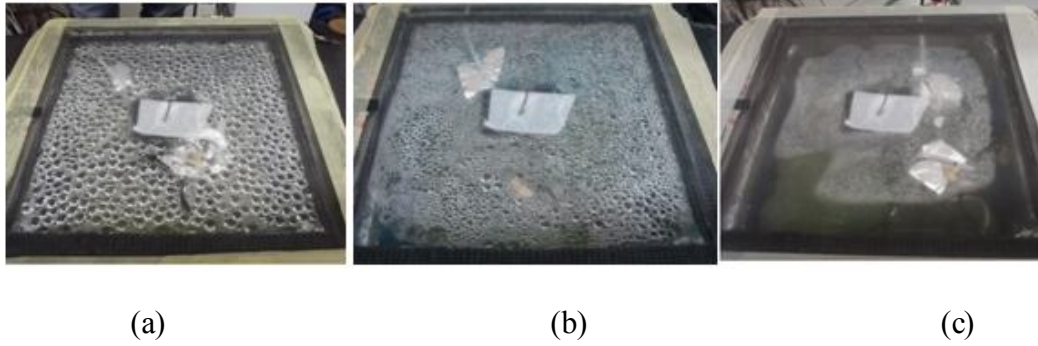
Brokoli deneysel çalışmalarının gerçekleştirildiği üç farklı koşuldan, sabit 3 °C tavan yüzey sıcaklığı için sıcaklık farkının en yüksek olduğu diğer kavite yüzeylerinin 10 °C olduğu durumda, hava ve doyma koşullarındaki tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkı da en yüksek olmuştur. Çizelge 4.27’ de doyma koşullarındaki özgül nem ve derişiklik değerleri ile derişiklik farkı bulunmaktadır. 3 °C saklama koşulunda derişiklik farkı değeri negatif çıkmıştır. Bu durum, havanın yoğuşma oluşturacak düzeyde yeterli doygunluğa ulaşmadığını göstermektedir.

Deneysel olarak gözlemlenen, koşullar özelindeki tavan yoğuşmaları Şekil 4.14’ de verilmiştir. 10 °C koşullarında yoğuşmanın, yapısal olarak büyük damlacıklar şeklinde meydana geldiği ve tüm tavan yüzeyini kapladığı görülmüştür. 5 °C koşullarında yoğuşma, miktar olarak daha az, yapısal olarak daha küçük damlacıklar şeklinde ve gene tüm tavan yüzeyi boyunca yayılmış olarak görülmüştür. 3 °C koşullarında yoğuşma, yok denecek kadar az meydana gelmiştir. Tavan yüzeyinin sadece orta kısmında oluşmuştur ve yapısal olarak damlacık şeklinde değil film

tabakası olduğu görülmüştür. Bu koşulda tüm yüzeyler eş sıcaklıkta olduğundan, diğer yüzeylerde de benzer oluşumda miktar olarak çok az yoğunlaşma görülmüştür.

Çizelge 4.27 : Yoğuşma değerlendirilmesi.

Koşul	ω_h [kg/kg]	$(d_v)_h$ [g/m ³]	ω_{tvn} [kg/kg] doyma koşulları	$(d_v)_{tvn}$ [g/m ³] doyma koşulları	Δd_v $(d_{vh}-d_{vtn})$ [g/m ³]
$T_{zy}=10\text{ }^0\text{C}_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	0,0068	8,3529	0,0046	5,8774	2,4756
$T_{zy}=5\text{ }^0\text{C}_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	0,0049	6,1858	0,0046	5,8774	0,3085
$T_{zy}=3\text{ }^0\text{C}_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$	0,0043	5,4802	0,0046	5,8774	-0,3971



Şekil 4.14 : Yoğuşma yapısının sıcaklık koşullarına göre değişimi (a) $T_{zy}=10\text{ }^0\text{C}_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$, (b) $T_{zy}=5\text{ }^0\text{C}_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$, (c) $T_{zy}=3\text{ }^0\text{C}_T_{tvnyzy}=3\text{ }^0\text{C}$.

4.4.2 Hava giriş hızının parametrik etkisi

Doğal taşınım koşullarının baskın olması koşulu ile kaviteye hava gönderilmesi durumunun ısı ve kütle transferi açısından irdelenmesi amacıyla iki farklı hava hızı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Hava hızının parametrik etkisinin incelendiği deneysel çalışmalarda, deneyler kavitenin tavan yüzeyinin 3 ⁰C, diğer yüzeylerinin 5 ⁰C olması durumu için yapılmıştır. Giriş hızının 0,04 m/s ve 0,02 m/s olduğu koşullar için deneysel olarak elde edilen hava, tavan ve gıda sıcaklık değerleri ile kavite içi bağıl nem değeri Çizelge 4.28’ de verilmiştir. Koşullar karşılaştırıldığında temel farkın kavite içi bağıl nem değeri olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.28 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Koşul	T_h [°C]	T_{tvn} [°C]	T_g [°C]	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	% Φ
0,04 m/s	6,1	2,9	5,6	2,7	71
0,02 m/s	5,5	3,0	5,4	2,4	88

Kavite temel olarak yüzeylerinden koşullandırıldığı için, sabit sıcaklıkta giriş hava hızının farklılaştırıldığı durumlar için, gıda-tavan arasındaki sıcaklık farkı, ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısı benzer değerlerde elde edilmiştir (Çizelge 4.29).

Çizelge 4.29 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi.

Koşul	$\Delta T (T_g - T_{tvn})$ [K]	Ra	h [W/m ² K]
0,04 m/s	2,7	1,662E+05	1,63
0,02 m/s	2,4	1,478E+05	1,58

Gıda-tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkı kullanılarak hesaplanan kütle transferi Ra_m sayısı , 0,04 m/s koşulunda 0,02 m/s koşuluna kıyasla, derişiklik farkı yüksek olduğundan daha yüksektir. Benzer şekilde k_a değeri de 0,04 m/s koşulunda daha yüksektir, brokoli için tespit edilen k_s değerinin de etkisiyle, koşullar için hesaplanan k_t değeri birbirine yaklaşmaktadır. Gıda-hava arasındaki derişiklik farkı 0,04 m/s koşulunda daha yüksek olmuştur.

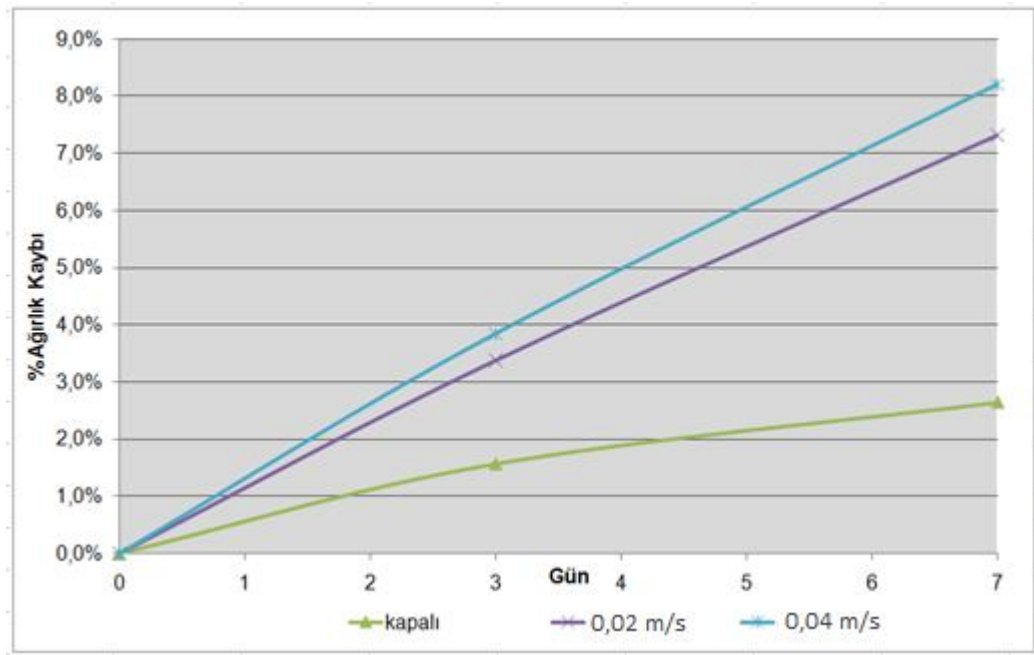
Çizelge 4.30 : Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağılı değişimi.

Koşul	Ra_m	Sh	h_m [m/s]	k_a [g/m ² sMPa]	k_s [g/m ² sMPa]	k_t [g/m ² sMPa]
0,04 m/s	7,51E+06	18,86	0,0061	48,25	6,93	6,06
0,02 m/s	3,78E+06	15,21	0,0049	38,90	6,93	5,88

Deney başlangıcı ve sonunda brokoli ağırlık ölçümleri alınarak tespit edilen yedi günlük ağırlık kaybı ve ağırlık kaybının ilk ağırlığa oranı ile tespit edilen $\%M_{ter}$, k_t ve Δd_v ile benzer olarak değişmektedir (Çizelge 4.30- Çizelge 4.31).

Çizelge 4.31 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının giriş hava hızına göre değişimi.

Koşul	$\Delta d_v (d_{vg}-d_{vtvn})$ [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	$\Delta d_v (d_{vg}-d_{vh})$ [g/m ³]	$\%M_{ter}$
0,04 m/s	2,84	7,512E+06	6,06	1,86	8,20%
0,02 m/s	1,72	3,784E+06	5,88	0,79	7,31%



Şekil 4.15: Ağırlık kaybının koşullara bağlı değişimi.

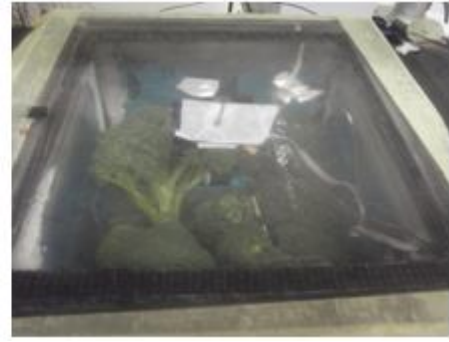
Tavan yüzeyinde meydana gelebilecek olası yoğuşmanın değerlendirilmesi amacıyla, deneysel ölçümlerden yola çıkılarak yapılan hesaplamalarda, hava ile doyma koşullarındaki tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkı birbirine çok yakın çıkmış ve tavan yüzeyinde yoğuşma görülmemiştir. Tavan yüzeyini süpürecek şekilde gönderilen hava hızı mertebeleri yoğuşma oluşumunu engellemiş ve hava ile tavan yüzeyine ait derişikliği birbirine yaklaştırmıştır.

Çizelge 4.32 : Yoğuşma değerlendirmesi.

Koşul	ω_h	$(d_v)_h$	ω_{tvn}	$(d_v)_{tvn}$	Δd_v
	[kg/kg]	[g/m ³]	[kg/kg] doyma koşulları	[g/m ³] doyma koşulları	($d_{vh}-d_{vtvn}$) [g/m ³]
0,04 m/s	0,0041	5,1222	0,0046	5,8355	-0,71
0,02 m/s	0,0049	6,1045	0,0046	5,8774	0,23



(a)



(b)

Şekil 4.16: Tavan yüzeyindeki yoğuşma durumu (a) 0,02 m/s, (b) 0,04m/s.

4.5 Marul Yüklü Deneysel Çalışmalar

Marul, nem kaybına duyarlı sebzeler grubuna örnek bir sebzedir. İdeal saklama koşulları 0 °C saklama sıcaklığı, %95 ve daha fazla bağıl nem olarak belirtilmiştir [23,26]. İdeal saklama koşulları altında saklanan marulların raf ömrü 2-3 hafta olarak belirtilmiştir.

Marul yüklü olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, saklama sıcaklığı, giriş hava hızı, yerleşim/miktar gibi fiziksel etkiler doğal taşınım ile ısı-kütle transferi açısından değerlendirilmiştir.

Saklama sıcaklığı ve giriş hava hızının parametrik etkisinin irdelendiği deneysel çalışmalar, standart olması amacıyla dört adet marulun dikey yerleşimi için gerçekleştirilmiştir. Dikey yerleşimde, gıda yüzeyi ile tavan yüzeyi arasındaki mesafe olan doğal taşınım karakteristik uzunluğu değişken olmaktadır.

Hesaplamalarda, dikey yerleşim durumunda karakteristik uzunluk, kavite yüksekliğinin yarısı olarak, 115 mm alınmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : Marul yüzeyi ile tavan yüzeyi arasında kalan mesafe.

Yerleşim ve miktarın etkisinin irdelendiği deneysel çalışmalar; sabit hava hızı ve saklama sıcaklığında; dikey dört adet, yatay dört adet, yatay altı adet, yatay üç adet ve yatay iki adet yerleşim durumları için gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışma grubunda, marul yüzeyi ile tavan yüzeyi arasındaki mesafe olan doğal taşınım karakteristik uzunluğu yerleşim ve miktara göre değişim göstermektedir. Detayları, ‘yerleşim ve miktarın parametrik etkisi’ bölümünde paylaşılmıştır.

Marul yüklü olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, yüzeyler arası sıcaklık farkı, giriş hava hızı, yerleşim/miktar gibi fiziksel etkiler doğal taşınım ile ısı-kütle transferi açısından değerlendirilmiştir.

4.5.1 Yüzeyler arası sıcaklık farkının parametrik etkisi

Yüzeyler arası sıcaklık farkının irdelendiği deneysel çalışmalar, sebzeliğe kısmi hava giriş çıkışının olduğu ve dört adet marulun dikey yerleşim durumu için gerçekleştirilmiştir. Deney koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri Çizelge 4.3’ te verilmiştir.

Çizelge 4.33 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Koşul	T_h [°C]	T_{tvn} [°C]	T_g [°C]	ΔT ($T_g - T_{tvn}$) [K]	% Φ
Tyzy=10°C	9,1	3,8	8,2	4,4	63
Tyzy=5°C	6,1	4,0	5,9	1,9	73

Yüzeyler arası sıcaklık farkının etkisi ısı transferi açısından değerlendirildiğinde, ısı taşınım katsayısının ve ısı transferi Ra sayısının sıcaklık farkı ile doğru orantılı değiştiği görülmektedir. 5 °C saklama koşullarında yüzeyler arası sıcaklık farkı, 10 °C saklama koşullarına göre daha azdır, yüzey sıcaklıkları birbirine daha yakındır. Sıcaklık farkının artması ile birlikte yüzeyler arası derişiklik farkı da artmaktadır.

Çizelge 4.34 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının yüzeyler arası sıcaklık farkına göre değişimi

Koşul	ΔT ($T_g - T_{t\text{vn}}$) [K]	Ra	h [W/m ² K]
Tyzy=10°C	4,4	7,970E+05	1,74
Tyzy=5°C	1,9	3,470E+05	1,36

Gıda-tavan ile gıda-hava arasındaki derişiklik farkının artması gıdanın daha fazla nem kaybetmesine neden olmaktadır.

Çizelge 4.35 ve 4.36’da görüldüğü gibi % ağırlık kaybı, derişiklik farkı ve kütle transfer katsayısı değerlerindeki eğilim birbirini destekleyici niteliktedir. Daha düşük sıcaklık farkının oluşması sonucunda derişiklik farkı, kütle transfer katsayısı ve ağırlık kaybı da azalmaktadır.

Çizelge 4.35: Toplam kütle geçiş katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.

Koşul	Ra _m	Sh	h _m [m/s]	k _a [g/m ² sMPa]	k _s [g/m ² sMPa]	k _t [g/m ² sMPa]
Tyzy=10°C	2,18E+07	26,35	0,0060	46,89	6,66	5,83
Tyzy=5°C	1,45E+07	23,19	0,0052	41,27	6,66	5,73

Çizelge 4.36: Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının sıcaklık farkına göre değışimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtvn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
Tyzy=10 ⁰ C	4,36	2,18E+07	5,83	2,75	%12
Tyzy=5 ⁰ C	2,54	1,45E+07	5,73	1,86	%6

4.5.2 Hava giriş hızının parametrik etkisi

Hava giriş hızının irdelendiğı deneysel çalışmalarda, hava giriş hızının 0,02-0,04-0,07 m/s olması durumları irdelenmiştir. Deneysel çalışmalar, sebzelik hava sıcaklığının 10 °C olduğu ve dört adet marulun dikey yerleştirildiğı durum için gerçekleştirilmiştir. Farklı hava hızlarının uygulandığı deneysel çalışmalarda elde edilen sıcaklık ve bağıl nem değeri Çizelge 4.37’ de verilmiştir.

Çizelge 4.37: Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değeri.

Koşul	T_h [°C]	T_{tvn} [°C]	T_g [°C]	ΔT (T_g-T_{tvn}) [K]	% Φ
$U_g=0,02$ m/s	10,2	7,4	9,9	2,5	51
$U_g=0,04$ m/s	9,1	3,8	8,2	4,4	63
$U_g=0,07$ m/s	8,6	5,9	8,8	2,9	71

Giriş kesitindeki 3 farklı hava hızı koşulu için, hava ve gıda sıcaklıkları, su buharı kütleler derişiklikleri ve marul terleme miktarları Çizelge 4.39 ve Çizelge 4.40’ da verilmektedir. Giriş kesitindeki hava hızının artması ile birlikte Çizelge 4.40’ da görüldüğü gibi, gıda ve hava derişiklikleri ile gıda ve tavan derişiklikleri arasındaki fark azalmaktadır. Görece yüksek giriş hava hızı koşulundaki daha yüksek hava kütleler derişiklik değeri neticesinde, Çizelge 4.40’da görüldüğü gibi, doğal taşınım ile kütle transferi için söz konusu olan alt ve üst sınır arasındaki derişiklik

farkı açılmaktadır. Böylece, kütle transferi için söz konusu olan Ra sayıları da artan giriş hava hızı ile birlikte artış göstermektedir.

Çizelge 4.38: Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının giriş hava hızına göre değişimi.

Koşul	ΔT ($T_g - T_{t\infty}$) [K]	Ra	h [W/m ² K]
$U_g=0,02$ m/s	2,5	4,50E+05	1,49
$U_g=0,04$ m/s	4,4	7,97E+05	1,74
$U_g=0,07$ m/s	2,9	5,15E+05	1,54

Ra_m ile benzer bir davranış gösteren “k_t” toplam kütle geçiş katsayısının nihai değerinde gıdaya bağlı yüzey kütle transfer katsayısı daha baskın bir etkiye sahip olduğundan, kütleli derişiklik farkının artışı ile “k_t” Ra_m’ ye göre daha küçük oranda bir artış göstermiştir. Eş yüzey koşulları için giriş kesitindeki hava hızının artışıyla birlikte; toplam kütle geçiş katsayısı ve gıda ile hava arasındaki derişiklik farkının azalması neticesinde, Çizelge 4.39 ve Çizelge 4.40’da görüldüğü gibi, gıdadan gerçekleşen terleme akısı ve toplam terleme miktarı azalmıştır. Deneysel çalışmalarda irdelenen parametrik etkiler, doğal taşınım koşullarının söz konusu olduğu, 0,1 m/s’ den daha düşük hız mertebeleri için geçerlidir.

Çizelge 4.39 : Toplam kütle geçiş katsayısının giriş hava hızına bağlı değişimi.

Koşul	Ra _m	Sh	h _m [m/s]	k _a [g/m ² sMPa]	k _s [g/m ² sMPa]	k _t [g/m ² sMPa]
$U_g=0,02$ m/s	2,29E+07	26,78	0,006	47,66	6,66	5,84
$U_g=0,04$ m/s	2,18E+07	26,35	0,006	46,89	6,66	5,83
$U_g=0,07$ m/s	1,69E+07	24,32	0,005	43,28	6,66	5,77

Çizelge 4.40 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının giriş hava hızına göre değışimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
$U_g=0,02$ m/s	5,21	2,29E+07	5,84	4,42	13%
$U_g=0,04$ m/s	4,36	2,18E+07	5,83	2,75	12%
$U_g=0,07$ m/s	3,54	1,69E+07	5,77	2,57	11%

4.5.3 Yerleşim ve miktarın parametrik etkisi

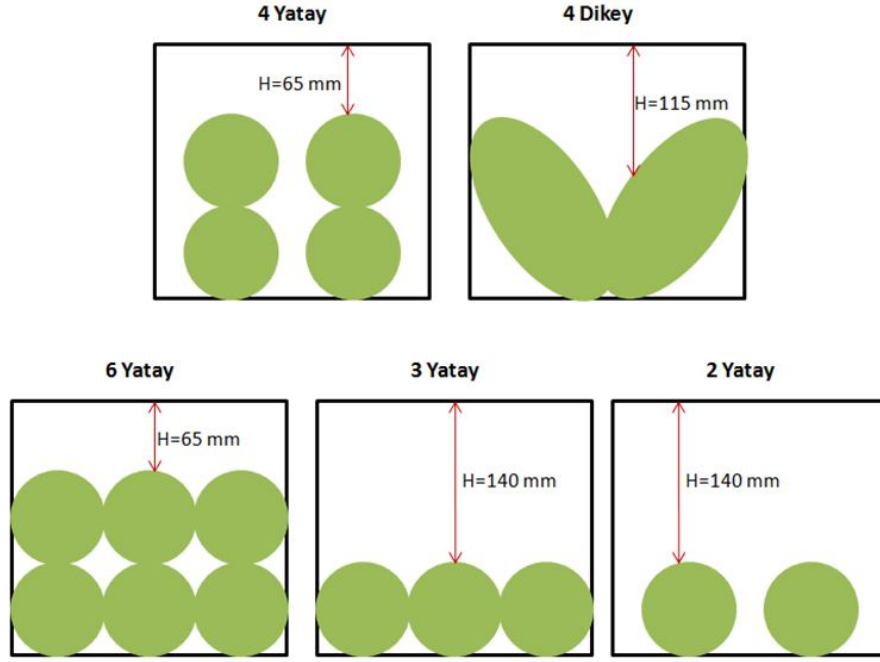
Doğal taşınım Ra boyutsuz sayısı yüzeyler arası sıcaklık farkı ve sıcaklık farkı bulunan iki yüzey arasındaki mesafenin üçüncü kuvveti ile doğru orantılıdır. Benzer şekilde kütle transferi Ra_m sayısı da derişiklik farkı ve yüzeyler arası mesafenin üçüncü kuvveti ile doğru orantılıdır.

$$Ra \propto \Delta T, H^3 \quad (4.26)$$

$$Ra_m \propto \Delta d_v, H^3$$

Sebzelik içerisine yerleştirilen marulların konum farklılığı ve miktarı ısı-kütle transferi karakteristik uzunluğunu değıştirmektedir. Karakteristik uzunluğun değışiminin ısı-kütle transferi açısından değeriendirilmesi amacıyla, marulların sebzelikte yatay ve dikey yerleşimleri ele alınmıştır. Ek olarak, yatay yerleşim durumu için farklı miktarların da etkisi ele alınmıştır. Söz konusu deneysel çalışmalar, giriş hava hızının 0,04 m/s ve sıcaklığın 5 °C olduğu durumda gerçekleştirilmiştir.

Yerleşim ve miktarın etkisinin irdelendiği marul yüklü deneysel çalışmalarda, dört adet marulun dikey ve yatay yerleşim durumları ile altı, üç ve iki adet marulun yatay yerleşim durumları ele alınmıştır. Söz konusu koşullar altında elde edilen sıcaklık ve bağıl nem değeri Çizelge 4.41’ de verilmiştir.



Şekil 4.18 : Deney koşulları.

Çizelge 4.41 : Saklama koşullarına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Koşul	H [mm]	T_h [°C]	T_{tvn} [°C]	T_g [°C]	ΔT ($T_g - T_{tvn}$) [K]	% Φ
4 adet marul Dikey	115	6,1	4	5,9	1,9	73
4 adet marul Yatay	65	5,5	4,7	5,8	1,1	64
6 adet marul Yatay	65	5,9	3,9	5,9	2,0	69
3 adet marul Yatay	140	6,2	3,7	5,7	2,0	65
2 adet marul Yatay	140	6,6	3,3	5,6	2,3	67

Yerleşim ve miktar farklılığının irdelendiği deneysel çalışmalarda, Çizelge 4.42-

Çizelge 4.43-Çizelge 4.44' de verilen ısı ve kütle transfer katsayılarının koşula bağlı olarak büyük farklılıklar göstermediği görülmektedir . Ancak bununla birlikte, Çizelge 4.44'de verilen % M_{ter} değerleri incelendiğinde koşullara bağlı farklılıklar

görülmektedir. Bu durum ağırlık kaybının baskın olarak, efektif kütle transfer yüzey alanına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.42 : Doğal taşınım ile ısı geçişine ilişkin ısı transferi Ra sayısı ve ısı taşınım katsayısının koşullara göre değişimi.

Koşul	ΔT ($T_g - T_{t\text{vn}}$) [K]	Ra	h [W/m ² K]
4 adet marul Dikey	1,9	3,47E+05	1,36
4 adet marul Yatay	1,1	3,63E+04	1,31
6 adet marul Yatay	2,0	6,60E+04	1,54
3 adet marul Yatay	2,0	6,59E+05	1,33
2 adet marul Yatay	2,3	7,59E+05	1,38

Çizelge 4.43 : Toplam kütle geçiş katsayısının koşullara bağlı değişimi.

Koşul	Ra _m	Sh	h _m [m/s]	k _a [g/m ² sMPa]	k _s [g/m ² sMPa]	k _t [g/m ² sMPa]
4 adet marul Dikey	1,45E+07	23,19	5,24E-03	41,27	6,66	5,73
4 adet marul Yatay	2,94E+06	14,05	5,62E-03	44,24	6,66	5,79
6 adet marul Yatay	2,90E+06	14,00	5,60E-03	44,07	6,66	5,79
3 adet marul Yatay	3,16E+07	29,60	5,50E-03	43,27	6,66	5,77
2 adet marul Yatay	3,03E+07	29,22	5,43E-03	42,71	6,66	5,76

Öncelikle aynı miktar için dikey-yatay yerleşim farklılığına bakıldığında, üç günlük deney sonunda, dikey yerleşimde daha fazla ağırlık kaybının meydana geldiği görülmektedir. Marulların dikey yerleştirilmesi ile yatay yerleşime göre karakteristik uzunluk artmakta, karakteristik uzunluk ve etkin kütle transfer yüzey alanının artması ile ağırlık kaybını artırıcı etki ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.44 : Doğal taşınım ile kütle geçişine ilişkin kütle transferi Ra_m sayısı, toplam kütle transfer katsayısının ve derişiklik farkının koşullara göre değışimi.

Koşul	Δd_v ($d_{vg}-d_{vtn}$) [g/m ³]	Ra_m	k_t [g/m ² sMPa]	Δd_v ($d_{vg}-d_{vh}$) [g/m ³]	% M_{ter}
4 adet marul Dikey	2,54	1,45E+07	5,73	1,86	6,0%
4 adet marul Yatay	2,86	2,94E+06	5,79	2,64	4,2%
6 adet marul Yatay	2,82	2,90E+06	5,79	2,21	2,6%
3 adet marul Yatay	3,03	3,16E+07	5,77	2,31	3,9%
2 adet marul Yatay	2,93	3,03E+07	5,76	1,91	5,3%

Yatay yerleşimde, yatay olarak dört ve altı adet marulun sebzeliğe iki sıra halinde yerleştirildiği durumda, karakteristik uzunluk sabit tutularak sebzelik içi doluluk oranının etkisi incelenmiştir. Dört adet marulun yatay yerleşimi ile altı adet marul yerleşimine göre boşluk oranı daha fazla olan bir yapı elde edilmektedir. Dolayısıyla havanın marulla temas edebileceği yüzey alanı artmaktadır. Bu durum aynı karakteristik uzunluk için daha az marul yerleşimi ile daha fazla ağırlık kaybının meydana geldiğini göstermektedir.

Benzer şekilde, yatay olarak iki ve üç adet marul sebzeliğe tek sıra halinde yerleştirilmesi ile sabit karakteristik uzunlukta sebzelik içi doluluk oranının etkisi incelenmiştir. İki adet marulun yerleştirildiği durumda da benzer oluşum ile ağırlık kaybı daha fazla olmuştur.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği yerleşim ve miktar kombinasyonları için, deneysel verilerden yola çıkılarak hesaplanan ' k_t ' kütle transfer katsayısının çok fazla değışmediği görülmektedir. Bu durum ağırlık kaybının baskın olarak, efektif kütle transfer yüzey alanına bağılı olarak değıştiğini göstermektedir. Bunu ortaya koymak amacıyla 4 dikey ve 4 yatay yerleşim durumları için etkin kütle transfer yüzey alanının değışim oranı hesaplanmıştır.

Gıda ve hava arasındaki derişiklik farkı ve taşınımsal kütle transfer katsayısı değerlerinin çarpımı ile terleme akısı M''_{ter} tespit edilmiştir. Çizelge 4.45' te

görüldüğü gibi, 4 adet dikey yerleşim durumunda terleme akısı daha düşüktür. Dolayısıyla, 4 adet dikey durumda ağırlık kaybı değerinin daha fazla olmasının sebebi etkin kütle transfer yüzey alanının artışı ile açıklanabilmektedir.

Çizelge 4.45 : Terleme akısı.

Yerleşim/Miktar	$\Delta d_v (d_{vg}-d_{vh})$ [g/m³]	h_m [m/s]	M''_{ter} [kg/m²s]
4 adet dikey	1,86	0,005302	9,83593E-06
4 adet yatay	2,64	0,005621	1,48123E-05

Etkin kütle transfer yüzey alanının hesaplanması amacıyla, ilk olarak deneylerde tespit edilen ağırlık kaybı değerlerinden ve toplam deney süresinden yola çıkılarak, birim zamandaki terleme miktarı M'_{ter} hesaplanmıştır.

Çizelge 4.46 : Birim zamandaki terleme miktarı [M'_{ter}].

Yerleşim/Miktar	Toplam Ağırlık Kaybı [g]	Toplam süre [s]	M'_{ter} [kg/s]
4 adet dikey	72,5	245880	2,94859E-07
4 adet yatay	17,0	250680	6,77158E-08

Çizelge 4.47: Kütle transfer yüzey alanı.

Yerleşim/Miktar	M'_{ter} [kg/s]	M''_{ter} [kg/m²s]	Kütle transfer yüzey alanı [m²]	Kütle transfer yüzey alanı [mm²]
4 adet dikey	2,94859E-07	9,8359E-06	0,030	29978
4 adet yatay	6,77158E-08	1,4812E-05	0,005	4572

Birim zamandaki terleme miktarı ile terleme akısı oranlanarak kütle transfer yüzey alanı tespit edilmiştir. 4 dikey yerleşim durumundaki kütle transfer yüzey alanının ve

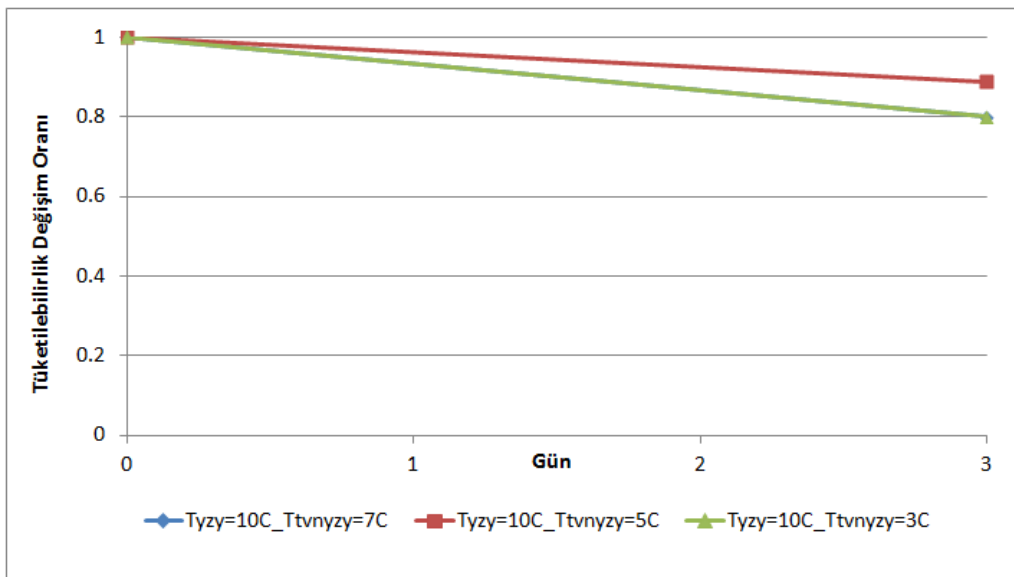
ağırlık kaybı değerinin, 4 yatay yerleşim durumuna göre daha fazla olduğu görülmektedir. İki yüzey alanı arasında yaklaşık 6 katlık bir oran bulunmaktadır. Bu sebeple aynı miktar marul için dikey yerleşimde daha fazla ağırlık kaybı gerçekleştiği görülmektedir.

4.6 Gıda Kalite Değerlendirmeleri

Salatalık yüklü deneysel çalışmalar kapsamında, sebzeliğe hava giriş-çıkışının olduğu ve sebzeliğin hava giriş çıkışına kapalı olduğu durumlar ve bu durumlar altında söz konusu diğer parametrik etkiler ayrı ayrı deneysel olarak irdelenmiştir.

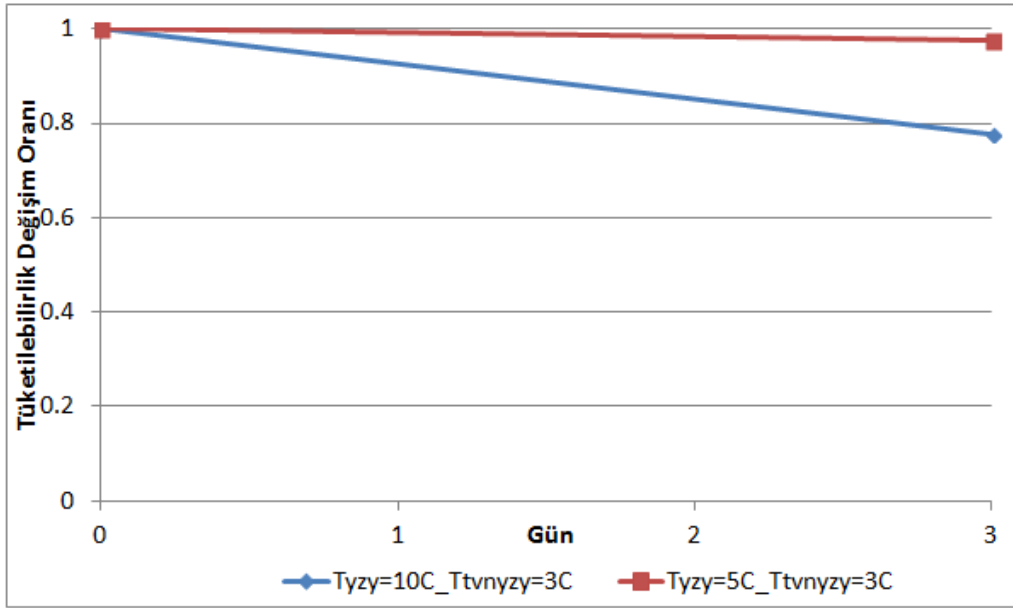
Tez çalışmaları kapsamında Bölüm 4 'de verilen Isı Kütle Transferi Değerlendirmeleri'nde, yüzeyler arası sıcaklık farkının ısı-kütle transferi açısından baskın etkisinin, sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişimi ile ortaya çıktığı görülmüştür. Isı-kütle transferi değerlendirmelerine paralel olarak gerçekleştirilen, gıda kalite değerlendirmelerinde de sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişimi daha baskın görülmüştür.

Gıda kalite değerlendirmeleri kapsamında salatalıklar, saklama koşulunun 0. gününde ve 3. gününde duyu değerlendirmeye tabi tutulmuştur. 5-6 panelistin katılımıyla gerçekleştirilen duyu değerlendirmede salatalıklar, renk, doku, büzüşme, soğuk zararlanması, küf-çürük ve genel tüketilebilirlik açısından değerlendirilmiştir.



Şekil 4.19 : Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin tüketilebilirliğe etkisi.

Şekil 4.19’de sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının değişiminin tüketilebilirliğe etkisi verilmektedir. Sabit 10 °C diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklıkları sırasıyla 7 °C, 5 °C, 3°C olduğunda, tüketilebilirlik açısından önemli değişimlerin ortaya çıkmadığı görülmektedir. Üç günlük saklama sonunda, ilk güne göre tüm koşullar benzer düşüşü göstermiştir. Benzer şekilde ısı-kütle transferi değerlendirmelerinde de, sebzeliğin hava sıcaklıkları temel olarak cıvadan sıcaklıkları ile sağlandığından tavan sıcaklığının değişiminin etkisiz kaldığı ortaya konmuştur.



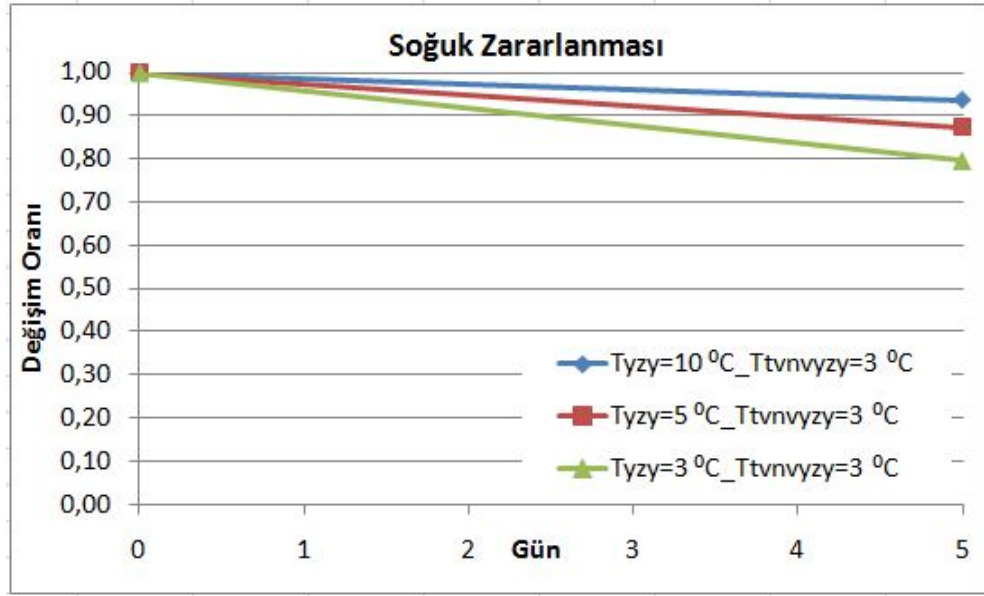
Şekil 4.20 : Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişiminin tüketilebilirliğe etkisi.

Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişiminin tüketilebilirliğe etkisi Şekil 4.20’de verilmiştir. Sabit 3°C tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıkları sırasıyla 10 °C ve 5 °C olduğunda, yüzeyler arası sıcaklık farkı arttıkça kütle transfer katsayısının arttığı ve salatalıkların görece daha fazla nem kaybetmesine bağlı olarak tüketilebilirlik açısından ilk güne göre daha düşük bir not aldığı görülmektedir.

Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişimi ile ısı ve kütle transferi açısından görülen farklılıklar, gıda kalitesinde meydana gelen değişimler ile de desteklenmiştir. Yüzeyler arası sıcaklık farkının bu şekilde sağlandığı durum için, sebzeliğin hava giriş çıkışının olmadığı durumda da ısı-kütle transferi değerlendirmelerine ek olarak gıda kalite değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

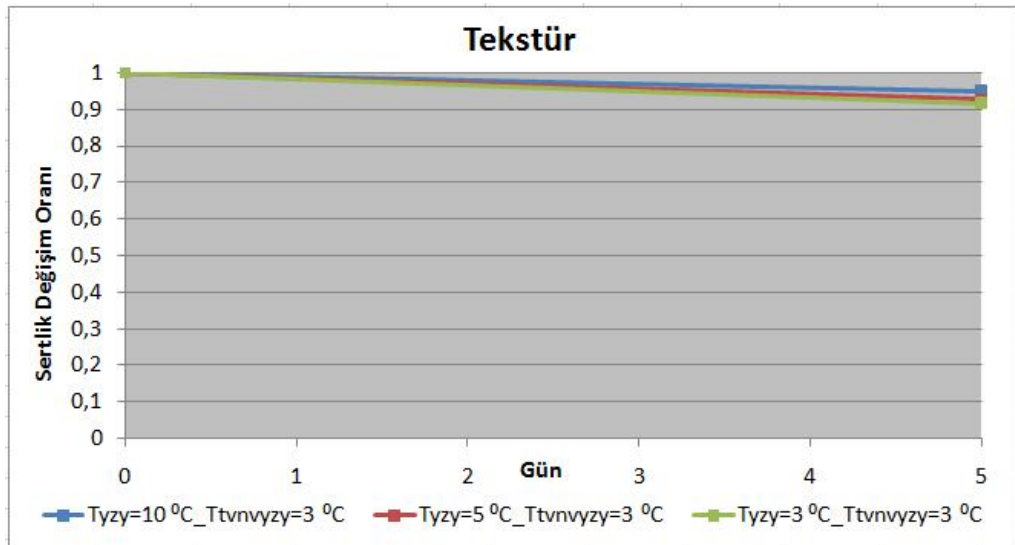
Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının 3°C , 5°C , 10°C olduğu, sebzeğe hava giriş çıkışının olmadığı ve diğer etkilerden bağımsız olarak sadece sıcaklık farkının etkisinin ortaya konduğu deneysel çalışmalarda, gıda kalite değeriendirmesi kapsamında, tekstür analizleri ve duyuusal analiz gerçekteştirilmiştir.

Duyuusal analiz soğuk zararlanması değeriendirmesinde, salatalıklarda, başlangıç gününe göre en fazla değerişim, 3°C saklama koşulunda meydana gelmiştir.

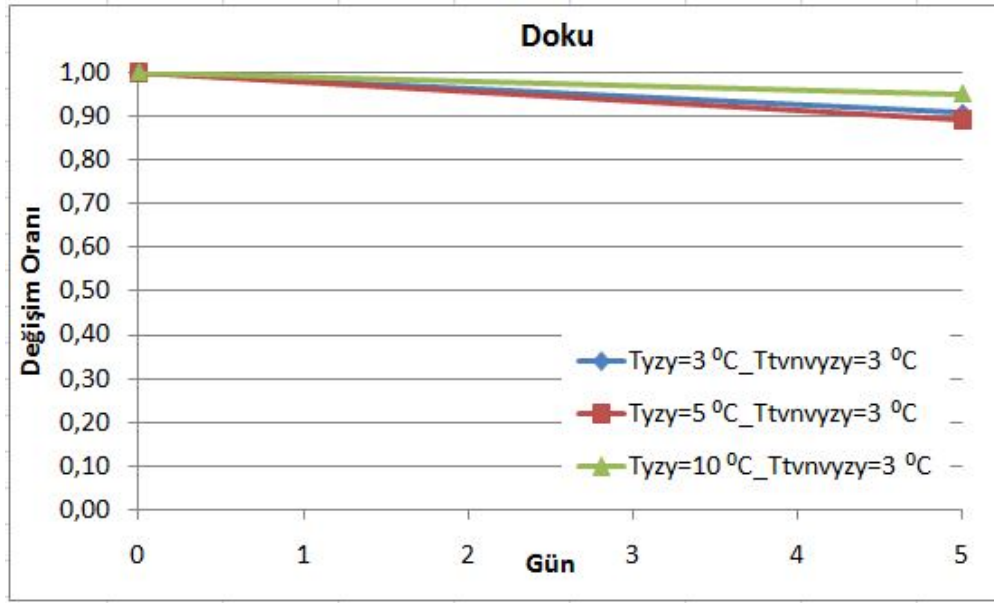


Şekil 4.21 : Soğuk zararlanması değeriendirmesi.

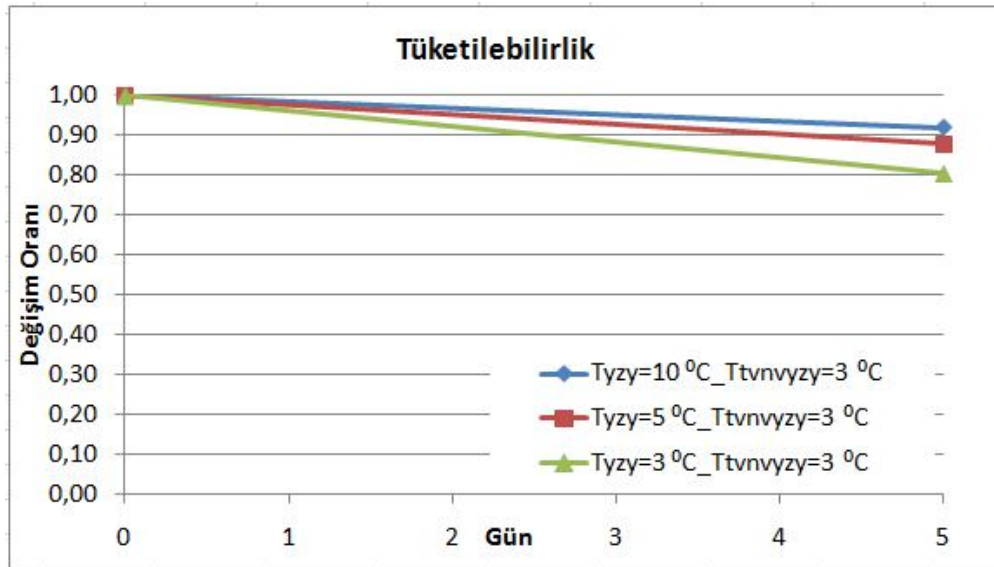
Tekstürel yöntemle belirlenen sertlik ölçümlerinde (Şekil 4.22) ve duyuusal analiz doku değeriendirmesinde (Şekil 4.23) koşullar arasında belirgin farklar görülmemiştir.



Şekil 4.22 : Salatalıklarda sertliğin koşullara bağılı olarak oransal değerişimi.



Şekil 4.23 : Duyusal analiz doku değerlendirme.



Şekil 4.24 : Duyusal analiz tüketilebilirlik değerlendirme.

Sıcaklık artışı ile birlikte daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmektedir fakat duyusal değerlendirme sonuçlarına göre tüketilebilirlik değerini en fazla soğuk zararlanması parametresi etkilemiştir.

Soğuk zararlanması, üründe soğuk etkiye bağlı olarak başlayan bir stres sonucu membranlardaki lipid tabakasında oksidatif reaksiyonların meydana gelmesi ile yapının bütünlüğü kaybedilerek doku hasarı (oyuklaşma, çökme, su batması vb. şekillerde) oluşarak kendini göstermektedir. Ayrıca glukozun piruvata kadar parçalanması ve birikmesi meydana gelmektedir. Saklama süresi boyunca duyusal

olarak salatalıklarda gözlemlenen soğuk zararlanmasının etkileri, kimyasal olarak elektrolit sızıntısı ve piruvat kimyasal analizleri ile ortaya konabilir.

3 °C saklama koşulunda, 7 gün sonunda soğuk zararlanmasının etkisi, salatalık yüzeylerinde su batması şeklinde görülmüştür. Deney süresi olarak belirlenen 7 gün boyunca, 3 °C ve 10 °C koşullarına ait görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.25: 0. gün salatalık görünüşü.



Şekil 4.26: 10 °C koşullarında saklanan salatalıkların 7. gün görünüşü.

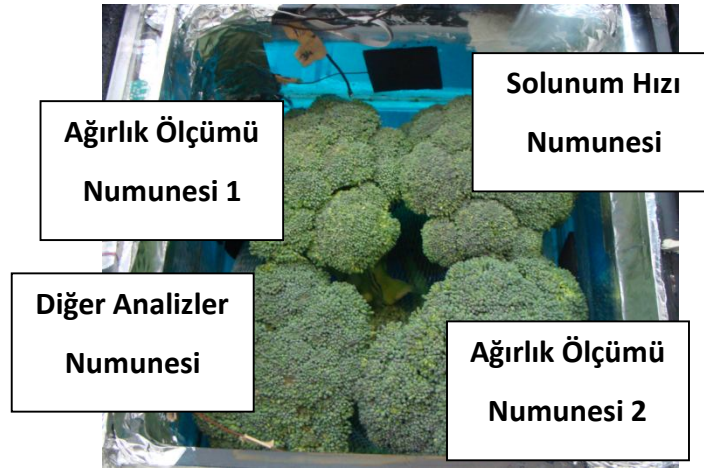


Şekil 4.27: 3 °C koşullarında saklanan salatalıkların 7. gün görünüşü.

Brokoli yüklü deneysel çalışmalar kapsamında, sebzeliğin hava giriş-çıkışına kapalı olduğu durum için yüzeyler arası sıcaklık farkının etkisi ve hava giriş-çıkışına açık olduğu durum için giriş hava hızının etkisi irdelenmiştir. Isı-kütle transferi değerlendirmeleri ile paralel olarak gıda kalite değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

Brokoli gıda kalite değerlendirmesi kapsamında, solunum hızı, Vitamin C kimyasal analizleri ve duyu analizi yapılmıştır. Brokoli deneysel çalışmaları 7 gün süreli olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerin 0. , 3. ve 7. gününde brokolilerde, gıda analizleri yapılmıştır. Deneyler arasında brokolilerden kaynaklanacak farklılıkların önüne geçilebilmesi amacıyla, deney düzeneğine yerleştirilmeden önce, deneye alınacak brokolilerin 0. gün analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz günleri olarak belirlenen 3. ve 7. gün analizleri ile elde edilen sonuçlar, 0. gün değerleri ile kıyaslanmıştır.

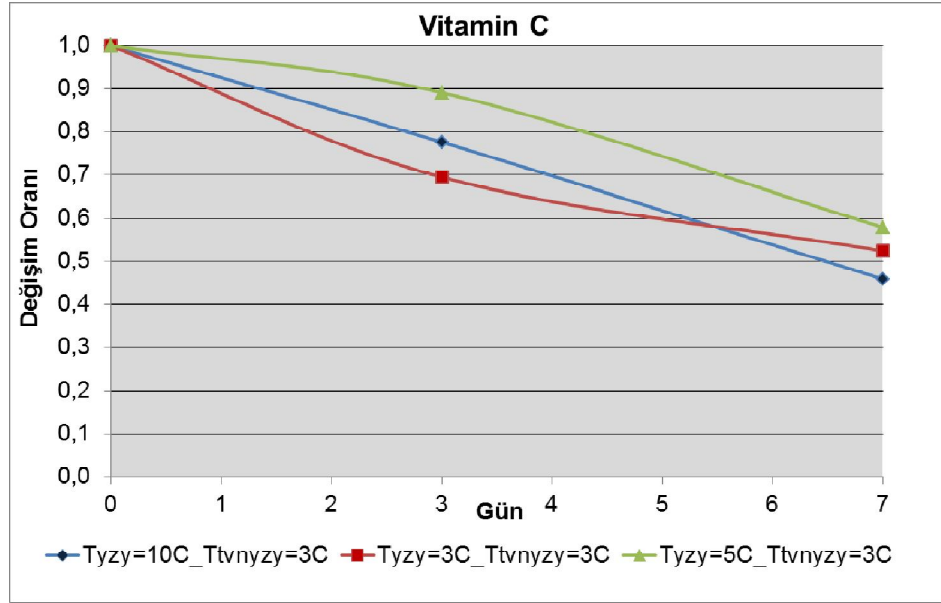
Deney düzeneği sebzelik hacmi içerisine, kimyasal analizlerde ve ağırlık kaybı ölçümünde kullanılmak üzere dört adet brokoli yerleştirilmiştir. Brokoli yerleşimi Şekil 4.28’da gösterilmektedir.



Şekil 4.28 : Brokolilerin deney düzeneği sebzeliği içerisine yerleşimi.

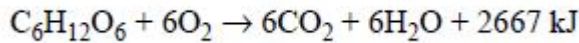
Brokoli, C vitamini açısından zengin bir sebzedir. Spektrofotometrik yöntemle gerçekleştirilen Vitamin C analizi ile brokolilerde, saklama sıcaklığının C vitamini değişimine olan etkisi incelenmiştir. 10 °C, 5 °C, 3°C saklama koşulları ve deney süresi boyunca Vitamin C değişimi Şekil 4.29’da verilmiştir. Vitamin C değerlerinde, tüm koşullarda hem 3. günde hem de 7. günde azalma meydana geldiği görülmektedir. Vitamin C değerlerinde, koşuldan bağımsız olarak gün bazında azalma meydana gelmiştir. C vitamini konsantrasyonunun, deneysel olarak irdelenen sıcaklık değerlerinde, indikatif bir değişim vermediği belirlenmiştir. Daha yüksek

depolama sıcaklıkları (25°C) ile C vitamini konsantrasyonunun azalma hızının artabileceği tahmin edilmektedir.



Şekil 4.29 : Koşullara bağlı olarak Vitamin C değerinin değişimi.

Solunum, şeker ve oksijenin reaksiyona girdiği ve bu reaksiyon sonucunda karbondioksit, su buharı ve ısınin açığa çıktığı kimyasal bir olaydır. Soluma prosesi süresince, başta şekerler olmak üzere sebze yapısındaki bazı maddeler harcanmaktadır. Her meyve ve sebzenin solunum hızı farklıdır. Genel solunum denklemi:

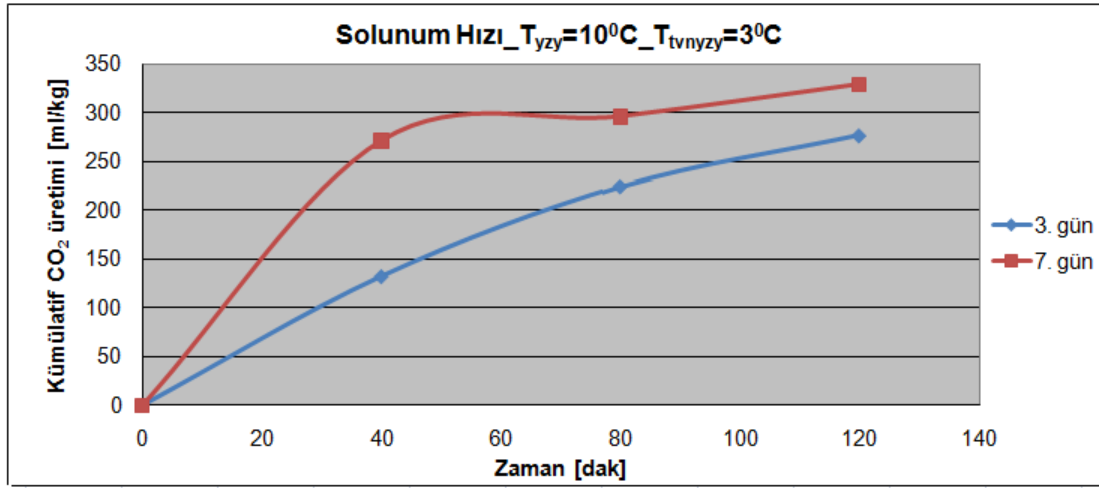


Solunum hızının bir göstergesi olan karbondioksit üretim miktarı, 'f' ve 'g' solunum katsayıları ile saklama sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, saklama sıcaklığı solunum hızının değişimi açısından önemli bir koşuldur. Karbondioksit üretim miktarı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

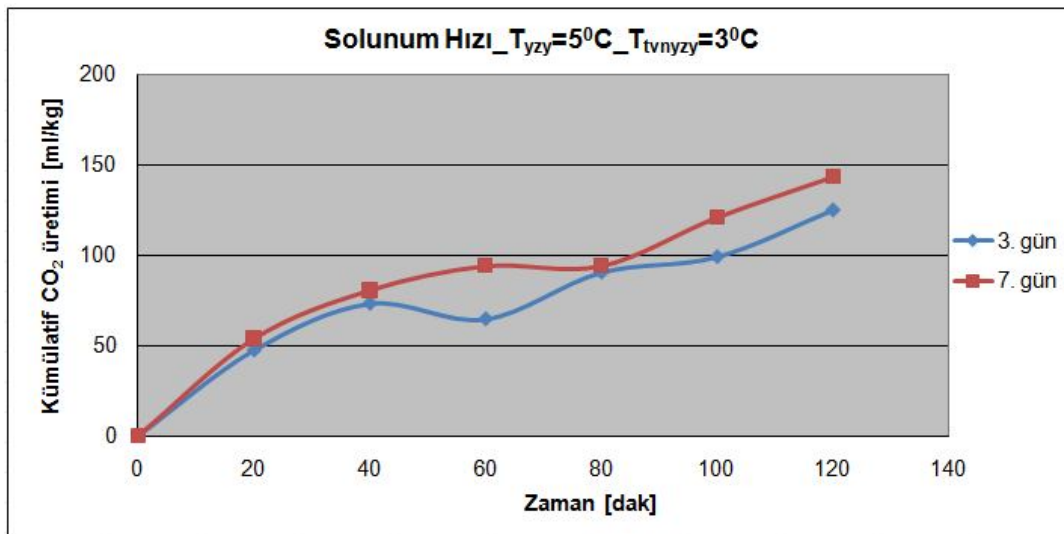
$$\dot{m}_{CO_2} = f \cdot \left(\frac{9T_m}{5} + 32 \right)^g \quad [\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$$

Brokolilerde solunum hızı ölçümlerinde, deney düzeneğinde sağlanan saklama koşullarından alınan solunum numunesi 120 dakika boyunca kapalı bir hacimde bekletilmekte ve bekleme süresi boyunca O₂-CO₂ gaz analizörü ile 20 dakika aralıklarla oksijen-karbondioksit yüzde konsantrasyonları ölçülmektedir. Ölçüm sona erdikten sonra solunum numunesi tekrar deney düzeneğine yerleştirilmektedir.

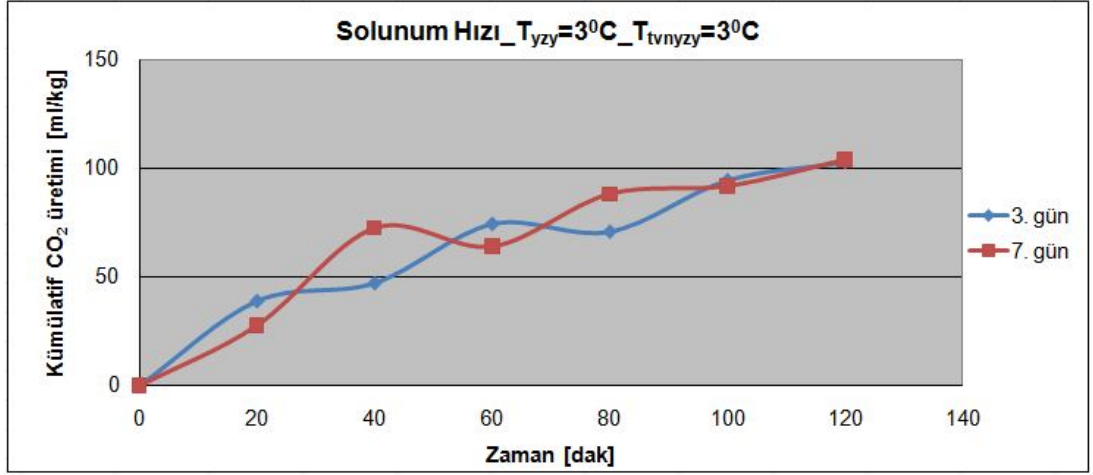
Ölçümler deney süresinin, 3. ve 7. günlerinde gerçekleştirilmiştir. 10 °C, 5 °C, 3 °C saklama koşullarında brokolilerde kümülatif CO₂ miktarının 3. ve 7. günlerde ulaştığı değerler, sırasıyla, Şekil 4.30-Şekil 4.31-Şekil 4.32’ de verilmiştir. Saklama sıcaklığı arttıkça metabolik aktivitelerin hızı ve solunum hızı artış göstermekte, buna bağlı olarak solunum için kullanılan çözünen katı miktarı (şekerler) yapı tarafından kullanılarak % briks (çözünen katı miktarı) derecesi de azalış göstermektedir. En yüksek kümülatif CO₂ üretimi, saklama süresinin 3. ve 7. günlerinde 10 °C koşullarında meydana gelmiştir. 7 gün sonunda, 10 °C koşullarında kümülatif CO₂ üretimi ~325 ml/kg, 5 °C koşullarında kümülatif CO₂ üretimi ~150 ml/kg ve 3 °C koşullarında kümülatif CO₂ üretimi ~100 ml/kg olarak saptanmıştır. Ayrıca, koşullar arasında benzer ilişki 3. gün sonunda da görülmüştür.



Şekil 4.30 : T_{zy}=10 °C_T_{tvnyzy}=3 °C koşulunda kümülatif CO₂ üretimi.



Şekil 4.31 : T_{zy}=5 °C_T_{tvnyzy}=3 °C koşulunda kümülatif CO₂ üretimi.



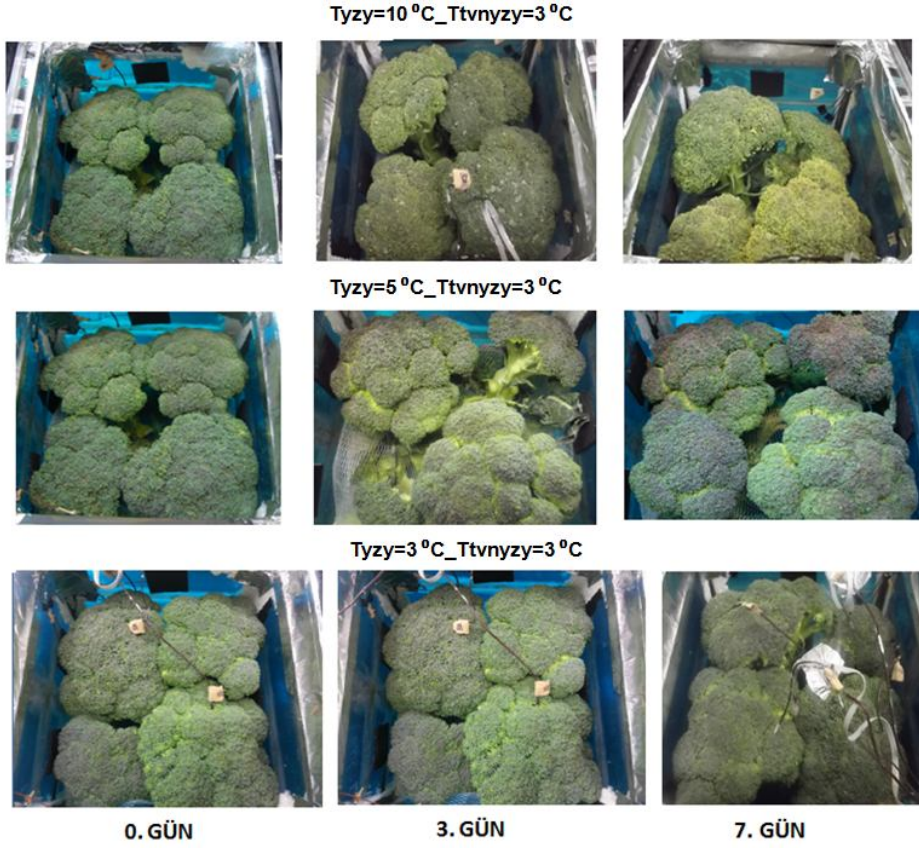
Şekil 4.32 : $T_{yzy}=3^{\circ}\text{C}$ _ $T_{tvnyzy}=3^{\circ}\text{C}$ koşulunda kümülatif CO_2 üretimi.

Koşul özelinde gün bazında karşılaştırma yapıldığında da, 3. gün ve 7. gün arasındaki farkın en fazla olduğu koşul 10°C ' dir. 5°C koşulunda bu fark daha az iken, 3°C koşulunda günler arasında fark oluşmamıştır. Sonuç olarak, 3°C koşulunun brokoli için optimum saklama sıcaklığına daha yakın olduğu görülmektedir. 10°C saklama koşulunda ise bozulmanın daha hızlı gerçekleşeceği öngörülebilmektedir.

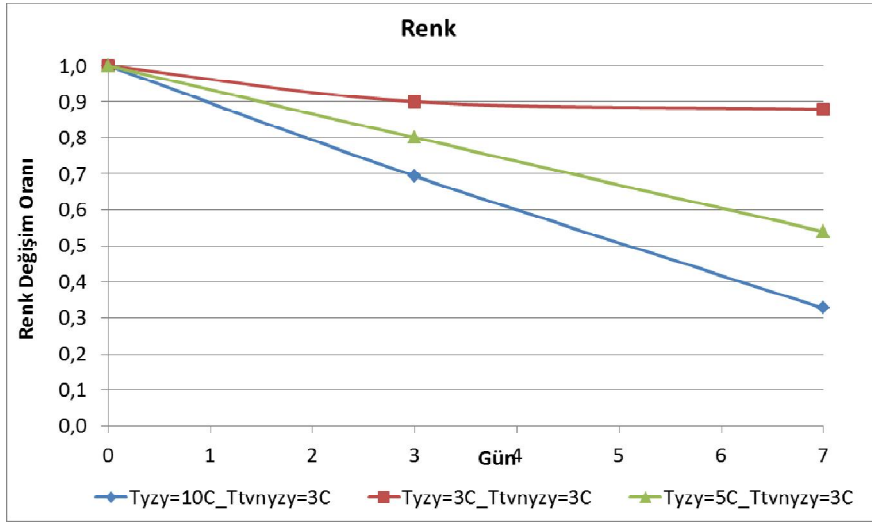
Klorofil brokolide oldukça yüksek konsantrasyonda bulunmaktadır. Depolama sıcaklığı arttıkça solunum hızı artışı ile ek bir ısı ortaya çıkmakta ve gıda sıcaklığı artmaktadır. Klorofil maddesi de sıcaklık arttıkça pheophythin'e parçalanmaktadır. Bu yeni madde, zeytin yeşili-sarı rengindedir. Bu mekanizma birinci derece bir reaksiyondur. Klorofilin parçalanması sonucunda brokolide renk değişimi meydana gelmiştir.

Saklama süresinin 3. ve 7. günlerindeki brokoli görselleri Şekil 4.32' de yer almaktadır. 3°C saklama koşullarında brokolilerde yeşil rengin değişimi minimum seviyede kalmıştır, 10°C saklama koşullarında, saklama süresinin ilerleyen günlerinde sararmalar görülmüştür. 5°C saklama koşullarında ise yeşil renk ile birlikte brokoli yüzeylerinde yer yer kahverengileşmeler görülmüştür.

Duyusal analiz, renk ve tüketilebilirlik değerlendirmeleri Şekil 4.34 ve Şekil 4.35' de verilmiştir. Tüketilebilirlik değerlendirmesi; solunum hızı, renk değerlendirmesi sonuçları ile uyum göstermektedir.



Şekil 4.33 : Koşullar ve gün bazında brokolilerde meydana gelen renk değişimi.

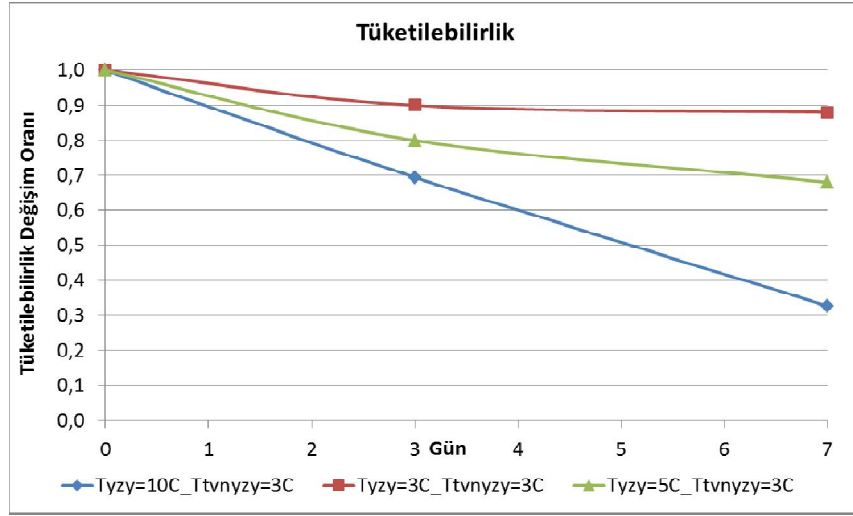


Şekil 4.34 : Duyusal analiz renk değerlendirmesi.

Brokoli için, solunum hızı ve klorofil analizlerinin indikatif test yöntemleri olduğu ortaya çıkmıştır.

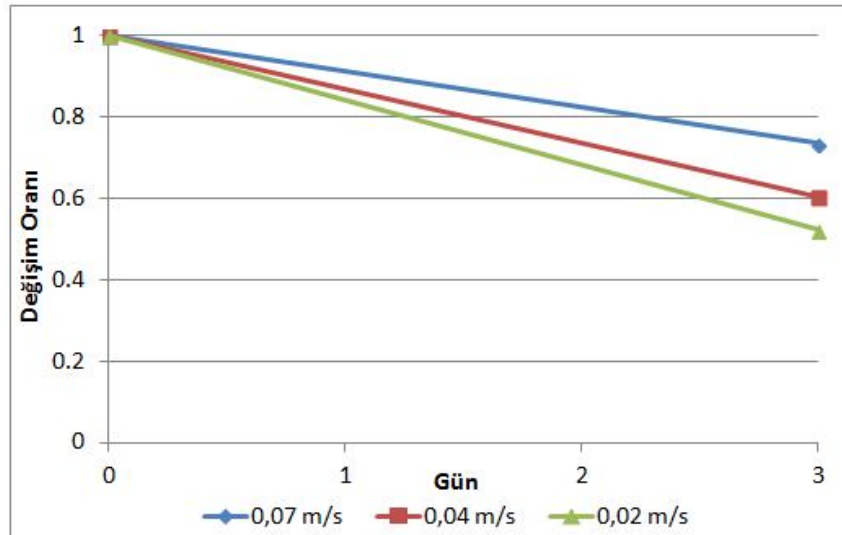
Marul yüklü deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen ısı-kütle transferi değerlendirmeleri paralelinde gıda kalite değerlendirme çalışmaları

gerçekleştirilmiştir. Gıda kalite değerlendirme çalışmalarında marul ağırlık kaybının tüketilebilirlik ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.



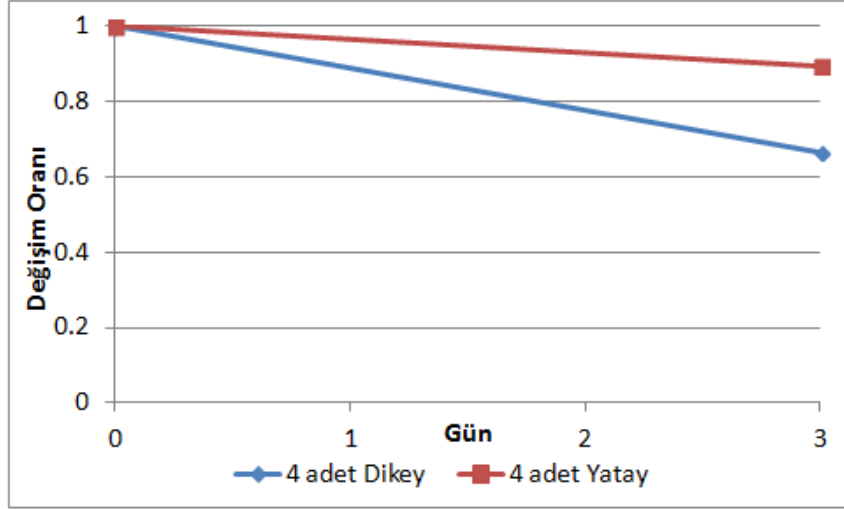
Şekil 4.35 : Duyusal analiz tüketilebilirlik değerlendirmesi.

Giriş hava hızının parametrik etkisinin irdelendiği deneysel çalışmalarda, giriş kesitindeki hava hızının artması ile gıda ve hava derişiklikleri ile gıda ve tavan derişiklikleri arasındaki fark azalmaktadır. Böylece ağırlık kaybı daha düşük olmaktadır. Gıda kalitesi kapsamında gerçekleştirilen duysal değerlendirme sonuçları incelendiğinde, üç gün sonunda, ağırlık kaybı ile uyumlu tüketilebilirlik değerleri elde edilmiştir. 0. güne göre, 3 gün sonunda tüketilebilirlik değerlerinde en fazla azalma, hızın 0,02 m/s olduğu durumda elde edilmiştir.



Şekil 4.36 : Hava giriş hızının marul tüketilebilirlik parametresine etkisi.

Marul yerleşiminin ısı-kütle transferine etkisinin irdelendiği deneysel çalışmalarda, dikey yerleşim durumunda yatay yerleşime göre marullarda daha fazla ağırlık kaybı meydana geldiği görülmüştür. Duyusal değerlendirmede, 0. güne göre 3. gün sonundaki tüketilebilirlik değerlerinin ağırlık kaybı ile uyumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Buna göre 4 adet marulun dikey olarak yerleştirildiği duruma ait gerçekleştirilen deneyin sonucunda, tüketilebilirlik kriterinde daha fazla azalma görülmüştür.



Şekil 4.37 : Marul yerleşiminin tüketilebilirliğe etkisi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, farklı sebze grupları için saklama koşullarına ilişkin fiziksel parametrelerin doğal taşınım ile ısı-kütle transferine etkisi irdelenmiş ve fiziksel parametreler ile gıda kalite parametreleri ilişkilendirilmiştir.

Literatürde bulunan çalışmalar göz önünde bulundurularak ve sebzelik fiziksel modeli ele alınarak, sebzelik tasarımına ilişkin başlıca fiziksel parametreler belirlenmiştir. Buna göre, saklama sıcaklığı, yüzeyler arası sıcaklık farkı, giriş hava hızı, gıda miktarı/konumu fiziksel parametrelerinin bağımsız değişken olarak kontrol edilebildiği parametrik bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinde, sebzeler için belirli saklama koşulları oluşturulmuş ve deneysel veriler kullanılarak ısı-kütle transferi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde uygulanan deneysel koşullar ve deney düzeneği hacmi içerisindeki düşük hava hızları ve yüzeyler arası sıcaklık farkları göz önünde bulundurularak, sebzelik içi doğal taşınım durumu değerlendirilmiştir. Deneysel olarak ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerleri kullanılarak doğal taşınım korelasyonları ile özgül nem, derişiklik değerleri ile ısı transferi ve kütle transferi Ra sayıları, ısı transfer katsayısı ve kütle transfer katsayıları hesaplanmıştır. Fiziksel parametrelerin değişimlerine göre sözkonusu büyüklüklerin değişimleri ortaya konmuş ve kütle transferi ve terleme miktarına etken parametreler belirlenmiştir. Sebze meyve saklamada etkin fiziksel parametrelerin ortaya konmasına ek olarak, fiziksel parametrelerin gıda kalitesine olan etkisi de incelenmiş ve fiziksel parametreler ile gıda kalite parametreleri ilişkilendirilmiştir.

Deney düzeneğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan sebze cinslerinin seçiminde öncelikle, sebzeler saklama koşullarına göre gruplandırılmış ve sözkonusu grupları temsilen seçilen sebzeler ile çalışılmıştır. Bu kapsamda, neme duyarlı sebzeler grubuna örnek olarak marul ile soğuk zararlanmasına duyarlı sebzeler grubuna örnek olarak salatalık ile düşük sıcaklıklarda saklanan sebzeler grubuna örnek olarak brokoli ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmaların değerlendirilmesi kapsamında toplam kütle transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılan yüzey kütle geçiş katsayısı ' k_s ' değerlerinin literatürde her sebze-meyve türünü içermemesi, değerlerin geniş bir aralıkta verilmiş olması ve sebzelerin coğrafyasal farklılıklar gösterebilmesi sebebiyle deneysel çalışmalarda incelenen sebzeler için katsayı tespiti deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Böylece tespit edilen katsayılar kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Isı-kütle transferi değerlendirmeleri kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda yüzeyler arası sıcaklık farkının etkisi iki şekilde ele alınmıştır. Sabit diğer yüzey sıcaklıkları için tavan yüzey sıcaklığının farklılaşması durumunda oluşan sıcaklık farkının değişimi ile ısı transferi Ra sayısının uyumlu olarak değiştiği görülmüştür. Kütle transferi değerlendirmelerinde, hava tarafı kütle transfer katsayısı ' k_a 'nın sıcaklık ve derişiklik farkı arttıkça arttığı ve koşullar arasında farklılık gösterdiği görülmektedir, ancak gıda yüzey kütle geçiş katsayısı ' k_s 'nin de etkisiyle toplam kütle transfer katsayısı ' k_t ' değerleri birbirine yaklaşmıştır. Ayrıca, derişiklik farkı ve su buharı kısmi basınçları arasındaki fark benzer mertebelerde kalmıştır. Bu nedenle, üç farklı tavan yüzey sıcaklığı durumunda, gıdadan havaya gerçekleşen terleme akısı ve toplam terleme miktarları da aynı mertebelerde kalmaktadır.

Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının değişiminin parametrik etkisinin irdelendiği deneysel çalışmalarda, ısı transferi Ra sayısı ve h ısı taşınım katsayısının, sıcaklık farkı ile orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Deneysel çalışma koşulları kütle transferi açısından değerlendirildiğinde, gıda ve tavan arasındaki derişiklik farkı ile gıda ve hava arasındaki derişiklik farkının ΔT 'nin azalması ile azaldığı ve buna bağlı olarak kütle transferi Ra_m sayısı, kütle transfer katsayısı ve % terleme miktarının da azaldığı görülmektedir.

Yüzeyler arası sıcaklık farkı ile ilgili deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar, Kocatürk tarafından gerçekleştirilen sayısal analiz çalışması ile uyumluluk göstermektedir. Ek olarak, gıda değerlendirmelerinde de, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile uyumlu ağırlık kaybı değerleri elde edilmiştir.

Yüzeyler arası sıcaklık farkı, tavan yüzeyindeki yoğunlaşma oluşumu açısından değerlendirildiğinde, hava ve doyma koşullarındaki tavan yüzeyi arasındaki derişiklik farkı değerleri ile deneysel olarak tespit edilen yoğunlaşma miktarları uyumlu

çıkıştır. Hava giriş-çıkışının olmadığı durumda, yüzeyler arası sıcaklık farkının arttıkça, yoğuşma miktarı da artmaktadır.

Giriş hava hızının irdelendiği deneysel çalışmalarda, saklama sıcaklığı koşullar arasında aynı tutulduğundan, gıda yükü ile tavan yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı aynı kalmış, dolayısıyla ısı transferi Ra sayısı ile ısı taşınım katsayısı, incelenen hava hızı için benzer değerler elde edilmiştir. Koşullar kütle transferi açısından değerlendirildiğinde, salatalık ve brokoli deneysel çalışmalarında, hava hızının görece yüksek olduğu durumda, hem gıda ile tavan arasındaki derişiklik farkı, hem de gıda ile hava arasındaki değışiklik farkı daha yüksek elde edilmiştir ve dolayısıyla ağırlık kaybı daha yüksek olmuştur. Marul yüklü durumda ise giriş kesitindeki hava hızının artması ile birlikte gıda ve hava derişiklikleri ile gıda ve tavan derişiklikleri arasındaki fark azalmaktadır. Dolayısıyla, gıdadan gerçekleşen terleme akısı ve toplam terleme miktarı azalmıştır. Marul için sözkonusu olan bu durum, 0,1 m/s'den daha düşük giriş hava hızları için gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Marul yüklü durumda, yerleşim şekli ısı-kütle transferi tarafından incelendiğinde, dikey-yatay yerleşim farklılığında, dikey yerleşimde daha fazla ağırlık kaybının meydana geldiği görülmektedir. Marulların dikey yerleştirilmesi ile yatay yerleşime göre karakteristik uzunluk artmakta, karakteristik uzunluk ve etkin kütle transfer yüzey alanının artması ile ağırlık kaybını arttırıcı etki ortaya çıkmaktadır. Yatay yerleşimde, karakteristik uzunluk sabit tutularak sebzeliğin içi doluluk oranının etkisi incelendiğinde, daha az marul yerleşiminde boşluk oranı daha fazla olan bir yapı elde edilmektedir. Dolayısıyla havanın marulla temas edebileceği yüzey alanı artmaktadır. Bu durum aynı karakteristik uzunluk için daha az marul yerleşimi ile daha fazla ağırlık kaybının meydana geldiğini göstermektedir.

Sabit tavan yüzey sıcaklığı için diğer yüzey sıcaklıklarının 3°C, 5°C, 10 °C olduğu, sebzeliğe hava giriş çıkışının olmadığı ve diğer etkilerden bağımsız olarak sadece sıcaklık farkının etkisinin ortaya konduğu deneysel çalışmalarda, gıda kalite değerlendirmesi kapsamında, elektrolit sızıntısı, tekstür analizleri ve duyuşsal analiz gerçekleştirilmiştir.

Gıda kalite değerlendirmelerinde, salatalıklarda saklama sıcaklığının etkisi soğuk zararlanması ile ortaya konmuştur. Salatalıklarda, soğuk zararlanması açısından başlangıç gününe göre en fazla değışim, 3°C saklama koşulunda meydana gelmiştir ve soğuk zararlanması tüketilebilirlikte etken parametre olmuştur.

Brokoli gıda kalite değerlendirmelerinde, C vitamini açısından zengin olan brokolilerde, saklama süresi boyunca değişim azalma meydana gelmiştir, ancak çalışılan sıcaklık koşulları altında farklılık gözlemlenmemiştir. Solunum hızı ölçümlerinde, sıcaklık arttıkça solunum hızının artış gösterdiği görülmüştür. 10 °C saklama koşulunda, brokolilerde bozulmanın daha hızlı gerçekleşeceği öngörülebilmektedir. Brokolilerde yüksek saklama sıcaklığında klorofil parçalanması gerçekleşmekte ve renk değişimi meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalarda, 3 °C saklama koşullarında brokolilerde yeşil rengin değişimi minimum seviyede kalmıştır, 10 °C saklama koşullarında, saklama süresinin ilerleyen günlerinde sararmalar görülmüştür. 5 °C saklama koşullarında ise yeşil renk ile birlikte brokoli yüzeylerinde yer yer kahverengileşmeler görülmüştür. Duyusal analiz, tüketilebilirlik değerlendirmesi; solunum hızı, renk değerlendirmesi, %briks sonuçları ile uyum göstermektedir. Marul nem kaybına duyarlı bir yapraklı sebze olduğundan, marul yüklü deneysel çalışmalarda duyusal değerlendirme sonuçları ağırlık kaybı ile uyumluluk göstermiştir.

Bu tez çalışmasının devamı olarak aşağıda sunulan önerilerin yararlı olabileceği düşünülmektedir:

- ✓ Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm noktaları arttırılarak ve ölçüm sistematığı geliştirilerek ısı ve kütle transferine ilişkin korelasyonlar geliştirilebilir.
- ✓ Gıda değerlendirme çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen solunum hızı ölçümlerinde, solunum hızı numunesi saklama koşulundan alınıp, ölçümlerin gerçekleştirildiği kapalı bir ölçüm ortamına yerleştirilmektedir. Solunum hızı ölçümlerinin gıdanın saklama ortamında yapılabileceği düzenek ve ölçüm sistemi geliştirilebilir.
- ✓ Ortam koşullarından soğukta saklama koşullarına yerleştirilen gıdalardan gerçekleşen nem kaybı (terleme) mekanizmasının ortaya konması amacıyla, kümülatif terleme miktarı yerine terleme akısının ölçülebileceği test koşulları çalışılabilir.
- ✓ Gıda saklamaya yönelik olarak oluşturulan hacimlerde sıcaklık ve bağıl nem ölçümlerinin yanı sıra, gıda solunumu ile ilişkili saklama ortamı gaz kompozisyonlarının ölçülerek gıda kalite değerlendirmesinde kullanımı geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Becker, B. R., Misra, A. ve Fricke, B. A.** (1996). Bulk Refrigeration of Fruits and Vegetables Part 1: Theoretical Considerations of Heat and Mass Transfer, *HVAC&R Research*, Vol.2, No.2, p.122-134.
- [2] **Uchino, T., Nei, D., Hu, W. ve Sorour, H.** (2004). Development of a mathematical model for dependence of respiration rate of fresh produce on temperature and time, *Postharvest Biology and Technology*, Vol.34, No.3, p.285-293.
- [3] **Techavuthiporn, C., Nakano, K. ve Maezawa, S.** (2008). Prediction of ascorbic acid content in broccoli using a model equation of respiration, *Postharvest Biology and Technology*, Vol.47, No.3, p.373-381.
- [4] **Mahajan, P. V., Oliveria, F. A. ve Macedo, I.** (2008). Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms, *Journal of Food Engineering*, Vol.84, No.2, p.281-288.
- [5] **Kang, J. S. ve Lee, D. S.** (1998). A kinetic model for transpiration of fresh produce in a controlled atmosphere, *Journal of Food Engineering*, Vol.35, No.1, p.65-73.
- [6] **Incropera, F. P. ve DeWitt, D. P., çev. Derbentli ve diğ.** (2007). Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri. İstanbul: Literatür Yayınları.
- [7] **Bejan, A.,** (1948). Convection Heat Transfer. New York : Wiley.
- [8] **Şeker, D.** (2004). *Buzdolabı İçi Isı ve Kütle Geçişinin Sayısal ve Deneysel İncelenmesi*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [9] **Kocatürk, S.** (2013). *Soğutulan Bir Hacim İçerisinde Yatay Yüzey Altında Yoğuşmanın Gıdalara İlişkin Isı-Kütle Transferi İle Birlikte İrdelenmesi*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul, Türkiye.

- [10] **Kandaswamy, P., Lee, J. ve Abdul Hakeem, A. K.** (2007). Natural convection in a square cavity in the presence of heated plate, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, Vol.12, No.2, p.203-212.
- [11] **Ben Nasr, K., Chouikh, R., Kerkeni, C. ve Guizani, A.** (2006). Numerical study of the natural convection in cavity heated from the lower corner and cooled from the ceiling, *Applied Thermal Engineering*, Vol.26, No.7, p.772-775.
- [12] **Mobedia, M., Özkola, Ü., Sunden, B.,** (2010). Visualization of diffusion and convection heat transport in a square cavity with natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, Issues 1–3, p.99–109.
- [13] **Nithyadevi, N., Kandaswamy, P., Lee, J.,** (2007). Natural convection in a rectangular cavity with partially active side walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50 (23).
- [14] **Varol, Y., Özgen, F.,** (2011). Tabandan ısıtılan kapalı bir hacim içerisine yerleştirilen açılı plakanın doğal taşınım ısı transferine etkisi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- [15] **Laguerre, O., Ben Amara, S., Flick, D.,** (2005).Experimental study of heat transfer by natural convection in a closed cavity: application in a domestic refrigerator, *Journal of Food Engineering*, Vol.70, p.523–537.
- [16] **Basak, T., Roy, S., Paul, T., Pop, I.,** (2006). Natural convection in a square cavity filled with a porous medium: Effects of various thermal boundary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.49, p.1430–1441.
- [17] **Sathiyamoorthy, M., Basak, T., Roy, S., Pop, I.,** (2006). Steady natural convection flow in a square cavity filled with a porous medium for linearly heated side wall(s), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.50, p.1892–1901.
- [18] **Giray, S., Kenber, E., ve diğ.** (2009). Klima Tesisatı. İstanbul:MMO Yayınları.

- [19] **Olivieri, J., Singh, T.** ve diğ. (1996). Psychrometrics: Theory and Practice, *ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta, ABD.
- [20] **Abbott, J., A.** (1998). Quality measurement of fruits and vegetables, *USDA–Agricultural Research Service*, USA.
- [21] **Agüero, M., V., Ponce, A., G.** ve diğ. (2011). Lettuce quality loss under conditions that favor the wilting phenomenon, *Postharvest Biology and Technology*, Vol.59, p.124-131.
- [22] **Javanmardi, J., Kubota, C.,** (2006). Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage, *Postharvest Biology and Technology*, Vol.41, p.151-155.
- [23] **ASHRAE Handbook, Refrigeration, Chapter: Commodity Storage Requirements.**
- [24] **Genceli, O.F.** (2005). *Ölçme Tekniği*, (1. Sürüm) (Sf. 30-60), Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [25] **Cheng, T.S.,** (2010). Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers, *International Journal of Thermal Sciences*.
- [26] **Url** <<http://postharvest.ucdavis.edu/>>, alındığı tarih:05.04.2013

EKLER

EK A : Salatalık Duyusal Değerlendirme Formu

EK B : Brokoli Duyusal Değerlendirme Formu

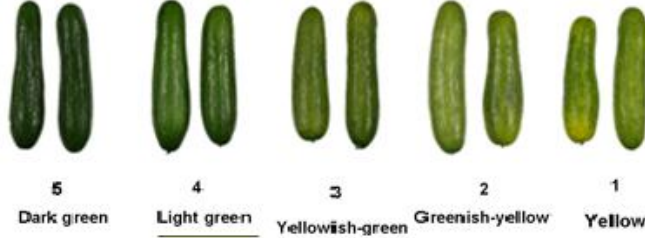
EK C : Marul Duyusal Değerlendirme Formu

EK A : SALATALIK DUYUSAL DEĞERLENDİRME FORMU



Kaliteli salatalık görünümü

Renk	1	Ciddi derecede sararma
	2	Yeşilimsi sarı
	3	Hafif sararma, Sarımsı yeşil
	4	Açık yeşil ile birlikte hafif sarı bölgeler
	5	Koyu yeşil veya koyu yeşil ile birlikte hafif sarı bölgeler



Doku	1	Ciddi oranda yumuşak, gevşek, parmak kuvvetine karşı direnç yok (özellikle uçlarda)
	2	Yumuşak, parmak kuvvetine çok hafif direnç var
	3	Hafif oranda yumuşama
	4	Sıkı, parmak kuvvetine karşı direnç var.
	5	Çok sıkı

Büzüşme	5	Hiç büzüşme yok
	4	Uçlarda hafif büzüşmeler var
	3	Uçlarda ve yüzeyde orta düzeyde büzüşme
	2	Uçlarda ve yüzeyde belirgin büzüşme
	1	Ciddi oranda büzüşme; solgun, kuru ve bozulmuş görünüm

Soğuk zararlanması	5	Hiç zararlanma yok
	4	Az oranda, yüzeyin %5-10'unda zararlanma var.
	3	Hafif oranda, yüzeyin %15-25'inde zararlanma var.
	2	Orta seviyede, belirginleşmeye başlamış yüzey çökükleri ve karmalar, %35-50 arasında zararlanma
	1	Ciddi seviyede, zararlanmaya uğramış bölgelerde çürüme başlangıcı, yüzeyin %70'den fazlasında zararlanma



Soğuk zararlanması kaynaklı çökmeler



Küf ve Çürük	1	Küf-çürük var, rahatsız ediyor.
	2	Küf-çürük var, rahatsız etmiyor.
	3	Küf-çürük yok



Fusarium kaynaklı çürüme (Beyazlıklar: Micellium)

Genel Tüketilebilirlik	5	Tüketilebilirlik çok iyi
	4	Tüketilebilirlik iyi
	3	Sınır koşullarda tüketilebilir
	2	Tüketilebilirlik kötü
	1	Tüketilemez, hemen reddedilir

EK B : BROKOLİ DUYUSAL DEĞERLENDİRME FORMU

Renk Değerlendirme

Renk skalası	Özellik
5	Koyu yeşil
4	Açık yeşil
3	Sarımsı yeşil
2	Yeşilimsi sarı
1	Sarı



Küf-Çürük Değerlendirme

Skala	Özellik
3	Küf-çürük yok
2	Var-rahatsız etmiyor
1	Var-rahatsız ediyor



Botrytis cinerea (küf) çürümesi

Büzüşme/Solma Değerlendirme

	Skala	
Büzüşme/solma yok (diri)	5	Kesinlikle kabul edilebilir
Hafif şiddette büzüşme-solma	4	Kabul edilebilir
Orta şiddette büzüşme-solma	3	Sınır koşullarda kabul edilebilir
Şiddetli büzüşme-solma	2	Kabul edilemez
Kesinlikle kabul edilemeyecek seviyede	1	Kesinlikle kabul edilemez

Genel Tüketilebilirlik

	Skala
Tüketilebilirlik çok iyi	5
Tüketilebilirlik iyi	4
Sınır koşullarda tüketilebilir	3
Tüketilebilirlik kötü	2
Kesinlikle tüketilemez	1

EK C : MARUL DUYUSAL DEĞERLENDİRME FORMU

Damarlarda kararma

	Puan	
Hiç kararma yok	5	Kesinlikle kabul edilebilir
Hafif şiddette yerel kararma	4	Kabul edilebilir
Orta şiddette yaygın kararma	3	Sınır koşullarda kabul edilebilir
Yaygın ve şiddetli kararma	2	Kabul edilebilir
Yaygın ve çok şiddetli kararma	1	Kabul edilemez



Yapraklarda beneklenme

	Puan	
Hiç beneklenme yok	5	Kesinlikle kabul edilebilir
Yaprak alanının %1-25'i arasında beneklenme	4	Kabul edilebilir
Yaprak alanının %25-50'i arasında beneklenme	3	Sınır koşullarda kabul edilebilir
Yaprak alanının %50-75'i arasında beneklenme	2	Kabul edilebilir
Yaprak alanının %75'inden fazla beneklenme	1	Kabul edilemez



Büzüşme-Solma

	Puan	
Hiç büzüşme yok	5	Kesinlikle kabul edilebilir
Yaprak uçlarında hafif büzüşme-solma	4	Kabul edilebilir
Yaprak uçlarında ve gövdesinde orta şiddette büzüşme-solma	3	Sınır koşullarda kabul edilebilir
Yaprak uçlarında ve gövdesinde şiddetli büzüşme-solma	2	Kabul edilemez
Tamamen büzüşmüş ve kesinlikle kabul edilemeyecek seviyede	1	Kesinlikle kabul edilemez

Küf-Çürük

Fungal ya da bakteri kaynaklı olabilmektedir. Fungal kaynaklı küflenmede yüzeyde gri pamukçuk şeklinde oluşur. Bakteriye gelişimde ise, yüzeyde mukoza oluşur ve kayganlık hissi verir. Ayrıca siyah bir çürüme olarak da kendini gösterir. Siyah çürümede yapraklarda aşırı yumuşama ve ezilme görülebilir.

Küf-Çürük	Puan
Yok	3
Var ama rahatsız etmiyor	2
Var ve rahatsız ediyor	1



Gri küf oluşumu



Bakteri kaynaklı çürüme

Genel Tüketilebilirlik

	Puan
Tüketilebilirlik çok iyi	5
Tüketilebilirlik iyi	4
Sınır koşullarda tüketilebilir	3
Tüketilebilirlik kötü	2
Kesinlikle tüketilemez	1

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Işıl USLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa / 08.01.1989

E-Posta: isiluslu@windowslive.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

Makine Mühendisliği (2006-2011)

Mesleki Deneyim: 2013 -... Arge Mühendisi, Arçelik A.Ş.

2011-2013 Proje Asistanı, Arçelik A.Ş.



