

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANTRİFÜJ KUVVET ALTINDA TEKSTİL İÇERİSİNDEKİ SU
HAREKETİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Fatih KASAP

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2018



İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANTRİFÜJ KUVVET ALTINDA TEKSTİL İÇERİSİNDEKİ SU
HAREKETİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Fatih KASAP
(503112010)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

ŞUBAT 2018



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503112010 numaralı Doktora Öğrencisi Fatih KASAP, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SANTRİFÜJ KUVVET ALTINDA TEKSTİL İÇERİSİNDEKİ SU HAREKETİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. A. Feridun ÖZGÜÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İ. Cem PARMAKSIZOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Murat HOŞÖZ
Kocaeli Üniversitesi

Prof.Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 29 Aralık 2017
Savunma Tarihi : 14 Şubat 2018





Aileme,



ÖNSÖZ

Santrifüj yöntemler ile katı ve sıvının birbirinden ayrılması işlemi son dönemlerde önemli araştırma konularından birisi olmuştur. Özellikle kimya, tekstil ve maden gibi farklı sektörlerde uygulamaları yer almaktadır. Çamaşır makinelerinde yıkama işlemi tamamlandıktan sonra da santrifüj su uzaklaştırma işlemi uygulanmaktadır. Doktora tez çalışmaları kapsamında; evsel çamaşır makinesi ürün standardında tanımlanan pamuklu yüklerin santrifüj kuvvet altında gözenekliliğin değişimine bağlı olarak su uzaklaştırma karakteristiği deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Tecrübesi ve bilgi birikimiyle tez çalışmaları sırasında her zaman destek veren değerli hocam Sn. Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR' e, olumlu yorumları ve yönlendirmeleri için saygıdeğer hocalarım Sn. Prof. Dr. A. Feridun ÖZGÜÇ ve Sn. Prof. Dr. Murat HOŞÖZ' e teşekkür ederim.

Doktora tezi kapsamında araştırmalar için ihtiyaç duyulan maddi desteği sağlayan başta Arçelik A.Ş. Ar-Ge Direktörü Sn. Nihat BAYIZ, Beko Çin İşletmesi Direktörü Sn. Dr. Faruk BAYRAKTAR, Mekanik Teknolojiler Grup Yöneticisi Sn. Dr. Emre OĞUZ, Makine Dinamiği & Temizleme Teknolojileri Yöneticisi Sn. Metin GÜL, Temel Bilimler Aile Lideri Sn. Zehra ÜLGER ve Temizleme Teknolojileri Aile Lideri Sn. Dr. Önder BALİOĞLU olmak üzere tüm yönetici ve takım liderlerine; deneysel çalışmalar sırasındaki destekleri için Sn. Mehmet KAYA, Sn. Murat ELGÜN, Sn. Özcan HATİPOĞLU, Sn. Turan SENDİNÇ ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Doktora tez çalışmalarım sırasında büyük bir fedakârlık örneği gösteren, karşılaştığım zorluklar sırasında bana destek veren ve benden sevgilerini hiç eksik etmeyen sevgili eşim Kübra KARADAĞ KASAP ve aileme şükranlarımı sunarım.

Şubat 2018

Fatih KASAP
(Yüksek Mak. Müh.)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER	xi
İNDİSLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR VE PATENT ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 Tekstil Üzerinde Kalan Su Miktarına Etkiyen Parametreler.....	5
2.2 Yoğunluk ve Gözenekliliğin Belirlenmesi	7
2.3 Akış Rejimi, Doyma Sayısı ve Kılcal Basıncın Belirlenmesi	8
2.4 Patent Araştırması	12
3. DÖNEN GÖZENEKLİ ORTAMDAKİ AKIŞIN GENEL KORUNUM	
DENKLEMLERİ	15
3.1 Gözenekli Ortam ve Genel Korunum Denklikleri	15
3.2 Dönen Eksen Takımında Korunum Denklikleri.....	18
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
4.1 Gözönüne Alınan Tekstilin Fiziksel Özellikleri.....	23
4.2 Sıkma İndeksi ve Doyma Sayısı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	29
4.3 Basınca Bağlı Gözeneklilik Değişiminin Belirlenmesi.....	30
4.4 Santrifüj Su Uzaklaştırma Deney Düzeneğinin Hazırlanması	37
4.5 Deney Numuneleri ve Gözenekli Ortamın Hazırlanışı	40
4.6 Deneylerin Yapılma Şekli ve Deney Listesi	42
4.7 Sıkma İndeksi Değişiminin İncelenmesi.....	46
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ.....	57
5.1 Kütle Korunum Denklemleri.....	58
5.2 Doyma Sayısı Değişiminin İncelenmesi	62
5.3 Momentum Korunum Denklemleri	70
6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	85
6.1 Zamana Bağlı Çözümün Geliştirilmesi	86
6.2 Deneysel ve Hesaplanan Sonuçların Karşılaştırılması.....	90
6.3 Farklı Tahrik Gruplarında Yapılan Çalışmalar ile Simülasyonun	
Karşılaştırılması	93
6.4 Alternatif Tahrik Grubu Tasarımı	94
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR	101
EKLER.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	143



SEMBOLLER

A_p	: Pres alanı (m^2)
b_f	: Sıvı faz için temsili değişken
b_s	: Katı faz için temsili değişken
C	: Yerçekimi birimi cinsinden santrifüj ivme (m/sn^2)
c	: Kıvrım oranı (-)
d	: Fiber çapı (m)
Da	: Darcy sayısı
E	: Ekman-Darcy sayısı
Ek	: Ekman sayısı
F	: Kuvvet (N)
f	: Kıvrım yüksekliği (mm)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/sn^2)
h	: Tambur genişliği (m)
K	: Sabit sayı
k	: Geçirgenlik (m^2)
L	: Gözenekli ortamın kalınlığı (m)
ΔL	: Fark kalınlık (m)
m	: Kütle (kg)
m_d	: Yıkama öncesi kuru tekstil kütlesi (kg)
m_d''	: Birim alan başına kuru tekstil kütlesi (kg/m^2)
m_l	: Sıvı kütlesi (kg)
$\dot{m}_o$	: Sıkma sırasında uzaklaştırılan suyun kütleli debisi (kg/sn)
m_s	: Katı kütlesi (kg)
m_s''	: Birim alan başına katı kütlesi (kg/m^2)
m_w	: Sıkma sonu kütle (kg)
N	: Dönme hızı (d/dk)
N_{cap}	: Kılcal (Kapilleri) sayı
n_k	: Katman sayısı
P	: Basınç (Pa)
P_c	: Kılcal basınç (Pa)
P_s	: Santrifüj basınç (Pa)
P_π	: Boyutsuzlaştırılan basınç terimi
$\dot{q}$	: Hacimsel debi (m^3/sn)
R	: Sıkma indeksi
R_∞	: Deney sonu sıkma indeksi
$\vec{r}$	: Silindirik koordinatlarda konum vektörü (m)
r_c	: Gözenekli ortam yarıçapı (m)

r_i	: Gözenekli ortam iç yarıçapı (m)
r_o	: Tambur yarıçapı (m)
r_π	: Boyutsuzlaştırılan yarıçap terimi
S	: Doyma sayısı
s	: Sıklık (adet/cm)
S_0	: Eşdeğer parçacık boyutu (m^2/m^3)
S_∞	: İndirgenemez doyma sayısı
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	: Zaman (sn)
T_{tex}	: İplik numarası (tex)
$\vec{u}$	: Dönen eksen takımındaki hız vektörü (m/sn)
$\vec{u}_f$	: Sabit eksen takımındaki hız vektörü (m/sn)
V	: Hacim (m^3)
V_l	: Gözenekli ortamda bulunan su hacmi (m^3)
V_p	: Gözenek hacmi (m^3)
V_p'	: Su dolu gözenek hacmi (m^3)
V_o	: Temsili hacme göre akışkana ait ortalama fiziksel büyüklükler
V_s	: Katı hacmi (m^3)
V_t	: Toplam hacim (m^3)
V_t'	: Su dolu gözenekli ortamın toplam hacmi (m^3)
$\vec{v}_f$	: Suyun gözenekli ortamdaki hızı (m/sn)
v_{fm}	: Tambur çıkışında ortalama su hızı (m/sn)
$\vec{x}$	: Temsili birim hacim içindeki konum
$\vec{x}_0$	: Hacim içinde ortalaması alınmış büyüklüğün tanımlı olduğu konumu
$\vec{z}$	: Koordinat yönü
α	: Spesifik direnç (m/kg)
β	: Sabit sayı
γ	: Atmosferden emilen nem oranı (%)
δ	: Tek kat çarşafın kalınlığı (m)
ε	: Gözeneklilik (porozite)
μ_l	: Suyun viskozite (Pa.sn)
v	: Kütle başına düşen hacim (m^3/kg)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
ρ_l	: Su yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_m	: Ortalama yoğunluk (kg/m^3)
ρ_s	: Katı yoğunluğu (kg/m^3)
σ	: Yüzey gerilimi (N/m)
σ_{rr}	: Katı faza r yönünde uygulanan basınç (N/m^2)
$\vec{\omega}$	: Açısal hız (1/sn)

İNDİSLER

d	:	Kuru
f	:	Akışkan
fm	:	Akışkanın ortalama
i	:	Başlangıç
k	:	Katman
l	:	Sıvı
m	:	Ortalama
p	:	Gözenek
r	:	r doğrultusunda
s	:	Katı
t	:	Toplam
w	:	Sıkma sonunda ıslak durum
∞	:	Deney sonunda gelinen durum
θ	:	θ açısı doğrultusunda



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Yıkayıcı kurutucu ürün senaryosu.....	2
Çizelge 4.1 : Çarşafın özellikleri (EN:60456, 2011)	24
Çizelge 4.2 : Farklı fiber tipleri için yoğunluk değerleri (Nimkar ve Preston, 1950)	27
Çizelge 4.3 : Farklı fiber tipleri için γ (%) değerleri (Ford, 1966)	28
Çizelge 4.5 : Deneylerde kullanılan numune setlerinin listesi	41
Çizelge 4.6 : Numune seti ve yük miktarı arasındaki ilişki	42
Çizelge 4.7 : Deney listesi	43
Çizelge 4.8 : Sıcaklık, devir ve yük miktarına bağlı sıkma indeksi değişimi.....	47
Çizelge 5.1 : Deney sonunda hesaplanan gözeneklilik ve indirgeneme doyma sayısı değerleri	66
Çizelge 5.2 : Sıkma indeksi, indirgenemez doyma sayısı ve kılcal basınç değerleri	79
Çizelge 6.1 : DeneySEL ve hesaplanan doyma sayısı ve sıkma indeksi değerlerinin karşılaştırılması	90
Çizelge 6.2 : Farklı boyutlara sahip çamaşır makinelerinin karşılaştırılması.....	93
Çizelge 6.3 : DeneySEL ve simülasyon çalıştırılmasının karşılaştırılması.....	94
Çizelge 6.4 : Alternatif tambur tasarım önerileri.....	95
Çizelge B.1 : Deney öncesi kuru kütle, deney sonu toplam kütle, sıkma sırasında su sıcaklığı ve deney sonu hesaplanan sıkma indeksi değerleri.....	108
Çizelge B.2 : Deney 1 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	109
Çizelge B.3 : Deney 2 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	110
Çizelge B.4 : Deney 3 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	111
Çizelge B.5 : Deney 4 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	112
Çizelge B.6 : Deney 5 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	113
Çizelge B.7 : Deney 6 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	114
Çizelge B.8 : Deney 7 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	115
Çizelge B.9 : Deney 8 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	116
Çizelge B.10 : Deney 9 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	117
Çizelge B.11 : Deney 10 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	118
Çizelge B.12 : Deney 11 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	119
Çizelge B.13 : Deney 12 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	120
Çizelge B.14 : Deney 13 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	121
Çizelge B.15 : Deney 14 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	122
Çizelge B.16 : Deney 15 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	123
Çizelge B.17 : Deney 16 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	124
Çizelge B.18 : Deney 17 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	125
Çizelge B.19 : Deney 18 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.....	126
Çizelge I.1 : Suyun fiziksel özellikleri	141



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Elektrikli ev aletleri elektrik tüketimi (BEYSAD, 2011).	1
Şekil 2.1 : Sıkma sırasında suya doyma ve kılcal basıncı değişimi (Hwang, Chu ve Lu, 2001).	10
Şekil 2.2 : EP2053152 (A1) patent başvurusu kanat tasarımı.	12
Şekil 2.3 : EP3004448 (A1) patent başvurusu sistem tasarımı.	13
Şekil 2.4 : EP2860297 (A1) patent başvurusu buhar sistemi.	13
Şekil 2.5 : KR101319148 (B1) patent başvurusu perfore sac yapısı.	14
Şekil 2.6 : DE112014003395 (T5) patent başvurusu dengeleme sistemi.	14
Şekil 4.1 : Mikroskop altında iplik çapının belirlenmesi.	25
Şekil 4.2 : Mikroskop altında tekstil kalınlığının belirlenmesi.	25
Şekil 4.3 : Çok sayıda katman için birim kalınlığın tayini.	26
Şekil 4.4 : Zwick Roell Z020 model basma ölçüm cihazı.	31
Şekil 4.5 : Farklı adetlerdeki katmanlar için efektif basınca bağlı gözeneklilik değişimi.	34
Şekil 4.6 : Pres deneyinde kullanılan gözenekli ortam için kuvvet dengesi.	34
Şekil 4.7 : $-\ln(\epsilon)$ ile $\ln(Pg/Lps)$ arasındaki ilişki.	36
Şekil 4.8 : Gözeneklilik hesabında uydurulan eğrinin deneysel veriler ile karşılaştırılması.	37
Şekil 4.9 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.	38
Şekil 4.10 : Deney düzeneğinde kullanılan güç analizörü.	38
Şekil 4.11 : Deney düzeneğinde kullanılan debimetre ve devir ölçer.	39
Şekil 4.12 : Tambura kaynatılan paslanmaz cıvataların görünümü.	39
Şekil 4.13 : Deney düzeneğinin görünümü.	40
Şekil 4.14 : Deneylerde kullanılacak numune setleri.	41
Şekil 4.15 : Deneylerde kullanılacak numunelerin tambura yerleşimi.	42
Şekil 4.16 : 2kg yük, 20 °C su sıcaklığı ve 600 d/dk tambur hızı koşulu için gerçekleştirilen deney.	45
Şekil 4.17 : T=20 °C deney başı su sıcaklığı için farklı kuru yük miktarı ve devirde yükte kalan su miktarı.	46
Şekil 4.18 : Denton (1974a) ile mevcut çalışmanın karşılaştırılması.	49
Şekil 4.19 : T=20 °C deney başı su sıcaklığı için farklı yük miktarı ve devirde deney sonu sıkma indeksinin araştırılması.	50
Şekil 4.20 : Farklı yük miktarı ve su sıcaklığı için sıkma indeksinin araştırılması. ..	51
Şekil 4.21 : 8 kg (8,02 kg) yükün farklı devirlerde zamana bağlı yükte kalan su kütlelerinin değişimi (T=20 °C sıkma başında sıcaklık için).	52
Şekil 4.22 : 1000 d/dk görünen tambur hızında farklı yüklerde zamana bağlı su kütlelerindeki değişim (T=20 °C sıkma başında sıcaklık için).	53
Şekil 4.23 : 8 kg (8,02 kg) yükün farklı devirlerde zamana bağlı sıkma indeksi değişimi (T=20 °C sıkma başında sıcaklık için).	54
Şekil 4.24 : 1000 d/dk tambur hızında farklı yüklerde zamana bağlı sıkma indeksinin değişimi (T=20 °C için).	55

Şekil 5.1 : Problemin temsili görünümü.	58
Şekil 5.2 : 2kg, 4kg ve 8 kg yük için tamburdan çıkan suyun hızı.	62
Şekil 5.3 : $S_m \geq 1$ durumunda su ve gözenekli ortamın iç çapları.	63
Şekil 5.4 : $S_m < 1$ durumunda su ve gözenekli ortamın iç çapları.	65
Şekil 5.5 : Farklı yükler için devire bağlı indirgenemez doyum değişimi ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ için).	67
Şekil 5.6 : 8 kg yük ve 1400 d/dk için gözenekliliğin değişimi.	68
Şekil 5.7 : 8 kg yük ve 1400 d/dk için gözeneklilik ve doyma sayısının değişimi.	69
Şekil 5.8 : 8 kg yük için farklı devirlerde doyma sayısı değişimi.	70
Şekil 5.9 : Katı için basınca karşılık şekil değiştirme oranı.	73
Şekil 5.10 : 8 kg 1400 d/dk. deneyi için Reynolds sayısının değişimi.	76
Şekil 5.11 : Santrifüj basınç ve kılcal basıncın gösterimi.	78
Şekil 5.12 : Kılcal basınç ile indirgenemez doyma sayısı arasındaki ilişki.	80
Şekil 5.13 : Deneyisel olarak elde edilen ve hesaplanan kılcal basınç.	82
Şekil 5.14 : Deneyisel verilerden elde edilen geçirgenlik değeri.	83
Şekil 6.1 : Girdi parametrelerinin belirlenmesi.	87
Şekil 6.2 : Çözümleme algoritması.	89
Şekil 6.3 : 4 kg yük 1000 d/dk sıkma eğrisi.	91
Şekil 6.4 : 4 kg yük 1000 d/dk debi eğrisi.	91
Şekil 6.5 : 4 kg yük 1400 d/dk debi eğrisi.	92
Şekil 6.6 : 4 kg yük 1400 d/dk sıkma eğrisi.	92
Şekil 6.7 : Farklı tahrik grupları için yürütülen deneyisel çalışmalar.	94
Şekil 6.8 : Alternatif tambur tasarım simülasyonu.	95
Şekil A.1 : Pierce modeli (Behera ve Hari, 2010).	106
Şekil C.1 : $\ln(\epsilon)$, $\ln(P/gpL)$ ve katman sayısı arasındaki ilişki.	127
Şekil D.1 : Kılcal basıncın elde edildiği regresyon analizi.	128
Şekil E.1 : Katı faz için şekil değiştirmeye neden olan gerilmenin belirlendiği regresyon analizi.	129
Şekil F.1 : Geçirgenliğin belirlendiği regresyon analizi.	130
Şekil H.1 : 2 kg yük 600 d/dk sıkma eğrisi.	134
Şekil H.2 : 2 kg yük 600 d/dk debi eğrisi.	134
Şekil H.3 : 2 kg yük 1000 d/dk sıkma eğrisi.	135
Şekil H.4 : 2 kg yük 1000 d/dk debi eğrisi.	135
Şekil H.5 : 2 kg yük 1400 d/dk sıkma eğrisi.	136
Şekil H.6 : 2 kg yük 1400 d/dk debi eğrisi.	136
Şekil H.7 : 4 kg yük 600 d/dk sıkma eğrisi.	137
Şekil H.8 : 4 kg yük 600 d/dk debi eğrisi.	137
Şekil H.9 : 8 kg yük 600 d/dk sıkma eğrisi.	138
Şekil H.10 : 8 kg yük 600 d/dk debi eğrisi.	138
Şekil H.11 : 8 kg yük 1000 d/dk sıkma eğrisi.	139
Şekil H.12 : 8 kg yük 1000 d/dk debi eğrisi.	139
Şekil H.13 : 8 kg yük 1400 d/dk sıkma eğrisi.	140
Şekil H.14 : 8 kg yük 1400 d/dk debi eğrisi.	140

SANTRİFÜJ KUVVET ALTINDA TEKSTİL İÇERİSİNDEKİ SU HAREKETİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, pamuklu tekstil katmanlarından oluşan gözenekli ortamdan, santrifüj kuvvet altında suyun uzaklaştırılması deneysel olarak incelenmiştir. Gözenekli ortamda bulunan su ve katı fazın davranışı ile ilgili parametreler ayrıntılı olarak ortaya konulmuştur. Gözenekli yapı içinde kalan su miktarının hesaplanmasına yönelik matematik model geliştirilmiştir.

Santrifüj kuvvet altında tekstilde kalan su miktarını azaltmaya yönelik literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır. Devir, kuru katı faz ile su miktarı (yük miktarı) ve yüzey gerilimine bağlı deneysel çalışmalar mevcuttur. Ancak zamana bağlı sistematik bir çözüm yöntemine rastlanmamaktadır. Literatürde, sadece deneysel çalışmaların yapıldığı koşullarda geçerli yarı ampirik ifadeler sunulmaktadır. Diğer taraftan, çamaşır makinesinde sıkma sonunda tekstil üzerinde kalan su miktarını azaltmaya yönelik, D06F 35 patent sınıfı altındaki başvurularda ise genel olarak suyun ısıtılması, buhar kullanımı ve algoritma optimizasyonu gibi yöntemler ile karşılaşılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında literatürden farklı olarak kılcallık ve değişken gözeneklilik etkilerini de içine alan, santrifüj kuvvet altında gözenekli ortam akış modeli oluşturulmuştur. Pamuklu tekstil katmanlarından oluşturulan çeşitli gözenekli yapılarda su akışı ve katı fazın şekil değiştirmesi ile ilgili parametrelerin belirlenmesi için deney düzenekleri hazırlanmıştır.

EN60456:2011 standardında tanımlanan pamuklu yapıdaki çarşaf lar üst üste dizilerek gözenekli ortam oluşturulmuştur. Pamuklu dokumada kullanılan iplik ve çarşaf katmanı mikroskop altında incelenerek iplik çapı ve katman kalınlığı belirlenmiştir. Santrifüj kuvvet altında gözenekli yapı ezildiğinden toplam kalınlık azalmakta ve gözeneklilik de değişmektedir. Bu durumu simüle etmek için farklı sayıdaki katmanlardan oluşturulan gözenekli yapının basınç altında kalınlık ve gözeneklilik değişimi ölçülmüştür. Ölçüm değerlerinin analizi edilerek uygun boyutsuz sayılar belirlenmiş ve regresyon analizi ile gözenekliliğ in basınçla değişimini veren ilişki elde edilmiştir.

Santrifüj kuvvet altında gözenekli katmanın sıkılmasının deneysel olarak incelenmesi amacıyla çamaşır makinesi benzeri bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Çarşaf katmanları farklı boyutlarda ve adetlerde kesilerek tambur çeperine monte edilebilecek şekilde deney setleri (yük) oluşturulmuştur. Bu yükler kullanılarak homojen yapıda bir gözenekli ortamdan su uzaklaştırma deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında yük miktarı, devir ve sıcaklık gibi parametrelerin su uzaklaştırma hızı ve gözenekli yapıda kalan su miktarına etkileri incelenmiştir.

Deneyler sonunda elde edilen ham veriler literatürde tanımlı olan sıkma indeksi ve doyma sayısına dönüştürülerek analiz edilmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır. Deney

sonunda elde edilen sıkma indeksi değerlerinin devir arttıkça azaldığı, yük miktarı azaldıkça arttığı görülmüştür. Sıkma indeksinin zamana bağlı olarak değişimine göre ivmelenme sırasında gözenekli ortamdan çıkan su miktarı artmakta ve sıkma indeksinde büyük bir düşüş meydana gelmektedir. Tambur hedeflenen devire ulaştığında, sıkma indeksinin düşme hızı azalmakta ve deneyin sonuna doğru asimptota oturmaktadır.

Presle yapılan deneyden elde edilen gözeneklilik-basınç değişimi ilişkisinden doyma sayısının elde edilebilmesinde yararlanılmıştır. Tambur devir sayısına bağlı olarak gözenekli yapıda kalan su miktarının (indirgenemez doyum) azaldığı belirlenmiştir. İvmelenme safhası sonuna doğru, doyma sayısının birden küçük bir değere indiği görülmüştür. Gözenekli yapı boşluklarında bulunan su miktarını gösteren doyma sayısının birden küçük olması yapıdaki boşluklara bir miktar havanın dolduğunu göstermektedir. Hedeflenen tambur devir hızına ulaşıldığında ise doyma sayısı birden küçük bir değere asimptotik olarak yaklaşmıştır.

Dönen eksen takımında gözenekli katı ve sıvı faz için ayrı ayrı süreklilik ve momentumun korunum denklemleri yazılmıştır. Katı faz için momentum denklemi integral formda çözümlenerek şekil değiştirme ile gerilme arasındaki ilişki belirlenmiş ve deneysel sonuçlar yardımıyla gerilme-şekil değiştirme denklemi elde edilmiştir. Bu denklem katı fazın santrifüj etki altındaki şekil değiştirme davranışını ortaya koymaktadır.

Sıvı faz için süreklilik denkleminin integral ifadesi yardımıyla tamburdan atılan suyun ortalama hızını veren denklem belirlenmiştir. Bu denklemden yararlanılarak deneysel veriler analiz edildiğinde, tamburdan çıkan suyun ivmelenme sırasında maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Yük miktarı arttıkça maksimum hız değerinin arttığı belirlenmiştir.

Sıkma işleminin sonunda, gözenekli ortamdan su çıkışı durduğundan kılcal basınç santrifüj basınca eşit olmaktadır. Regresyon analizi yapılarak kılcal basınç, devir, yarıçap, katman sayısı ve kalan su miktarı boyutsuz sayılarla ifade edilmiş ve aralarındaki ilişkiyi veren bir korelasyon elde edilmiştir. Sıvı faz için hesaplanan Reynolds sayısı çok düşük değerde olduğu için akış rejiminin Darcy rejimi olduğu gösterilmiştir. İntegral formdaki momentum denkleminde ivme, kılcal basınç, santrifüj basınç ve Darcy terimleri arasındaki ilişki elde edilmiştir. Kılcal basıncın santrifüj kuvvete eşit olduğu kabul edilerek, bu ilişkiden geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Regresyon analizi ile geçirgenlik değerleri ve doyma sayısı arasında üstel bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur.

Matlab yazılımı kullanılarak gözenekli ortamda santrifüj kuvvetler altında su hareketi ve kalan su miktarını belirlemek için bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir. Korunum denklemleri ve deneysel olarak bulunmuş olan ortama ait ilişkilerle birlikte algoritmada beş adet denklem kullanılmaktadır. Bu denklemler gözenekli ortamdan santrifüj etki ile suyun uzaklaştırılmasını ve katının ezilme davranışını ortaya koymaktadır. Tambur çapı, tambur derinliği, sıkma algoritması, sıcaklık ve yük miktarı bu matematik modelin girdileridir. Bu modelin çözümünden hesaplanan sıkma indeksi değerleri deneysel değerlerle karşılaştırıldığında aradaki farkın en fazla $\pm 5\%$ olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte modelden elde edilen zamana bağlı uzaklaştırılan su debisi ve sıkma indeksi değerleri de deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu çıkmıştır.

Deneysel sonuçlarımızla gerekli karşılaştırmaları yapılan Matlab yazılımı ile farklı boyutlara sahip tambur için hesaplamalar yapılmış ve literatürdeki deney sonuçları ile

karşılaştırılmıştır. Hesaplanan değerlerin deneysel sonuçlardan en fazla $\pm 4\%$ farklı olduğu tespit edilmiştir.





INVESTIGATION OF WATER FLOW IN POROUS TEXTILE UNDER CENTRIFUGAL FORCES

SUMMARY

Dewatering of cotton textile with variable porosity under centrifugal forces has been examined theoretically and experimentally within the scope of the doctoral study. In this way, experimental studies have been carried out to determine the porosity under compression. Then, dehydration rate of textile was measured according to input parameters. Afterwards, conservation equations were written and they were simplified by considering the physics of phenomenon. At the end of study, mathematical models were developed in order to calculate the amount of remaining water on the textile and dewatering rate time dependently.

When previous studies in the literature were examined, it was seen that there were some researches which aim to minimize the amount of water remaining on the textile under centrifugal forces. Experimental results mentioned in the studies were generally considered parameters such as spinning speed, amount of load and surface tension. However, there was no time dependent solution method by creating necessary dimensionless number. Even though, there are different parametric studies in order to decrease water level after spinning, there is not any valid comprehensive mathematical model. The semi-empirical statements are valid only in the space where experimental work has been done. Additionally, the patent applications under D06F35 patent class were investigated to reduce the amount of water on the textile after spinning process. It is observed that the main topics are related with water heating, steam applications, algorithms and perforated drum forms.

In the thesis study, it is aimed to develop porous media flow model under centrifugal force including capillary pressure and variable porosity effects unlike the literature. Experimental setups were prepared in order to obtain the effects of mentioned parameters and determine the flow regime during dewatering. Experimental studies were basically carried out in two steps.

In the experimental studies, test materials were preferred to demonstrate deformable porosity under centrifugal loading and define saturation effected by capillary number. Because of above mentioned properties, the bed sheets defined in EN60456:2011 washing standard for household appliances were used for tests. The thickness of single layer and diameter of fibers were measured by optical device. Same parameters were calculated by utilizing Pierce model. It was observed that the measured and calculated values were parallel to each other. Afterwards, porous media was formed by stacking the sheets on top of each other. Then, the porosity of textile specimen was calculated by using predetermined calculations. However, textile porosity shows variable property due to centrifugal forces. Therefore, different number of textile samples were exposed to compression tests. Force balance was written down for the analysis of the measurement variables and dimensionless expressions in convenient form were

determined. The porosities were correlated with input parameters such as thickness, pressure and number of layers as a result of regression analysis performed in Minitab.

In the second phase of experimental studies, a test setup based on washing machine was prepared. Test sets (loads) which were formed by cutting the sheets in different numbers and sizes, could be mounted on to the periphery of the washing machine's drum. A homogeneous porous media was simulated by using these loads during dewatering tests. In the test setup, washing machine was settled onto platform and the motorized valve is connected under tub. When the control system commanded the water evacuation before spinning, the valve was motorized and it ensured to pass water onto scale. There was also data acquisition system which was also connected to experimental setup to measure drum speed, temperature, inlet water, outlet water and power consumption.

In the experimental studies, the effects of parameters such as the amount of load, spin speed and temperature on water removing rate and amount of water remaining on the textile were aimed to examine. The acceleration rate of drum was the main influential parameter on centrifugal pressure and porosity of textile so that wide range between 600-1400 rpm were planned to investigate during tests. The number of sheet layers was also another powerful input defined in the summary of literature. Therefore, the mass of test load was changed to simulate number of sheet layers. The third factor was the temperature to acquire impression of water viscosity and surface tension on desaturation. As a result, full factorial experimental design was created and 18 tests were performed.

Raw data obtained from the experiments was analyzed by converting to spinning index and saturation number which were defined in the literature. When our experimental study was compared with results obtained by Denton (1974a), it was noticed that the of spinning index values of both studies were close to each other. Thus, performed experimental study was verified by comparing with the literature.

When spinning index obtained from the experiment was examined, it was seen that spinning index was decreasing while target spin speed increases. In addition, spinning index increased when the amount of load decreased. In fact, the change of spinning index versus time was analyzed, it was seen that most of the water moved away from the porous medium during acceleration and major decrease occurred in the spinning index. As the drum reached the target spin speed, reduction rate of the spinning index decreased and approached the asymptote at the end of the experiment. Same experimental data was analyzed again by transforming into the saturation number. In order to obtain the saturation number, equation for calculating the porosity after press experiment was utilized. It was determined that irreducible saturation obtained from the experiment reduces similarly, as the spin speed of the drum was increased. In the initial phase of spinning, saturation number increases due to the reduction of porosity. During acceleration phase, it was seen that saturation number suddenly decreases. At the target spin speed of drum, saturation number approached the asymptote value towards the end of spin process.

After the experimental study, conservation of momentum and continuity equations were written down separately for solid and liquid phases on the rotating axis. When the continuity equation for the solid phase was solved, it appeared that there was no solid output from the system. Afterwards, the momentum equation for the solid phase was solved and the relationship between strain rate and pressure difference was obtained. When the continuity equation for the liquid phase was solved, the equation

that showed the speed of water removing from the drum was obtained. As the experimental data is analyzed by using this equation, it is seen that speed of the water removed from the drum is at maximum level during acceleration. It was determined that the maximum dewatering speed value increased, as the amount of test load increased. When Reynolds number for the liquid phase was calculated, flow regime was determined as Darcy since the obtained value was at low level. Then, the momentum equation was written in the integral form and mathematical operations were performed. Finally, an equation that contained acceleration, capillary pressure, centrifugal pressure and Darcy terms were obtained.

After the reduction of momentum equation, capillary pressure and permeability of textile were aimed to be determined from experimental data. At the end of the spin process, capillary pressure became equal to centrifugal pressure since water output from the porous media approaches zero. In this case, necessary dimensionless numbers were created by utilizing momentum equation. Afterwards, regression analysis in Minitab was done and the equality that explains the capillary pressure is obtained. It was seen that capillary pressure is increasing while remaining moisture content of porous media increased. By utilizing the experimental data since the beginning of spin extraction, the permeability of textile was correlated. The permeability and capillary pressure expressions were achieved by examining equations in dimensionless forms.

After experimental studies and reduction of conservation equations, a simulation program was developed by using Matlab. The inputs of the simulation were drum diameter, drum width, spinning algorithm, temperature and amount of load. In every step, porosity was calculated iteratively and it was written down in continuity and momentum equations. Then, permeability and capillary pressure parameters were calculated by utilizing equations obtained in data reduction section. Finally, the dewatering rate per time step could be achieved. When the numerical and experimental studies were compared, It was shown that results are parallel and the difference between the experimental and the calculated values was at most $\pm 5\%$. As, the graphs of time dependent water flow and spinning index were drawn, it was seen that obtained curves were compatible with the experimental studies.

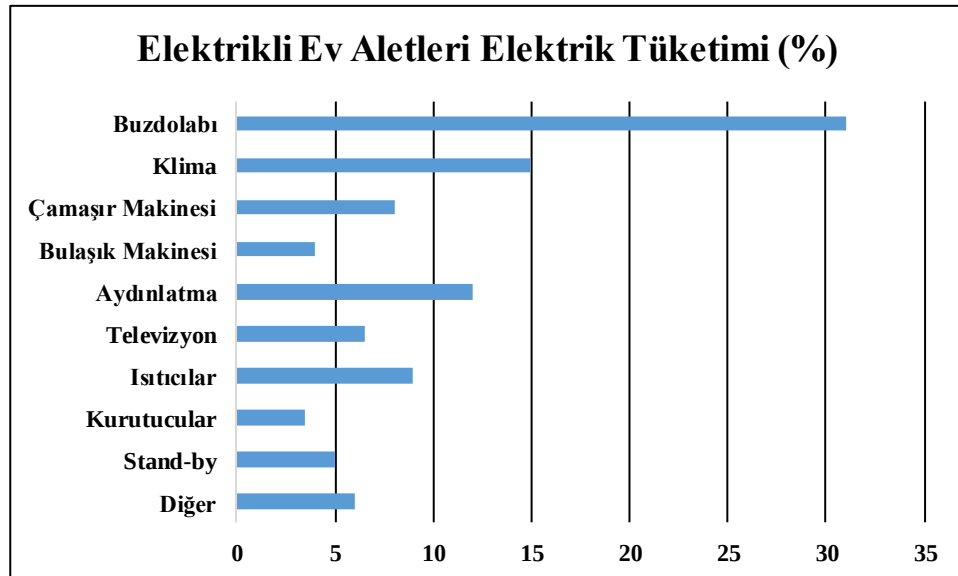
In conclusion, developed software was compared with experimental results conducted at washing systems with different drum sizes. At this point, 3 product group with different capacities were chosen. Although experiments were not conducted with larger diameter than 480 mm diameter and higher than 1400 rpm drum speed, since nondimensionalizations were applied during modeling, it was expected that simulation converges at these points and parallel results with experiments are obtained. When measurement and simulation results were compared, it was obtained that the results were different in the range of $\pm 4\%$. When the data from experimental results were nondimensionalized conveniently, it was determined that correct results were obtained with the prepared simulation. The methods are investigated to increase the spinning efficiency, by using the software. It was calculated that the drum investigation with 520 mm drum diameter and 275 mm drum deepness decreased the remaining moisture content thoroughly. On the other hand, the reduction of surface tension could be evaluated. For the further studies, the effects of chemicals in order to decrease the surface tension could be investigated experimentally.



1. GİRİŞ

Tekstil üzerinde kalan su miktarını azaltmak amacıyla uygulanan mekanik yöntemlerden bir tanesi de santrifüj metottur. Santrifüj yöntemlerin kullanımı ile suyun uzaklaştırılması tekstil ve kimya sektörlerinde kullanılmaktadır. Santrifüj kuvvetler sonucunda tekstilin üzerinde kalan toplam su kütlesinin yıkama işlemi öncesinde ölçülen ağırlığına oranı EN60456:2011 standardı içerisinde “Sıkma İndeksi” olarak tanımlanmaktadır. Sıkma indeksi ne kadar düşük olursa tekstil üzerinde sıkma işlemi sonunda kalan su miktarı da o oranda azalacaktır. Bu sebepten dolayı sıkma işlemi sonunda tekstil üzerinde kalan nem miktarı kurutma sırasında harcanan enerji tüketimi açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Konutlarda kullanılan elektrik enerjisi konusunda Beyaz Eşya Tüketicileri Derneği’nin (BEYSAD, 2011) gerçekleştirdiği araştırmaya göre çamaşır makinası ve kurutucularda tüketilen enerjinin, meskende tüketilen toplam elektrik enerjisine oranı %11’ dir. (Şekil 1.1). Yıkayıcı ürünlerde santrifüj kuvvet altında sıkma işleminde yapılacak iyileştirmenin ekonomiye sağlayacağı katkı göz ardı edilemez derecede büyük olacaktır.



Şekil 1.1 : Elektrikli ev aletleri elektrik tüketimi (BEYSAD, 2011).

Growth From Knowledge (GFK) (2014) araştırma şirketi tarafından gerçekleştirilen pazar araştırmasına göre Avrupa’da çamaşır makinelerinin 13 milyon/yıl olan bir satış hacmi bulunmaktadır. Bunun 10,4 milyon adedi önden yüklemeli çamaşır makinalarını kapsamaktadır. İngiltere’de yılda 1 milyon 250 bin adet önden yüklemeli çamaşır makinası satılmaktadır. İngiltere’yi sırasıyla İtalya ve İspanya takip etmektedir. Avrupa pazarında yüksek satış oranlarının bulunması, bu ürüne kazandırılacak ekstra fonksiyonların önemini arttırmaktadır. Ayrıca son yıllarda yeni bir ürün olarak markette yer alan yıkayıcı/kurutucu ürünlerde de kurutma sürelerinin kısalmasına ve ürünlerin pazar payının artmasına neden olacaktır. Çamaşır üzerinde kalan nem miktarı direkt olarak kurutma enerjisini ve kurutma sürelerini etkilediğinden dolayı sıkma işlemi üzerine yapılacak çalışma bu açıdan incelendiğinde büyük önem arz etmektedir. Aşağıdaki tabloda yıkayıcı/kurutucu ürün için sıkma sonunda çamaşırda kalan su miktarı %5 azaltıldığında diğer parametrelerde hesaplanan ve öngörülen iyileştirme miktarları verilmektedir.

Çizelge 1.1 : Yıkayıcı kurutucu ürün senaryosu.

Parametre	Mevcut Durum	Hesaplanan Durum
Sıkma İndeksi (%)	47	40
Enerji Tüketimi (Wh/kg)	680	612
Enerji Sınıfı	A	A-%10

Çizelge 1.1’ de yer aldığı üzere aynı devirde sıkma indeksi üzerinde yapılabilecek 7 puanlık iyileştirme, 68 Wh/kg mertebesinde kurutma enerji tüketiminin azaltılması imkânını sağlayacaktır. Mevcutta A enerji sınıfına sahip yıkayıcı kurutucu ürünün enerji sınıfı iyileşme sonucu A-%10 seviyesine indirilebilecektir. Belirtilen iyileşmenin gerçekleştirilebilmesi için sıkma sırasında santrifüj kuvvet etkisiyle uzaklaştırılan su akışının modellenmesi ve etki eden parametrelerin belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Santrifüj kuvvetler ile tekstildeki suyun uzaklaştırılması konusu son yıllarda deneysel olarak araştırılan önemli konu başlıkları arasında yer almaktadır. Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda tambur devri, sıkma süresi, yüzey gerilimi ve yük miktarı üzerine çalışmalar yer almaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalarda belirtilen parametrelerin sadece sıkma indeksi üzerine etkisi incelenmiş olup sadece yarı ampirik çözüm modelleri elde edilmiştir. Sıkma işlemi sırasında kuvvet etkisi ile

gözenekliliğin değişkenlik göstermesi akış sırasında geçirgenliğin zaman içerisinde değişmesine neden olacaktır. Ayrıca tekstil üzerinde azalan su miktarına bağlı olarak kılcal etkilerin de artması önemli bir husustur. Kılcallık ve değişken gözenekliliği kapsayan zamana bağlı çözüm önerileri literatürde yer almamaktadır. Belirtilen etkiler de göz önüne alınarak, gözenekli ortamda santrifüj kuvvet altında akış rejiminin belirlenmesi ve çözüm modelinin oluşturulması önem arz etmektedir.

Tez çalışması kapsamında literatürden farklı olarak kılcal basınç etkisini içine alan, santrifüj kuvvet altında değişken gözenekliliğe sahip ortamdaki akış modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda tez kapsamında aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

İkinci bölümde literatürde yer alan deneysel çalışmalar ve temel tanımlar aktarılmıştır. Literatür araştırması ile sıkma sonunda tekstil üzerinde kalan su miktarına etkiyen parametreler araştırılmıştır. Buna ek olarak tekstil gözenekliliği ve doyma sayılarının belirlenebilmesi için literatürde yer alan modeller tespit edilmiştir. Ayrıca patent araştırması ile çamaşır makinesi üreticilerinin sıkma indeksini iyileştirmede uyguladıkları tasarım çalışmaları hakkında kısa bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde gözenekli ortam teorisine ait kütle ve momentumun korunumu denklikleri yer almaktadır. İlk olarak gözenekli ortam için genel korunum denklikleri verilmiştir ve daha sonra, dönen eksen takımında katı ve sıvı faz için korunum denklikleri yazılmıştır.

Dördüncü bölümde, ilk olarak tekstilin temel fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Temel tekstil tanımları ve belirlenen numunenin mikroskop altında yapılan ölçümleri ile iplik çapı ve kalınlığı verilmiştir. Ardından tekstilin kalınlığı ve gözenekliliğinin farklı sıkıştırma kuvveti altında değişimi deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel verilerin indirgenebilmesi için sıkıştırma durumunda temel kütle korunum denkliği yazılıp, belirlenen denklige uygun olarak tekstil gözenekliliğinin modellenmesi için uygun korelasyon geliştirilmiştir. Çamaşır makinesi baz alınarak bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde; sıcaklık, devir, atılan su miktarı, sisteme giren su miktarı, enerji tüketimi gibi parametreler ölçülmüştür. Çarşaflar farklı boyutlarda ve adetlerde kesilerek çamaşır makinesinin çeperine monte edilebilecek şekilde deney setleri (yük) oluşturulmuştur. Su uzaklaştırma deneyleri sırasında bu yükler kullanılarak homojen yapıda bir gözenekli ortam simüle edilmiştir. Deneysel

alışmalar sırasında yük miktarı, devir ve sıcaklık gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır.

Üçüncü bölümün sonunda elde edilen kütle ve momentumun korunumu denklikleri beşinci bölümde indirgenmeye ve sadeleştirilmeye başlanmıştır. Kütlenin korunumu ile santrifüj su uzaklaştırma sırasında su hızının veren denklik elde edilmiştir. Sıvı faz için kütlenin korunumu denkliğinin uygun varsayımlar ile indirgenmesi sonucu, zamana bağılı olarak su uzaklaştırma hızını veren denklem tespit edilmiştir. Momentumun korunum denkliğinin indirgenmesi sonucunda kılcal basınç ve geçirgenlik değeri belirlenmiştir.

Son bölümde ise geliştirilen simülasyonun detayları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması ve sıkma indeksinin iyileştirilmesine yönelik olarak öneriler yer almaktadır. İlk olarak geliştiren hesaplama programı ile elde edilen sonuçlar ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Daha sonra farklı tambur çapı, derinliği ve devre sahip tahrik gruplarında yürütölen deneysel çalışmalar ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. En sonunda sıkma indeksini iyileştirebilmek için yapılması gereken tasarım önerileri yer almaktadır.

2. LİTERATÜR VE PATENT ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, santrifüj kuvvet uygulayarak tekstilden suyun uzaklaştırılmasına yönelik olarak geçmiş yıllarda yürütülen çalışmalar araştırılmaktadır. Literatür ve patent olmak üzere iki ayrı başlıkta konular incelenmektedir. Literatür araştırması kapsamında, tekstil üzerinden suyun uzaklaştırılmasına yönelik olarak farklı parametrelerin etkilerinin deneysel olarak belirlenmesi ve elde edilen yarı ampirik denklemler yer almaktadır. Patent araştırması kapsamında ise sıkma sonunda tekstil üzerinde kalan su miktarını azaltmaya yönelik olarak yapılan uygulamalar bulunmaktadır.

2.1 Tekstil Üzerinde Kalan Su Miktarına Etkiyen Parametreler

Welo ve Ziffle (1952) gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda tekstil tipinin kalan su miktarına etkisini incelemiştir. Rayon (Selülozdan elde edilmiş viskon yapı) tekstil tipinde kalan su miktarının en fazla, polyester tekstil tipinde ise kalan su miktarının en az olduğunu belirlemişlerdir.

Nimkar ve Preston (1952) gerçekleştirdiği çalışmada temas açısının kalan su üzerine etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, temas açısının artmasıyla tekstil üzerinde kalan su miktarının azaldığı gösterilmiştir.

Loeb (1963) gerçekleştirdiği deneysel çalışmada yüzey gerilimi değişiminin tekstil üzerinde kalan su miktarı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında pamuk bazlı tekstilin kullanıldığı ve yüzey gerilimini azaltmak için her deneyin başında su sıcaklığının artırıldığı belirtilmiştir. Santrifüj su uzaklaştırma çalışmalarında 14,60 cm çapına sahip laboratuvar tipi bir cihaz kullanılmıştır. Cihaz deneyler sırasında 800 d/dk dönme hızında 3 dk. boyunca çalıştırılmıştır. Loeb (1963) yüzey geriliminin azalması sonucu tekstil üzerinde kalan su miktarının da azalacağını belirlemişlerdir. Loeb (1963) aynı çalışma kapsamında sıkma indeksini hesaplamak için yüzey gerilimi, santrifüj etki, tekstil kalınlığı ve fiber çapı parametrelerine bağlı yarı ampirik bir ifade elde etmiştir.

Richter (2005) tarafından yapılan çalışmada, deterjan ve yumuşatıcı kullanımının sıkma indeksi üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre deterjan ve yumuşatıcı kullanımı çamaşır üzerinde kalan su miktarı üzerinde etkili olmaktadır.

Merediz (2009) tarafından yürütülen çalışmada farklı algoritmaların su atma hızı üzerine etkisi incelenmiştir. Merediz (2009) gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda yüksek ivmeye sahip algoritmalarda su atma hızının ilk etapta yüksek olduğunu belirlenmiştir. Ancak daha düşük ivmelenmeye sahip algoritmalarda aynı sıkma devrinde yeteri kadar beklendiğinde çamaşır üzerinde kalan su miktarının yine aynı noktaya ulaştığını tespit etmiştir.

Loeb (1965) gerçekleştirdiği deneysel çalışmada tekstil katman kalınlığının kalan su miktarı üzerine etkisini incelemiştir. Deneyler sırasında 10,16 cm x 20,32 cm boyutlarında pamuklu kuşgözü yapıdaki bezler kullanılmıştır. Tekstilleri sıkıştırmak ve suyu uzaklaştırmak için motor tarafından sürülen 5,08 cm çapında ve 30,48 cm uzunluğundaki kauçuk merdanelerden yararlanılmıştır. Loeb (1965) yüksek basınç altında sıkıştırma sonucu, tekstil kalınlığı arttıkça üzerinde kalan su miktarının da yüzdesel olarak azaldığını tespit etmiştir.

Denton (1974a) suyun santrifüj kuvvet ile tekstilden uzaklaştırılması için limit sıkma indeksi olduğunu belirtilmektedir. Gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda tamburun iç yüzeyine iplik paketleri yerleştirmiştir ve bu sayede homojen yapıda gözenekli tekstil ortamı oluşturulmuştur. Santrifüj olarak suyu uzaklaştırabilmek için 50,8 cm çapında hidroekstraksiyon cihazı kullanılmıştır. Deneyler sırasında tambur maksimum 1450 d/dk. hızında döndürülmüştür ve sıkma süresi 1-2 dk. aralığında değiştirilmiştir. Çalışmalar sonunda Denton (1974a), pamuklu tekstil için %30-40 aralığında sıkma indeksi limitinin olduğunu iddia etmektedir.

Denton (1974a) tarafından elde edilen zamana bağlı kalan su miktarı ölçümleri sonucunda, merkezkaç kuvvetin etki süresi arttıkça tekstil üzerinde kalan su miktarının da azaldığı tespit edilmiştir. Denton (1974a) sıcaklığa bağlı olarak kalan su miktarı ile ilgili deneyler de yapmıştır. Çalışma sonunda sıcaklık arttıkça tekstil üzerinde kalan su miktarının azaldığı belirlenmiştir. Denton (1974a) gerçekleştirdiği deneysel çalışmaların sonunda tekstil üzerinde kalan su miktarını belirlemek için ampirik bir ifade de vermektedir. Elde ettiği kalan su miktarı ifadesi; başlangıç su miktarı,

merkezkaç etki, süre ve geçirgenlik gibi parametrelere bağlı olup sadece Denton (1974a) tarafından yürütülen deney koşulları için geçerlidir.

Denton (1974b) tarafından yürütülen son çalışmada ise sıkma sonunda katmanlar arasında kalan su miktarının değişimi araştırılmıştır. En dış katmanda kalan su miktarının maksimum olduğu ve en iç katmanda minimum miktarda su kaldığı tespit edilmiştir. İç katmanda çok az su miktarı içeriye doğru hızla arttıktan sonra orta katmanlarda yaklaşık aynı değerlerde kalmaktadır. En dış katmana doğru su miktarı tekrar artmakta ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra hızla azalmaktadır. Ayrıca sıkma süresi arttıkça kalan su miktarında azalma olduğu görülmüştür.

Hearne ve Nossar (1983b) fiber başına kalan su miktarını lif kesişimlerini göz önüne alan bir model geliştirmişlerdir. Hearne ve Nossar (1983c) daha sonra tekstil üzerinde bulunan su miktarını belirtilen yarı ampirik bir ifade geliştirmiştir. Elde ettikleri denklemde sıkma indeksi ifadesi, tekstil bünyesindeki lif sayısı, tekstilin yoğunluğu ve sıvı yoğunluğu parametrelerine bağlıdır.

Sıkma işlemi sonunda tekstil üzerinde kalan su miktarını etkileyen parametreler olarak literatürde;

- Tekstil yapısı ve malzemesi (iplik hammaddesi, örme ve dokuma şekli, katman sayısı),
- Kılcallık etkisi (Yüzey gerilimi-sıcaklık, yumuşatıcılar ve temas açısı),
- Santrifüj hareket (dönüş algoritması, sıkma süresi ve santrifüj kuvvet),

konularında çalışmalar mevcuttur. Görüldüğü gibi tekstilin yapısal özellikleri ve kılcallığın yanında sıkma işlemi en çok çalışılan alanlardır.

2.2 Yoğunluk ve Gözenekliliğin Belirlenmesi

Denton (1964) tarafından yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda tekstil yoğunluğu arttıkça gözenekli yapının geçirgenliği azalmaktadır. Burada tekstil yoğunluğu; tekstili oluşturan fiber kütlelerinin toplam hacme oranı olarak tariflenmektedir.

Chan, S. H., Kiang, S. ve Brown, M. A. (2003) uygulanan basınca bağlı olarak akışa uygulanan spesifik direnç değerini (α) hesaplamaktadır. Burada spesifik direnç; akışkanın hareketini engelleyen ve basıncın düşüşüne neden olan m/kg biriminde

hidrolik direnç olarak tanımlanmaktadır. Elde ettikleri deneysel veriler ve regresyon analizi sonucuna göre, basınç arttıkça spesifik direnç de artmaktadır.

Hearne ve Nossar (1982) gerçekleştirdiği çalışmalarda Instron marka (TT-B Floor model) cihaz kullanarak basınca bağlı olarak tekstil yoğunluğunun değişimini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, uygulanan basınç arttıkça tekstilin yoğunluğu artmaktadır.

Hearne ve Nossar (1983a) devir ve yarıçapa bağlı olarak tekstil yoğunluktaki değişimi hesaplamışlardır. İlk olarak, santrifüj kuvvet altında tekstilin dış katman alanına uygulanan basınç ifadesi elde edilmektedir. Bir önceki çalışmada (Hearne ve Nossar (1982)) elde edilen basınç ve yoğunluk arasındaki ilişkiden yararlanılarak santrifüj kuvvet ile yoğunluk değişimi hesaplanmaktadır.

Wakeman ve Tartelon (2005) yaptıkları çalışmalar sonunda basınç ile gözeneklilik ve spesifik direnç arasında üstel tipte bir ilişki olduğunu belirlemektedir.

Literatür araştırmasında, gözenekli ortam yoğunluğu ve gözenekliliğin basınç ile değişimini içeren farklı çalışmaların olduğu tespit edilmektedir.

2.3 Akış Rejimi, Doyma Sayısı ve Kılcal Basıncın Belirlenmesi

Gözenekli ortamdaki akış rejimi genel olarak literatürde Darcy denkliğiyle açıklanmaktadır. Darcy (1856) gerçekleştirdiği ilk çalışmalarda dikey bir borunun içerisine kum taneleri yerleştirerek, farklı tipte kum taneleri ve kum yüksekliklerinin su akışı üzerine etkisini incelemektedir. İlk çalışmasında viskoziteyi hesaba katmasa da, zaman içerisinde formül aşağıdaki gibi elde edilmektedir;

$$v_f = \frac{-k dP}{\mu_l dz} \quad (2.1)$$

v_f akışkan hızını, k geçirgenlik, μ_l viskozite ve dP/dz basınç gradyenini temsil etmektedir. Zhu, T. ve arkadaşları (2014) gerçekleştirdikleri çalışmalarda Reynolds sayısı çok küçük olduğunda Darcy akış rejiminin olduğunu belirtmektedir. Hwang ve Chou (2007) gerçekleştirdiği çalışmalarda, santrifüj kuvvet altında gözenekli ortamdan su uzaklaştırma sırasında Darcy akış rejiminin olduğunu ortaya koymaktadır. Vadasz (1998) dönme sırasında Coriolis etkilerin ihmal edilebilir seviyede olduğunu belirtmektedir.

Kozeny-Carman (1937), granül yapıdaki gözenekli ortamın geçirgenliğini hesaplamak için denklem 2.2’de yer alan ifadeyi önermektedir;

$$k = \frac{\varepsilon^3}{5S_0^2(1 - \varepsilon)^2} \quad (2.2)$$

Denklemde yer alan S_0 eşdeğer parçacık boyutunu, ε ise gözenekliliği (porozite) ifade etmektedir. Kozeny-Carman ifadesi genel olarak $0,4 < \varepsilon < 0,7$ aralığında kararlı olduğundan daha yüksek gözeneklilik değerlerinde genel olarak Happel (1958) tarafından geliştirilen hücre modeli önerilmektedir.

Denklem 2.2’de yer alan porozite ise fiziksel olarak gözenekli ortam içerisinde yer alan boşluk hacminin toplam hacme oranıdır.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.3)$$

V_p boşluk hacmi, V_t toplam hacim olarak tanımlanmaktadır.

Gözenekli ortamda bulunan su hacminin boşluk hacmine oranı Wakeman ve Tartelon (2005) tarafından doyma sayısı olarak tanımlanmıştır.

$$S = \frac{V_l}{V_p} \quad (2.4)$$

Denklemde bulunan V_l suyun hacmini ifade etmektedir. Gözenekli ortam içinde bulunan su miktarı arttıkça doyma sayısı 1 değerine yaklaşır. Santrifüj ya da pres gibi mekanik yöntemler ile gözenekli ortamdan su uzaklaştırılmaya çalışıldığında belirli bir noktadan sonra su çıkış hızı durur ve bir denge durumu oluşur. Wakeman ve Rushton (1977), suyun çıkarılamadığı durumdaki doyma sayısını indirgenemez doyma (S_∞) olarak tanımlamaktadır.

Wakeman ve Rushton (1979), merkezkaç kuvvet altında indirgenemez doyma (S_∞) değerini belirleyebilmek için deneysel çalışmalar yürütmektedirler. Çalışma sonunda indirgenemez doyma ile kılcılık arasında aşağıdaki ifadeleri elde etmektedir;

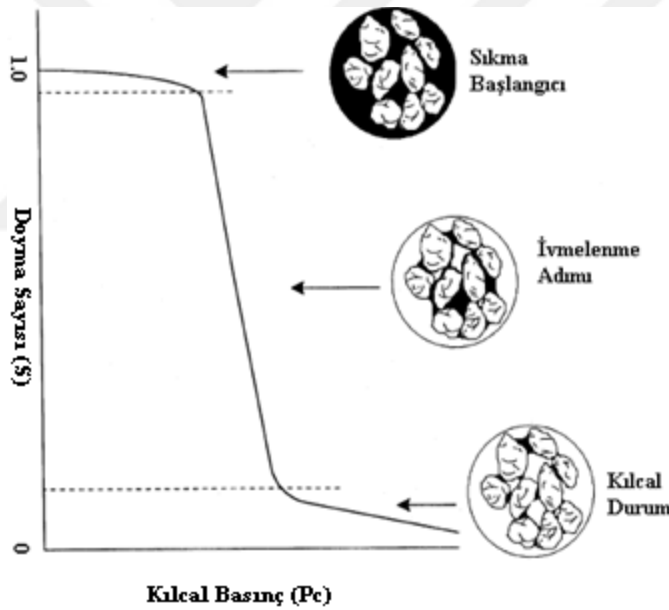
$$\begin{aligned} 10^{-5} \leq N_{cap} < 0,14 \text{ aralığında } S_\infty &= 0.0524N_{cap}^{-0.19} \\ 0,14 \leq N_{cap} < 10 \text{ aralığında } S_\infty &= 0.0139N_{cap}^{-0.86} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Wakeman ve Rushton (1982), denklemde yer alan N_{cap} ifadesini kılcak sayısı olarak tanımlamaktadır. Kılcak sayısı, fiziksel olarak santrifüj kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranı olarak ifade edilmektedir.

$$N_{cap} = \frac{\varepsilon^3 d^2 \rho_1 \omega^2 r_c}{(1 - \varepsilon)^2 \sigma} \quad (2.6)$$

Denklemden yer alan ρ_1 sıvının yoğunluğu, σ yüzey gerilimi, d gözenekli ortamdaki parçacıkların çapı, ω açısal hız ve r_c gözenekli ortamın ortalama yarıçapıdır.

Ambler (1988) ise gerçekleştirdiği çalışmalarda indirgemez doyma sayısı ile fiber çapı, tambur devri, tambur yarıçapı, yerçekimi ivmesi ve sıvı yoğunluğu arasında bir ilişki belirtmektedir. Elde ettiği denklemin boyut analizi gerçekleştirildiğinde, denklemin sağ ve sol tarafı arasında uyumsuz bir durum olduğu görülmektedir. Pamuktan oluşan tekstil yüklerinde santrifüj yöntemler ile su uzaklaştırma veriminin belirlenmesinde kılcal basınç önemli rol oynar. İçerideki iplerin şekli ve büyüklüğü, kalan su miktarı, sıvı yoğunluğu, yüzey gerilimi kılcal basıncı etkileyen başlıca faktörlerdir. Hwang, Chu ve Lu (2001) santrifüj yöntemlerle su uzaklaştırma sırasında gözenekli ortam içerisinde 3 durumun oluştuğunu belirtmektedir.



Şekil 2.1 : Sıkma sırasında suya doyma ve kılcal basıncı değişimi (Hwang, Chu ve Lu, 2001).

Sıkma işleminin henüz başlangıç aşamasında gözenekli ortamın tamamı suya doymuş durumdadır ($S=1$). Bu durum sıkma işleminin başlangıcı olduğundan dolayı tambur devri düşüktür ve tekstilin yüksek oranda porozitesi mevcuttur. İçerideki gözenekli ortam suya doymuş durumda olduğundan kılcal basınç çok düşüktür ve ihmal edilebilecek seviyededir.

Tambur devri arttıkça suya doymuş ortamda bulunan su miktarında azalma başlayacaktır. Tambur devri arttıkça içerideki su miktarı azalmaktadır. Azalan su miktarı ile paralel olarak kılcal basınç lineer olarak artmaktadır. Bu adımda gözenekli ortam üzerinde oluşan basınçtan dolayı gözeneklilik ilk duruma göre azalmaktadır. Gözenekli ortamdan uzaklaştırılan suyun debisi ivmelenmenin sonuna doğru bu debi azalacaktır.

Tambur devri sabit kalıp suyun büyük bir kısmı atıldıktan sonra su özellikle gözenekli ortamın kontak bölgelerinde kalır. Santrifüj basınç kılcal basıncı yenemeyecek seviyelere ulaşır. Su gözenekli ortam içerisinden daha fazla uzaklaştırılmaz ve en sonunda indirgenemez doyum değerine ulaşılır.

Literatür araştırması sonunda aşağıdaki sonuçlara çıkarılmıştır;

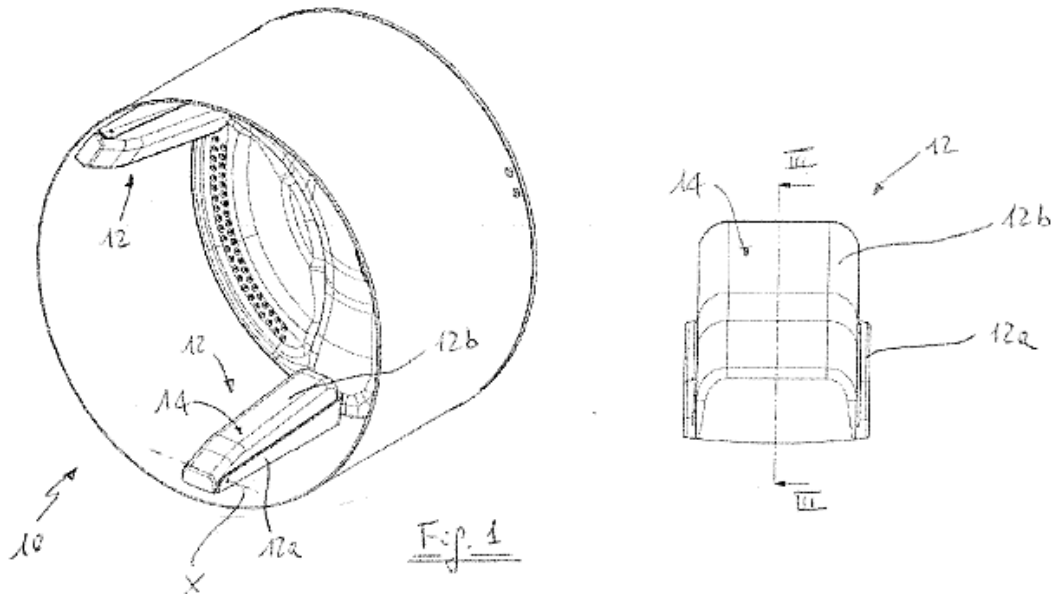
- Sıkma işlemi sonunda tekstilde kalan su miktarını etkileyen parametrelerin etkileri tekstil mühendisliği uzmanlığı altında geçmişte deneysel olarak çalışılmıştır. Ancak elde edilen sonuçların ampirik denklemlerle ifade edildiği belirlenmiştir. Deneysel çalışmaları destekleyici kapsamlı bir akış modelinin kurulmadığı ve incelenen çalışmaların çok eski tarihli olduğu tespit edilmiştir.
- Santrifüj kuvvet altında dönen gözenekli ortam konusu makine mühendisliği uzmanlığı altında geçmişte çalışılmıştır. Yürütülen çalışmalarda genel olarak sabit gözenekliliğe sahip ortamda doğal ve zorlanmış taşınımın araştırıldığı belirlenmiştir
- Santrifüj kuvvet altında değişken gözenekliliğe sahip malzemeden suyun uzaklaştırılması konusu son yıllarda kimya mühendisliği uzmanlığı altında incelenmiştir. Çalışmalarda genel olarak toz ve granül yapıdaki malzemelerin kullanıldığı ve akış rejimi olarak direkt olarak Darcy kabulünün yapıldığı görülmüştür.

Yürütülen tez çalışması sonunda literatürden farklı olarak; kılcal basıncın da etkisini belirleyebilmek için pamuklu yapıdaki tekstilden yararlanarak, santrifüj kuvvet altında değişken gözenekli ortamdaki akış modelinin kurulması amaçlanmıştır.

2.4 Patent Araştırması

Çamaşır makinesi üreticilerinin rekabette fark yaratmak için buluş basamağı içeren patent başvuruları D06F patent sınıfında yayınlanmaktadır. Sıkma performansını iyileştirmeye yönelik olarak alternatif metotlar ise D06F 35/00 sınıfının altında bulunmaktadır. Sadece çamaşır makinesinin devrini arttırarak sıkma verimini iyileştirilmesinin dışında farklı yöntemlerin araştırılması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar ve kurulacak model içerisinde farklı bir parametre tespit edilirse çalışmanın içerisine katılması öngörülmüştür. Belirtilen konu başlıklarının anlatıldığı patent başvuruları sırasıyla aşağıda yer almaktadır.

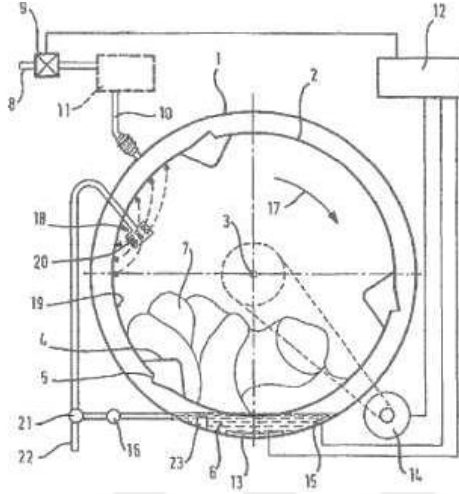
EP2053152 (A1) nolu patentte büyük kanat geometrisinin sıkma sırasında dengesiz yük ihtimalini arttırdığı ve çamaşırları daha çok hasarlandığı ifade edilmektedir. Bahsi geçen buluş sayesinde alt kısmı sabit, üst kısmı hareketli bir kanat yapısı geliştirildiği ifade edilmektedir. Yıkama adımında kanadın hareketli kısmı yukarıda durmakta ve büyük kanat geometrisi elde edilmektedir. Sıkma sırasında ise santrifüj kuvvetin etkisi ile kanadın hareketli kısmı alttaki sabit kısmın içindeki yuvaya girmekte ve geometri küçülerek sıkmanın daha kolay yapılması sağlanmaktadır. Şekil 2.2' de hareketli kanat yapısının detayı yer almaktadır.



Şekil 2.2 : EP2053152 (A1) patent başvurusu kanat tasarımı.

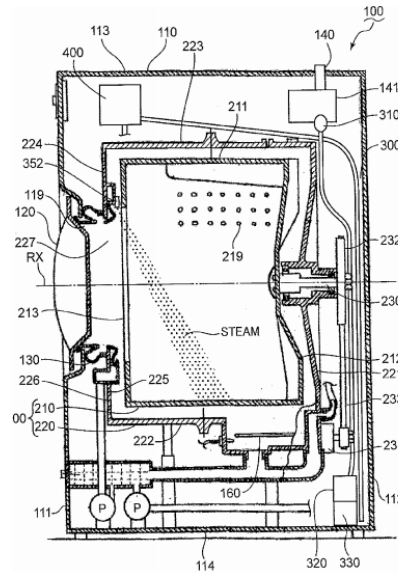
EP3004448 (A1) nolu patent başvurusunda kazan içerisinde yer alan su miktarı belirli bir seviyenin üzerinde ise önceden belirlenen değere kadar ısıtma gerçekleştirilir.

Sıkma başlangıcından önce ısıtılan su belirlenen sıkma hızında yük üzerine dağıtılır. Şekil 2.3’ de tariflenen sistem tasarımı yer almaktadır.



Şekil 2.3 : EP3004448 (A1) patent başvurusu sistem tasarımı.

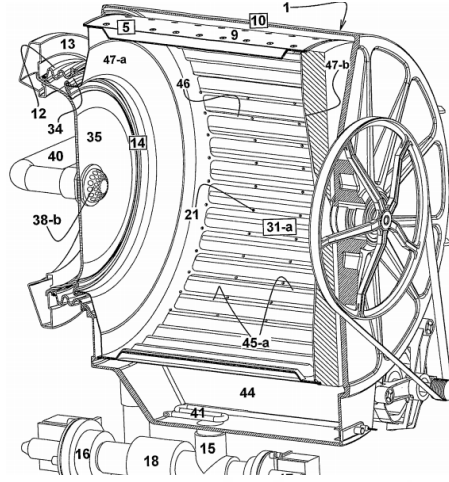
EP3004448 (A1) nolu başvuruda kıyafet temizleme aparatı; kazan, gövde, yükleme ağzı, su sağlama mekanizması ve yıkama ortamına buhar sağlayabilen bir jeneratör içermektedir. Şekil 2.4’ de yer alan buhar mekanizması sıkma işlemi başladıktan sonra önceden belirtilen süre kadar yıkama ortamına buhar sağlar. Sıkma işlemi gerçekleştirilen yükün su uzaklaştırma süresince sıcaklığı yükselir.



Şekil 2.4 : EP2860297 (A1) patent başvurusu buhar sistemi.

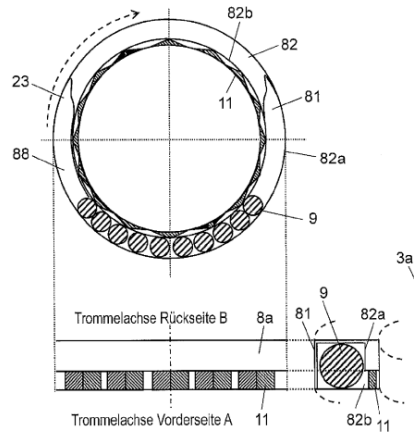
KR101319148 (B1) nolu patent başvurusunda yıkama ve ekstraksiyon yapan makinede su, enerji ve zaman açısından etkinlik sağlanması amaçlanmaktadır. Şekil 2.5’ de görülen tamburdaki kanatlar ve perfore sac yapısı sayesinde yüksek sıkma

devirlerinde tekstil hasarının önleildiği ve sıkma indeksinin azaltılabildiği iddia edilmektedir.



Şekil 2.5 : KR101319148 (B1) patent başvurusu perfore sac yapısı.

DE112014003395 (T5) nolu patent başvurusunda dönebilen tambur, yatay ya da eğimli mil, yıkama kazanı, motor ve dengeleme bilyaları içeren bir çamaşır makinesi içermektedir. Tamburun ucunda halkasal bir kap içerisinde yer alan dengeleme topları titreşim miktarını azaltarak makinenin hedeflenen sıkma devrine ulaşmasını ve etkin kurutma yapmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.6 : DE112014003395 (T5) patent başvurusu dengeleme sistemi.

Patent araştırmasının sonunda tambur devri ve yük miktarı dışında sıcaklığın da farklı bir parametre olarak çalışmalara dâhil edilmesi ön görülmüştür. Sıcak su kullanımı ya da buhar uygulamasıyla literatür araştırmasında da görüldüğü üzere dolaylı olarak yüzey gerilimi de çalışmalar içerine alınacağı belirlenmiştir.

3. DÖNEN GÖZENEKLİ ORTAMDAKİ AKIŞIN GENEL KORUNUM DENKLEMLERİ

3.1 Gözenekli Ortam ve Genel Korunum Denklikleri

Gözenekli ortamlarda akış ve ısı geçişi uzun yıllardan beri incelenmektedir. Bu konuda oldukça geniş bir literatür mevcut olup Kaviany (2012), Bejan (2013) ve Bear (1972)' in yazdığı kitaplarda okuyucu için yeterince bilgi mevcuttur. Burada literatürdeki bilgiler ışığında, konumuz olan hareketli gözenekli ortamlardaki kütle ve momentum geçişi ile ilgili temel formülasyon ele alınmaktadır.

Gözenekli ortam yapısı çok karmaşık olduğu için kütle ve momentum gibi genel korunum yasalarının bütün ortam içinde çözümü mümkün değildir. Sürekli ortamlar için diferansiyel formda yazılan korunum denklemlerinin hacim ortalamaları alınarak yeniden düzenlenir. Burada gözenekli ortamı karakterize eden temsili birim hacmin seçimi önemlidir. Temsili birim hacim üzerinde ortalamaları alınmış büyükler matematik uzayında bir noktanın özellikleri olarak işaretlenir. Böylece gözenekli ortamın süreklilik modeli elde edilir.

Gözenekli ortam içinde seçilen bir V_o temsili hacme göre akışkana ait ortalama fiziksel büyüklükler Denklem 3.1' de belirtildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\overline{b_f}(\mathbf{x}_o) = \frac{1}{V_o} \int_{V_{of}} b_f(\mathbf{x}) dV = \varepsilon \overline{b_f}^f = \frac{\varepsilon}{V_f} \int_{V_{of}} b_f dV \quad (3.1)$$

Burada $\mathbf{x}$ temsili hacim içindeki konumu ve $\mathbf{x}_o$ ise hacim içinde ortalaması alınmış büyüklüğün tanımlı olduğu konumu göstermektedir. Denklem 3.2' de yer alan ε gözeneklilik olup gözenekli ortamın temsili birim hacmi içindeki boşluk hacminin (veya akışkan hacminin) toplam hacme oranıdır.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (3.2)$$

Gözenekli ortamı oluşturan katı fazın ortalama fiziksel büyüklükleri ise benzer şekilde aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\overline{b_s}(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{V_o} \int_{V_{os}} b_s(\mathbf{x}) dV = (1 - \varepsilon) \overline{b_s^s} = \frac{1 - \varepsilon}{V_s} \int_{V_{os}} b_s dV \quad (3.3)$$

Buna göre hem akışkan hem de katı fazlarda tanımlı bir fiziksel büyüklüğün ortalaması ise 3.4 olarak ifade edilir.

$$\overline{b}(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{V_o} \left(\int_{V_{of}} b_f(\mathbf{x}) dV + \int_{V_{os}} b_s(\mathbf{x}) dV \right) = \overline{b_f} + \overline{b_s} = \varepsilon \overline{b_f^f} + (1 - \varepsilon) \overline{b_s^s} \quad (3.4)$$

Bir faza ait b büyüklüğü, hacim ortalaması ve ortalamadan sapmanın toplamı denklem 3.5 olarak yazılabilir.

$$b = \overline{b^f} + b' \quad (3.5)$$

Burada ortalamadan farkın ortalaması $b' = 0$ olacağı açıktır. İki büyüklüğün çarpımının ortalamasının ise Denklem 3.6 olduğu kolayca gösterilebilir.

$$\overline{b_1 b_2^f} = \overline{b_1^f b_2^f} + \overline{b_1' b_2'^f} \quad (3.6)$$

Slattery (1969)' un belirttiği gradyan ve diverjans operatörlerinin hacim ortalamaları Denklem 3.7 ve 3.8' de yer almaktadır.

$$\overline{\nabla b} = \nabla \overline{b} + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} b \mathbf{n} dA \quad (3.7)$$

$$\overline{\nabla \cdot \mathbf{b}} = \nabla \cdot \overline{\mathbf{b}} + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.8)$$

Bu ifadeler temsili hacim içinde bulunan farklı fazlara göre alınan ortalama değerler için de yazılabilir.

Temsili birim hacim içindeki bir faza ait büyüklüğün hacim integralinin maddesel türevi ile temsili hacim üzerindeki integralinin maddesel türevleri karşılaştırıldığında ortalama büyüklüklerin zamana göre türevleri arasında

$$\frac{\partial \overline{b}}{\partial t} = \overline{\frac{\partial b}{\partial t}} + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} b \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.9)$$

veya

$$\frac{\partial(\varepsilon \overline{b^f})}{\partial t} = \varepsilon \overline{\left(\frac{\partial b}{\partial t} \right)^f} + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} b \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.10)$$

ilişkisi olduğu gösterilebilir.

Süreklilik denklemi

Uzaysal koordinatlarda sürekli ortamın süreklilik denkleminin diferansiyel şekli denklem 3.11 gibi olmaktadır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.11)$$

Denklem 3.8 ve 3.9 göz önüne alınırsa akışkan fazı için;

$$\frac{\partial \bar{\rho}_l}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho}_l \bar{\mathbf{v}}_f = 0 \quad (3.12)$$

Denklem 3.1 ve 3.6 ile birleştirilirse;

$$\frac{\partial \varepsilon \bar{\rho}_l^f}{\partial t} + \nabla \cdot \varepsilon (\bar{\rho}_l^f \bar{\mathbf{v}}_f + \overline{\rho'_l \mathbf{v}'_f}) = 0 \quad (3.13)$$

Denklem 3.8 ve 3.9 göz önüne alınırsa katı fazı için ;

$$\frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho}_s \bar{\mathbf{v}}_s = 0 \quad (3.14)$$

Denklem 3.1 ve 3.6 ile birleştirilirse;

$$\frac{\partial (1 - \varepsilon) \bar{\rho}_s^s}{\partial t} + \nabla \cdot (1 - \varepsilon) (\bar{\rho}_s^s \bar{\mathbf{v}}_s + \overline{\rho'_s \mathbf{v}'_s}) = 0 \quad (3.15)$$

olduğu kolayca bulunur. Akışkan ve katı sıkışmaz akışkan kabul edilirse $\rho_f = \bar{\rho}_f^f = \text{sabit}$, $\rho_s = \bar{\rho}_s^s = \text{sabit}$ denklem 3.16 ve 3.17 elde edilebilmektedir.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \varepsilon \bar{\mathbf{v}}_f^f = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial (1 - \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (1 - \varepsilon) \bar{\mathbf{v}}_s^s = 0 \quad (3.17)$$

Wakeman ve Vince (1986), içerisinde doyma sayısını (saturasyon) ifadesini barındıracak şekilde denklem 3.16' ı aşağıdaki formda revize etmiştir.

$$\frac{\partial (\varepsilon S)}{\partial t} + \nabla \cdot S \varepsilon \bar{\mathbf{v}}_f^f = 0 \quad (3.18)$$

S doyma sayısı olarak belirtilmekte ve gözenekli ortamda bulunan su hacminin toplam boşluk hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$S = \frac{\text{Gözenekli ortamda bulunan su hacmi(m}^3\text{)}}{\text{Toplam gözenek hacmi(m}^3\text{)}} = \frac{V_l}{V_p} \quad (3.19)$$

V_l gözenekli ortamdaki sıvı hacmini, V_p ise gözenekli ortamın toplam hacmini temsil etmektedir. Sıkma işlemi sonunda tekstilin bünyesinde bulunan sıvı miktarı ne kadar az olursa doyma sayısı da o kadar küçük olur. Gözenekli ortamda sıkma işlemi boyunca santrifüj basınca maruz kalacağından dolayı ε değeri değişkenlik gösterecektir. Ayrıca gözenekli ortamdan uzaklaşan su miktarı arttıkça doyma sayısı S azalacaktır.

Momentum Denklemi

Uzaysal koordinatlarda momentum denkleminin diferansiyel ifadesi

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} \quad (3.20)$$

şeklinde yazılır. Bear (1972)' a göre akışkan ve katının sıkışmaz olduğu durumda denklem 3.20' in hacim ortalaması alınarak denklem 3.21 elde edilebilir.

$$\varepsilon \bar{\rho}_l^f \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_f^f}{\partial t} + \varepsilon \bar{\rho}_l^f \bar{\mathbf{v}}_f^f \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}_f^f = \nabla \cdot \varepsilon \bar{\boldsymbol{\sigma}}_f^f + \varepsilon \bar{\rho}_l^f \bar{\mathbf{f}}_f^f + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_f dA \quad (3.21)$$

Sıkışmaz Newtonian akışkan için

$$\varepsilon \bar{\rho}_l^f \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_f^f}{\partial t} + \varepsilon \bar{\rho}_l^f \bar{\mathbf{v}}_f^f \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}_f^f = -\nabla \varepsilon \bar{p} + \mu \nabla^2 \varepsilon \bar{\mathbf{v}}_f^f + \varepsilon \bar{\rho}_l^f \bar{\mathbf{f}}_f^f + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_f dA \quad (3.22)$$

Katı faz için

$$\begin{aligned} & (1 - \varepsilon) \bar{\rho}_s^s \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_s^s}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \bar{\rho}_s^s \bar{\mathbf{v}}_s^s \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}_s^s \\ & = \nabla \cdot (1 - \varepsilon) \bar{\boldsymbol{\sigma}}_s^s + (1 - \varepsilon) \bar{\rho}_s^s \bar{\mathbf{f}}_s^s + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_s dA \end{aligned} \quad (3.23)$$

elde edilmektedir.

3.2 Dönen Eksen Takımında Korunum Denklikleri

Sabit ve dönen eksen takımları ilişkiler Greitzer (2004)' de ayrıntılı olarak ele alınmakta olup burada kısaca genel korunum denklemlerinin dönen bir eksen

takımındaki ifadeleri verilmektedir. Sabit eksen takımındaki hız vektörü $\mathbf{v}_F$, olmak üzere bunun, dönen eksen takımındaki $\mathbf{v}$ hızı ile arasındaki bağıntı

$$\mathbf{v}_F = \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3.24)$$

olarak yazılır. Burada $\mathbf{v}$ ve $\boldsymbol{\omega}$ sırasıyla dönen eksen takımındaki izafi hız ve açısal hız vektörleri ve $\mathbf{r}$ ise yer vektörüdür. Vektör ve/veya tansör olan bir $\mathbf{B}$ büyüklüğünün sabit eksen takımındaki maddesel türevi ile dönen eksen takımı arasındaki maddesel türevi arasında

$$\left(\frac{d\mathbf{B}}{dt}\right)_F = \frac{d\mathbf{B}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{B} \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir. Yoğunluk, entropi vb skaler büyüklerin maddesel türevleri ise sabit açısal hız için aynıdır. Yani yukardaki denklemin (Denklem 3.25) sağ tarafındaki ikinci terim sıfırdır. Şimdi Denklem 3.24'ü Denklem 3.25'de yerine yazıp gerekli düzenlemeler yapılırsa hızın maddesel türevi, sabit açısal hız için

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt}\right)_F &= \frac{d(\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \\ &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \end{aligned} \quad (3.26)$$

elde edilir. Bu durumda ivme terimi için

$$\left(\frac{d\mathbf{v}}{dt}\right)_F = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \quad (3.27)$$

olarak bulunur. Burada sağdaki terimler sırasıyla yerel ivme, konvektif ivme, santrifüj ivme ve Coriolis ivmeleridir. Elde edilen 3.27 denklemi kullanılarak gözenekli ortam için daha önce elde edilen süreklilik denklemleri aynı kalırken momentum denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

Sıkıştırılmaz Newtonian akışkan için

$$\begin{aligned} &\varepsilon \bar{\rho}_f \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_f}{\partial t} + \varepsilon \bar{\rho}_f \bar{\mathbf{v}}_f \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}_f \\ &= -\nabla \varepsilon \bar{p} + \mu \nabla^2 \varepsilon \bar{\mathbf{v}}_f + \varepsilon \bar{\rho}_f \bar{\mathbf{f}}_f + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_f dA - \varepsilon \bar{\rho}_f \boldsymbol{\omega} \\ &\times (\boldsymbol{\omega} \times \bar{\mathbf{r}}) - 2\varepsilon \bar{\rho}_f \boldsymbol{\omega} \times \bar{\mathbf{v}}_f \end{aligned} \quad (3.28)$$

Eğer gözenekli ortamın doyma sayısı 1' den küçük olursa ($S < 1$) sıkıştırılmaz Newtonian akışkan için

$$\begin{aligned} S\varepsilon\bar{\rho}_f^f \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_f^f}{\partial t} + S\varepsilon\bar{\rho}_f^f \bar{\mathbf{v}}_f^f \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}_f^f \\ = -\nabla S\varepsilon\bar{p} + \mu \nabla^2 S\varepsilon\bar{\mathbf{v}}_f^f + S\varepsilon\bar{\rho}_f^f \bar{\mathbf{f}}_f^f + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_f dA - S\varepsilon\bar{\rho}_f^f \boldsymbol{\omega} \\ \times (\boldsymbol{\omega} \times \bar{\mathbf{r}}) - 2S\varepsilon\bar{\rho}_f^f \boldsymbol{\omega} \times \bar{\mathbf{v}}_f^f \end{aligned} \quad (3.29)$$

Katı faz için

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon)\bar{\rho}_s^s \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_s^s}{\partial t} + (1 - \varepsilon)\bar{\rho}_s^s \bar{\mathbf{v}}_s^s \cdot \nabla \bar{\mathbf{v}}_s^s \\ = \nabla \cdot (1 - \varepsilon)\bar{\boldsymbol{\sigma}}_s^s + (1 - \varepsilon)\bar{\rho}_s^s \bar{\mathbf{f}}_s^s + \frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_s dA - (1 \\ - \varepsilon)\bar{\rho}_s^s \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \bar{\mathbf{r}}) - 2(1 - \varepsilon)\bar{\rho}_s^s \boldsymbol{\omega} \times \bar{\mathbf{v}}_s^s \end{aligned} \quad (3.30)$$

Denklemin sağ tarafında yer alan $\frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_s dA$ terimi, katı ve sıvı arasındaki etkileşimden kaynaklanan ortalama sürüklenme kuvvetini belirtmektedir. Whitaker (1967), belirtilen bu sürüklenme kuvvetinin katı ve sıvı faz arasındaki hız farkından kaynaklandığını belirtmektedir. Literatürde arayüzde oluşan sürüklenme kuvvetini tanımlayan amprik ifadeler yer almaktadır (Burcharth ve Andersen (1995), Gu ve Wang (1991)). Bu çalışmalarda arayüz kuvvetinin, katı ve sıvı arasındaki hız farkının fonksiyonu olarak modellendiği görülmektedir. Hsu ve Cheng (1990), katı ve sıvı faz arasında oluşan sürüklenme kuvvetini aşağıdaki denklemki gibi ifade etmektedir.

$$-\frac{1}{V_o} \int_{A_{fs}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_f dA = \frac{\mu\varepsilon}{k} (\bar{\mathbf{v}}_f^f - \bar{\mathbf{v}}_s^s) \cdot \mathbf{n} + \frac{\beta\bar{\rho}_f^f\varepsilon}{\sqrt{k}} |\bar{\mathbf{v}}_f^f - \bar{\mathbf{v}}_s^s| (\bar{\mathbf{v}}_f^f - \bar{\mathbf{v}}_s^s) \cdot \mathbf{n} \quad (3.31)$$

Denklemin incelendiğinde sürüklenme kuvveti ile hız farkı arasındaki ilişkinin lineer ve kuadratik olarak değişebileceği görülmektedir. Denklemin sağ tarafında yer alan birimci terim Darcy, ikincisi ise Forcheimer terimi olarak tanımlanmaktadır. Denkleminde bulunan k gözenekli ortamın geçirgenliğini (m^2) ve β ise Forcheimer akış rejiminde tanımlanan katsayıyı ifade etmektedir. k ve β , genel olarak deneysel çalışmalar sonunda amprik olarak elde edilmektedir.

Gözenekli ortamdaki atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı Reynolds sayısı ile ifade edilmektedir ve $Re = \frac{\bar{\mathbf{v}}_f^f d\bar{\rho}_f^f}{\mu_f}$ formülüyle tanımlanmaktadır. Eğer Reynolds sayısı

düşükse ($Re \ll 1$) viskoz kuvvetler etkilidir ve basınç kaybı akışkan hızı ile lineer değişir. Bu durumda akış rejimi Darcy (1856) rejimi olarak tanımlanır. Yüksek Reynolds sayısında ise ($Re > 300$) hızın karesinin etkisi, kuvvet dengesinde ağırlık kazanır. Bu durumda akış türbülanslı olur ve akış rejimi Forcheimer (1901) rejimi olarak elde edilir.

Bu bölüm içerisinde akışkan ve katı faz için genel korunum denklemleri yazılmaktadır. Her iki faz için süreklilik ve momentumun korunumu elde edilmektedir. İleriki bölümlerde, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılarak belirtilen denklemler çözülecektir.





4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Suyun santrifüj kuvvetlerin uygulanması ile tekstilden uzaklaştırılmasının incelendiği bu çalışmada, farklı amaca hizmet edecek şekilde deneysel çalışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda sırası ile aşağıdaki çalışmalar yapılmaktadır;

- Tekstilin yoğunluğu, kalınlığı ve gözenekliliği gibi fiziksel özelliklerin belirlenmesi
- Sıkma indeksi ve doyma sayısı gibi tekstilde kalan su miktarını belirten literatürdeki tanımların verilmesi ve aralarındaki ilişkinin elde edilmesi,
- Farklı parametrelere bağlı olarak gözeneklilik değişiminin belirlenmesi,
- Santrifüj su uzaklaştırma deneyleri için deney düzeneğinin hazırlanması,
- Su uzaklaştırma deneylerinin gerçekleştirilmesi,
- Sıkma indeksi ve doyma sayısını değişimlerinin incelenmesi,

4.1 Gözönüne Alınan Tekstilin Fiziksel Özellikleri

Gözenekli ortamı oluşturan tekstil malzemesinin seçimi santrifüj kuvvet altında sıvı hareketini etkilediğinden dolayı önemlidir. Çalışmamızda çamaşırın sıkılmasını etkileyen parametrelerin ortaya çıkarılması hedeflendiğinden tekstil numunesinin seçiminde evlerde kullanılan tekstiller gözüne alınmaktadır. Çamaşır makinası üreticileri deneylerini EN:60456 (2011) standardında yer alan tekstil malzemeleri ile yapmaktadır. Bu standarda göre, evlerde kullanılan tekstil malzemelerinden pamuklu çarşaf ve yastık kılıfı tekstilleri seçilmektedir. Uygun boyutta kesilen numunenin katmanlar halinde dizilmesiyle gözenekli ortamlar oluşturulmaktadır. Seçilen tekstil numunesi özel imal edildiği için fiziksel özellikleri her noktasında aynı olmaktadır. Aynı zamanda, belirlenen numune kolayca kesilerek silindirik bir hacmin iç çevresel yüzeyine katmanlar halinde yerleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, seçilen numunenin (standartta yer alan çarşafın) teknik özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.1' de belirtilmektedir;

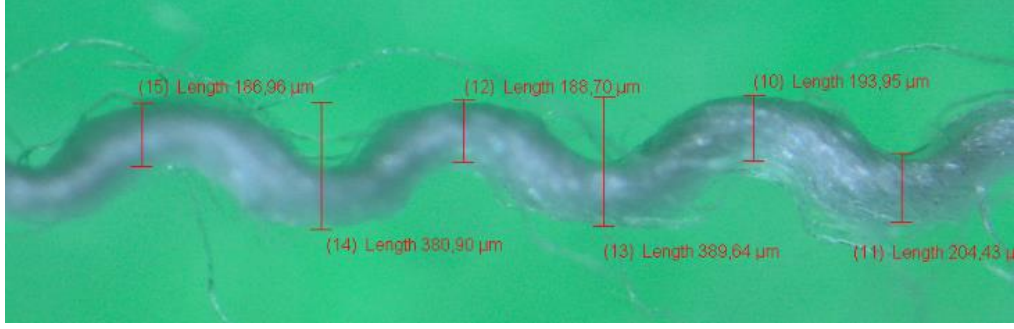
Çizelge 4.1 : Çarşafın özellikleri (EN:60456, 2011).

Tekstil	Çarşaf ve Yastık Kılıfı
İplik numarası (tex:g/1000m)	
Çözü	33±1
Atkı	33±1
Sıklık (adet/cm)	
Çözü	24±1
Atkı	24±1
Boyut (mm)	
Uzunluk	2400±150
Genişlik	1600±40
Alan başına kütle (g/m²)	185±10
Adet başına kütle (g/adet)	725±15

Tabloda belirtilen atkı yönü, kumaşın uzun kenarına dik olan yani enine doğru yerleştirilen ipliklerdir. Çözü iplikleri ise atkı iplikleriyle dik açı oluşturmaktadır. Atkı ve çözü yönlerindeki ipliklerin adedi ve yoğunluğu kumaşın dokusunu oluşturduğundan dolayı önemlidir. Bu sebepten dolayı iplik numarası ve sıklık tanımları yapılmaktadır. İplik numarası, birim uzunluktaki iplik kütle miktarını temsil etmektedir ve genelde tex biriminde kullanılır. Tex birimi yerine g/1000m de kullanılabilir. Sıklık ise atkı ve çözü yönünde bulunan birim uzunluktaki iplik sayısını ifade etmekte ve adet/cm biriminde kullanılmaktadır (Nergis, 2008). Seçilen tekstil numunesinin hem atkı hem de çözü yönlerinde iplik numarası 33 tex ve sıklığı 24'dür.

İplik Çapı ve Tabaka Kalınlığının Belirlenmesi

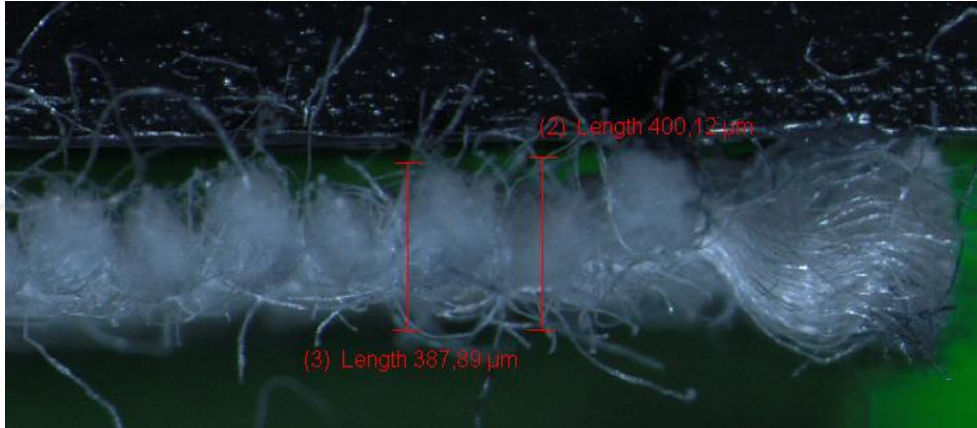
İplik çapının belirlenmesi deneylerinin tamamı EN:60456 (2011) standardında belirtilen 23±2 °C ve %55±5 ıfafi nemde gerçekleştirilmektedir. Çap ölçümü için çarşaftan iplik numuneleri alınmaktadır. Bu numunelerin çapı Olympos ZSX7 model mikroskop altında incelenmektedir. Şekil 4.1' de iplik çapının belirlenmesine yönelik olarak yapılan ölçümler yer almaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, cihaza ait görüntü işleme yazılımı kullanılarak iplik numunesi üzerinde 4 farklı noktada iplik çapı belirlenmektedir.



Şekil 4.1 : Mikroskop altında iplik çapının belirlenmesi.

Ölçülen iplik çapının 0,187-0,204 mm aralığında değiştiği görülmektedir. İpliği oluşturan fiberlerin pamuktan oluşması ve bu fiberler esnek bir yapı oluşturduğundan dolayı çap değerleri 0,187-0,204 mm arasında değişmektedir.

Şekil 4.2’ de ise çözgü ve atkı yapısı ayrılmamış çarşaf numunesine ait kalınlığın belirlenmesine yönelik ölçümler yer almaktadır. Ölçümün yapılabilmesi için numune mikroskoba dik bir biçimde konumlandırılmaktadır.



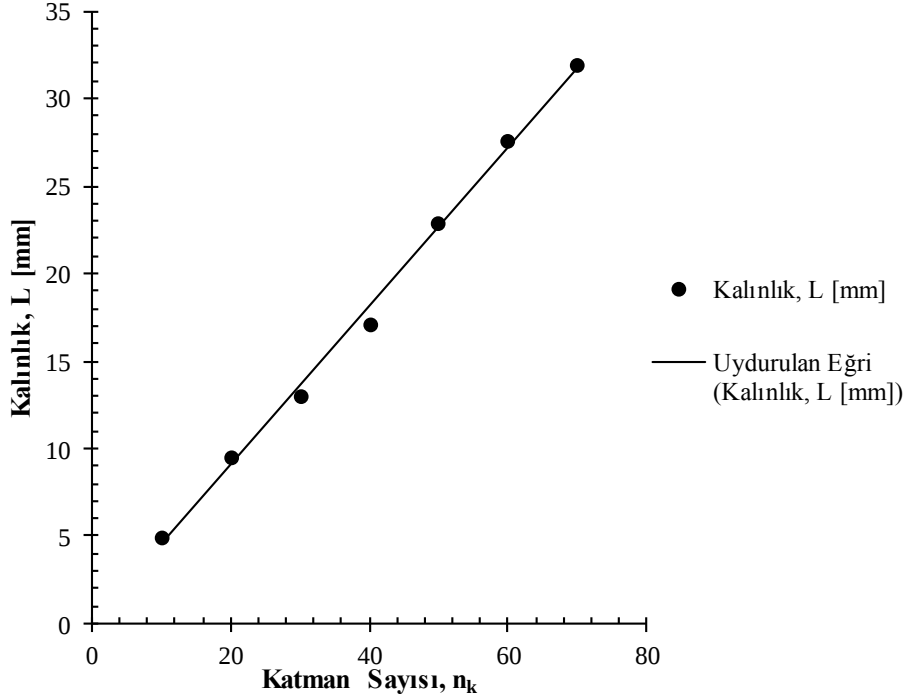
Şekil 4.2 : Mikroskop altında tekstil kalınlığının belirlenmesi.

Cihaza ait görüntü işleme yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda tekstil kalınlığının ortalama olarak 0,387-0,400 mm aralığında olduğu tespit edilmektedir. Şekil 4.2’ de yer aldığı üzere her bir tekstil katmanı için dışarıya doğru saçılan fiberlerin olduğu tespit edilmektedir. Tekstil kalınlığı ve iplik çapı için yapılan ölçümlerin teorik hesaplamalar ile karşılaştırılması EK-A’ da verilmektedir.

Gözenekli Ortam Kalınlığının Katman Sayısı ile Değişimi

Tekstil katmanları üst üste yerleştirildiğinde meydana gelen katmanlı yapının toplam kalınlığı, yukarıda bulunan tek katman kalınlığının katman sayısı ile çarpımı olup olmadığı gösterilmelidir. Katmanların üst üste konulması sırasında Şekil 4.2’de görülen saçılmış elyafların toplam katman kalınlığını etkilemesi söz konusudur. Bu

durumun belirlenebilmesi 10 katmanlı yapıdan başlayarak, katman sayısı 10’ar adet arttırılarak yedi farklı katmanlı yapının toplam kalınlıkları kumpas ile ölçülmektedir. Bu şekilde yapılan kalınlık ölçümlerinin sonucu Şekil 4.3’de görülmektedir. Farklı adetlerde katmanlardan oluşan tekstil yapısının toplam gözenekliliği hesaplanırken yapının kalınlığına göre bulunan toplam hacmi göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.3 : Çok sayıda katman için birim kalınlığın tayini.

Şekilde görüldüğü gibi katman sayısı ile toplam kalınlığın değişimi doğrusaldır. Bu verilere uydurulan eğrinin denklemi

$$L = 0,4533n_k \quad (4.1)$$

şeklindedir. Denklemden birim katman kalınlığının 0,4533 mm olduğu görülmektedir. %95 güven aralığı için uydurulan eğrinin standart sapması 0,027 mm olarak elde edilmektedir. Şekil 4.2’ deki katman kesitinde görünen liflerin saçılması söz konusu olduğundan, katmanlar üst üste konulduğunda aralarında boşluklar oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı katmanlar üst üste yerleştirildiğinde birim kalınlık 0,4533 mm olarak belirlenmiştir.

Gözenekliliğin Belirlenmesi

Farklı adetlerdeki katmanlardan oluşan gözenekli ortam yapısı için kalınlık değeri ölçüldükten sonra alanla çarpılarak V_t toplam hacim (m^3) belirlenir. Toplam hacim içerisinde V_p boşluk hacmi ve V_s katı hacmi ayrı ayrı fazlar oluşturmaktadır. Ancak 23 ± 2 °C ve $\%55 \pm 5$ izafi nem koşullarında pamuklu tekstil bir miktar nem (su) ihtiva edeceğinden bu değer belirlenmesi ve toplam içerisinde kapladığı hacim olarak hesaba katılması gerekmektedir.

Katı ortam yoğunluğu için pamuklu fiberlerin yoğunluğunun bilinmesine ihtiyaç vardır. Nimkar ve Preston (1950) gerçekleştirdiği çalışmalarda buldukları farklı fiber tiplerinin yoğunlukları Çizelge 4.2’ de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Farklı fiber tipleri için yoğunluk değerleri (Nimkar ve Preston, 1950).

Fiber	Yoğunluk (kg/m ³)
Pamuk	1550
İpek	1300
Yün	1340
Naylon 6.6	1140

Bu değerler ipliğin kemik kuruluk (bone drying) durumundaki yoğunluklarıdır. Kemik kuruluk ifadesi tekstilin bünyesinde nem ve su bulundurmadığı duruma karşılık gelmektedir. EN60456 (2011) standardının Annex G bölümünde tekstil için kemik kuruluk metodu tariflenmektedir. Kemik kuruluk değerine getirilen pamuk, yün, ipek v.b. fiberler ortama bırakıldığında ortamdan nem kaparak bir denge durumu oluşturur. Denge durumunda atmosferden aldığı nem miktarının kuru fiber ağırlığına oranına yeniden kapılan su oranı (water regain) olarak tariflenmektedir;

$$\gamma = \frac{\text{Atmosferden aldığı nem miktarı (kg)}}{\text{Atmosferik ortamda fiber kütlesi (kg)}} = \frac{m_l}{m_s} \quad (4.2)$$

Urquhart ve Eckersall (1930), pamuklu fiber için ortamdaki nem miktarına bağlı olarak atmosferden emilen nem miktarını incelemektedir. Yaptıkları ölçüm sonuçlarına göre atmosferdeki bağıl nem miktarı arttıkça pamuk tarafından emilen nem miktarı da artış göstermektedir.

Ford (1966), farklı fiber tipleri için 20 °C sıcaklık ve $\% 65$ izafi nem koşulunda atmosferden emilen nem miktarını ölçerek Çizelge 4.3’ de görülen değerleri vermektedir.

Çizelge 4.3 : Farklı fiber tipleri için γ (%) değerleri (Ford, 1966).

Fiber	γ (%)
Pamuk	7-8
İpek	10
Yün	14
Naylon 6.6	4.1

Çizelgede görüldüğü üzere pamuk için atmosferden emilen su değeri %7-8 olmaktadır. EN60456 (2011) standardında da pamuklu tekstilin kemik kuruluk koşuluna getirilmesinden sonra standart oda koşullarında atmosferden %6-8 aralığında nem aldığı belirtilmektedir. Sonuç olarak yeniden kapılan su oranı %8 olarak tespit edilmekte ve çalışmamızda %8 değeri kullanılmaktadır.

Belirtilen standart oda koşullarında (23 °C, %55 bağıl nem) kuru çarşafımızın kütlesi, katı ve yeniden kapılan su kütlelerinin toplamıdır. Denklem 4.2 göz önüne alınarak çarşafın katı kütlesi

$$m_s = \frac{m_d}{1+\gamma} \quad (4.3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada m_d oda koşullarında ölçülen kuru kütle miktarı (kg), m_s ise katı kütle (kg) miktarıdır. Çizelge 4.1’de kuru çarşafın birim alan başına kütle miktarı ($m_d'' = m_d/A$) 185 g/m² olarak verilmektedir. Denklem 4.3 yardımıyla birim alan başına katı kütle miktarı ise

$$m_s'' = \frac{m_s}{A} = \frac{m_d''}{1+\gamma} \quad (4.4)$$

şeklinde hesaplanır. Buna göre seçilen çarşafın katı kütlesi 171,3 g/m²’dir.

Katı kütlenin hacmi

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{m_d}{\rho_s(1+\gamma)} \quad (4.5)$$

şeklinde basitçe hesaplanır.

Çizelge 4.1’ de birim kütle, en ve boy değerleri belirtilen numunenin toplam hacmi hesaplanır ve tüm bu veriler kullanılarak denklem 4.6 ile gözeneklilik hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} = 1 - \frac{m_s''}{\rho_s \delta} = 1 - \frac{0,185}{1550 \cdot (1 + 0,08) \cdot 0,0004} = 0,724 \quad (4.6)$$

Denkleimde yer alan 1550 kg/m^3 değeri Çizelge 4.2' den alınan pamuk fiberin yoğunluğu, $0,185 \text{ kg/m}^2$ değeri ise oda şartlarındaki kuru tekstilin birim alanı başına ölçülen kütlesidir. Katmanlardan oluşan tekstil için gözeneklilik değeri 0,724 olarak hesaplanmaktadır. Kuru çarşaf içindeki nem miktarı ihmal edilirse gözeneklilik 0,702 olarak hesaplanmaktadır. Ward (2000) gerçekleştirdiği çalışmalarda çarşaf için gözeneklilik değerini 0,700 olarak vermekte ve tekstilin içerisinde yer alan %7-8 nem miktarını ihmal etmektedir.

Bu çalışmada, seçilen çarşaf numunesi kullanılarak çok katmanlı gözenekli ortamlar oluşturulmaktadır. Bu katmanlı yapının gözenekliliği

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_s}{\rho_s AL} = 1 - \frac{m_s'' n_k}{\rho_s L} \quad (4.7)$$

ile hesaplanır. Burada L gözenekli yapının kalınlığı, n_k ise yapıyı oluşturulan katmanların sayısıdır.

4.2 Sıkma İndeksi ve Doyma Sayısı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Önceki kısımda tekstil ile ilgili temel yapısal özellikler verilmekte olup bu kısımda santrifüj su uzaklaştırma ile ilgili sıkma indeksi, doyma sayısı (saturasyon) ve santrifüj ivme gibi tanımlamalar yapılmaktadır.

Santrifüj kuvvetler sonucunda tekstilin üzerinde kalan toplam su kütlesinin kuru tekstil (yıkama işlemi öncesinde tekstilin) kütlesine oranı EN60456 (2011) standardı içerisinde sıkma indeksi (R) olarak tanımlanır ve

$$R = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (4.8)$$

şeklinde hesaplanır. Burada m_w sıkma işlemi sonunda sıvı ve katı toplam kütleyi temsil etmektedir. Sıkma indeksi ne kadar düşük olursa tekstil üzerinde sıkma işlemi sonunda kalan su miktarı da o oranda azalacaktır.

Gözenekli ortamda bulunan su miktarı sıkma indeksi yerine Wakeman ve Tartelon (2005)'nin önerdiği doyma sayısı ile de tanımlanmaktadır. Doyma sayısı, gözenekli ortamda bulunan su hacminin toplam boşluk hacmine oranıdır.

$$S = \frac{\text{Gözenekli ortamda bulunan su hacmi (m}^3\text{)}}{\text{Toplam gözenek hacmi (m}^3\text{)}} = \frac{V_l}{V_p} = \frac{V_l}{\varepsilon V_t} \quad (4.9)$$

V_l gözenekli ortamdaki sıvı hacmini, V_p ise gözenekli ortamın boşluk hacmini temsil etmektedir. Sıkma işlemi sonunda tekstilin bünyesinde bulunan sıvı miktarı ne kadar az olursa doyma sayısı da o kadar küçük olur.

Denklem 4.8' de tanımlanan tekstil üzerinde kalan su miktarı aynı zamanda doyma sayısı cinsinden de ifade edilebilir. Denklem 4.8' de yer alan m_d kuru tekstil kütlesi $m_s(1 + \gamma) = m_s + \gamma m_s$ olarak katı kütlesi ve atmosferden emilen su cinsinden açılır. Aynı denklemde bulunan m_w sıkma işlemi sonunda sıvı ve katı toplam kütleyi temsil ettiğinden $m_w = m_s + m_l = m_s + \rho_l V_l$ formunda açılır. V_l su hacmi denklem 4.9' da yer alan doyma sayısı cinsinden $V_l = S \epsilon V_t$ olarak tanımlanır. Kuru tekstil kütlesi, sıkma sonundaki toplam kütle ve sıvı hacmi, belirtilen formlarda denklem 4.8' de yerine yazıldığında sıkma indeksi ile doyma sayısı arasındaki ilişki elde edilir.

$$R = \frac{S \epsilon V_t \rho_l - m_s \gamma}{m_d} \quad (4.10)$$

4.3 Basınca Bağlı Gözeneklilik Değişiminin Belirlenmesi

Önceki kısımda numune olarak çamaşır makinası standart yıkama ve sıkma performansı testlerinde kullanılan pamuklu kumaş seçilmekte ve belirli ölçülerde kesilen numunenin gözenekliliği deneysel olarak belirlenmektedir. Bu bölüm de ise numune parçaların üst üste konulmasıyla oluşturulan gözenekli ortamın basınç altında gözeneklilik değişimi deneysel olarak elde edilmektedir.

Santrifüj kuvvet etkisi ile tekstilden suyun uzaklaştırılması esnasında gözenekli yapı kuvvet altında ezilmektedir. Böylece, yapının toplam hacmi ile beraber içindeki su miktarı da azalmaktadır. Bu sebeple, basınçla gözeneklilik arasındaki ilişkinin deneysel olarak belirlenmesi gereklidir. Santrifüj kuvvetler altında bu değişimin deneysel olarak tespit edilmesi zordur. Literatürde genellikle bu deneyler bir pres altındaki değişimlerin ölçülmesi ile yapılmaktadır (Crawford ve Jones (2011)).

Bu çalışmada yapılan deneylerde Şekil 4.4' de görülen Zwick Roell Z020 model cihaz kullanılmaktadır. Cihaz ile uygulanan kuvvet ve yer değişimi belirlenebilmekte, ölçülen değerler bilgisayar ortamında kaydedilebilmektedir. Pres 0-20 kN kuvvet aralığında yer değiştirme miktarını $\pm 2 \mu\text{m}$ doğruluk ile belirleyebilmektedir. Presin üzerinde 20x20 cm boyutlarında alt ve üst tablalar yer almaktadır.



Şekil 4.4 : Zwick Roell Z020 model basma ölçüm cihazı.

Pres deneylerinin yapılabilmesi için EN60456 (2011) standardında tanımlanan çarşaf, tablaya yerleştirilebilecek şekilde 20x20 cm boyutlarında kesilir. Kesilen parçalar üst üste konulduğunda gözenekli ortamı temsil etmesi amaçlanır. Santrifüj kuvvet altında sıkma işlemi uygulanan kuru kütle miktarı değişkenlik gösterebileceğinden dolayı farklı adetlerde katmanlardan oluşan gözenekli ortamlar oluşturulur. Bu sebeple 20, 40 ve 80 katmandan oluşan deney setleri kesilen çarşafların üst üste yerleştirilmesiyle elde edilir. Sonuçların etkilenmemesi için 3 farklı deney seti hazırlanır ve her ölçümde farklı bir set kullanılır.

Presleme işleminin ıslak tekstillere uygulanması gerektiğinden deney setleri minimum 10 dk. su banyosunda bekletilir ve gözenekli yapının tamamen su ile doldurulması sağlanır. Su banyosundan alınan deney seti preste yer alan tablanın üzerine yerleştirilir ardından üst tabla yavaş yavaş indirilir. Üst tablanın, deney setinin serbest haldeki kalınlığına indiği gözle kontrol edildikten sonra pres üzerindeki konum ve kuvvet sıfırlanır. Bu durumdan itibaren uygulanan kuvvet ve kalınlık değişimi kaydedilir. Uygulanan kuvvet sıfırdan başlayarak santrifüj basıncı içine alacak biçimde değiştirilir. Ölçülen kuvvet ve yer değiştirme miktarları Çizelge 4.4’ de yer almaktadır.

Çizelge 4.4 : Basınç ve katman sayısına bağlı gözeneklilik değişimi.

Katman Sayısı	Kuvvet (N)	Basınç (Pa)	Kalınlık Değişim (mm)	Anlık Kalınlık (mm)	Gözeneklilik	Gözeneklilik Hata Hesabı (±)
20	0	0	0	9,29	0,76	0,013
	3	83	0,25	9,04	0,76	0,013
	10	238	0,66	8,63	0,74	0,014
	30	753	1,1	8,20	0,73	0,015
	77	1933	1,55	7,74	0,71	0,015
	239	5983	2,03	7,26	0,7	0,016
	635	15870	2,39	6,90	0,68	0,017
	1883	47080	2,85	6,44	0,66	0,019
	3226	80660	3,15	6,14	0,64	0,019
	4979	124475	3,44	5,85	0,62	0,020
40	0	0	0	18,80	0,76	0,013
	6	148	1,42	17,38	0,75	0,014
	31	773	2,82	15,98	0,72	0,015
	122	3058	4,23	14,57	0,7	0,016
	396	9898	5,12	13,68	0,68	0,017
	743	18570	5,54	13,26	0,67	0,018
	1322	33045	5,95	12,85	0,66	0,019
	2090	52245	6,32	12,48	0,65	0,019
	2974	74350	6,64	12,16	0,64	0,020
	3943	98570	6,92	11,88	0,63	0,020
80	4893	122321	7,16	11,64	0,62	0,021
	0	0	0	33,80	0,76	0,014
	7	180	0,91	32,89	0,73	0,015
	20	503	2,08	31,72	0,72	0,015
	93	2335	4,36	29,44	0,7	0,016
	541	13523	6,63	27,17	0,67	0,018
	800	19998	7,11	26,69	0,67	0,018
	1796	44900	8,19	25,62	0,65	0,019
	3040	76000	9,02	24,78	0,64	0,019
	3939	98480	9,48	24,32	0,64	0,020
	4922	123045	9,91	23,89	0,63	0,020

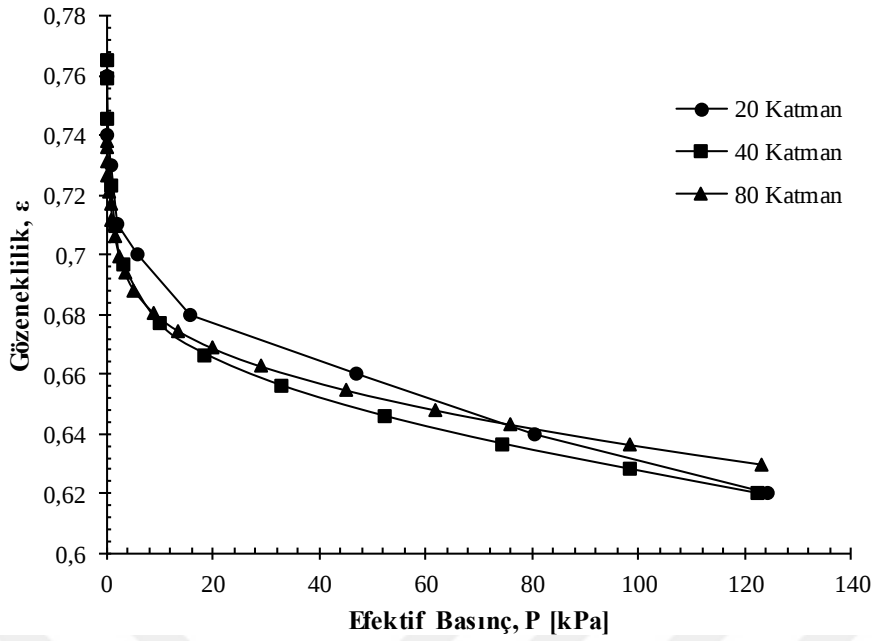
Presin uyguladığı kuvvet, gözenekli yapının kesit alanına (20cmx20cm) bölünerek uygulanan basınç değeri belirlenir. Çizelgede görülen kalınlık değişimi üst tablanın aşağıya doğru yer değiştirme miktarını göstermektedir. Başlangıçta yani yer değiştirmenin sıfır olduğu durumda, gözenekli yapının kalınlığı yapının serbest

haldeki kalınlığıdır. Üst tabla aşağıya doğru yer değiştirmeye başladıktan sonra gözenekli yapı ezildiği için kalınlık değişimi artar. Kuvvet altındaki anlık kalınlık değerleri, serbest haldeki kalınlık değerinden yer değiştirme miktarının çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır. Böylece kuvvet değişimine bağlı olarak anlık kalınlık değerleri elde edilmektedir. Katmanlı yapının gözenekliliği denklem 4.7’ de de yer alan $\varepsilon = 1 - m_s'' n_k / \rho_s L$ ifadesiyle hesaplanmaktadır. Birim alan başına katı kütlesi (m_s'') 0,1713 kg/m² ve fiber yoğunluğu (ρ_s) 1550 kg/m³’ dür. Deney setini oluşturan katman sayısı (n_k) ve anlık kalınlık değeri (L) denklemde yerine yazıldığında gözeneklilik (ε) hesaplanmaktadır. Gözenekliliğin elde edilmesi sırasında farklı sebeplerden kaynaklanan hatalar oluşabileceği için belirsizlik analizi yapılır. Belirsizlik analizinin yapılabilmesi için

$$w_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial y_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial H}{\partial y_j} w_j\right)^2} \quad (4.11)$$

ifadesi kullanılır. w_H hata oranı, H ölçülecek boyutu ve j bağımsız değişken adedini belirtmektedir. Denklem 4.11 kullanılarak yapılan belirsizlik analizi sonucunda elde edilen gözeneklilik hata değerleri Çizelge 4.4’ de yer almaktadır. Ezilme sonunda 0,62 olarak hesaplanan gözeneklilik değerinde ise $\pm 0,020$ hata miktarı oluşmaktadır. Ezilme işlemi sırasında ortalama hata miktarı $\pm 0,017$ olarak hesaplanmaktadır. Bu noktadan sonra yapılan tüm belirsizlik analizinde Denklem 4.11 kullanılmaktadır.

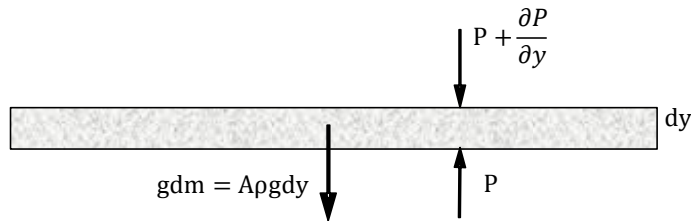
Basınca bağlı gözenekliliğin değişimi Şekil 4.5’ de yer almaktadır ve beklendiği gibi basınç arttıkça gözeneklilik azalmaktadır.



Şekil 4.5 : Farklı adetlerdeki katmanlar için efektif basınca bağlı gözeneklilik değişimi.

Şekilde görüldüğü gibi pres işlemi sonunda 80 katmanlılığın gözenekliliği 40'dan daha yüksektir. 20 katmanlılığın gözenekliliği düşük basınçlarda 40 katmanlıdan büyük iken basınç arttıkça diğer eğrileri kesmektedir. Bu grafikte gözeneklilik boyutsuz bir parametre iken basınç ise boyutludur. 20 katmanın farklı davranışını bu grafikte açıklamak mümkün değildir. Bu sebeple, deneysel çalışma için basınç teriminin nasıl boyutlaştırılacağı belirlenmelidir.

Çizelge 4.4' de yer alan deney verilerini analiz edebilmek için pres altında ıslak durumdaki gözenekli ortamın kuvvet dengesi oluşturulur. Şekil 4.6' de gözenekli ortam için kuvvet dengesi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Pres deneyinde kullanılan gözenekli ortam için kuvvet dengesi.

Şekilde yer alan ρdy hacmindeki kütle, sıvı ve katıdan oluşmaktadır. Pres uygulandığında gözenekli ortama hava girişi olmadığından dolayı tüm gözenek hacmi su ile doludur ve $V_1 = V_p$ dir. Şekilde belirtilen ρ , gözenekli ortamın ortalama yoğunluğudur. Basınç uygulanan ıslak durumdaki gözenekli ortamın kütlesi $m_w =$

$\rho_s V_s + \rho_l V_l$ ile ifade edilmektedir. Eşitliğin her iki tarafı toplam hacim (V_t)' e bölündüğünde ortalama yoğunluk (ρ)

$$\rho = (1 - \varepsilon)\rho_s + \rho_l \varepsilon \quad (4.12)$$

olarak elde edilir.

Presin üst tablası ve yer çekimi ivmesi ıslak durumdaki gözenekli ortama etki ederken presin alt tablası tepki kuvveti oluşturmaktadır. Bu durumda gözenekli ortam için kuvvet dengesi

$$P A - P A - \frac{dP}{dy} dy A - A \rho g dy = 0 \quad (4.13)$$

şeklindedir. Denklemden bulunan P basıncı, A presin taban alanını ve g yer çekimi ivmesini temsil etmektedir. Presin taban alanı (A) denklemin her iki tarafında sadeleştirilir ve denklem 4.14 elde edilir.

$$-\frac{dP}{dy} - \rho g = 0 \quad (4.14)$$

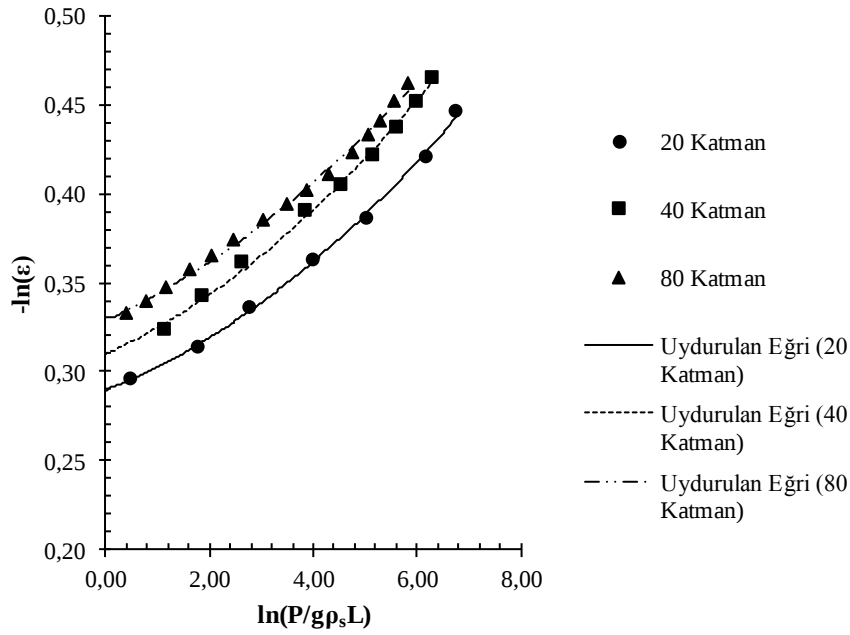
Denklemin içerisinde yer alan yoğunluk (ρ) yerine $(1 - \varepsilon)\rho_s + \rho_l \varepsilon$ yazılır ve her iki tarafın da integralinin alınmasının ardından gözenekliliğin basınç ile değişimini ifade eden denklem 4.15 elde edilir.

$$\frac{P}{g L \rho_s} = 1 - \varepsilon \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_s} \right) \quad (4.15)$$

Elde edilen denklemin her iki tarafında yer alan ifadeler boyutsuzdur ve teorik olarak pres altında gözeneklilik değişimini ifade etmektedir. Ancak teorik olarak denklem 4.15 elde edilmiş olsa da Şekil 4.5' de yer alan pres basıncına karşılık olarak gözeneklilik değişimi incelendiğinde, aralarında lineer bir ilişki olmadığı görülmektedir. Ayrıca 20, 40 ve 80 katmandan oluşan deney setleri için eğriler iç içe geçmekte ve birbirinden ayırtılamamaktadır. Bu sebepten dolayı denklem 4.16' de yer alan ilişki araştırılmaktadır.

$$\varepsilon \sim f\left(\frac{P}{g L \rho_s}\right) \quad (4.16)$$

ε ve $\left(\frac{P}{g L \rho_s}\right)$ ifadelerinin logaritması alınarak farklı adetlerdeki katmanlar için Şekil 4.7' de yer alan grafik çizilir.



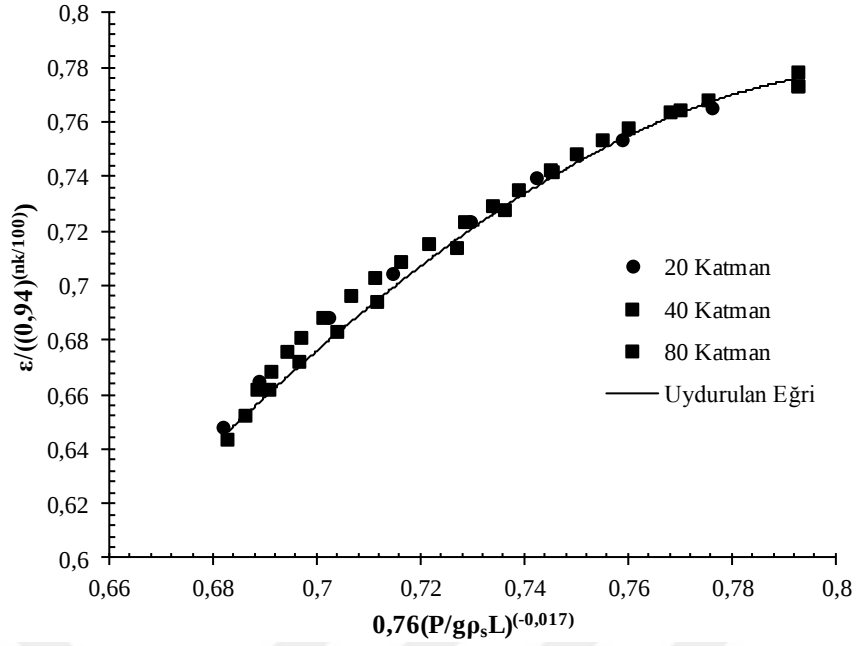
Şekil 4.7 : $-\ln(\varepsilon)$ ile $\ln\left(\frac{P}{gL\rho_s}\right)$ arasındaki ilişki.

Grafik incelendiğinde, $-\ln(\varepsilon)$ ve $\ln(P/gL\rho_s)$ eğrilerinin katman sayısına (n_k) bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmektedir. Farklı katman sayılarından oluşan gözenekli ortam için $\ln(P/gL\rho_s)$ - $\ln(\varepsilon)$ eğrisi değişkenlik göstermektedir. Şekil 4.7’ de yer alan eğrilerin incelenmesi sonucunda $\varepsilon = f(P/gL\rho_s, n_k)$ formunda analiz gerçekleştirilir. Çizelge 4.4’ de yer alan deneysel veriler MINITAB 16 yazılımı kullanılarak analiz edildiğinde,

$$\varepsilon = 0,76(0,94)^{\frac{n_k}{100}} \left(\frac{P}{gL\rho_s} \right)^{-0,017} \quad (4.17)$$

ifadesi elde edilir. EK-C içerisinde regresyon analizinin detayları yer almaktadır. Regresyon analizinin sonunda elde edilen %98,69 R-Sq değeri ile basınç, katman sayısı ve gözeneklilik arasında yüksek seviyede bir ilişki olduğu tespit edilmektedir.

Çizelge 4.4’ de yer alan deneysel veriler ve denklem 4.17 ile hesaplanan değerler farklı bir formda Şekil 4.8’ de tekrar çizdirilmiştir.



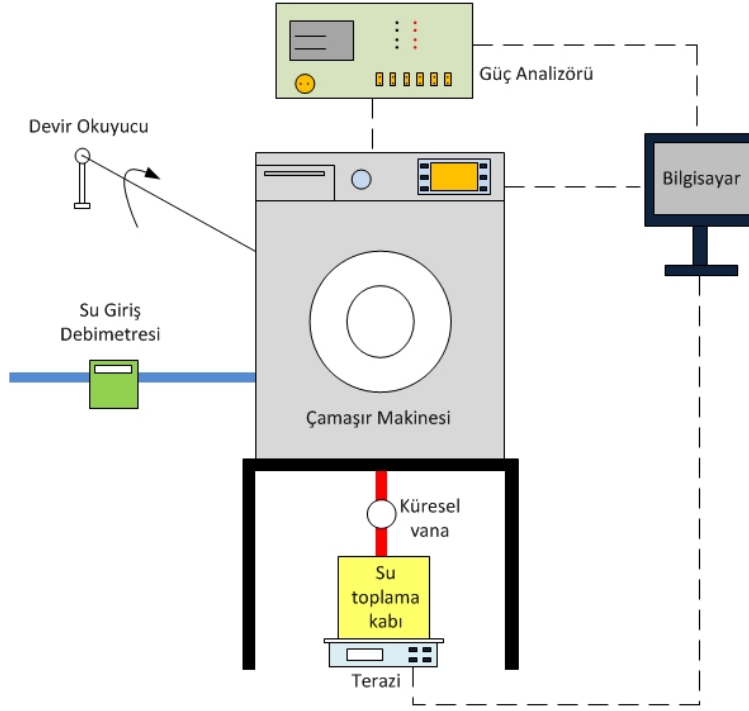
Şekil 4.8 : Gözeneklilik hesabında uydurulan eğrinin deneysel veriler ile karşılaştırılması.

Grafiğin x ekseninde $0,76(P/(gL\rho_s))^{-0,017}$ yer alırken y eksenine $\varepsilon/(0,94)^{\frac{nk}{100}}$ değerleri bulunmaktadır. Grafik incelendiğinde, farklı katman sayısı için elde edilen deneysel verilerin üst üste geldiği ve uydurulan eğrinin bu noktalardan geçtiği görülmektedir.

Literatürde bulunan gözeneklilik ile basınç arasındaki ilişkiyi tanımlayan çalışmalarda, analiz sonucunda elde edilen denklemlerde birim uyumsuzluğu gözlemlenmektedir. Bu çalışma sırasında birim uyumu da sağlanarak literatürden farklı olarak denklemin her iki tarafında boyutsuz ifadeler elde edilmektedir.

4.4 Santrifüj Su Uzaklaştırma Deney Düzeneğinin Hazırlanması

Deney düzeneği Şekil 4.9’ da şematik olarak görülmektedir. Düzenekteki esas elaman ev tipi çamaşır makinasıdır. Düzenekte ayrıca debimetre, devir ölçer, güç analizörü, bilgisayar, terazi, küresel vana ve su toplamak için kova kullanılmaktadır.



Şekil 4.9 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Makinenin sıcaklık ölçümleri, makinenin aldığı su miktarı, tahliye edilen su miktarı, güç analizöründen elde edilen veriler ve motorun anlık devir sayısı Veri Toplama Sistemi (VTS) adı verilen Agilent VEE tabanlı yazılım ile toplanmaktadır.

Makineye sağlanan gerilim, anlık çekilen akım ve gücün ölçüldüğü analizör Şekil 4.10' da gösterilmektedir. Analizör cihazı SCHNEIDER ELECTRIC marka ION 6200 model olup ölçülen enerji ve güç değerleri için 0.5% doğruluğa sahiptir.



Şekil 4.10 : Deney düzeneğinde kullanılan güç analizörü.

Sıkma sırasında makineden çıkan su miktarını ölçmek için hassas terazi kullanılmaktadır. Terazi, CAS marka ED-H serisi terazi olup RS232 bağlantısı sağlanabilmektedir ve $\pm 2\%$ ölçüm hatasına sahiptir.

Şekil 4.11' de devir ölçmek için kullanılan rotary encoder ve su giriş miktarını ölçmek için kullanılan debimetre yer almaktadır. Devir ölçümü için AUTONICS marka E50S8-360-3-T-24 model rotary encoder ve debi ölçümü için ENDRESS HAUSER

marka Promag P50 serisi elektromanyetik tip debi ölçer kullanılmaktadır. Kullanılan debimetre maksimum $\pm 0,5\%$ ölçüm hatasına sahiptir. Debimetre ile çamaşır makinesi arasında bir adet su ayar regülatörü kullanılmakta ve böylece su alma sırasında basınç 240 ± 50 kPa aralığında tutulmaktadır.



Şekil 4.11 : Deney düzeneğinde kullanılan debimetre ve devir ölçer.

Deneylerde sıcaklık ölçümünde T tipi ısıl çift kullanılmaktadır. Kullanılan ısıl çift ± 0.5 °C ölçüm hatasına sahiptir. Isıl çift deneyler sırasında kazan ile gövde arasında sızdırmazlığı sağlayan körük üzerine konumlandırılmaktadır. Deneyler sırasında EN60456 (2011) standardında tariflenen biçimde tanklarda şartlandırılan su kullanılmaktadır. Şartlandırılan suyun iletkenliği 750 ± 150 μ s, sertliği $2,50 \pm 0,20$ mmol/l ve pH' ı $7,5 \pm 0,2$ aralığındadır.

Deneyler sırasında kullanılan çarşaf numunesinin kesintisiz olarak tambura sarılabilmesi için mevcutta yer alan kanatlar çıkarılmıştır. Çarşafın kat kat tambura bağlanması ve dönme sırasında çarşafın tamburdan ayrılmaması için 13 adet M6x70 boyutunda paslanmaz cıvata tambura kaynatılmaktadır. Şekil 4.12' de tambura kaynatılan paslanmaz cıvataların görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.12 : Tambura kaynatılan paslanmaz cıvataların görünümü.

Deneyler sırasında merkezkaç kuvvet altında su atma hızı ölçüleceğinden makine 35 cm yüksekliğe sahip bir platform üzerine yerleştirilir. Bu sayede makineden teraziye doğru suyun akışı sağlanmış olur.

Deneyler sırasında 1400 d/dk hızında sıkma işlemi gerçekleştirileceğinden titreşim problemi yaşamamak için makinenin bulunduğu platform zemine sabitlenmektedir. Buna ek olarak makine bir kayış-kilit mekanizması yardımıyla platforma bağlanmaktadır. Şekil 4.13’ de tamamlanan son durumu yer almaktadır.



Şekil 4.13 : Deney düzeneğinin görünümü.

4.5 Deney Numuneleri ve Gözenekli Ortamın Hazırlanışı

EN60456 (2011) standardında tanımlanan çarşaf, deneysel çalışmalarda tambur iç yüzeyini saracak şekilde kesilir. Kesilen parçalar üst üste konulduğunda gözenekli ortamı temsil etmesi amaçlanır. Ancak tamburun silindirik olması sebebiyle çarşaf lar farklı uzunluklarda kesilmektedir. Belirtilen duruma dikkat edilerek çarşaf katmanları üst üste yerleştirilir ve deney numune setleri oluşturulur. Hazırlanan her bir numune seti için numara verilir ve set numarası arttıkça katmanlar üst üste yerleştiğinden numunelerin boyu kısalır. Ayrıca, deney sırasında cıvataların numuneleri tutabilmesi için hazırlık aşamasında çarşaf ların üzerine delikler açılmaktadır. Şekil 4.14’ de deneylerde kullanmak üzere hazırlanan numune setleri yer almaktadır.



Şekil 4.14 : Deneylerde kullanılacak numune setleri.

Toplamda 13 deney numunesi elde edilmektedir. Hazırlanan her numune seti için standart oda koşullarında ölçülen kuru kütle miktarı, boy, en ve katman sayısı Çizelge 4.5’ de yer almaktadır.

Çizelge 4.5 : Deneylerde kullanılan numune setlerinin listesi.

Numune Seti	Kuru Kütle (kg)	Boy (cm)	Katman Sayısı
1	1,97	147,5	20
2	0,57	142,5	6
3	0,56	139	6
4	0,55	138	6
5	0,54	135,2	6
6	0,52	131	6
7	0,51	130	6
8	0,50	127	6
9	0,50	123,5	6
10	0,48	122,5	6
11	0,48	119	6
12	0,48	116,3	6
13	0,47	115	6

Deneyler sırasında ilk olarak her zaman 1 nolu numune seti, tamburun içerisinde en dış katmana yerleştirilmektedir. Hazırlanan diğer numune setleri, gerekli kuru tekstil kütlelerine ulaşana kadar tamburun iç yüzeyine üst üste konulur. Dönme ve su alma

sırasında yerleştirilen numune setlerinin cıvatalardan ayrılmaması için somun ve plastik plakalar kullanılmaktadır. Şekil 4.15’ da tambur içine yerleştirilen numune setlerinin görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.15 : Deneylerde kullanılacak numunelerin tambura yerleşimi.

Her deney öncesinde hedeflenen kuru kütle miktarına (yük miktarı) ulaşana kadar numune setleri yerleştirileceğinden yük miktarı ile hazırlanan numune setleri eşleştirilir. Yük miktarı ile set numaraları arasındaki ilişki Çizelge 4.6’ da yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Numune seti ve yük miktarı arasındaki ilişki.

Yük (kg)	Katman Sayısı	Numune Seti No
2	20	1
4	44	1,2,3,4 ve 8
8	92	1-13 (Hepsi)

2 kg kuru kütleyle sahip yük elde edebilmek için sadece numune 1 kullanılırken 8 kg yük için tüm numuneler üst üste yerleştirilmektedir. 4 kg yük için ise 1,2,3,4 ve 8 nolu numuneler kullanılmaktadır.

4.6 Deneylerin Yapılma Şekli ve Deney Listesi

Çizelge 4.7’ de takip edilecek deney listesi yer almaktadır. Deney listesi incelendiğinde; su sıcaklığı, yük miktarı ve tambur devri parametrelerinin incelendiği görülmektedir.

Çizelge 4.7 : Deney listesi.

Deney No	Sıcaklık (°C)	Yük (kg)	Devir (d/dk)
1	20	2	600
2	20	2	1000
3	20	2	1400
4	20	4	600
5	20	4	1000
6	20	4	1400
7	20	8	600
8	20	8	1000
9	20	8	1400
10	60	2	600
11	60	2	1000
12	60	2	1400
13	60	4	600
14	60	4	1000
15	60	4	1400
16	60	8	600
17	60	8	1000
18	60	8	1400

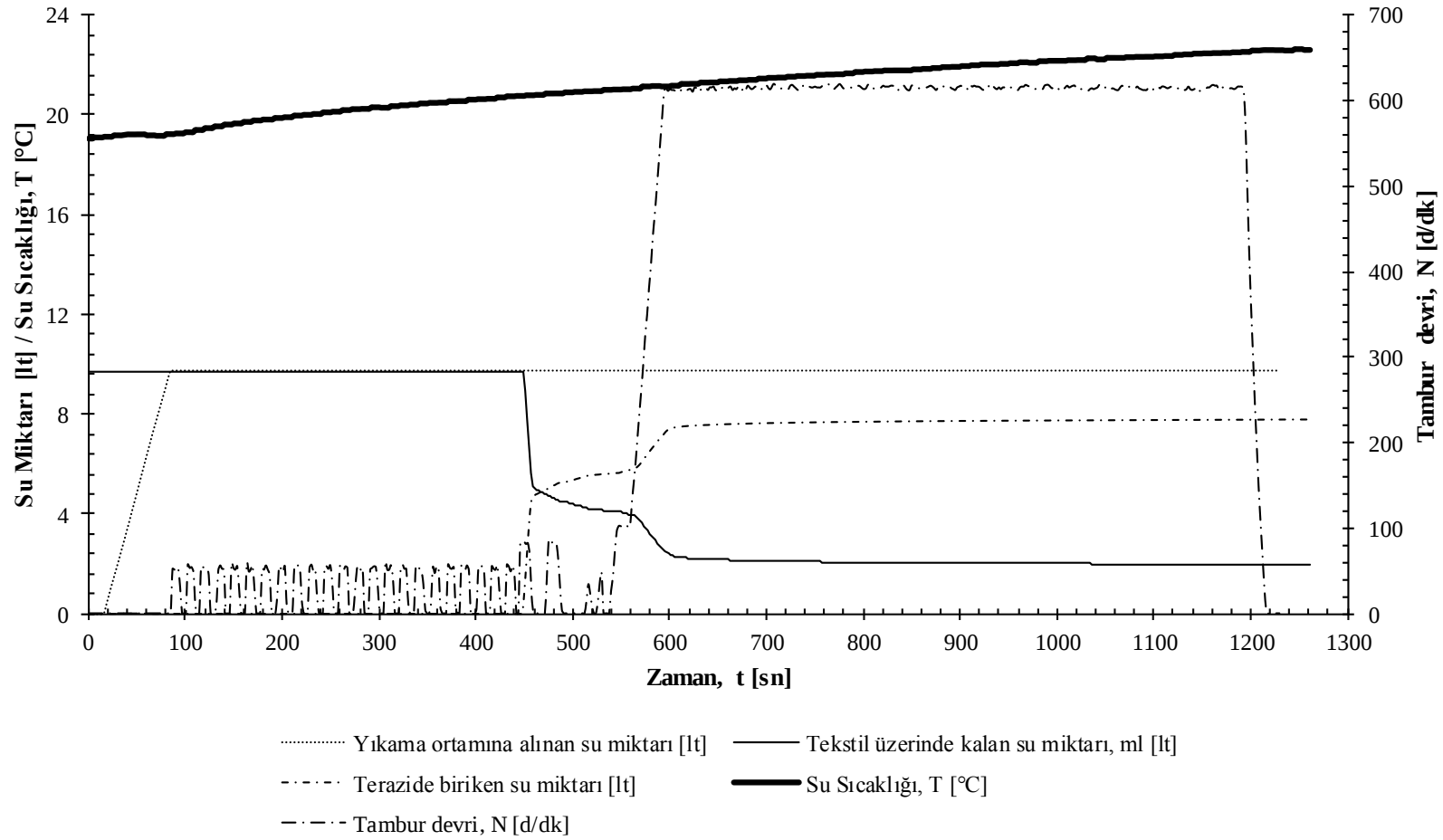
Deneylerin yapılışı sırasında izlenen adımlar örnek olarak 1. deney üzerinden anlatılmaktadır. 1. deneyde yük miktarı 2 kg, su sıcaklığı 20 °C ve tambur hızı 600 d/dk olarak belirlenmektedir. Deneyin başlangıcında 1 nolu numunenin kuru durumdaki kütle miktarı ölçülür ve kaydedilir. Ardından numune tambur iç yüzeyine sarılır. Pim, somun ve plastik parçadan yararlanılarak numune tambura sabitlenir. Çamaşır makinesinin kapağı kapatıldıktan sonra terazi sıfırlanır ve veri toplama sistemi çalıştırılır. Deney için hazırlanan yazılım yüklenir ve program başlatılır.

Deney sırasında 9,73 l su yıkama ortamına alınır ve tambura tutturulan numuneyi ıslatmak için 6 dk boyunca tambur döndürülür. Kazanda bulunan ısıtıcı, döndürme sırasında hedef değer olan 20 °C' ye ulaşılan kadar numuneyi ve suyu ısıtır. Islatma işleminden sonra küresel vana açılır ve numune tarafından emilemeyen kazandaki fazla su, terazinin üzerinde bulunan kaba dolar. Bu sebepten, Şekil 4.16' da 450 - 500 sn aralığında terazide biriken su değerinde birden artış gözlemlenir. Daha sonra çamaşır makinesi, sıkma işleminden önce rutin olarak gerçekleştirdiği 100 d/dk' da dengesiz yük kontrolü yapar. Deneysel çalışmamızda numune homojen olarak tambura sarıldığından sıkma işlemine başlanır. 550-600 sn aralığında tambur hızını arttırır ve sonunda hedef devir olarak 600 d/dk' ya ulaşılır. İvmelenme sırasında

terazide biriken su kütlesinde artış görülmektedir. Tambur 600 d/dk hızda 10 dk boyunca döndürülür ve ardından program tamamlanır. Hedeflenen hızda tambur dönerken, terazide biriken su miktarının ivmelenmeye kıyasla daha az arttığı ve sonunda asimptota ulaştığı görülmektedir.

Deney sırasında veri toplama sistemi kullanılarak; kazana alınan su miktarı, devir, sıcaklık, terazide biriken su miktarı, gerilim ve akım değerleri kaydedilmektedir. Deney sonunda tamburdan sökülen numunenin ıslak durumdaki toplam kütlesi yine ölçülür. Islak olan numune bir sonraki deneyde kullanmak üzere dolap tipi endüstriyel kurutucuda kurtulur ve ardından min. 8 saat standart oda koşulunda sererek bekletilir.

Yukarıda belirtilen yöntemin aynısı uygulanarak Çizelge 4.7' de yer alan tüm deneyler sırasıyla gerçekleştirilir. Deneyler sırasında veri toplama sistemiyle kaydedilen deney dataları EK-B' de yer alan çizelgelerde verilmektedir.



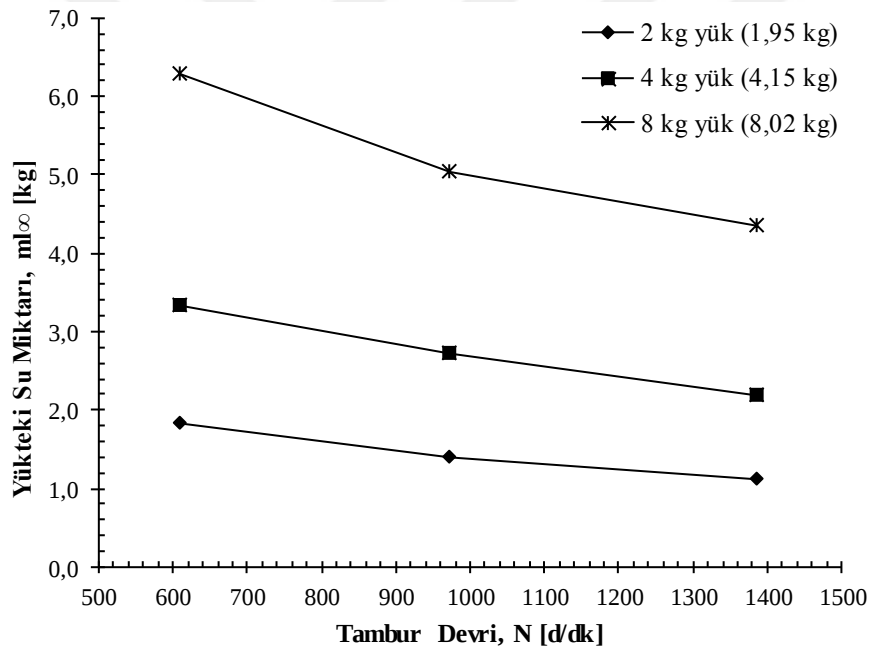
Şekil 4.16 : 2kg yük, 20 °C su sıcaklığı ve 600 d/dk tambur hızı koşulu için gerçekleştirilen deney.

4.7 Sıkma İndeksi Değişiminin İncelenmesi

Deney Sonu Sıkma İndeksinin Belirlenmesi

İlk olarak deney sonunda yükte kalan su miktarının grafiksel analizi yapılır. Deneysel çalışmada, kuru kütle miktarı (m_d) ve deney sonrasında su içeren toplam kütle miktarı (m_w) ölçülmektedir. Belirtilen iki ölçümün farkı alındığında ($m_w - m_d$) sıkma işlemi kaynaklı yükte kalan su miktarı elde edilir. Sıkma işleminden önce atmosferden emilen nem değeri denklem 4.3 ($m_d/1 + \gamma$) kullanılarak hesaplanır ve sıkma işleminden gelen su miktarına eklenir. Böylece yükte kalan toplam su miktarı $m_w - m_d + m_d/1 + \gamma$ formülü kullanılarak tüm deneysel çalışmalar için hesaplanır.

Farklı devir ve kuru yük miktarına bağlı olarak sıkma sonunda elde edilen su miktarı aşağıda yer almaktadır.



Şekil 4.17 : T=20 °C deney başı su sıcaklığı için farklı kuru yük miktarı ve devirde yükte kalan su miktarı.

Devir artışına göre grafik yorumlandığında, tambur devri arttıkça yükte kalan su miktarının azaldığı görülmektedir. Benzer biçimde yüke göre inceleme yapıldığında yük miktarı arttıkça yükte kalan su miktarı da artmaktadır. 8 kg ile 4 kg arasında su kütlesi farkının 2 kg ile 4 kg arasındaki su kütlesi farkından daha fazla olduğu tespit edilmektedir.

Elde edilen deneysel veriler EN60456 (2011) standardı içerisinde tanımlanan sıkma indeksi hesaplanarak da analiz edilir. Deneysel çalışmada, kuru kütle miktarı (m_d) ve

deney sonrasında su içeren toplam kütle miktarı (m_w) ölçülmektedir. Ölçülen m_d ve m_w değerleri denklem 4.8’ de belirtilen $(m_w - m_d)/m_d$ formülünde yerine yazıldığında her deney için sıkma indeksi hesaplanmaktadır. Deney sonunda elde edilen sıkma indeksi R_∞ sembolüyle ifade edilmektedir. Çizelge 4.8’ de hesaplanan sıkma indeksi değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.8 : Sıcaklık, devir ve yük miktarına bağlı sıkma indeksi değişimi.

Test No	Sıkma Başında Sıcaklık (°C)	Görünen Yük (kg)	Görünen Devir (d/dk)	Ölçülen Kuru Yük (kg)	Toplam Yük (kg)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ölçülen Devir (d/dk)	Sıkma İndeksi
1			600		3,64	18,8	610	0,87
2		2	1000	1,95	3,20	20,0	973	0,64
3			1400		2,93	18,9	1387	0,50
4			600		7,17	21,2	609	0,73
5	20	4	1000	4,15	6,57	22,6	969	0,58
6			1400		6,02	24,2	1384	0,47
7			600		13,71	21,3	609	0,71
8		8	1000	8,02	12,46	21,5	968	0,55
9			1400		11,78	23,1	1382	0,45
10			600		3,56	52,5	608	0,82
11		2	1000	1,95	3,18	51,0	966	0,63
12			1400		2,91	50,6	1381	0,49
13			600		7,10	53,3	608	0,71
14	60	4	1000	4,15	6,41	51,3	967	0,54
15			1400		5,94	51,2	1384	0,45
16			600		13,42	50,7	608	0,67
17		8	1000	8,02	12,25	49,8	967	0,53
18			1400		11,45	48,4	1381	0,43

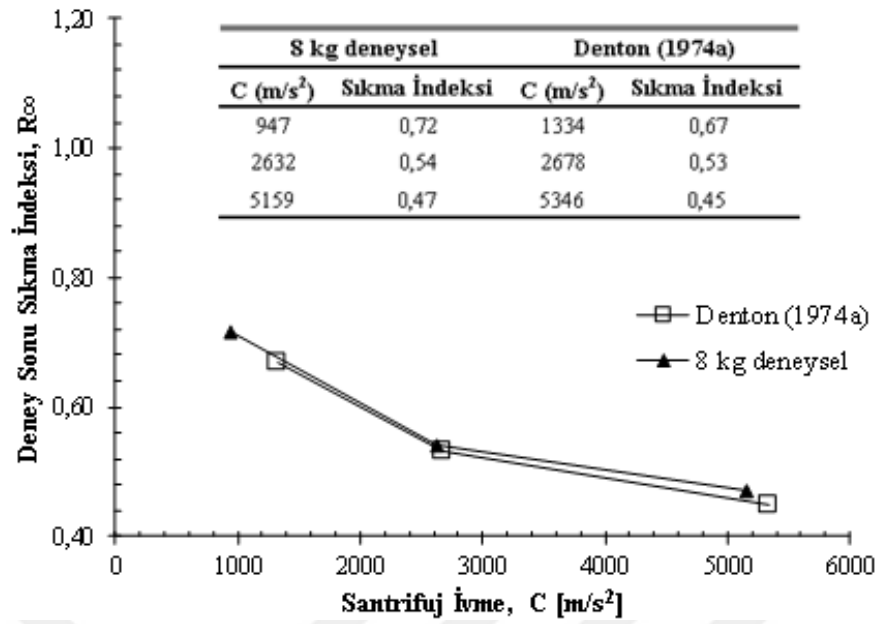
Çizelgede, görünen yük ve devir değerleri ile ölçülen yük ve devir değerleri yer almaktadır. Grafiklerde her ne kadar görünen yük ve devirlere atıfta bulunulsa da tüm hesaplamalarda ölçülen değerler kullanılmaktadır. Sıkma işleminin başında su sıcaklığı 20 °C ve 60 °C’ ye getirilse de sıkma işlemi boyunca sıcaklık değişmektedir. 20 °C deneylerinde sıcaklık artarken, 60 °C deneylerinde sıcaklık azalmaktadır. Bunun sebebi ise deneyler atmosfer basıncında gerçekleştirildiğinden dolayı olayın fizikini bozmamak için kazananın giriş ve çıkış kanalları açıktır. Dolayısıyla bu bölgelerden hava giriş ve çıkışı sağlanmakta, sıkma deneyi boyunca sıcaklık değişmektedir. Deneysel çalışmaların analizi sırasında ortalama sıcaklık kullanılmaktadır. Suyun

yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi gibi termofiziksel özelliklerinin hesabında kullanılan değerler REFPROP (2017) yazılımının veri tabanından alınmaktadır. Bu değerlere uygun formda eğriler uydurularak elde edilen denklemler, hesaplamalarda kullanılmaktadır. EK-H’ de konu hakkında detaylı bilgi yer almaktadır.

Çizelgede yer alan sıkma indeksi sonuçları, geçmişte yürütülen benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Literatür araştırması tekrar gözden geçirildiğinde Denton (1974a)’ ın benzer bir çalışmayı gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Denton (1974a) çalışmalarında en fazla 1450 d/dk’ da dönme hızının etkisini incelemekte ve deneylerinde 20 in. (50,8 cm) çapında tambur kullanmaktadır. Hem incelenen devir aralığı hem de tambur çapı açısından gerçekleştirdiğimiz deneyler ile benzerlik oluşturmaktadır. Çünkü yaptığımız çalışmada 48 cm çapına sahip tambur en fazla 1400 d/dk. hızda sürülmektedir. Denton (1974a) yaptığı çalışmalarda kumaş parçaları yerine tamburun içerisine yerleştirilmiş iplik paketleri kullanmaktadır. Deneylerinde kullanılan yük miktarı hakkında detaylı bir bilgi yer almamaktadır. Denton (1974a), deneylerin analizi sırasında sıkma indeksinin santrifüj ivme (m/s^2)’ ye göre değişimini araştırmaktadır.

$$C = \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 r_o \quad (4.18)$$

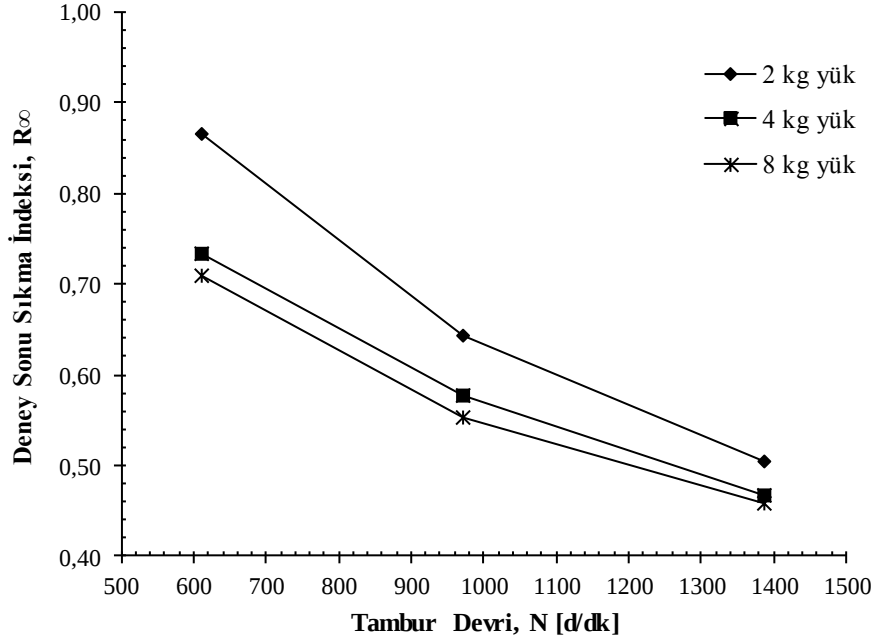
N d/dk biriminde tambur dönme hızını, r_o tambur yarıçapını ve C santrifüj ivmeyi belirtmektedir. Deneysel çalışmalarımızda 8 kg yük için ölçülen ve Denton (1974a)’ ın gerçekleştirdiği çalışmalarda elde ettiği sıkma indeksi sonuçları aynı grafikte gösterilmiştir. Aşağıda her iki çalışma sonunda elde edilen veriler yer almaktadır.



Şekil 4.18 : Denton (1974a) ile mevcut çalışmanın karşılaştırılması.

Deneyssel çalışmalarımız ile Denton (1974a) tarafından elde edilen sonuçlar incelendiğinde sıkma indeksi değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. 2678 m/s² santrifuj ivmede Denton (1974a) 0,53 sıkma indeksi elde ederken, bizim çalışmamızda 2632 m/s² santrifuj ivmede 0,54 sıkma indeksi ölçülmektedir. Daha düşük santrifuj ivme değerlerinde sıkma indeksi eğrilerinin üst üste oturduğu görülmektedir. 5000 m/s²' den daha yüksek santrifuj ivmede sıkma indeksi farkı artmaktadır. Literatürde benzer bir çalışmaya sahip Denton (1974a) ile sonuçlar karşılaştırılmakta ve mevcut yürütülen deneylerin doğrulaması yapılmaktadır.

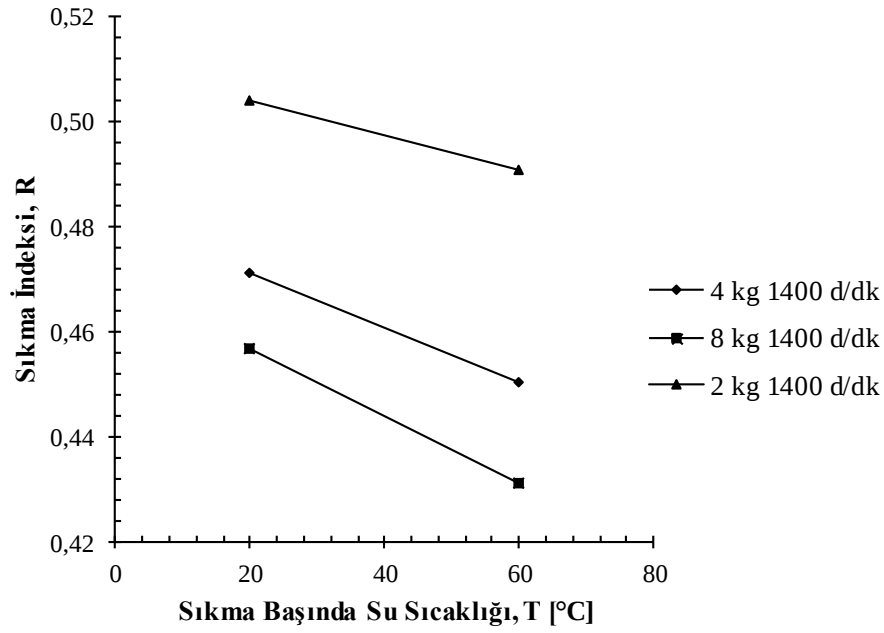
Bu noktadan sonra farklı yük miktarlarında tambur devrinin sıkma indeksi üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.19' da, yük miktarı ve tambur devrine bağlı olarak sıkma indeksi eğrileri yer almaktadır.



Şekil 4.19 : $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ deney başı su sıcaklığı için farklı yük miktarı ve devirde deney sonu sıkma indeksinin araştırılması.

Grafik incelendiğinde devir miktarı arttıkça sıkma indeksinin azaldığı tespit edilmektedir. Aynı grafik, yük miktarına bağlı olarak yorumlandığında 2 kg için elde edilen sıkma indeksi değerlerinin 4 kg ve 8 kg' dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle 600 d/dk tambur hızında; aradaki farkın daha fazla olduğu, devir arttıkça farkın azaldığı görülmektedir. 4 kg ve 8 kg yük miktarlarında ise net bir ayrım yapılamamaktadır. Bu grafikte deney sonunda elde edilen sıkma indeksi boyutsuz bir parametre iken tambur devri boyutludur. 4 kg ve 8 kg yük miktarlarının davranışını bu grafikte açıklamak mümkün değildir. Bu sebeple, tambur devrinin boyutsuzlaştırılarak gerçekleştirilen analiz çalışmanın ileriki aşamalarında açıklanmaktadır.

Deneyler sırasında kontrol edilen diğer parametre de su sıcaklığıdır. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ düşük su sıcaklığı ve $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ yüksek su sıcaklığının sıkma indeksine etkisi incelenmiştir. İstenen sıcaklığa ulaşabilmek için sıkma işleminin başında tekstil ve su ısıtılmaktadır. Şekil 4.20' de, farklı miktarda kütleye sahip yükler için su sıcaklığına bağlı sıkma indeksinin değişimi yer almaktadır.

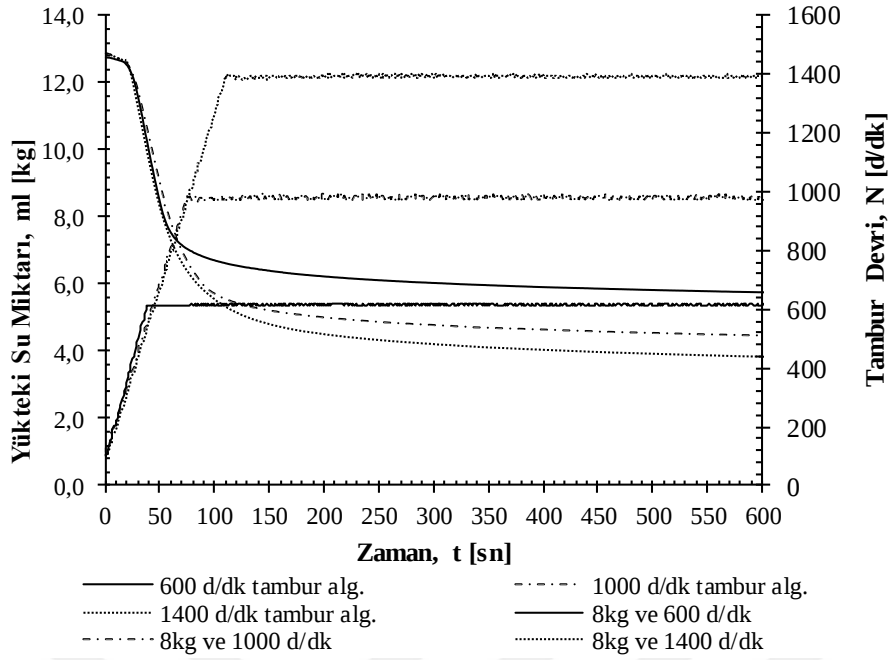


Şekil 4.20 : Farklı yük miktarı ve su sıcaklığı için sıkma indeksinin araştırılması.

Grafik incelendiğinde tüm yüklerde sıcaklığın artması sonucu sıkma indeksinin azaldığı görülmektedir. Ancak sıkma indeksindeki bu azalma, tambur devrinin etkisiyle karşılaştırıldığında etkinin daha az olduğu tespit edilmektedir.

Zamana Bağlı Sıkma İndeksinin Belirlenmesi

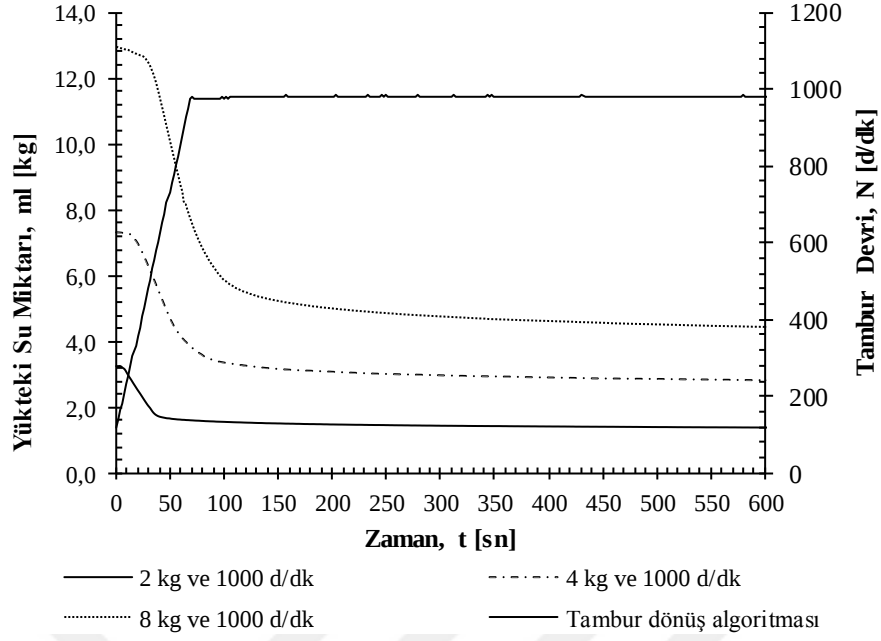
Deney sonunda elde edilen yükte kalan su miktarı ve sıkma indeksi değerlerinin grafiksel analizinden sonra zamana bağlı değişimler incelenmiştir. Şekil 4.21’ de, 8 kg (8,02 kg) yük için farklı devirlerde zaman bağlı olarak kalan su miktarları yer almaktadır.



Şekil 4.21 : 8 kg (8,02 kg) yükün farklı devirlerde zamana bağlı yükte kalan su kütlesinin değişimi ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıkma başında sıcaklık için).

Grafik genel hatlarıyla incelendiğinde; sıkma işleminin başı, ivmelenme ve sabit devirde dönme olmak üzere 3 fazın olduğu görülmektedir. Sıkma işlemi 100 d/dk dönme hızında başlamaktadır. Sıkma başlangıç fazı olan 0-20 aralığında, tambur devir hızları çok düşük mertebede olduğundan dolayı yükteki su miktarı çok az değişmektedir. 20. sn' den sonra tambur ivmelenmeye devam ederken yükteki su miktarında birden azalma görülmektedir. 20-60 sn aralığında su miktarı lineer olarak azalmaktadır. Her üç deneyde tambur hedeflenen hız değerine ulaştıktan sonra kalan su miktarı değerinin değişim hızı azalmaktadır. Bu durum özellikle 1400 d/dk hızda yürütülen deneyde daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Hedeflenen devirde tambur döndükçe kalan su miktarı asimptota ulaşmaktadır. 200. sn' den sonra yükten çok az miktarda suyun uzaklaştırılabildiği ve bu zaman adımıdan önce yükteki suyun çoğu uzaklaştırılmaktadır. Yükte kalan su miktarı en fazla 600 d/dk tambur dönme hızında, en düşük 1400 d/dk tambur dönme hızında olmaktadır. Ayrıca 600 d/dk-1000 d/dk aralığında yükteki su kütlesi farkının 1000 d/dk-1400 d/dk aralığındaki farktan daha fazla olduğu görülmektedir.

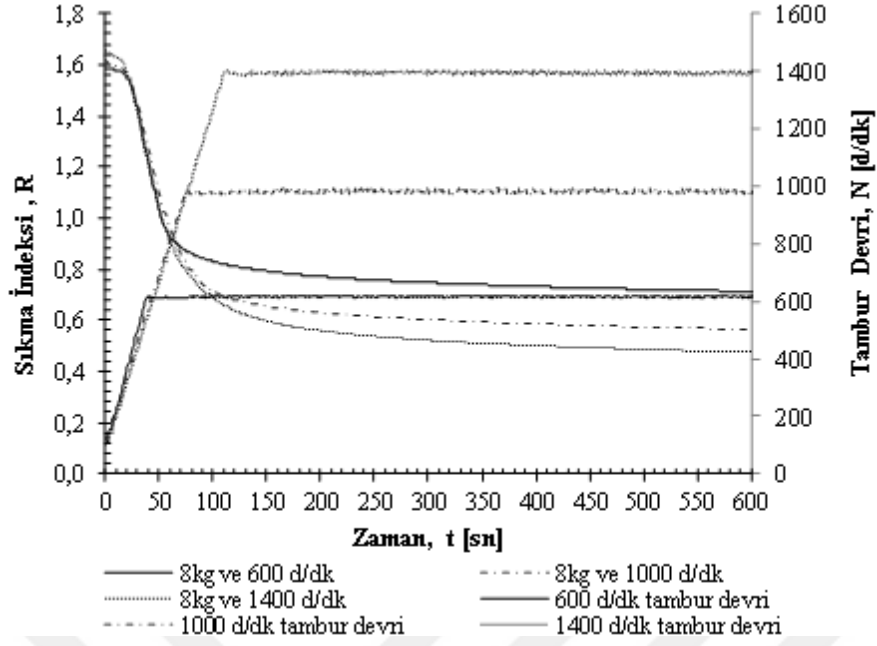
1000 d/dk görünen tambur hızında, yükte kalan su kütlesinin zamana ve kuru yük miktarına bağlı olarak değişimi, Şekil 4.22' de yer almaktadır.



Şekil 4.22 : 1000 d/dk görünen tambur hızında farklı yüklerde zamana bağlı su kütlesindeki değişim (T=20 °C sıkma başında sıcaklık için).

Her üç deney için sıkma işleminin başında uzaklaştırılan su miktarı çok düşüktür. İvmelenme ile birlikte yükte kalan su miktarı lineer olarak azalmaya başlar. Şekil 4.21’ den farklı olarak, devrin dışında yük miktarının da eğrinin asimptota oturmaya başladığı nokta üzerinde etkili olduğu bu grafikte ortaya çıkmaktadır. Örneğin; 2 kg öngörülen yük için henüz tambur 1000 d/dk hıza ulaşmadan yükteki su miktarının asimptota ulaştığı görülmektedir. 8 kg miktarında ise bu durum daha farklıdır. Tambur 1000 d/dk hıza ulaşp 100 sn. ye kadar bu hızla dönerken yükteki su miktarındaki azalma lineer olmaktadır. Bu noktadan sonra yükteki su miktarı eğrisi asimptota oturmaya başlar. 1000 d/dk tambur hızında tüm yük miktarları için sıkma işleminin sonuna doğru yükteki su miktarı değeri değişmemektedir.

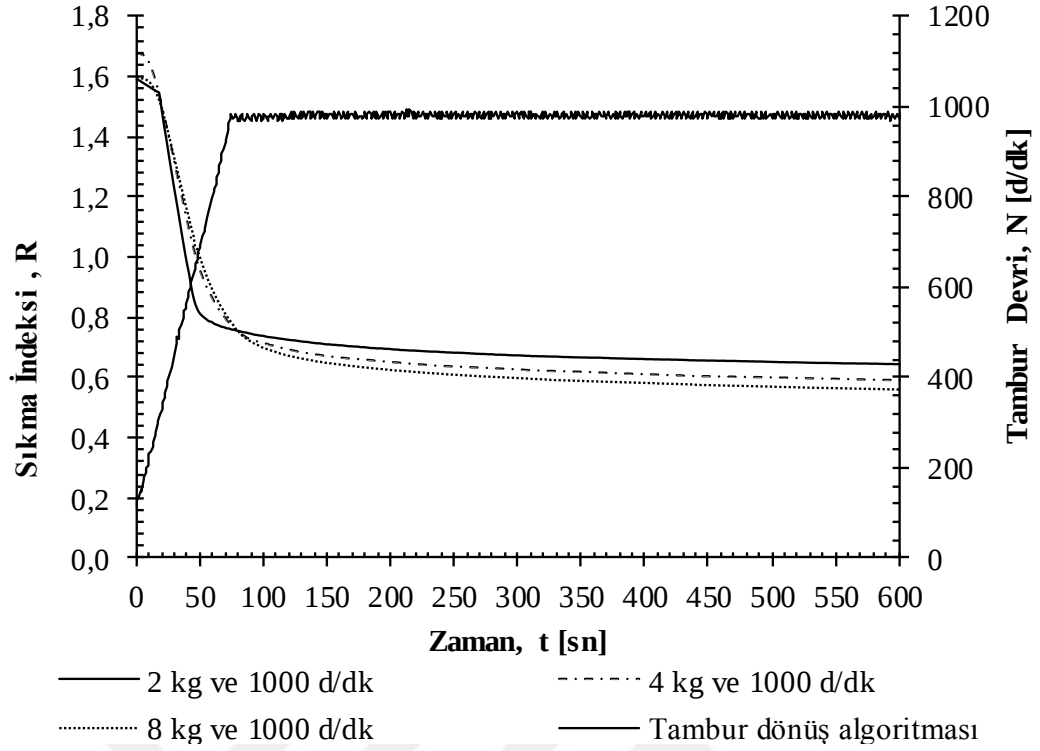
Sıkma sonunda yükte kalan su miktarına basit olarak her zaman adımı için terazide biriken su miktarı (Δm_l) eklendiğinde $((m_w - m_d + \Delta m_l))/m_d$ zamana bağlı olarak sıkma indeksi (R) hesaplanır. Şekil 4.23’ de, 8 kg kütleye sahip yükün farklı devirler için zamana bağlı sıkma indeksi değişimi yer almaktadır.



Şekil 4.23 : 8 kg (8,02 kg) yükün farklı devirlerde zamana bağlı sıkma indeksi değişimi ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıkma başında sıcaklık için).

Grafik incelendiğinde, işlemin başında 0-20 sn aralığında sıkma indeksi 1.60' dan daha yüksektir. Tambur ivmelenmeye devam ettikçe sıkma indeksi azalır. 20-60 sn aralığında sıkma indeksi lineer olarak azalır. Her üç deneyde tambur hedeflenen hız değerine ulaştıktan sonra sıkma indeksinin düşme hızı azalmaktadır. Hedeflenen devirde tambur döndükçe sıkma eğrileri asimptota oturmaktadır. Sıkma indeksi en yüksek değere 600 d/dk tambur dönme hızında, en düşük değere ise 1400 d/dk tambur dönme hızında ulaşmaktadır. 600 d/dk – 1000 d/dk aralığında sıkma indeksi farkının, 1000 d/dk-1400 d/dk aralığındaki farktan daha fazla olduğu görülmektedir.

Tambur devri 1000 d/dk' da sabit tutularak yük miktarının zaman bağlı olarak sıkma indeksine olan etkisi Şekil 4.24' de yer almaktadır.



Şekil 4.24 : 1000 d/dk tambur hızında farklı yüklerde zamana bağlı sıkma indeksinin değişimi (T=20 °C için).

Grafik incelendiğinde, ivmelenme sırasında sıkma indeksinin lineer olarak azaldığı görülmektedir. 2 kg yük için su miktarı daha az olduğundan dolayı eğri diğerlerine göre daha erken asimptota oturmaya başlar. Hedef devir hızında tambur döndükçe tüm yükler için sıkma indeksleri asimptota ulaşmakta, sıkmanın sonuna doğru tamburdan çıkan su durduğu için sıkma indeksi eğrisi yatay olmaktadır.



5. DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ

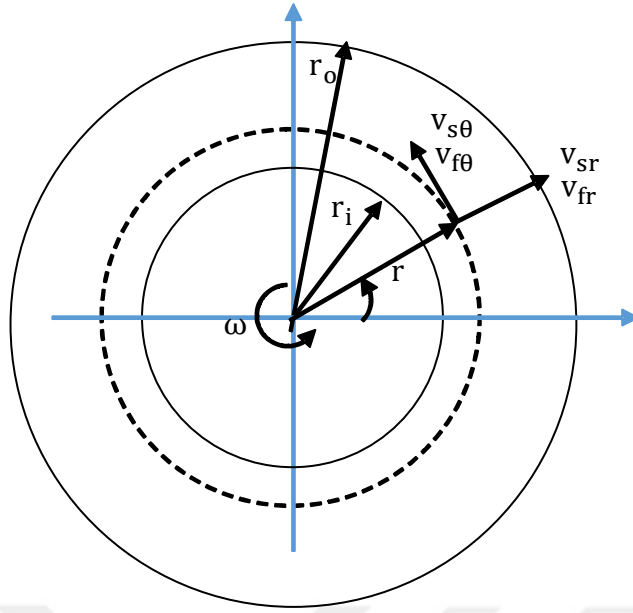
Önceki bölümde deney tesisatları ve deneylerin yapılışı açıklanmakta olup sıkma indeksi gibi bazı deneysel sonuçlar verilmektedir. Gözenekli ortamda kalan su miktarı ile ilgili sonuçlardan sıkma işleminin aşamaları tam olarak ortaya konulamamaktadır. Sıkma esnasında katının da şekil değiştiriyor olması problemi daha karmaşık hale getirmektedir. Bu bölümde, bölüm 3’ de verilen kütlenin korunumu ve momentumun korunumu denklemlerinin diferansiyel formlarından yola çıkarak, ortamın hareketinin integral korunum denklemleri elde edilmektedir. Bu denklemler sıkma işleminde katı ve sıvı fazların hareketini ve etki eden parametrelerin görünmesinde faydalı olmaktadır. Ayrıca diferansiyel formdaki korunum denklemlerinde ihtiyaç duyulan, katının gerilme - şekil değiştirme, sıvı fazı geçirgenlik katsayısı, sıkma sonu kılcal basıncı v.b. değişimlerin deneysel verilerden nasıl elde edileceği gösterilmektedir.

3. bölümün sonunda katı ve sıvı faz için korunum denklemleri belirtilmektedir. 4. bölümde ise farklı parametrelere bağlı olarak literatürde tanımlı olan doyma sayısı ve sıkma indeksinin değişimleri incelenmektedir. Bu bölümde deneysel verilerden de yararlanılarak 3. bölümde elde edilen denklemlerin çözümleri geliştirilecektir.

Korunum denklemlerinin çözümü sırasında aşağıdaki varsayımlarda bulunmaktadır;

- Kontrol hacminde yer alan katı kütlesi sabittir (m_s : sabit),
- Gözeneklilik değeri sabit değildir ($\varepsilon \neq$ sabit),
- Fiziksel özellikler her noktada aynıdır.
- Başlangıç anında tüm gözenekler su ile doludur ($t = 0 \rightarrow S \geq 1$),

Problemin fiziği temsili olarak Şekil 5.1’ de belirtilmektedir.



Şekil 5.1 : Problemin temsili görünümü.

Sıkma işleminin başından hedeflenen devire ulaşana kadar ivmelenme adımı ($\omega \neq \text{sbt}$) yer almaktadır. Hedeflenen devire ulaştıktan sonra tambur sabit devir hızında ($\omega = \text{sbt}$) dönmektedir. Tambur ω hızıyla dönerken içeride bulunan tekstil ve su hareket etmektedir. Katı faz santrifüj basıncın etkisiyle ezilmekte ve iç yarıçapı (r_i) basınca bağlı olarak değişmektedir. Benzer şekilde sıvı faza da santrifüj basınç uygulanmakta ve gözenekli ortamdan dışarıya su çıkışı olmaktadır. Tekstil ve sudan oluşan gözenekli ortamın dış yarıçapı tambur yarıçapına eşittir ve r_o ile temsil edilmektedir.

Bu noktadan sonra yukarıda fiziği tariflenen problem için katı ve sıvı faza ait korunum denklemleri yazılır. Tek tek her faza ait süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümü gerçekleştirilir.

5.1 Kütle Korunum Denklemleri

Katı faz için süreklilik denklemi 5.1' de yer almaktadır.

$$\frac{\partial (1 - \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (1 - \varepsilon) \mathbf{v}_s = 0 \quad (5.1)$$

Denklemin sol tarafında birinci terim zamana bağlı değişimi, ikinci terim ise konvektif değişimi ifade etmektedir. Denkleminde bulunan konvektif terim açıldığında süreklilik denklemi

$$\frac{\partial (1 - \varepsilon)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(1 - \varepsilon)v_{sr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} ((1 - \varepsilon)v_{s\theta}) = 0 \quad (5.2)$$

olarak elde edilir. z yönünde katı fazın hızı olmadığından, bu yöndeki hız sıfır kabul edilir ($v_{sz} = 0$).

Gözenekli ortamın birim hacmi $dV = rhdrd\theta$ ’ dir. Diferansiyel formda yazılan süreklilik denklemi, çözüm için integral forma dönüştürülür. Denklemden yer alan terimler $\int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} rhdrd\theta$ ifadesiyle çarpılır. Zamana bağlı değişim teriminin integralinin alınabilmesi için Leibniz’ in integral kuralı uygulanır ve

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} (1 - \varepsilon) rhdrd\theta + \int_0^{2\pi} (1 - \varepsilon) v_{sr} r_i h d\theta \\ - \int_0^{2\pi} (1 - \varepsilon) v_{sr} r_o h d\theta \end{aligned} \quad (5.3)$$

ifadesi elde edilir. r_o ’ da gözenekli ortam tambura temas ettiğinden, bu noktada sınır hareketsizdir. Dolayısıyla $-\int_0^{2\pi} (1 - \varepsilon) v_{sr} r_o h d\theta$ terimi 0 değerini alır. Yukarıdaki denklemden yer alan $\int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} (1 - \varepsilon) rhdrd\theta$ teriminin integrali alındığında $(1 - \varepsilon_m) h \pi (r_o^2 - r_i^2)$ elde edilir. ε_m tüm gözenekli ortam için ortalama gözenekliliği ifade eder ve

$$\varepsilon_m = \frac{1}{h \pi (r_o^2 - r_i^2)} \int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} h r \varepsilon dr d\theta \quad (5.4)$$

denklemleriyle hesaplanır.

r yönündeki konvektif değişim ifadesinin hacim integrali alındığında denklem 5.5 elde edilir.

$$\int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(1 - \varepsilon) v_{sr}) rhdrd\theta = - \int_0^{2\pi} (1 - \varepsilon) v_{sr} r_i h d\theta \quad (5.5)$$

θ yönünde hacim integrali alındığında, denklemin 0 değerine eşit olduğu görülmektedir.

$$\int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} ((1 - \varepsilon) v_{s\theta}) rhdrd\theta = 0 \quad (5.6)$$

Tek tek hacim integrali alınan terimler katı için süreklilik denkleminde tekrar yerine yazılıp, gerekli sadeleştirmeler yapıldığında denklem 5.7 elde edilir.

$$\frac{d}{dt} [(1 - \varepsilon_m) h \pi (r_0^2 - r_i^2)] = \frac{dV_s}{dt} = 0 \quad (5.7)$$

Katı hacminin değişmediği yani gözenekli ortamda bulunan katı kütesinin sabit olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu noktadan sonra sıvı faz için süreklilik denklemi incelenir.

Sıvı faz için süreklilik denklemi, 5.8' de ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial S\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot S\varepsilon \mathbf{v}_f = 0 \quad (5.8)$$

Deneyisel çalışmaların analizi sırasında tüm gözenek hacminin su ile dolu olmadığı durumlar gözlenmektedir. Bundan dolayı birim hacimdeki su miktarını belirtmek için süreklilik denkleminde gözeneklilik ifadesi doyma sayısı ile çarpılmaktadır ($S\varepsilon$). z yönünde sıvı fazın hızı olmadığından, bu yöndeki hız değeri sıfır değerini alır ($v_{fz} = 0$). Süreklilik denklemi sadeleştirildiğinde aşağıdaki formu alır.

$$\frac{\partial S\varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r S\varepsilon v_{fr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (S\varepsilon v_{f\theta}) = 0 \quad (5.9)$$

İntegral forma dönüşümün sağlanması için denklemde yer alan terimler $\int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} r h dr d\theta$ ifadesiyle çarpılır. İlk olarak zamana bağlı terimin integrali alınır ve Leibniz' in integral kuralı uygulanır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} S\varepsilon r h dr d\theta + \int_0^{2\pi} S\varepsilon v_{fr} r_i h d\theta - \int_0^{2\pi} S\varepsilon v_{fr} r_o h d\theta \quad (5.10)$$

r_o ' da gözenekli ortam tambura temas ettiğinden, bu noktada sınır hareketsizdir. Dolayısıyla $-\int_0^{2\pi} S\varepsilon v_{fr} r_o h d\theta$ terimi 0 değerini alır. Yukarıdaki denklemde yer alan $\int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} S\varepsilon r h dr d\theta$ teriminin integrali alındığında $S_m \varepsilon_m h \pi (r_0^2 - r_i^2)$ elde edilir. S_m tüm gözenekli ortam için ortalama doyma sayısını ifade eder ve

$$S_m = \frac{1}{\varepsilon_m h \pi (r_0^2 - r_i^2)} \int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} h r S\varepsilon dr d\theta \quad (5.11)$$

denklemleriyle hesaplanır.

r yönündeki konvektif değişim ifadesinin hacim integrali alındığında denklem 5.12 elde edilir.

$$\int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r S \epsilon v_{fr}) r h dr d\theta = \int_0^{2\pi} S \epsilon v_{fr} r_0 h d\theta - \int_0^{2\pi} S \epsilon v_{fr} r_i h d\theta \quad (5.12)$$

θ yönünde hacim integrali alındığında, denklemin 0 değerine eşit olduğu görülmektedir.

$$\int_0^{2\pi} \int_{r_i(t,\theta)}^{r_o} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} ((S \epsilon v_{f\theta}) r h dr d\theta = 0 \quad (5.13)$$

Tek tek hacim integrali alınan terimler sıvı için süreklilik denkleminde tekrar yerine yazıldığında

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [S_m \epsilon_m h \pi (r_o^2 - r_i^2)] + \int_0^{2\pi} S \epsilon v_{fr} r_0 h d\theta - \int_0^{2\pi} S \epsilon v_{fr} r_i h d\theta \\ + \int_0^{2\pi} S \epsilon v_{fr} r_i h d\theta = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

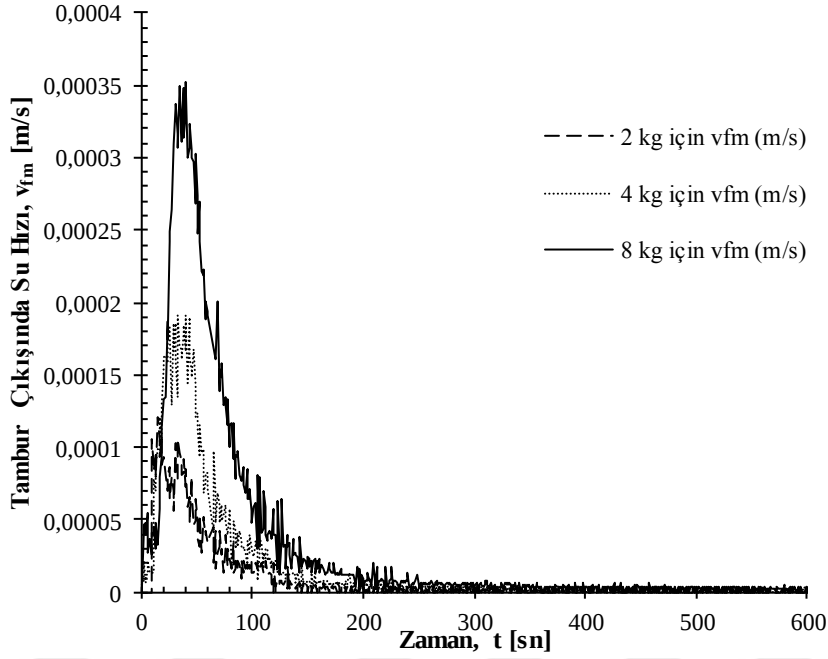
elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında denklem 5.15 elde edilir.

$$\frac{d}{dt} [S_m \epsilon_m h \pi (r_o^2 - r_i^2)] + 2\pi r_0 h S_m \epsilon_m v_{fr}(r_o) = 0 \quad (5.15)$$

Gözenekli ortamdan çıkan suyun hızını ifade eden denklem 5.16 elde edilir.

$$v_{fm} = v_{fr} = \frac{1}{2\pi r_0 h} \frac{dV_l}{dt} \quad (5.16)$$

Tüm deneysel çalışmalar için tamburdan çıkan suyun hızı, denklem 5.16' dan yararlanılarak hesaplanabilmektedir. 1400 d/dk tambur devrinde, 2 kg, 4 kg ve 8 kg yükler için elde edilen su hızları Şekil 5.2' de yer almaktadır.



Şekil 5.2 : 2kg, 4kg ve 8 kg yük için tamburdan çıkan suyun hızı.

Grafik incelendiğinde, tüm yük miktarları için maksimum su hızı değerine 0-100 sn aralığında ulaşılmaktadır. Elde edilen maksimum su hızı değerleri, yaklaşık olarak yük miktarıyla orantılıdır. 8 kg yük için ~0,0035 m/s su hızına ulaşılırken, 4 kg için ~0,0018 m/s ve 2 kg için ~0,0010 m/s elde edilmektedir. Tambur hedeflenen devire ulaştıktan sonra su uzaklaştırma hızları azaltmakta ve asimptota oturmaktadır. En fazla uzaklaştırılması gereken su miktarı 8 kg yükte bulunduğundan dolayı, su uzaklaştırma eğrisi 200. sn' den sonra sıfır değerine yaklaşmaktadır.

5.2 Doyma Sayısı Değişiminin İncelenmesi

Doyma Sayısının Belirlenmesi

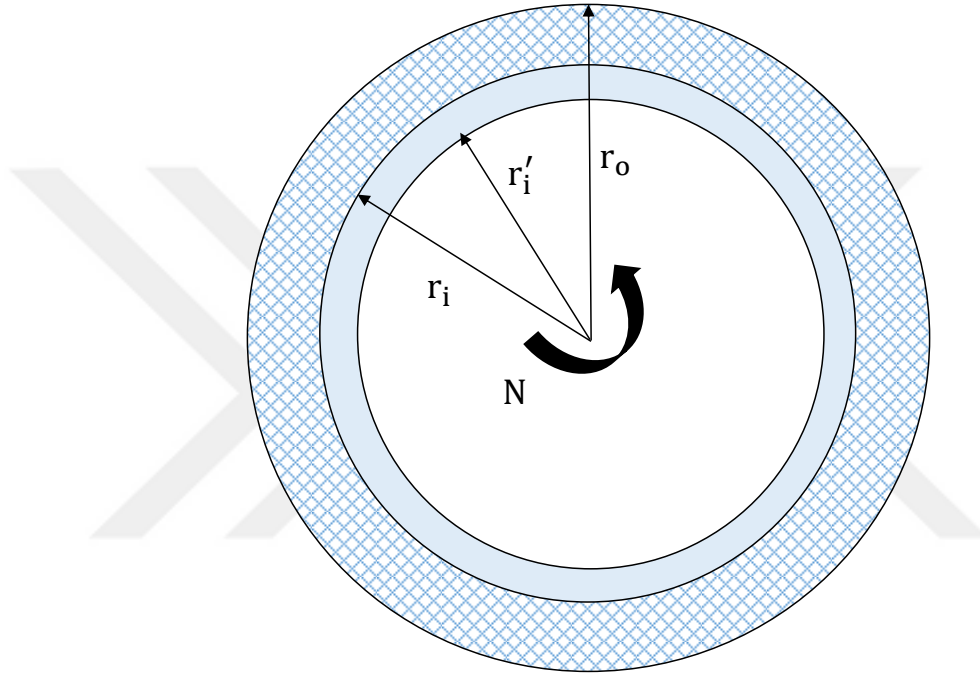
Sıkma indeksinden sonra bu bölümde ortalama doyma sayısının farklı parametrelere bağlı değişimi incelenmektedir. Doyma sayısı (S_m), gözenekli ortamda bulunan su hacminin toplam boşluk hacmine oranıdır. Sıkma işlemi sonunda elde edilen doyma sayısı ise indirgenemez doyma sayısı ($S_{m\infty}$) olarak tanımlanır.

Doyma sayısı ve indirgenemez doyma sayısı ifadelerinin hesaplanabilmesi için santrifüj su uzaklaştırma sırasında gözenekli ortamda bulunan su miktarı ve gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Denklem 4.10' da sıkma indeksi ile doyma sayısı arasında $R = (S_m \varepsilon_m V_t \rho_l - m_s \gamma) / m_d$ formunda bir ilişki tanımlanmaktadır. Gözenekli ortamdaki su miktarı, deney sonundaki toplam kütle

miktarı ve terazi ölçümlerinden hesaplanabilmektedir. Ancak doyma sayısının belirlenebilmesi için gözenekliliğin de hesaplanması gerekmektedir.

Santrifüj su uzaklaştırma işlemi sırasında gözenekli ortamda bulunan su miktarına bağlı olarak olayın fiziki değişmektedir. Bu durumda gözeneklilik hesabı da ortamda bulunan su miktarına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Su hacmi gözenek hacminden fazla olduğunda, fiziki durumun temsili görünümü aşağıdaki şekilde yer almaktadır;



Şekil 5.3 : $S_m \geq 1$ durumunda su ve gözenekli ortamın iç çapları.

Sıkma işleminin başında ve ivmelenme sırasında gözenekli ortamın tamamı su ile dolu olmaktadır. Gözenekli ortama sığmayarak taşan su ise gözenekli ortamın iç yüzeyine sıvanmaktadır. Bu durumda doyma sayısı 1 değerinden daha fazla olmaktadır ($S_m \geq 1$). Bölüm 4.3' de pres basıncı ile gözeneklilik arasında $\varepsilon_m = 0,76(0,94)^{\frac{n_k}{100}} \left(\frac{P}{gL\rho_s} \right)^{-0,017}$ denklemiyle belirtilen bir ilişki elde edilmektedir. Pres deneyinde gözenekli ortam ezilmekte ve su, şekil değiştirme miktarı kadar gözenekli ortamdan uzaklaşmaktadır. Dolayısıyla doyma sayısı 1 değerine eşittir ($S_m = 1$). Hem santrifüj kuvvet altında su uzaklaştırma deneyinde hem de pres basıncı ile sıkıştırma deneyinde gözenekli ortam su ile dolu olduğundan gözeneklilik hesabı için aralarında analogi kurulur. Gözenekliliğin hesaplanabilmesi için pres yerine santrifüj basıncın etki ettiği kabulü yapılır. Böylece santrifüj basınca bağlı olarak gözeneklilik

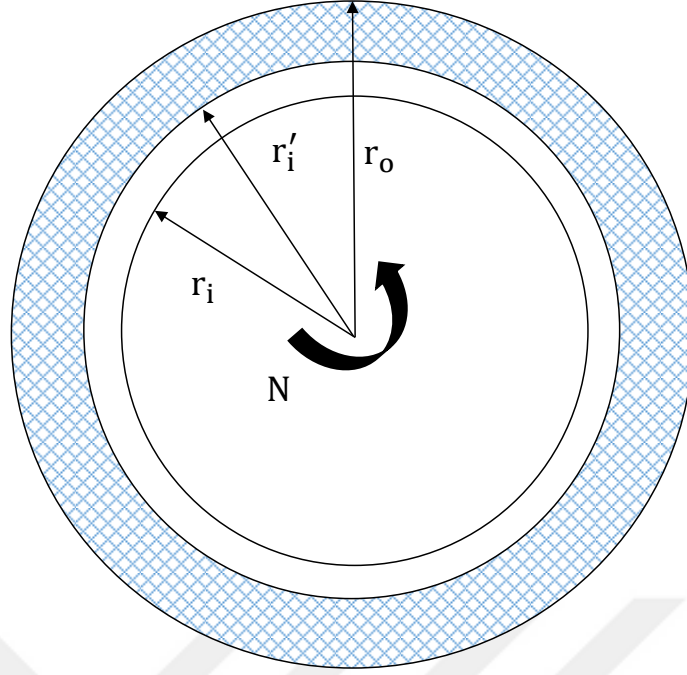
hesaplanabilir. Sıkma sırasında tüm gözenek hacminin su ile dolduğu durumda, uygulanan toplam santrifüj basınç (birim alandaki santrifüj kuvvet) ise aşağıdaki gibidir;

$$P_s = \frac{\rho_m \omega^2}{2} (r_0^2 - r_i^2) \quad (5.17)$$

P_s santrifüj basınç (Pa), ω tambur dönme hızı (1/sn), r_0 tambur dış yarıçapı (m) ve r_i gözenekli ortam iç yarıçap olarak tanımlanmaktadır. ρ_m ortalama yoğunluk (kg/m^3) olup $(1 - \varepsilon)\rho_s + \varepsilon\rho_l$ formülüyle hesaplanmaktadır. Santrifüj basıncın bulunabilmesi için ise gözenekli ortamın iç yarıçapının hesaplanması gerekmektedir. Sıkma sırasında dönen gözenekli ortam silindire benzer bir yapı oluşturmaktadır. Gözenekli ortamın toplam hacmi (V_t) silindir formundan dolayı $(r_0^2 - r_i^2)\pi h$ formülüyle hesaplanabilir. h gözenekli ortamın derinliğini ifade etmektedir. Gözenekli ortamın toplam hacmi ile gözeneklilik arasında $m_s/\rho_s(1 - \varepsilon_m)$ denklemiyle belirtilen bir ilişki yer almaktadır. İki denklemin beraber çözülmesi sonunda gözenekli ortamın iç yarıçapı $r_i = \sqrt{r_0^2 - (m_s/((1 - \varepsilon_m)\rho_s))/\pi h}$ olarak hesaplanabilir. Gözenek hacmine sığmayarak taşan su kütlesi ise gözenekli ortamın iç yüzeyine sıvanır ve bu bölgede oluşan su hacminin iç yarıçapı r_i' ile ifade edilmektedir. Gözenekli ortamın iç yüzeyine sıvanan su hacmi ise $V_1 - V_p$ formülüyle hesaplanır. Bu bölgedeki su hacminin iç yarıçapı $r_i' = \sqrt{r_i^2 - (V_1 - V_p)/\pi h}$ olarak elde edilir.

Elde edilen gözenekli ortam iç yarıçapı (r_i) kullanılarak santrifüj basınç hesaplanır. Yukarıda belirtilen işlemler 5 defa tekrarlanarak iteratif olarak gözeneklilik ve santrifüj basınç hesaplanır. Gözeneklilik ve toplam su hacmi değerleri kullanılarak doyma sayısı (S) belirlenir.

Santrifüj su uzaklaştırma sırasında gözenekli ortamda bulunan su miktarı azalmakta ve doyma sayının 1'den daha küçük olma ihtimali bulunmaktadır ($S_m < 1$). Bu durumda gözenek ve sıvının hacimleri aynı olmamaktadır. Toplam su hacmi gözenek hacminden az olduğunda, fiziki durumun temsili görünümü aşağıdaki şekilde belirtilmektedir;



Şekil 5.4 : $S_m < 1$ durumunda su ve gözenekli ortamın iç çapları.

Gözenekli ortamın iç yarıçapı r_i ile belirtilirken, sadece su dolu gözenekli ortamın iç yarıçapı ise r_i' olarak ifade edilmektedir. r_i ve r_i' yarı çapları arasında kalan hacimde ise katı ve hava yer almaktadır. Gözenekliliğin elde edilmesinde pres deneyi ile analogi kurulabilmesi için $S = 1$ olan gözenekli ortam, santrifüj basınç hesabında göz önüne alınır. Bu durumda santrifüj basınç $P_s = \frac{\rho_m \omega^2}{2} (r_o^2 - r_i'^2)$ olarak tanımlanır. r_o ve r_i' yarıçapları arasında bulunan toplam hacim V_t' ve tamamı su ile dolu olan boşluk hacmi ise V_p' sembolüyle gösterilmektedir. Bu bölümdeki gözenekli ortamın toplam hacmi (V_t') silindir formdan dolayı $(r_o^2 - r_i'^2)\pi h$ formülüyle hesaplanabilir. Gözenekli ortamın hacmi ile gözeneklilik arasında $(V_t' - V_p')/(1 - \varepsilon_m)$ denklemiyle belirtilen bir ilişki yer almaktadır. İki denklemin beraber çözülmesi sonunda tamamı su dolu

gözenekli ortamın iç yarıçapı $r_i' = \sqrt{r_o^2 - \left((V_t' - V_p') / (1 - \varepsilon_m) \right) / \pi h}$ olarak

hesaplanabilir. Gözenekli ortamın toplam hacmini oluşturan silindir formunun iç yarıçapı, r_i ile ifade edilmektedir. r_i' ve r_i yarı çapları arasında kalan hacmin de gözenekliliği ε değerine sahiptir. Bu durumda toplam hacmin iç yarıçap $r_i =$

$\sqrt{r_i'^2 - \left((V_t' - V_p') / (1 - \varepsilon_m) \right) / \pi h}$ formülüyle elde edilebilir. Belirtilen işlemler 5

defa tekrarlanarak iteratif olarak gözeneklilik ve santrifüj basınç hesaplanır. Gözeneklilik ve toplam su hacmi değerleri kullanılarak doyuma sayısı (S_m) belirlenir.

Toplam su hacmi ile gözenek hacmi arasındaki ilişkiye bağlı olarak gözeneklilik ve doyma sayısı hesaplanabilmektedir. Bu yöntem kullanılarak sırasıyla deney sonunda elde edilen indirgenemez doyma sayısı ve su uzaklaşma sırasında değişen doyma sayısı değerleri belirlenir.

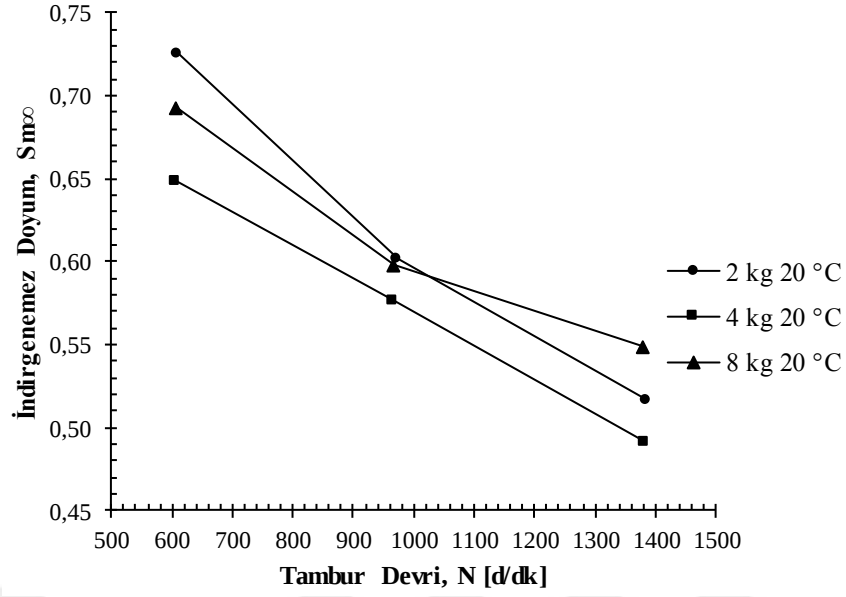
Deney Sonunda İndirgenemez Doyma Sayısının Elde Edilmesi

Yukarıda tariflenen yöntem kullanılarak hesaplanan gözeneklilik ve indirgenemez doyma sayısı değerleri, Çizelge 5.1’ da yer almaktadır.

Çizelge 5.1 : Deney sonunda hesaplanan gözeneklilik ve indirgenemez doyma sayısı değerleri.

Test	Sıkma Başında Sıcaklık (°C)	Görünen Yük (kg)	Görünen Devir (d/dk.)	Ölçülen Devir (d/dk.)	Gözeneklilik ($\epsilon_{m\infty}$)	İndirgenemez Doyma Sayısı ($S_{m\infty}$)
1	20	2	600	610	0,68	0,73
2			1000	973	0,67	0,60
3			1400	1387	0,65	0,52
4		4	600	609	0,67	0,65
5			1000	969	0,66	0,58
6			1400	1384	0,64	0,51
7		8	600	609	0,65	0,69
8			1000	968	0,64	0,60
9			1400	1382	0,62	0,53
10	60	2	600	608	0,69	0,70
11			1000	966	0,67	0,60
12			1400	1381	0,65	0,51
13		4	600	608	0,68	0,64
14			1000	967	0,66	0,55
15			1400	1384	0,64	0,49
16		8	600	608	0,65	0,67
17			1000	967	0,64	0,58
18			1400	1381	0,62	0,51

İlk olarak farklı yük miktarlarında tambur devrinin indirgenemez doyma sayısına etkisi incelenir. Şekil 5.5’ de, yük miktarı ve tambur devrine bağlı olarak indirgenemez doyma sayısı eğrileri yer almaktadır.

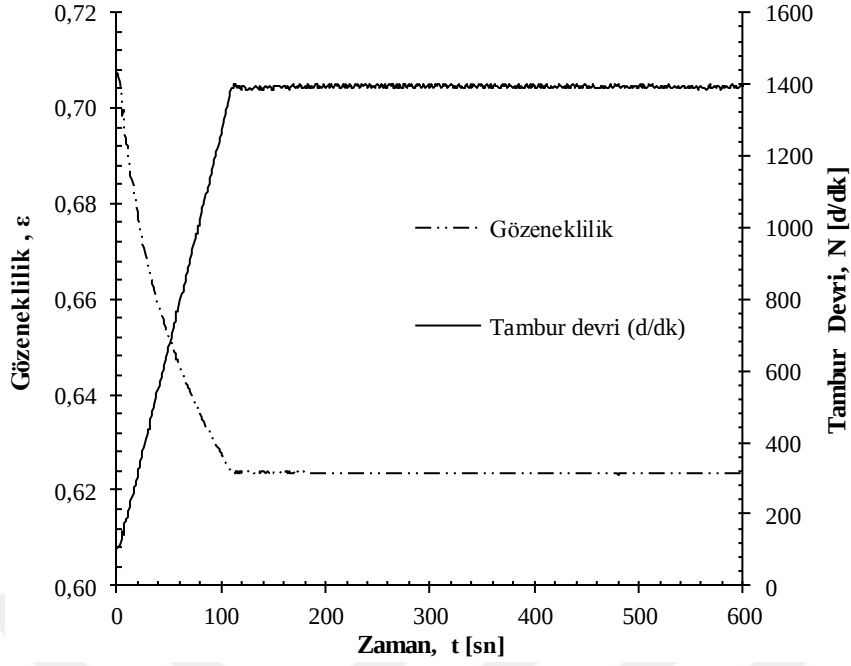


Şekil 5.5 : Farklı yükler için devire bağlı indirgenemez doyma değişimi (T=20 °C için).

Grafik incelendiğinde tambur devri arttıkça doyma sayısının azaldığı ancak yük miktarına bağlı bir değişim izlenmediği gözlemlenmektedir. Grafikte yer alan indirgenemez doyma sayısı boyutsuz bir parametre iken yük miktarı ve tambur devri ise boyutludur. Yük miktarına bağlı farklı davranışı, bu grafikte açıklamak mümkün değildir. Bu sebepten dolayı çalışmanın ileriki safhasında gerekli boyutsuzlaştırmalar yapılmaktadır.

Zamana Bağlı Doyma Sayısının İncelenmesi

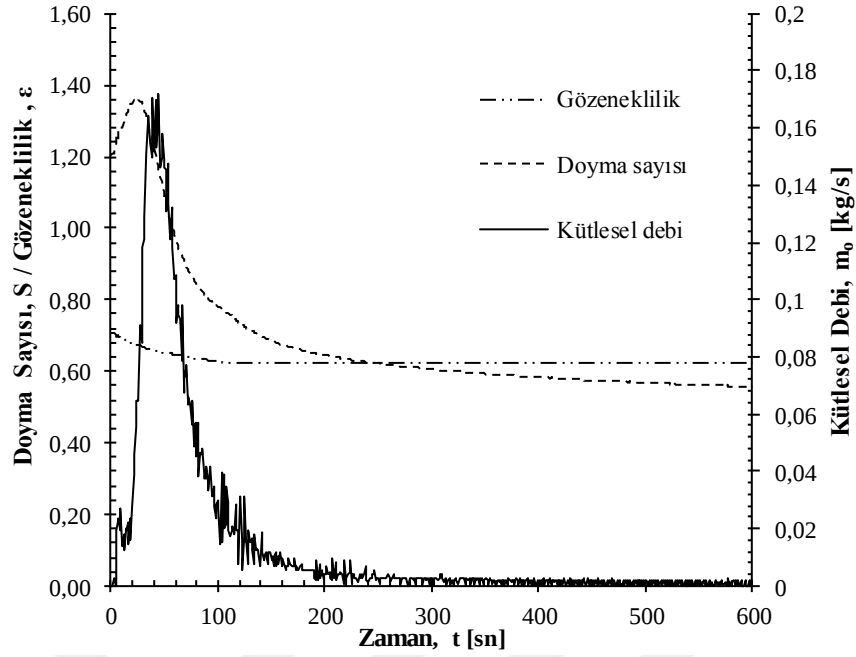
Bu noktadan sonra zamana bağlı gözeneklilik ve doyma sayısının değişimi incelenmektedir. İteratif yöntem uygulanarak her bir zaman adımı için gözeneklilik hesaplanmaktadır. Aşağıdaki şekilde 8 kg yük ve 1400 d/dk tambur hızı algoritmasında gözeneklilik değişimi yer almaktadır.



Şekil 5.6 : 8 kg yük ve 1400 d/dk için gözenekliliğin değişimi.

100 d/dk tambur hızında dengesiz yük kontrolü yapıldıktan sonra sıkma işlemi başlamaktadır. Sıkma işleminin başındaki bu noktada gözeneklilik 0,71 olarak hesaplanmaktadır. Tambur 400 d/dk hıza ulaştığında tekstilin ezildiği ve gözenekliliğin 0,67 değerine düştüğü görülmektedir. 1400 d/dk değerine ulaşana kadar tambur hızlanmaya devam etmektedir. Hedef devre ulaşıldığında gözeneklilik yaklaşık olarak 0,62 değerine kadar azalmaktadır. 400 d/dk tambur hızından sonra ivmelenme sırasında gözeneklilik değişmeye devam etmekte ancak değişim hızı 400 d/dk tambur hızından öncesine göre daha düşük olmaktadır.

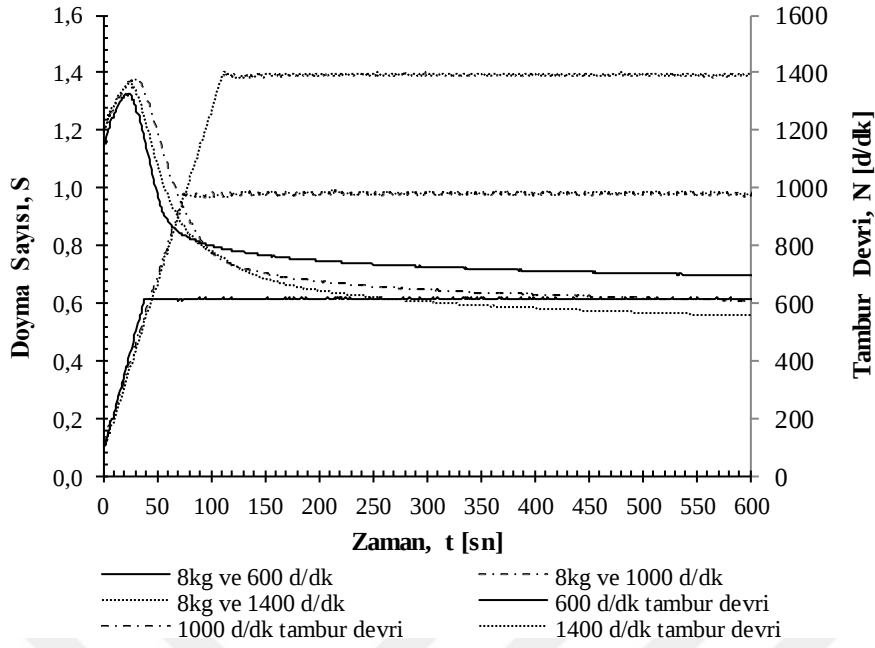
Hesaplanan gözeneklilik değerleri $R = (S_m \epsilon_m V_t \rho_l - m_s \gamma) / m_d$ olarak belirtilen denklem 4.10' da yerine yazılır ve her zaman adımı için doyma sayısı (S_m) elde edilir. 8 kg yük ve 1400 d/dk hedef tambur hızı deneyi için gözeneklilik, çıkan suyun kütleli debisi ve doyma sayısı eğrileri Şekil 5.7' de beraber çizdirilir. Kütleli debi ($\dot{m}_o$) terazide birim zaman aralığında değişen kütle miktarıdır ve basit olarak $\Delta m_1 / \Delta t$ formülüyle hesaplanmaktadır.



Şekil 5.7 : 8 kg yük ve 1400 d/dk için gözeneklilik ve doyma sayısının değişimi.

Grafik incelendiğinde sıkma işleminin başlangıcında doyma sayısının 1,20' den 1,40' a çıktığı görülmektedir. Doyma sayısının arttığı bu aralık 100-400 d/dk tambur hızı aralığına karşılık gelmektedir. Bu aralıkta gözeneklilik 0,71' den 0,67' e düştüğü için doyma sayısı artmaktadır çünkü suyun kütlesel debisi çok düşüktür, sadece 0,02 kg/s'dir. Tambur hızlandıkça gözeneklilik azalmaya devam etmekte ancak kütlesel debi artarak 0,16 kg/s değerine yaklaşmaktadır. Kütlesel debinin 0,16 kg/s olduğu zaman aralığında doyma sayısının 1,3' den 1,1' e düştüğü görülmektedir. 120. saniyeye gelindiğinde suyun kütlesel debisi tekrar 0,02 kg/s değerine düşmektedir. Bu noktada doyma sayısının 0,8' e kadar azaldığı görülmektedir. Şekil 5.6' den görüldüğü üzere tambur 1400 d/dk sabit hızla dönmeye başlar. Bu noktadan sonra doyma sayısı önceki adımlara kıyasla daha az değişir ve sıkma işleminin sonuna doğru doyma eğrisi asimptota oturur.

8 kg kütleye sahip yükün 600 d/dk, 1000 d/dk ve 1400 d/dk tambur hızları için zamana bağlı doyma sayısı değişimi Şekil 5.8' de yer almaktadır.



Şekil 5.8 : 8 kg yük için farklı devirlerde doyma sayısı değişimi.

Grafik incelendiğinde, her üç deney için sıkma işleminin başında gözeneklilik birden azaldığı için doyma sayıları artmaktadır. Ardından tambur ivmelenmeye devam eder ve bu süreçte sistemden su çıkışı olduğundan doyma sayısı eğrileri azalır. Tambur, hedeflenen devir değerine ulaştıktan sonra her üç deneyde de doyma eğrileri azalarak asimptota ulaşmaktadır. En düşük indirgenemez doyuma 1400 d/dk tambur hızında ulaşılırken, 600 d/dk tambur hızında indirgenemez doyma en yüksek seviyede kalmaktadır. Hedeflenen tambur hızı arttıkça indirgenemez doyma azalmaktadır.

5.3 Momentum Korunum Denklemleri

Katı faz için hem θ hem de r yönünde momentum denklemleri diferansiyel formda yazılır ve ayrı ayrı incelenir.

Katı İçin θ Yönünde Momentum Denklemi

θ yönündeki momentum denklemi 5.18' da ifade edilmektedir.

$$(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial v_{s\theta}}{\partial t} + (1 - \varepsilon)\rho_s \left\{ v_{sr} \frac{\partial v_{s\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} v_{s\theta} \frac{\partial v_{s\theta}}{\partial \theta} + v_{sz} \frac{\partial v_{s\theta}}{\partial z} + \frac{v_{sr} v_{s\theta}}{2} \right\} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(1 - \varepsilon)\sigma_{\theta\theta}] - (1 - \varepsilon)\rho_s g \cos\theta + 2(1 - \varepsilon)\rho_s \omega v_{sr} \quad (5.18)$$

Sistemden katı çıkışı olmadığından dolayı $v_{sr} = 0$ ve $v_{s\theta} = 0$ denklemde yerine yazılır ve gerekli sadeleştirmeler yapılır.

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(1 - \varepsilon) \sigma_{\theta\theta}] - (1 - \varepsilon) \rho_s g \cos \theta \quad (5.19)$$

Denklemde yer alan terimlerin hacim integrasyonu alınır. Bu işlemin sonunda $\sigma_{2\pi} - \sigma_0 = 0$ sonucu elde edilir.

Katı İçin r Yönünde Momentum Denklemi

r yönündeki momentum denklemi 5.20' de ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1 - \varepsilon) \rho_s v_{sr}}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \rho_s \left\{ v_{sr} \frac{\partial v_{sr}}{\partial r} + 0 - \frac{v_{s\theta}^2}{2} \right\} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(1 - \varepsilon) r \sigma_{rr}] - (1 - \varepsilon) \rho_s g \sin \theta \\ + \frac{1}{V_0} \int_{A_{fs}} \sigma \cdot n_s dA + (1 - \varepsilon) \rho_s \omega^2 r + 2(1 - \varepsilon) \rho_s \omega v_{s\theta} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Denklemin sol tarafında birinci terim yerel ivmeyi belirtmektedir. Yerel ivmede diferansiyel formun içindeki çarpım ifadesi açılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon) v_{sr}] = v_{sr} \frac{\partial(1 - \varepsilon)}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial v_{sr}}{\partial t} \quad (5.21)$$

Katı faz için süreklilik denkleminde $v_{sr} \frac{\partial(1 - \varepsilon)}{\partial t} = -v_{sr} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(1 - \varepsilon) r v_{sr}]$ eşitliği elde edilmektedir. Bu eşitlik yerel ivmede yerine yazılır ve denklem 5.22 elde edilir.

$$\rho_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial v_{sr}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \rho_s [(1 - \varepsilon) v_{sr}] + \rho_s v_{sr} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(1 - \varepsilon) r v_{sr}] \quad (5.22)$$

Düzenlenen yerel ivme terimi, diferansiyel formdaki momentum denklemine yerine yazılır ve aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} \rho_s \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon) v_{sr}] + \rho_s (1 - \varepsilon) v_{sr} \frac{\partial v_{sr}}{\partial r} + \rho_s \frac{v_{sr}^2}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(1 - \varepsilon)] \\ + (1 - \varepsilon) \rho_s v_{sr} \frac{\partial v_{sr}}{\partial r} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(1 - \varepsilon) r \sigma_{rr}] - (1 - \varepsilon) \rho_s g \sin \theta \\ + \frac{1}{V_0} \int_{A_{fs}} \sigma \cdot n_s dA + (1 - \varepsilon) \rho_s \omega^2 r + 2(1 - \varepsilon) \rho_s \omega v_{s\theta} \end{aligned} \quad (5.23)$$

$v_{s\theta} = 0$ olduğundan dolayı katı faz için Coriolis terimi de sıfır değerini alır ($2(1 - \varepsilon) \rho_s \omega v_{s\theta} = 0$). Yer çekimi ivmesi santrifüj ivmeye kıyasla çok küçük olduğundan $(1 - \varepsilon) \rho_s g \sin \theta = 0$ kabulü yapılır.

Denklemin sol tarafında yer alan konvektif ivme terimleri çarpımın türev ifadeleri olarak görülmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki denklemde belirtilen formda da yazılabilmektedir.

$$\rho_s(1 - \varepsilon) \frac{\partial v_{sr}^2}{\partial r} + \rho_s \frac{v_{sr}^2}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(1 - \varepsilon)] = \rho_s \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(1 - \varepsilon) v_{sr}^2] \quad (5.24)$$

Bu noktadan sonra momentum denkleminde kalan terimler tek tek ele alınır. İlk olarak yerel ivmenin integrali alınır ve bunun için Leibniz' in integral kuralı uygulanır.

$$\rho_s \int_{r_i}^{r_o} \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon) v_{sr}] = \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} + (1 - \varepsilon) v_{sr} \Big|_{r_i} \frac{dr_i}{dt} \quad (5.25)$$

$2\pi h \int_{r_i}^{r_o} r dr$ ifadesiyle çarpılarak hacim integrali alınır. Ardından gerekli sadeleştirmeler yapıldığında $2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr$ elde edilir.

$$\begin{aligned} 2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr + \rho_s 2\pi h r_i (1 - \varepsilon) v_{sr_i} \frac{dr_i}{dt} \\ + \rho_s 2\pi h r (1 - \varepsilon) v_{sr}^2 \Big|_{r_i}^{r_o} = 2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr \end{aligned} \quad (5.26)$$

Santrifüj ivme teriminin hacim integrali alındığında denklem 5.27 elde edilir.

$$\int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) \rho_s \omega^2 r 2\pi h r dr = 2\pi h (1 - \varepsilon_m) \rho_s \omega^2 \frac{r_o^3 - r_i^3}{3} \quad (5.27)$$

Denklemin pay ve paydası $(r_o^2 - r_i^2)$ ifadesiyle çarpılırsa denklemin içine toplam hacim (V_t) terimi gelir.

$$2\pi h (1 - \varepsilon_m) \rho_s \omega^2 \frac{r_o^3 - r_i^3}{3} = (1 - \varepsilon_m) V_t \rho_s \omega^2 r_s^* \quad (5.28)$$

Denklemden belirtilen r_s^* ise $\frac{2(r_o^3 - r_i^3)}{3(r_o^2 - r_i^2)}$ olarak ifade edilmektedir. Hacim integrellerinin alınması sonucunda katı faz için r yönünde momentum denklemi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} 2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr = 2\pi h (1 - \varepsilon_m) (r_o \sigma_{rr_o} - r_i \sigma_{rr_i}) + (1 \\ - \varepsilon_m) V_t \rho_s \omega^2 r_s^* \end{aligned} \quad (5.29)$$

$(r_o\sigma_{rr_o} - r_i\sigma_{rr_i})$ ifadesinin yerine $(r_s^*\sigma_{rr})$ yazıldığında momentum denklemi son halini alır.

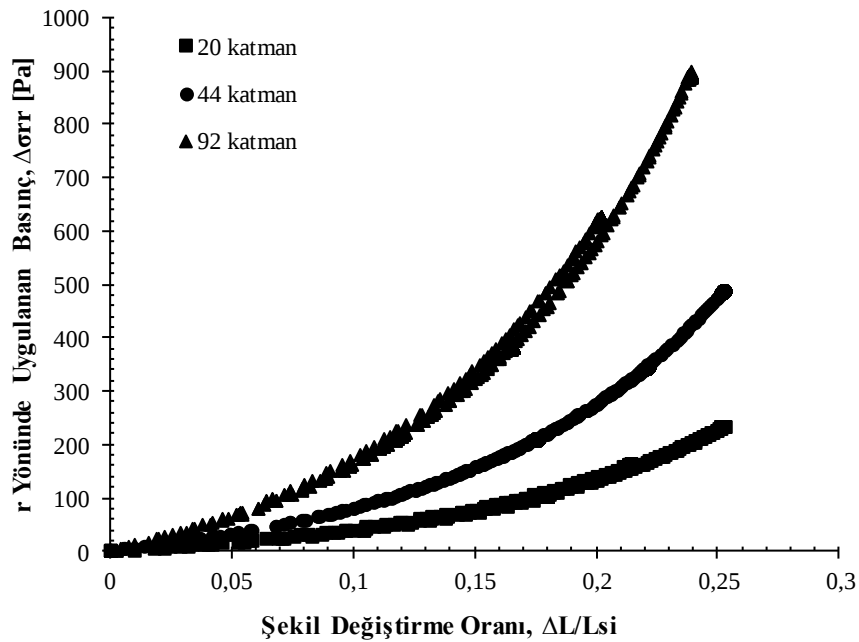
$$2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr = 2\pi h (1 - \varepsilon_m) (r_s^* \sigma_{rr}) + (1 - \varepsilon_m) V_t \rho_s \omega^2 r_s^* \quad (5.30)$$

Katı Faz İçin Şekil Değiştirme Oranının Belirlenmesi

Santrifüj su uzaklaşma sırasında, katı fazı oluşturan pamuklu yapı, basıncın etkisiyle şekil değiştirmektedir. Katı fazın dış çapı tambur iç çapına eşit olsa da iç çapı basıncın etkisiyle hareket etmektedir. Katı faz için r yönünde momentum denklemi yazıldığında denklem 5.30 elde edilmektedir. Katıya uygulanan basınç farkı bu denklemden çekildiğinde aşağıdaki ifade belirlenmektedir;

$$\sigma_{rr} = \frac{2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr - (1 - \varepsilon_m) V_t \rho_s \omega^2 r_s^*}{2\pi h r_s^* (1 - \varepsilon_m)} \quad (5.31)$$

Deneysel çalışmalarda, tambur 100 d/dk hıza ulaştığında sıkma işlemi başlamaktadır. Bu yüzden uzunluk değişimi hesabında, ilk uzunluk değeri için 100 d/dk hızdaki tambur devir hızı referans alınır. Ayrıca uygulanan basınç için bu devirdeki basınç referans alınarak sıfırlama işlemi uygulanır ve denklem 5.31 kullanılarak 100 d/dk tambur hızından sonra basınç değişimi hesaplanır ($\Delta\sigma_{rr} = \sigma_{rr} - \sigma_{rr100d/dk}$). Uygulanan basınca karşılık katının şekil değiştirme oranı Şekil 5.9' de yer almaktadır.



Şekil 5.9 : Katı için basınca karşılık şekil değiştirme oranı.

Grafik incelendiğinde uygulanan basınç arttıkça şekil değiştirme oranının da arttığı görülmektedir. 20, 44 ve 92 katmandan oluşan numune setlerinde katı kütle miktarları farklılık gösterdiğinden dolayı şekil değiştirme oranı katman sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu sebepten dolayı aynı basınçta 20 katmanda en yüksek, 92 katman da ise en düşük şekil değiştirme oranı gözlemlenmektedir.

Grafiğin incelenmesinin ardından elde edilen deneysel veriler Minitab 16 yazılımı kullanılarak analiz edilir ve $\Delta\sigma_{rr} = f(n_k, \Delta L/L_{si})$ formunda bir ilişki araştırılır. Regresyon analizinin ardından

$$\Delta\sigma_{rr} = -2284,3 \frac{\Delta L}{L_{si}} + 10456 \left(\frac{\Delta L}{L_{si}} \right)^2 - 35,99 n_k \frac{\Delta L}{L_{si}} \quad (5.32)$$

denklemi elde edilir. EK-E içerisinde regresyon analizinin detayları yer almaktadır. Regresyon analizinin sonunda elde edilen %99,12 R-Sq değeri ile şekil değiştirme oranı, uygulanan basınç ve katman sayısı arasında yüksek seviyede bir ilişki olduğu tespit edilmektedir. Analiz sonunda %95 güven aralığı için standart sapmanın 38 olduğu belirlenmektedir.

θ – Sıvı İçin Momentum Denklemi

Katı fazda olduğu gibi sıvı faz için de hem θ hem de r yönünde momentum denklemleri diferansiyel formda yazılır ve ayrı ayrı incelenir.

Sıvı İçin θ Yönünde Momentum Denklemi

θ yönündeki momentum denklemi 5.33' da ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} S\varepsilon\rho_1 \frac{\partial v_{f\theta}}{\partial t} + S\varepsilon\rho_1 \left\{ v_{fr} \frac{\partial v_{f\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} v_{f\theta} \frac{\partial v_{f\theta}}{\partial \theta} + v_{fz} \frac{\partial v_{f\theta}}{\partial z} + \frac{v_{fr} v_{f\theta}}{2} \right\} \\ = - \frac{\partial}{\partial \theta} (S\varepsilon P_\theta) - S\varepsilon\rho_1 g \cos\theta \end{aligned} \quad (5.33)$$

Süreklilik denkleminde θ yönündeki hız değeri sıfır olarak belirtilmektedir. $v_{f\theta} = 0$, θ yönündeki momentum denklemde yerine yazılır ve gerekli sadeleştirmeler yapılır.

$$0 = - \frac{\partial}{\partial \theta} (S\varepsilon P_\theta) - S\varepsilon\rho_1 g \cos\theta \quad (5.34)$$

Denklemde yer alan terimlerin hacim integrasyonu alınır. Bu işlemin sonunda $P_{2\pi} - P_0 = 0$ sonucu elde edilir.

Sıvı İçin r Yönünde Momentum Denklemi

r yönündeki momentum denklemi 5.35' de ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S\varepsilon\rho_1 v_{fr}}{\partial t} + S\varepsilon\rho_1 \left\{ v_{fr} \frac{\partial v_{fr}}{\partial r} + 0 - \frac{v_{f\theta}^2}{2} \right\} \\ = -\frac{\partial}{\partial r}(S\varepsilon P) - S\varepsilon\rho_1 g \sin\theta + \frac{1}{V_0} \int_{A_{fs}} \sigma \cdot n_s dA + S\varepsilon\rho_1 \omega^2 r \\ + 2S\varepsilon\rho_1 \omega v_{f\theta} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Denklemin sol tarafındaki birinci terim yerel ivmeyi belirtmektedir. Diferansiyel formdaki yerel ivmenin içindeki çarpım ifadesi genişletilerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}[S\varepsilon v_{fr}] = v_{fr} \frac{\partial S\varepsilon}{\partial t} + S\varepsilon \frac{\partial v_{fr}}{\partial t} \quad (5.36)$$

Sıvı faz için süreklilik denkleminden $\frac{\partial S\varepsilon}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[rS\varepsilon v_{fr}]$ eşitliği elde edilmektedir.

Bu eşitlik yerel ivmede yerine yazılır ve denklem 5.37 elde edilir.

$$S\varepsilon\rho_1 \frac{\partial v_{fr}}{\partial t} = \rho_1 \frac{\partial}{\partial t}[S\varepsilon v_{fr}] + \rho_1 v_{fr} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[rS\varepsilon v_{fr}] \quad (5.37)$$

Düzenlenen yerel ivme terimi, diferansiyel formda belirtilen momentum denkleminde yerine yazılır ve aşağıdaki denklem elde edilir.

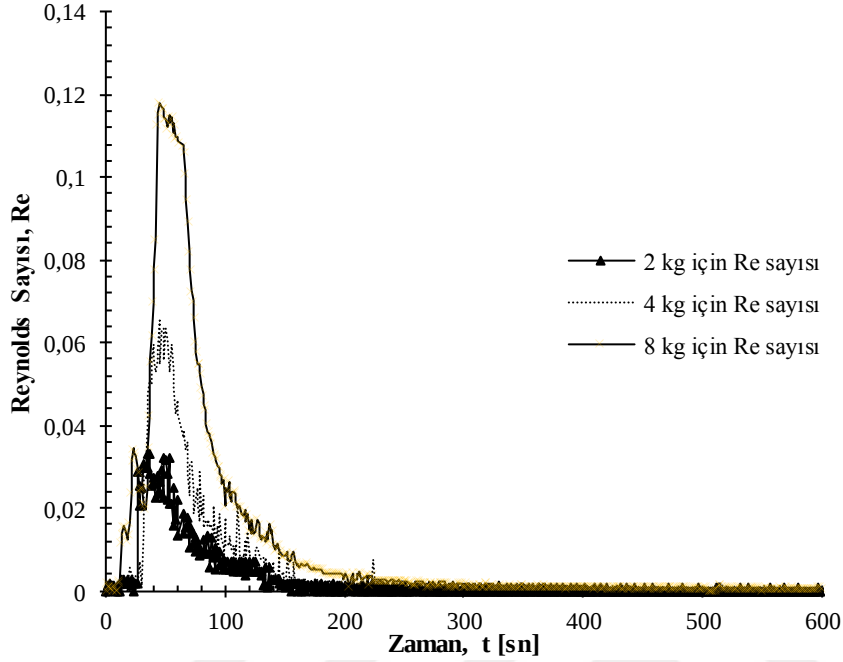
$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial}{\partial t}[S\varepsilon v_{fr}] + \rho_1 S\varepsilon v_{fr} \frac{\partial v_{fr}}{\partial r} + \rho_1 \frac{v_{fr}^2}{r} \frac{\partial}{\partial r}[rS\varepsilon] + \rho_1 S\varepsilon v_{fr} \frac{\partial v_{fr}}{\partial r} \\ = -\frac{\partial}{\partial r}[S\varepsilon P] - \rho_1 S\varepsilon g \sin\theta + \frac{1}{V_0} \int_{A_{fs}} \sigma \cdot n_s dA + \rho_1 S\varepsilon \omega^2 r \\ + 2S\varepsilon\rho_1 \omega v_{f\theta} \end{aligned} \quad (5.38)$$

$v_{f\theta} = 0$ olduğundan dolayı sıvı faz için Coriolis terimi de sıfır değerini alır ($2(1 - \varepsilon)\rho_s \omega v_{s\theta} = 0$). Yer çekimi ivmesi santrifüj ivmeye kıyasla çok küçük olduğundan $\rho_1 S\varepsilon g \sin\theta = 0$ kabulü yapılır. Gözenekli ortamdan çıkan suyun hızı belirlendikten sonra akış rejimi, aşağıdaki denklemde tanımı yer alan Reynolds sayısı ile belirlenebilmektedir.

$$Re = \frac{v_{fm} d \rho_1}{\mu_1} \quad (5.39)$$

Eğer, Reynolds sayısı düşükse ($Re \ll 1$) viskoz kuvvetler etkilidir ve bu akış rejimi Darcy (1856) rejimi olarak tanımlanır. Yüksek Reynolds sayısında ise ($Re > 300$) hızın karesinin etkisi kuvvet dengesinde ağırlık kazanır (Whitaker (1996)). Bu

durumda akış türbülanslı olur ve akış rejimi Forcheimer (1901) rejimi olarak elde edilir. 2 kg, 4 kg ve 8 kg yüklere 1400 d/dk tambur hızında sıkma işlemi uygulandığında elde edilen Reynolds sayısının değişimi Şekil 5.10' de yer almaktadır.



Şekil 5.10 : 8 kg 1400 d/dk. deneyi için Reynolds sayısının değişimi.

Her üç yük miktarı için Reynolds sayısının çok düşük mertebede olduğu ve $Re \ll 1$ durumu ile karşılaşıldığı, dolayısıyla akış rejiminin Darcy olarak kabul edilebileceği görülmektedir. Akış rejimi Darcy olduğu için momentum denkleminde $\frac{1}{V_0} \int_{A_{fs}} \sigma \cdot n_s dA$ teriminin yerine $\mu_l \frac{v_{fr}}{k}$ yazılabilmektedir.

Bu noktadan sonra momentum denkleminde yer alan diğer terimler tek tek ele alınır. Denklemin sol tarafında yer alan konvektif ivme terimleri çarpımın türev ifadeleri olarak görülmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki denklemde belirtilen formda da yazılabilmektedir.

$$\rho_l S \epsilon \frac{\partial v_{fr}^2}{\partial r} + \rho_l \frac{v_{fr}^2}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r S \epsilon] = \rho_l \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r S \epsilon v_{fr}^2] \quad (5.40)$$

Santrifüj ivme teriminin hacim integrali alındığında denklem 5.41 elde edilir.

$$\int_{r_i}^{r_o} S \epsilon \rho_l \omega^2 r \cdot 2\pi h r dr = 2\pi h S_m \epsilon_m \rho_l \omega^2 \frac{r_o^3 - r_i^3}{3} \quad (5.41)$$

Denklemin pay ve paydası $(r_o^2 - r_i^2)$ ifadesiyle çarpılırsa denklemin içine toplam hacim (V_t) terimi gelir. Denklemden belirtilen r_s^* ise $\frac{2(r_o^3 - r_i^3)}{3(r_o^2 - r_i^2)}$ terimini içermektedir.

$$S_m \epsilon_m \rho_l \omega^2 \frac{r_o^3 - r_i^3}{3} = S_m \epsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^* \quad (5.42)$$

Momentum denkleminin sol tarafında yer alan yerel ivme teriminin integrali alınır. Bunun için Leibniz' in integral kuralı uygulanır.

$$\rho_l \int_{r_i}^{r_o} \frac{\partial}{\partial t} [S \epsilon v_{fr}] = \rho_l \frac{\partial}{\partial t} \int_{r_i}^{r_o} S \epsilon v_{fr} + S_m \epsilon_m v_{fr} |_{r_i} \frac{dr_i}{dt} \quad (5.43)$$

$2\pi h \int_{r_i}^{r_o} r dr$ ifadesiyle çarpılarak hacim integrali alınır. Ardından gerekli sadeleştirmeler yapıldığında $2\pi h \rho_l \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} S \epsilon v_{fr} r dr$ elde edilir.

$$\begin{aligned} 2\pi h \rho_l \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} S_m \epsilon_m v_{fr} r dr + 2\pi h \rho_l r_i S_m \epsilon_m v_{fr} |_{r_i} \frac{dr_i}{dt} + 2\pi h \rho_l S_m \epsilon_m (r v_{fr}^2) |_{r_i}^{r_o} \\ = 2\pi h \rho_l \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} S \epsilon v_{fr} r dr \end{aligned} \quad (5.44)$$

$2\pi h \rho_l \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} S \epsilon v_{fr} r dr$ ivme teriminin integrali alındığında $\frac{d}{dt} \left[\rho_f S \epsilon V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_f A_o} \right]$ elde edilmektedir. Diferansiyel formdaki momentum denkleminde yer alan terimlerin, hacim integrellerinin alınması sonucunda denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\rho_l S_m \epsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o} \right] \\ = -2\pi h S_m \epsilon_m (r_o P_{c_o} - r_i P_{c_i}) - \mu_l S_m \epsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o k} \\ + S_m \epsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^* \end{aligned} \quad (5.45)$$

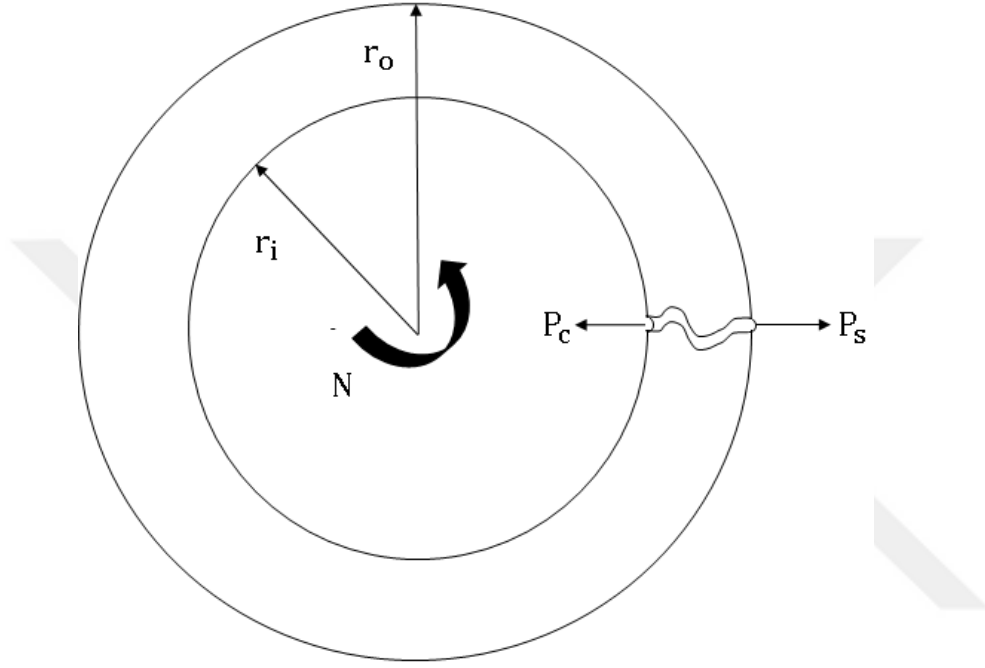
Denklem 5.45 ifadesi doyma sayısının birden küçük olduğu ($S_m < 1$) durumda geçerlidir. Denklemin sol tarafında ivme terimi yer alırken sağ tarafında ise kılcal basınç, Darcy terimi ve santrifüj basınç yer almaktadır.

Santrifüj su uzaklaştırma deneyleri sırasında özellikle tambur ivmelenirken doyma sayısı genel olarak birden daha büyüktür ($S_m \geq 1$). Bu durumda gözenekli ortamın tamamı su ile dolu olduğundan momentum denkleminde yer alan doyma sayısı ifadeleri sadeleştirilebilir. Ayrıca bu durumda kılcal basınç da etki etmemektedir ve sıfır değerini almaktadır ($r_o P_{c_o} - r_i P_{c_i} = 0$). Doyma sayısı birden büyük olduğunda momentum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left[\rho_l \epsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o} \right] = 0 - \mu_l \epsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o k} + \epsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^* \quad (5.46)$$

Kılcal Basıncın Belirlenmesi

Sıkma işlemi sırasında santrifüj basıncın etkisiyle su tambura doğru hareket ederken, yüzey geriliminin etkisiyle akışa ters yönde menüsküs formlar oluşur. Patnaik ve arkadaşları (2006), menüsküs formlardan dolayı oluşan basıncı, kılcal basınç olarak tanımlamaktadır. Aşağıdaki şekilde santrifüj ve kılcal basınç ifadeleri gösterilmektedir.



Şekil 5.11 : Santrifüj basınç ve kılcal basıncın gösterimi.

Sıkma işleminin sonunda gözenekli ortamdan su çıkışı durur ve bu durumda kütleli debi sıfır değerini alır ($\dot{m}_o = 0$). Bu durumda tamburun hızı sabittir ($\omega = \text{sbt}$). Doyma sayısının indirgenemez doyma sayısına ulaştığı bu noktada momentum denklemi

$$\frac{\partial}{\partial r}(S_{m\infty}\epsilon_{m\infty}P_{c\infty}) = S_{m\infty}\epsilon_{m\infty}\rho_l\omega^2r \quad (5.47)$$

olarak yazılır. Çözüm için denklemin her iki tarafının hacim integrali alınır. Sol tarafın integrasyonu sonunda $2\pi h S \epsilon r_{sf}^* P_{c\infty}$ ifadesi elde edilir. Sağ tarafın integrasyonu sonunda santrifüj basınç terimi $S \epsilon \rho_l V_t \omega^2 r_s^*$ olarak yazılır.

$$2\pi h \int_{r_i}^{r_o} \frac{\partial}{\partial r}(S \epsilon P_{c\infty}) r dr = 2\pi h S_m \epsilon_m P_{c\infty} r \Big|_{r_i}^{r_o} = 2\pi h S_m \epsilon_m r_{sf}^* P_{c\infty} \quad (5.48)$$

$$= 2\pi h S_m \varepsilon_m \rho_l \omega^2 \frac{r_o^3 - r_i^3}{3} = S_m \varepsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^*$$

Elde edilen eşitlikte gerekli sadeleştirmeler yapıldığında kılcal basınç, denklem 5.49' de belirtildiği gibi elde edilir.

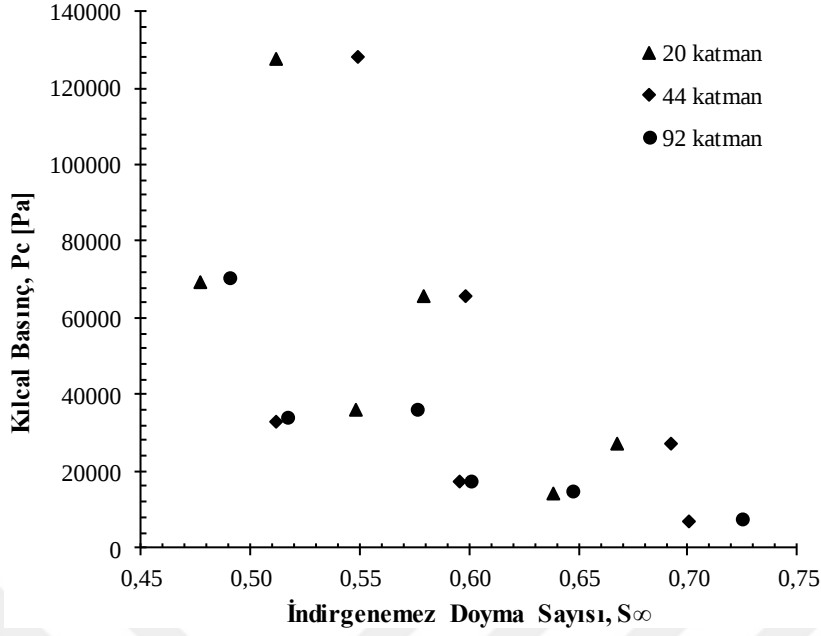
$$P_{c\infty} = \frac{\rho_l \omega^2}{2} (r_o^2 - r_{i\infty}^2) \quad (5.49)$$

Deney sonunda elde edilen sıkma indeksi, indirgenemez doyma sayısı ve kılcal basınç değerleri Çizelge 5.2'de yer almaktadır.

Çizelge 5.2 : Sıkma indeksi, indirgenemez doyma sayısı ve kılcal basınç değerleri.

Test	Sıkma Başında Sıcaklık (°C)	Görünen Yük (kg)	Görünen Devir (d/dk.)	İndirgenemez Doyma Sayısı	Sıkma İndeksi	Kılcal Basınç (Pa)
1	20	2	600	0,73	0,87	7242,6
2			1000	0,60	0,64	17464,1
3			1400	0,52	0,50	33826,4
4		4	600	0,65	0,73	14931,7
5			1000	0,58	0,58	35772,9
6			1400	0,51	0,47	70280,8
7		8	600	0,69	0,71	27203,3
8			1000	0,60	0,55	65466,1
9			1400	0,53	0,45	127998,8
10	60	2	600	0,70	0,82	7075,1
11			1000	0,60	0,63	17167,6
12			1400	0,51	0,49	33035,2
13		4	600	0,64	0,71	14051,6
14			1000	0,55	0,54	35905,0
15			1400	0,49	0,45	69439,4
16		8	600	0,67	0,67	26936,7
17			1000	0,58	0,53	65485,4
18			1400	0,51	0,43	127784,2

Tabloda yer alan kılcal basınç değerlerinin indirgenemez doyma sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 5.12' de yer almaktadır.



Şekil 5.12 : Kılcal basınç ile indirgenemez doyma sayısı arasındaki ilişki.

Şekilde görüldüğü üzere, doyma sayısının değeri arttıkça kılcal basınç azalmaktadır. Ancak literatürden farklı olarak bu ilişki daha fazla dağınıklık göstermektedir. Bu durumda sadece indirgenemez doyma sayısı değil diğer olası parametrelerin de kılcal basınca olan etkileri belirlenmelidir. Ayrıca kılcal basınç ile indirgenemez doyma sayısı arasında boyut uyumsuzluğu bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı analiz için boyutsuzlaştırma işlemi yapılmalıdır.

Boyutuzlaştırma işlemi için kılcal basınç $P_{c\pi} = P_c / P_{c\infty}$, yarıçap ise $r_\pi = r / r_s^*$ formunda yazılır. Doyma sayısının indirgenemez doyma sayısına ulaştığı sıkma işleminin sonunda santrifüj basınç kılcal basınca eşit olur. Bu durumda momentum denklemi $\frac{\partial}{\partial r} (S_{m\infty} \epsilon_{m\infty} P_{c\infty}) = S_{m\infty} \epsilon_{m\infty} \rho_l \omega^2 r$ olarak yazılır. Boyutsuz kılcal basınç ve yarıçap terimleri momentum denkleminde yerine yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial P_{c\pi}}{\partial r_\pi} = \frac{\rho_l \omega^2 r_s^{*2}}{P_{c\infty}} r_\pi \quad (5.50)$$

Elde edilen denklemin sağ tarafındaki katsayıdan $\pi_1 = \frac{\rho_l \omega^2 r_s^{*2}}{P_{c\infty}}$ boyutsuz sayısı belirlenmektedir.

$$\pi_1 = \frac{\rho_l \omega^2 r_s^{*2}}{P_{c\infty}} \quad (5.51)$$

Sıkma işleminin sonunda uygulanan santrifüj basınç kılcal basınca eşit olmaktadır. Kılcal basıncın oluşumuna neden olan sebep ise yüzey geriliminin etkisiyle akışa ters yönde menüsküs formlardır. Bu durumda santrifüj basıncın yüzey geriliminden dolayı oluşan basınca oranı π_2 boyutsuz sayısı ile tanımlanmaktadır.

$$\pi_2 = \frac{\rho_l \omega^2 r_s^{*2} d}{4\epsilon_m \sigma} = \frac{\rho_l \omega^2 d r_s^{*2}}{4\epsilon_m \sigma} \quad (5.52)$$

Denklem 5.52' de yer alan $4\epsilon\sigma/d$ terimi, menüsküs formdan dolayı birim iplik başına etkiyen yüzey gerilim basıncını ifade etmektedir. Sıkma indeksi, indirgenemez doyma sayısı ve katman sayısı ise bilinen diğer boyutsuz sayılardır;

$$\begin{aligned} \pi_3 &= R_\infty = \frac{m_w - m_d}{m_d} \\ \pi_4 &= S_{m\infty} = \frac{V_l}{V_p} \\ \pi_5 &= n_k \end{aligned} \quad (5.53)$$

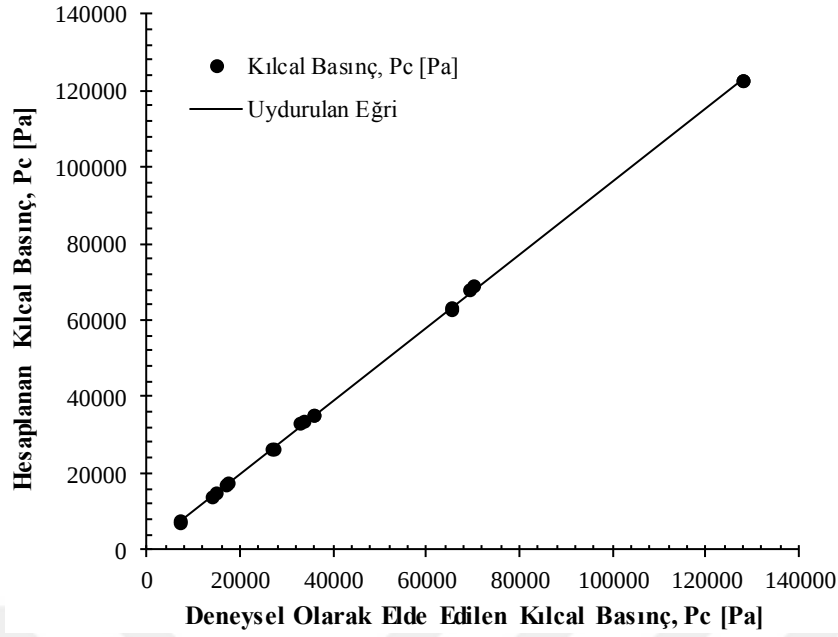
MINITAB 16 programından yararlanılarak $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ ve π_5 boyutsuz sayılarının regresyon analizi yapılır ve

$$\ln(\pi_1) = 3,88266 + 0,07736 \ln(\pi_2) + 0,0523 \ln(R_\infty) - 0,046613 n_k + 0,000245 n_k^2 - 0,000067 \ln(\pi_2) n_k \quad (5.54)$$

denklemini elde edilir. Denklem sadeleştirildiğinde π_1

$$\pi_1 = R_\infty^{0,0523} \pi_2^{0,07736 - 0,000067 n_k} e^{3,88266 - 0,046613 n_k + 0,000245 n_k^2} \quad (5.55)$$

olarak elde edilir. Denklem 5.51' den yararlanılarak $P_{c\infty} = \frac{\rho_l \omega^2 r_s^{*2}}{\pi_1}$ formunda kılcal basınç çekilir. EK-D içerisinde regresyon analizinin detayları yer almaktadır. Regresyon analizinin sonunda elde edilen %100 R-Sq değeri ile sıkma indeksi, katman sayısı ve kılcal basınç arasında yüksek seviyede bir ilişki olduğu tespit edilmektedir. Deneysel çalışmada elde edilen ve analiz sonucu geliştirilen denklem ile hesaplanan kılcal basınç değerleri Şekil 5.13' de birlikte çizdirilmektedir.



Şekil 5.13 : Deneysel olarak elde edilen ve hesaplanan kılcal basınç.

Grafiğin x ekseninde deneysel elde edilen kılcal basınç değerleri yer alırken y eksenine hesaplanan kılcal basınç değerleri bulunmaktadır. Grafik incelendiğinde deney verileri ile hesaplanan sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Literatürde yer alan kılcal basınç ile indirgenemez doyma sayısı arasındaki ilişkiyi tanımlayan çalışmalarda, analiz sonucunda elde edilen denklemlerde birim uyumsuzluğu gözlemlenmektedir. Bu çalışma sırasında birim uyumu da sağlanarak literatürden farklı olarak denklemin her iki tarafında boyutsuz ifadeler elde edilmektedir.

Geçirgenliğin Belirlenmesi

Kılcal basıncın ardından son olarak geçirgenlik terimi deneysel verilerden çekilerek belirlenir. Bunun için momentum denklemi

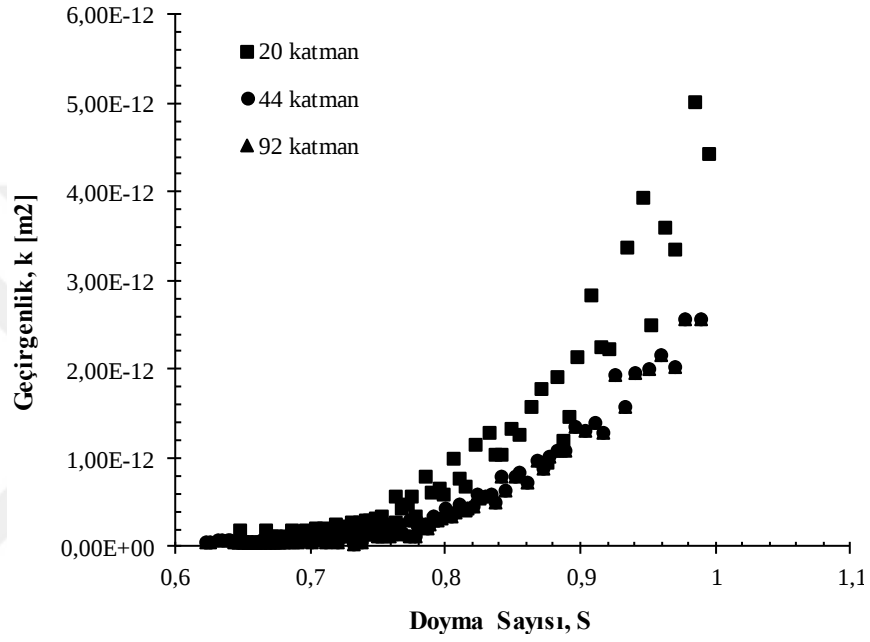
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\rho_l S_m \varepsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_f A_o} \right] \\ = -2\pi h S_m \varepsilon_m r_{sf}^* P_c - \mu_l S_m \varepsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_f A_o k} + S_m \varepsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^* \end{aligned} \quad (5.56)$$

olarak tekrar yazılır. Geçirgenlik terimi momentum denkleminde çekilerek

$$k = \frac{\mu_l S_m \varepsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o}}{-2\pi h S_m \varepsilon_m r_{sf}^* P_c - \frac{d}{dt} \left[\rho_l S_m \varepsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o} \right] + S_m \varepsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^*} \quad (5.57)$$

İfadesi elde edilir. Denklem 5.57 kullanılarak deneysel verilerden geçirgenlik terimi hesaplanmaktadır.

Santrifüj kuvvet ile gözenekli ortamdan suyun uzaklaştırılmasına yönelik literatürde yer alan çalışmalar tekrar hatırlandığında doyma sayısı ile geçirgenlik arasında $k = aS^b$ formunda korelasyonlar yer almaktadır. Denklemde yer alan a ve b deneysel olarak belirlenen sayılardır. Aşağıdaki grafikte doyma sayısına bağlı olarak geçirgenlik ifadesinin değişimi yer almaktadır.



Şekil 5.14 : Deneysel verilerden elde edilen geçirgenlik değeri.

Literatürde yer alan çalışmalara paralel olarak doyma sayısı ile geçirgenlik arasında üstel bir ilişki gözlemlenmektedir. MINITAB 16 programından yararlanılarak regresyon analizi yapılır ve

$$\ln(k) = -25,579 + 9,183 \ln(S_m) - 0,011432n_k \quad (5.58)$$

denklemini elde edilir. Denklem sadeleştirildiğinde geçirgenlik (k)

$$k = S_m^{9,183} e^{-25,579-0,011432n_k} \quad (5.59)$$

olarak elde edilir. EK-F içerisinde regresyon analizinin detayları yer almaktadır. Regresyon analizinin sonunda elde edilen %91,25 R-Sq değeri ile geçirgenlik, katman sayısı ve doyma sayısı arasında yüksek seviyede bir ilişki olduğu tespit edilmektedir.



6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Dördüncü bölümde; yük miktarı, devir ve sıcaklık gibi parametrelerin su uzaklaştırma hızı ve gözenekli ortamda kalan su miktarına etkileri belirlenmiştir. Beşinci bölümde ise hem katı hem de sıvı faz için süreklilik ve momentum denklemleri integral formda çözümlenmiştir. Ayrıca deneysel verilerin regresyon analizleri sonunda kılcal basınç ve geçirgenlik değerleri belirlenmiştir. Bu bölümde ise hesaplama algoritmasının oluşturulması ve elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Algoritmanın oluşturulabilmesi için çözülmesi gereken denklemler ve bilinmeyenler yazılmaktadır.

Katı için süreklilik

$$\frac{d}{dt} [(1 - \varepsilon_m) h \pi (r_0^2 - r_i^2)] = \frac{dV_s}{dt} = 0 \quad (6.1)$$

sıvı için süreklilik

$$v_{fm} = \frac{1}{2\pi r_0 h} \frac{dV_l}{dt} \quad (6.2)$$

katı için momentum

$$2\pi h \rho_s \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_0} (1 - \varepsilon) v_{sr} r dr = 2\pi h (1 - \varepsilon_m) (r_s^* \sigma_{rr}) + (1 - \varepsilon_m) V_t \rho_s \omega^2 r_s^* \quad (6.3)$$

ve sıvı için momentum

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\rho_l S_m \varepsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o} \right] \\ = -2\pi h S_m \varepsilon_m (r_s^* P_c) - \mu_l S_m \varepsilon_m V_t \frac{\dot{m}_o}{\rho_l A_o k} + S_m \varepsilon_m \rho_l V_t \omega^2 r_s^* \end{aligned} \quad (6.4)$$

denklemleri elde edilmektedir. Bu denklemler ortam ve akışa ait bünye denklemleridir. Katı için yazılan denklemlerde v_{sr} , σ_{rr} ve r_i bilinmemektedir. Akışa ait denklemlerde ise S_m , ε_m , r_i , v_{fm} , k ve P_c bilinmeyen olarak olarak ön plana çıkmaktadır. Kontrol hacminden dışarıya her ne kadar katı çıkışı olmasa da, işlem boyunca şekil değişimi gözlenmektedir. Bu durum iç çaptaki sınır tabakanın değişimine neden olmaktadır.

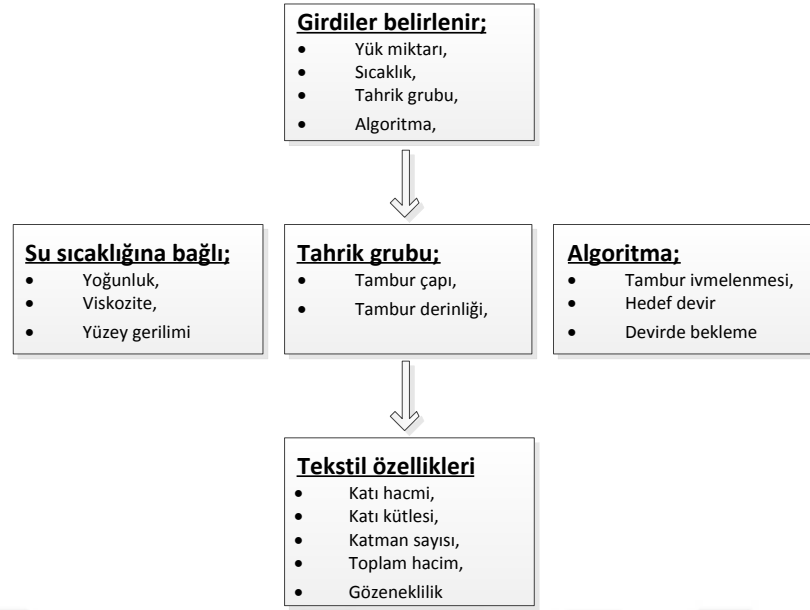
Dolayısıyla $v_{sr} = \frac{dr_i}{dt}$ tanımı göz önüne alınmaktadır. Denklemlerin çözümünde önceki bölümde bulunan katının gerilim-şekil değişimi, sıvının geçirgenlik ve kılcal basınç ifadelerinden yararlanılacaktır. Sonuç olarak çözüm için 5 denklem ve 5 bilinmeyen ortaya çıkmaktadır. S_m , ε_m , r_i , v_{fm} ve v_{sr} bilinmeyen parametrelerdir.

Belirtilen parametrelerin çözümü için her zaman adımında ortam ve akışa ait bünye denklemleri birlikte çözülmelidir. Denklemlerin yakınsaması ve doğru sonuçların elde edilebilmesi için iteratif bir yöntem uygulanmalıdır. Bu sayede her zaman için sonuçlar yakınsar ve bir sonraki adıma geçilmiş olunur. Bu noktadan sonra çözümleme için kurgulanan adımlar detaylandırılır.

6.1 Zamana Bağlı Çözümün Geliştirilmesi

Santrifüj kuvvet ile tekstilden uzaklaştırılan suyun hızı ve kalan su miktarının elde edilebilmesi için simülasyon programı geliştirilmiştir. Simülasyonun hazırlanmasında ihtiyaç duyulan kılcal basınç ve geçirgenlik parametreleri deneysel olarak önceki bölümlerde belirlenmektedir. Bu bilgiler kullanılarak MATLAB R2015b programında yazılım hazırlanmaktadır. Hesaplama programında ilk etapta girdiler belirlenir;

- Su ve yük sıcaklığı belirlenir. Sıcaklığa bağlı olarak suyun yoğunluğu, viskozitesi ve yüzey gerilimi elde edilir.
- Sıkma işleminde kullanılacak çamaşır makinesinin tahrik grubu bilgileri girilir. Buradan tamburun çapı, derinliği ve yanal yüzey alanı ortaya konulur.
- Tekstilden suyun uzaklaştırılacağı sıkma algoritması belirlenir. Bu noktada hedeflenen devire ulaşma süresi, hedeflenen sıkma devri ve bu devirde bekleme süresi belirlenir.
- Sıkma başlanmadan önce tekstilin katı hacmi, katı kütlesi, sıkma başında gözenekli ortamdaki su miktarı, toplam hacim ve gözeneklilik değerleri hesaplanır.



Şekil 6.1 : Girdi parametrelerinin belirlenmesi.

Sıkma öncesinde tekstil ve su için fiziksel özellikler belirlendikten sonra hesaplama için başlangıç koşulu belirlenir. Bu durumda hesaplama için kabul edilen ve belirlenen başlangıç değerleri aşağıdaki gibidir;

- Devir($t=0$): 100 d/dk
- Gözeneklilik($t=0$): 0,724

Sıkma işlemi başlangıcında çamaşır makinesi kontrol grubu dengesiz yük miktarını belirleyip ivmelenmeye başladığından dolayı 100 d/dk değeri başlangıç devri olarak tespit edilir. Ayrıca sıkmanın başında gözenekli ortamdaki tüm boşluklar su ile doludur.

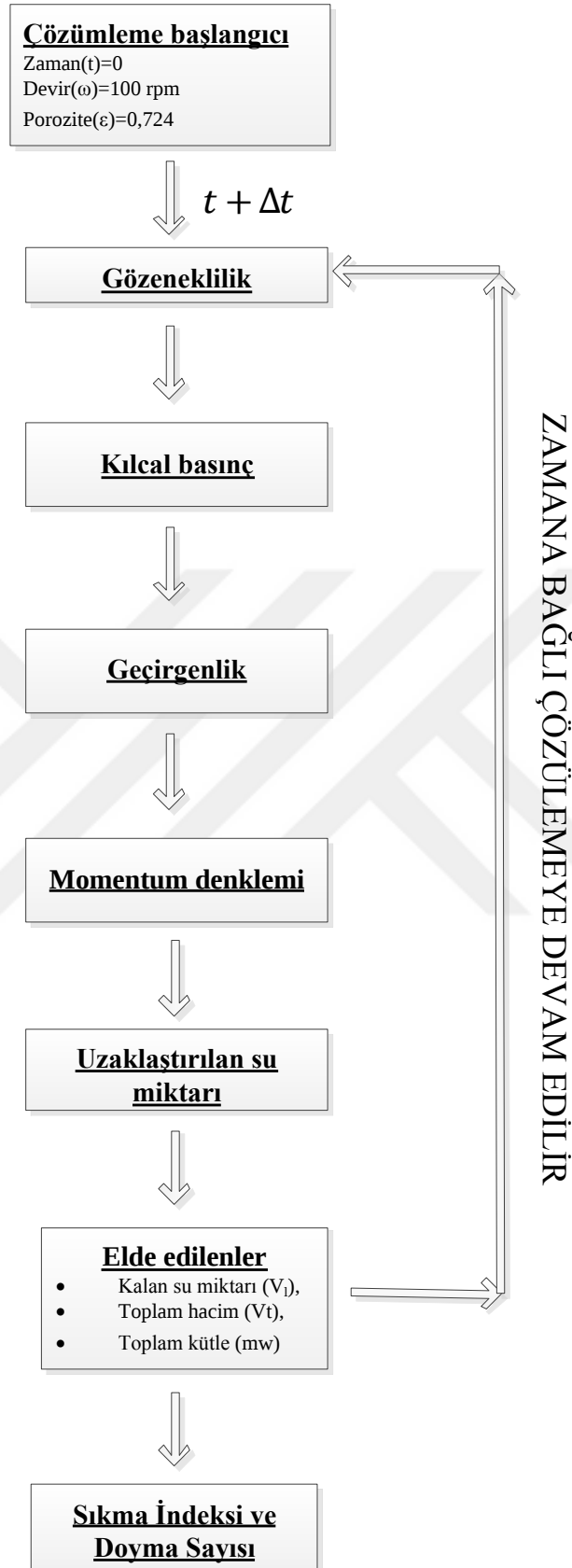
Hesaplamalar sırasında çözümleme için sırası ile aşağıdaki adımlar uygulanır;

- Başlangıç koşullarının belirlenmesinin ardından Δt süre için sayısal çözümleme başlatılır.
- Santrifüj kuvvet ve katman sayısına bağlı olarak gözeneklilik değeri hesaplanır.
- Gözeneklilik kullanılarak doyma sayısı belirlenir. Anlık olarak doyma sayısı ve sıkma indeksi hesaplanır. Bu değerlere bağlı olarak kılcal basınç ve geçirgenlik elde edilir.

- Bu noktada ekspilisit yöntem uygulanarak sıvı faz için momentum denklemi çözölür ve belirtilen zaman adımı için çıkan su miktarı hesaplanır.
- Tekstil üzerinde kalan su miktarı belirlendikten sonra gözeneklilik değeri bir sonraki zaman adımı için hesaplanır ve benzer şekilde hesaplamalar he zaman adımı için tekrarlanır.

Yukarıda belirtilen hesap yöntemi aşağıdaki şekilde detaylı olarak aktarılmaktadır.





Şekil 6.2 : Çözümleme algoritması.

MATLAB R2015b programında yukarıda belirtilen algoritma hazırlanır. Oluşturulan program algoritması EK-G' de yer almaktadır.

6.2 Deneysel ve Hesaplanan Sonuçların Karşılaştırılması

Program algoritması kullanılarak deney sonu sıkma indeksi ve indirgenemez doyma parametreleri hesaplanır. Hesaplanan değerlerin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Çizelge 6.1' de yer almaktadır.

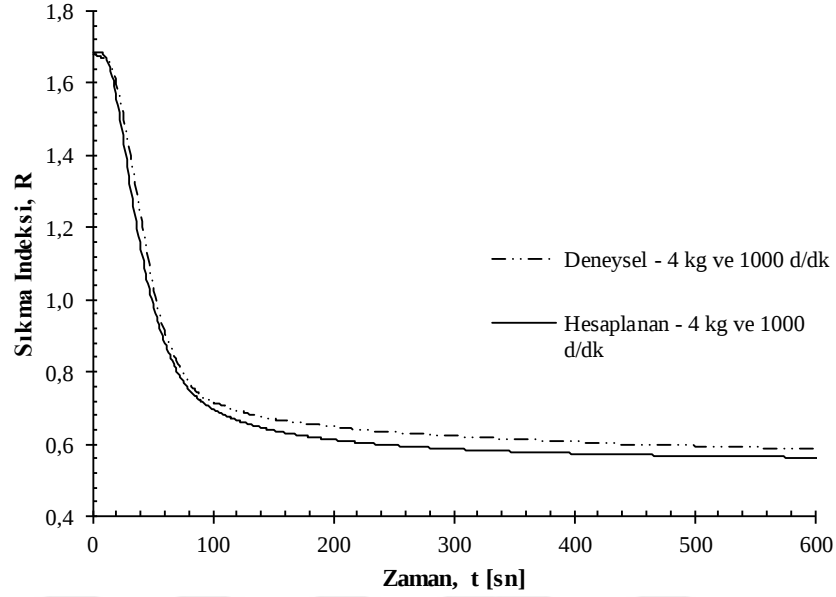
Çizelge 6.1 : Deneysel ve hesaplanan doyma sayısı ve sıkma indeksi değerlerinin karşılaştırılması.

Sıkma Başında Sıcaklık (°C)	Görünen Yük (kg)	Görünen Devir (d/dk.)	Sıkma İndeksi (Deneysel)	Sıkma İndeksi (Hesaplanan)	Fark (%)	İndirgenemez Doyma Sayısı (Deneysel)	İndirgenemez Doyma Sayısı (Hesaplanan)	Fark (%)
20	2	600	0,87	0,82	-4,7	0,73	0,69	-4,2
		1000	0,64	0,63	-2,1	0,60	0,59	-2,0
		1400	0,50	0,52	2,8	0,52	0,53	2,4
	4	600	0,73	0,73	0,3	0,65	0,65	0,4
		1000	0,58	0,56	-3,8	0,58	0,56	-3,4
		1400	0,47	0,47	0,3	0,51	0,51	0,2
	8	600	0,71	0,71	-0,3	0,69	0,69	-0,1
		1000	0,55	0,55	-0,1	0,60	0,60	-0,1
		1400	0,45	0,47	4,0	0,53	0,55	3,4
	2	600	0,82	0,83	0,3	0,70	0,70	0,6
		1000	0,63	0,63	0,1	0,60	0,60	0,1
		1400	0,49	0,51	4,1	0,51	0,53	3,6
60	4	600	0,71	0,73	2,9	0,64	0,66	3,2
		1000	0,54	0,56	2,4	0,55	0,56	2,0
		1400	0,45	0,46	3,4	0,49	0,50	2,8
	8	600	0,67	0,70	4,5	0,67	0,70	4,2
		1000	0,53	0,54	2,7	0,58	0,59	2,3
		1400	0,43	0,45	4,8	0,51	0,54	5,0

Deneysel çalışmalarda elde edilen ve hesaplanan sıkma indeksi ve indirgenemez doyma sayıları karşılaştırıldığında aradaki farkın en fazla $\pm\%5$ olduğu görülmektedir. Fark verileri incelediğinde genel olarak 20 °C görünen sıcaklıkta eksi, 60 °C görünen sıcaklık da ise artı değerlerin olduğu görülmektedir. Bu durumun en büyük sebebi sıkma işlemi sırasında ortalama su sıcaklığı alınarak; yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi gibi suyun fiziksel özellikleri hesaplanmıştır. Bu noktadan sonra zamana bağlı olarak sıkma indeksi ve debi değerleri karşılaştırılmaktadır. 4 kg ve 8 kg yükler için 1000 d/dk ve 1400 d/dk değerlerinde gerçekleştirilen deneysel değerler alınmaktadır. Deneysel verilerden zamana bağlı debi (m^3/sn) ve sıkma indeksi (%) eğrileri

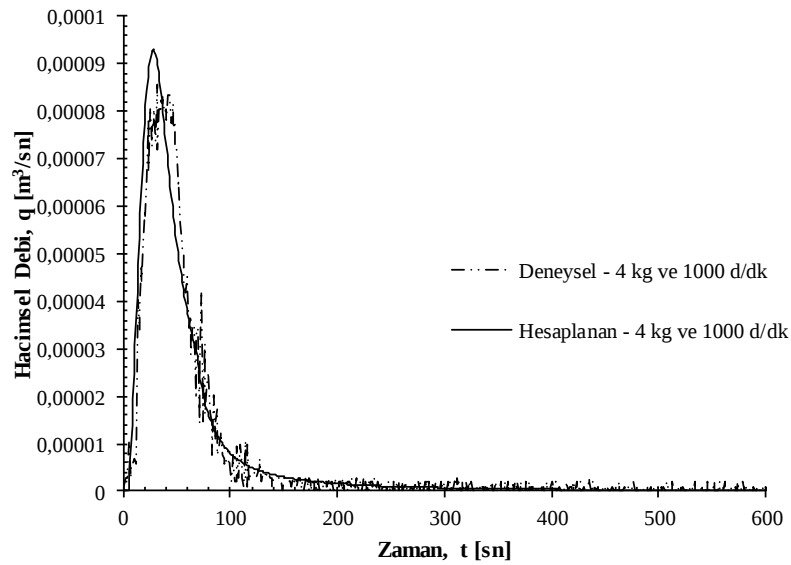
çıkarılmaktadır. Belirlenen şartlar için simülasyon çalıştırılarak benzer eğriler oluşturulmaktadır. Deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen verileri karşılaştırmak için grafikler üst üste çizdirilir.

İlk olarak 4 kg yük ve 1000 d/dk deneyi incelenir.



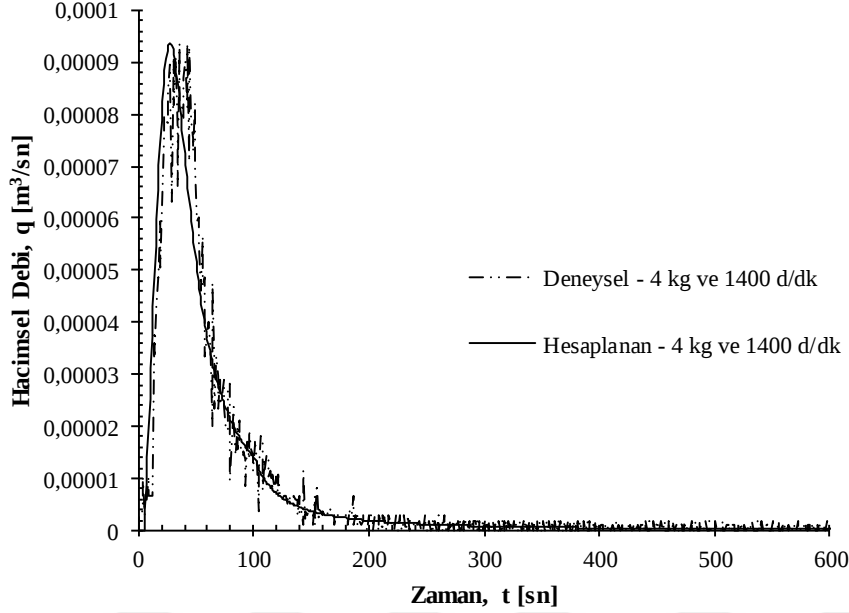
Şekil 6.3 : 4 kg yük 1000 d/dk sıkma eğrisi.

Şekil 6.3'de görüldüğü üzere ivmelenme adımında yükteki suyun büyük bölümünü dışarıya atılmaktadır. Bu noktadan sonra tekstil üzerinde kalan su miktarının azalması ile artan kılcal basınç ve azalan geçirgenlik sonucu su uzaklaştırma debisi de aniden düşmektedir.



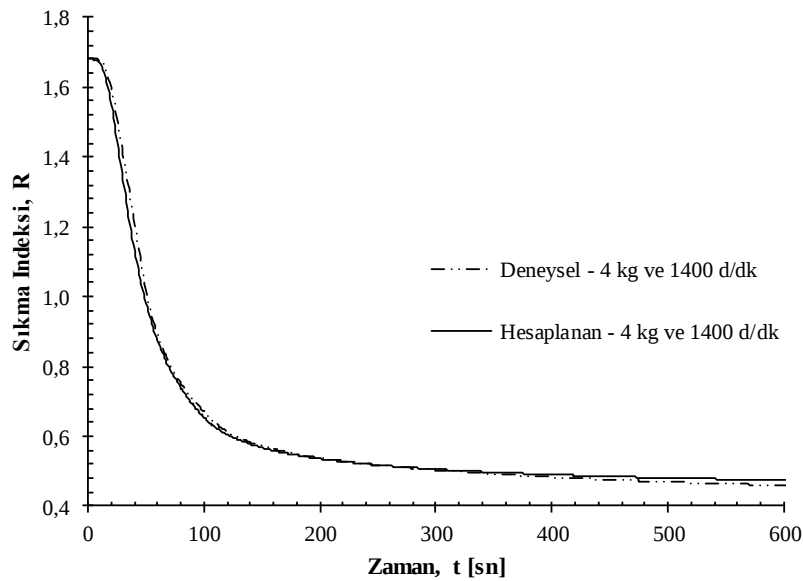
Şekil 6.4 : 4 kg yük 1000 d/dk debi eğrisi.

1400 d/dk devirde gerçekleştirilen çalışmalarda da benzer karakteristik ortaya çıkmaktadır. Hem 1000 d/dk hem de 1400 d/dk deneyinde debi aynı noktada maksimum değere ulaşmaktadır. Tambur hedeflenen 1400 d/dk değerine ulaştıktan sonra <kılcal basınç ve geçirgenlikteki değişime bağlı olarak tekstilden su uzaklaştırma hızı azalmakta ve sistem eğrisi asimptota oturmaktadır.



Şekil 6.5 : 4 kg yük 1400 d/dk debi eğrisi.

0-100 sn aralığında her iki devir için su uzaklaştırma karakteristiği benzer iken ivmelenme arttığından dolayı 100-200 sn aralığında hedef devir daha yüksek olduğundan dolayı uzaklaştırılan su miktarı daha fazla olmaktadır.



Şekil 6.6 : 4 kg yük 1400 d/dk sıkma eğrisi.

0-100 sn aralığında her iki devir için su uzaklaştırma karakteristiği benzer iken ivmelenme arttığından dolayı 100-200 sn. aralığında hedef devir daha yüksek olduğundan dolayı uzaklaştırılan su miktarı daha fazla olmaktadır.

8 kg yük için benzer şekilde deneysel ve simülasyon verilerinin incelendiği grafikler EK-H’ de yer almaktadır.

6.3 Farklı Tahrik Gruplarında Yapılan Çalışmalar ile Simülasyonun Karşılaştırılması

Geliştirilen yazılımın farklı boyutlara sahip tahrik gruplarında yapılan deneyler ile karşılaştırılması ve yazılımın doğrulanması amaçlanır. Bu noktada farklı kapasitelere sahip 3 tahrik grubu seçilir. Kapasiteye ek olarak tamburların çapları da farklılık göstermektedir. 8 kg kapasiteye sahip ürünün çapı 480 mm iken 7 kg kapasitede derinliği daha dar olan 502 mm çap seçilir. Daha geniş çap için Arçelik ürün gamında yer almayan, 12 kg kapasiteye sahip 515 mm çapında benchmark ürün tercih edilmektedir. Ürünlerin görselleri ve boyut bilgileri Çizelge 6.2’ de detaylı olarak yer almaktadır.

Çizelge 6.2 : Farklı boyutlara sahip çamaşır makinelerinin karşılaştırılması.

Kapasite: 8 kg

Tambur Çapı: 480 mm

Tambur Derinliği: 356 mm



Kapasite: 7 kg

Tambur Çapı: 502 mm

Tambur Derinliği: 253 mm



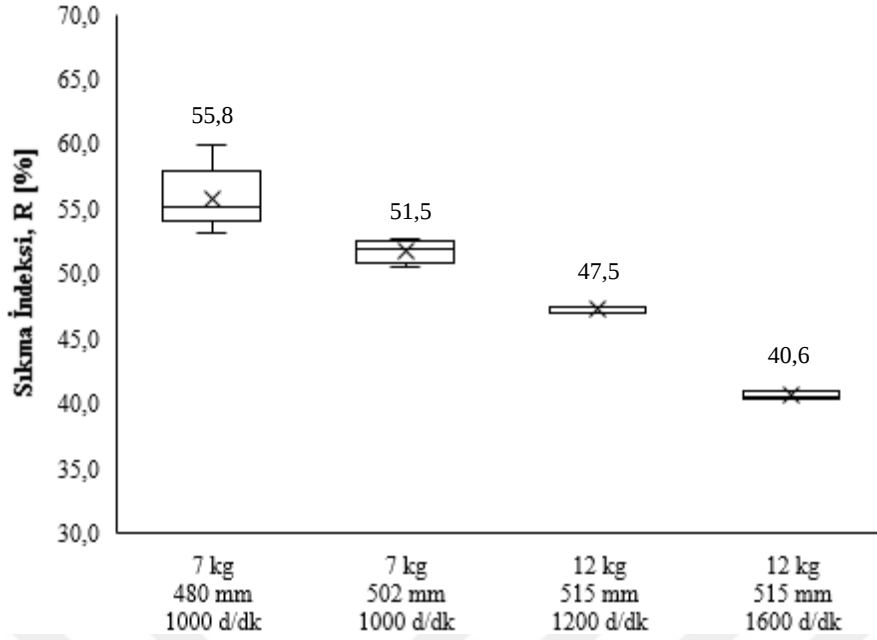
Kapasite: 12kg

Tambur Çapı: 515 mm

Tambur Derinliği: 356 mm



Belirlenen tahrik grupları üzerinde rastgele belirlenen şartlarda su uzaklaştırma deneyleri planlanmaktadır. 480 mm ve 502 mm çapına sahip ürünlerde 1000 d/dk tambur hızında 7 kg yük için su uzaklaştırma deneyleri planlanır. 12 kg kapasiteye sahip 515 mm çapındaki üründe ise 1200 d/dk ve 1600 d/dk tambur hızlarında sıkma deneyleri gerçekleştirilir. Yapılan deneylere ait sonuçlar Şekil 6.7’ de aktarılmaktadır.



Şekil 6.7 : Farklı tahrik grupları için yürütülen deneysel çalışmalar.

480 mm çapından daha büyük ve 1400 d/dk tambur hızından daha yüksek hızlarda deney yapılmamasına rağmen modelleme sırasında boyutsuzlaştırmalar uygulandığından hazırlanan simülasyonun bu noktalarda yakınsaması ve deneysel sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir. Çizelge 6.3’ de deney sonuçlarının ortalaması ile simülasyondan elde edilen veriler yer almaktadır.

Çizelge 6.3 : Deneysel ve simülasyon çalıştırılmasının karşılaştırılması.

Tambur Çapı (mm)	Yük Miktarı (kg)	Devir (d/dk)	Ölçülen Sıkma İndeksi (%)	Hesaplanan Sıkma İndeksi (%)	Fark (%)
480	7	1000	55,8	55,5	-0,5
502	7	1000	51,5	53,1	3,1
515	12	1200	47,3	46,4	-1,9
515	12	1600	40,6	39,2	-3,4

Ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığından elde edilen sonuçların ± 4 aralığında farklı olduğu tespit edilmektedir. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin uygun biçimde boyutsuzlaştırıldığından deneysel çalışmaların yapılmadığı noktalar da dahi hazırlanan simülasyon ile doğru sonuçların elde edilebildiği belirlenmektedir.

6.4 Alternatif Tahrik Grubu Tasarımı

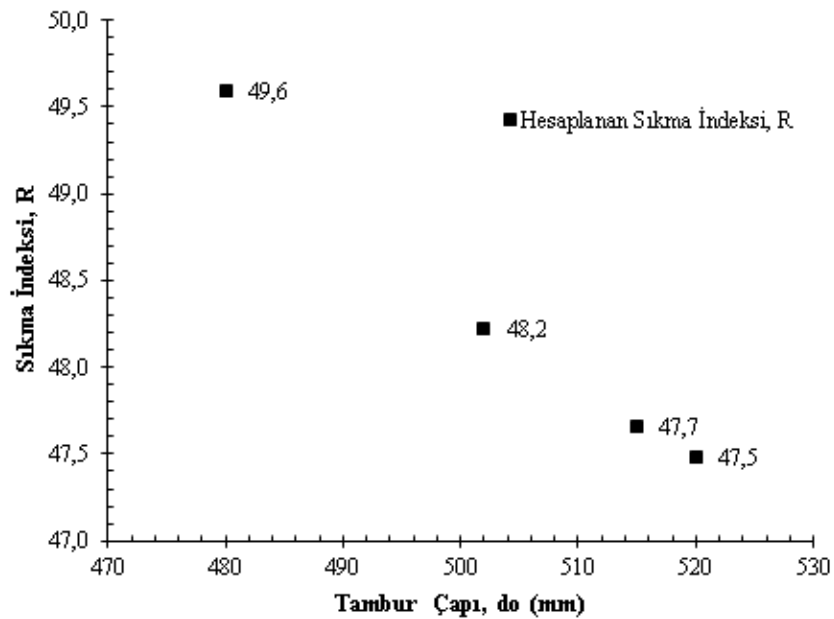
Simülasyonun uç noktalarda deneysel çalışmalar ile doğrulamasından sonra sıkma verimini iyileştirebilecek tasarım optimizasyonu amaçlanır. Arçelik bünyesinde 480

ve 502 mm çapında tambur tasarımları yer almaktadır. 8 kg yıkama kapasitesini mevcutta koruyarak daha geniş tambur çapına sahip ve daha dar derinliğe sahipler alternatif öneriler araştırılmaktadır. Kapasiteye ek olarak tahrik grubunun yerleştirileceği gövde boyutları da sabit tutulmuştur. Bu noktada çap artırımını uygulanmak istendiğinde gövde boyutları sabit olacağı için tambur çapının belirlenmesinde bir üst limit yer almaktadır. Bu noktada daha geniş çaptaki tasarım opsiyonları arasından 525 ve 520 mm alternatiflerinin değerlendirilebileceği ön görülmektedir. Çizelge 6.4 içerisinde mevcutta yer alan ve alternatif olarak önerilen tahrik gruplarına ait boyut bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 6.4 : Alternatif tambur tasarım önerileri.

Tambur Çapı (mm)	Tambur Derinliği (mm)	Durum	Yük Miktarı (kg)	Devir (d/dk)
480	356	Mevcut	8	1200
502	297	Mevcut	8	1200
515	280	Alternatif	8	1200
520	275	Alternatif	8	1200

Su sıcaklığı 15 °C ve kapasite 8 kg sabit tutularak tambur çapı arttırıldığında ve tambur derinliği azaltıldığında sıkma indeksinin azaltılabileceği öngörülmektedir. Şekil 6.8’ de alternatif tambur boyutlarına bağlı olarak elde edilen sıkma indeksi değerleri yer almaktadır. Tambur çapı 40 mm arttırıldığında sıkma indeksinin %49,59’ dan % 47,48 değerine gelebileceği hesaplanmaktadır.



Şekil 6.8 : Alternatif tambur tasarım simülasyonu.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen doktora tezi çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir;

- i. Deneysel çalışmalarda, EN60456:2011 standardında tanımlı pamuklu yapıdaki çarşaflar üst üste dizilerek gözenekli ortam oluşturulmuştur. İlk olarak seçilen tekstilin kalınlığı ve iplik çapı deneysel olarak belirlenmiştir. Standart oda koşullarında katmanlı yapıdaki deney numunesinin gözenekliliği 0,724 olarak hesaplanmıştır.
- ii. Farklı adetlerdeki katmanların üst üste konulmasıyla oluşturulan gözenekli ortamın basınç altında gözeneklilik değişimi ölçülmüştür. Uygun formda boyutsuz ifadeler belirlenerek regresyon analizi sonucunda, gözenekliliğin değişimini ifade eden $\varepsilon = 0,76(0,94)^{\frac{n_k}{100}} \left(\frac{P}{g_L \rho_s} \right)^{-0,017}$ denklemi elde edilmiştir.
- iii. Hazırlanan deney düzeneği ile sıcaklık, devir, atılan su miktarı, sisteme giren su miktarı, enerji tüketimi gibi parametreler ölçülmüştür. Su uzaklaştırma deneyleri sırasında çeşitli yükler kullanılarak homojen yapıda bir gözenekli ortam elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında yük miktarı, devir ve sıcaklık gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır.
- iv. Deneyler sonunda, devir arttıkça tekstilde kalan su miktarının azaldığı,, yük miktarı arttıkça tekstilde kalan su miktarının arttığı belirlenmiştir. Deneysel veriler, sıkma indeksi ve doyma sayısına dönüştürülerek literatürle karşılaştırılmıştır. Devir arttıkça sıkma indeksinin azaldığı ve yük miktarı azaldıkça sıkma indeksinin arttığı görülmüştür. Sıkma işlemi analiz edildiğinde; ivmelenme ve sabit devirde dönme olmak üzere iki fazın olduğu görülmüştür. İvmelenme sırasında gözenekli ortamdan çıkan su miktarı artmakta ve sıkma indeksinde büyük bir düşüş meydana gelmektedir. Tambur hedeflenen devire ulaştığında, sıkma indeksinin düşme hızı azalmakta ve deneyin sonuna doğru asimptota oturmaktadır.

- v. Doyma sayısının hesaplanabilmesi için pres deneyleri sonunda elde edilen gözeneklilik-basınç değişimi ilişkisi kullanılmıştır. Deney sonunda gözenekli ortamdaki su hacminin gözenek hacmine oranı olarak tanımlanan indirgenemez doymun devir arttıkça azaldığı belirlenmiştir. İvmelenme adımı sırasında doyma sayısının birden küçük bir değere indiği ve gözenekli ortama hava girişinin olduğu görülmüştür. Tambur hedeflenen hızda dönerken sıkma işlemini sonuna doğru doyma sayısının birden küçük bir değere asimptotik olarak yaklaşmıştır.
- vi. Dönen eksen takımında katı ve sıvı faz için ayrı ayrı süreklilik ve momentumun korunum denklemleri yazılmıştır. Katı faz için momentum denklemi integral formda çözümlenerek şekil değiştirme ile gerilme arasındaki ilişki belirlenmiştir. Deneysel veriler analiz edildiğinde, gerilme-şekil değişimini veren $\Delta\sigma_{rr} = -2284,3 \frac{\Delta L}{L_{si}} + 10456 \left(\frac{\Delta L}{L_{si}} \right)^2 35,99 n_k \frac{\Delta L}{L_{si}}$ denklemi elde edilmiştir.
- vii. Sıvı faz için süreklilik denkleminin integral ifadesi yardımıyla tamburdan atılan suyun ortalama hızını veren denklem belirlenmiştir. Bu denklemden yararlanılarak deneysel veriler analiz edildiğinde tamburdan çıkan suyun ivmelenme sırasında maksimuma ulaştığı görülmüştür. Maksimum hız değerinin yük miktarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısı çok düşük değerde olduğundan akış rejimi Darcy olarak tespit edilmiştir.
- viii. İntegral formdaki momentum denkleminde ivme, kılcal basınç, santrifüj basınç ve Darcy terimleri arasındaki ilişki elde edilmiştir. Sıkma işleminin sonunda, kılcal basınç santrifüj basınca eşit olduğundan gözenekli ortamdan su çıkışı durmuştur. Regresyon analizi yapılarak kılcal basınç, devir, tarıçap, katman sayısı ve kalan su miktarı arasındaki ilişki, boyutsuz sayılardan oluşan $\pi_1 = R_\infty^{0,0523} \pi_2^{0,07736-0,000067 n_k} e^{3,88266-0,046613 n_k+0,000245 n_k^2}$ denklemiyle ifade edilmiştir. Kılcal basınç değerleri momentum denkleminde yerine yazılır ve deneysel verilerden geçirgenlik değerleri çekilmiştir Regresyon analizi ile geçirgenlik ve doyma sayısı arasında $k = S_m^{9,183} e^{-25,579-0,011432 n_k}$ denklemiyle belirtilen üstel bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur.
- ix. Santrifüj kuvvetler altında gözenekli ortamdaki suyun hareketi, katının ezilme miktarı ve gözenekli ortamda kalan su miktarını belirlemek için hesaplama

algoritması geliştirilmiştir. Tambur çapı, tambur derinliği, sıkma algoritması, sıcaklık ve yük miktarı bu matematik modelin girdileridir. Deney sonunda elde edilen sıkma indeksi değerleri, hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığında aradaki farkın en fazla $\pm 5\%$ olduğu görülmüştür. Hesaplanarak elde edilen zaman bağlı sıkma indeksi ve su debisi değerlerinin de deneysel sonuçlarla paralel olduğu belirlenmiştir.

- x. Son olarak geliştirilen Matlab yazılımı ile farklı boyutlara sahip tahrik gruplarında yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Ölçüm ve hesaplanan değerler karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların $\pm 4\%$ aralığında farklı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın devamı olarak gelecekte aşağıdaki çalışmaların yürütülmesi yararlı olacaktır;

- i. Mevcut çalışma sonunda EN 60456:2011 standardında tanımlı olan pamuklu yük için sıkma sonunda kalan su miktarını belirleyen bir hesaplama yöntemi oluşturulmuştur. Bu yöntem sadece pamuklu yükler için geçerli olmaktadır. Geliştirilen metodolojiden yararlanarak viskon, sentetik, yük, ipek ve karışık tekstil yükleri için benzer bir çalışma yürütülebilir. Böylece çamaşır makineleri için son kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayabilecek yük miktarı ve tipine göre değişen adaptif sıkma algoritmaları tasarlanabilir.
- ii. Santrifüj kuvvet formuna ek olarak hava basıncı ya da vakumun su uzaklaştırma sırasında uygulanması değerlendirilebilir. Bu sayede hibrit sistem tasarımı ile aynı tambur devrinde daha yüksek su uzaklaştırma değerlerinin elde edilebilirliği araştırılabilir.
- iii. Sıkma sonunda tekstil üzerinde kalan su miktarını azaltmak için diğer bir yöntemi geliştirilen modelden de görüldüğü üzere minimum yüzey gerilimidir. Son durulama aşamasında yüzey gerilimini azaltabilecek kimyasal ile tekstilin proses edilmesi araştırılabilir. Bu yöntem ile kalan su miktarı azaltılabilirse yüzey geriliminin etkisi hazırlanan modelde geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Ambler, C. M.** (1988). *Handbook of Separation Techniques*. 2nd Edition, New York, USA.
- Başer, G.** (2004). *Dokuma Tekniği Ve Sanatı Cilt I Temel Dokuma Tekniği ve Kumaş Yapıları*. İzmir: TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası.
- Bear, J.** (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Elsevier.
- Behera, B. K., Hari, P. K.** (2010). *Woven Textile Structure, Theory and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Bejan, A. ve Nield, D.** (2013). *Convection in Porous Media*. New York: Springer-Verlag.
- BEYSAD.** (2011). *Dokuma Tekniği*. Retrieved from <http://www.beysad.org.tr/>
- Burcharth, H.F. & Andersen, O. H.** (1995). On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equations, *Coast.Eng.*, 24, 233-257
- Carman, P. C.** (1937). Fluid flow through a granular bed, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 15, 150-157.
- Chan, S. H., Kiang, S. ve Brown, M. A.** (2003). One-Dimensional Centrifugation Model, *AIChE Journal*, 49 (4), 925-938.
- Crawford, R., Jones, F., You, L. ve Wu, Q.** (2011). Compression-dependent permeability measurement for random soft porous media and its implications to lift generation, *Chemical Engineering Science*, 66 (3), 294-302.
- Darcy, H. P. G.** (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
- Denton, M. J.** (1964). The permeability of cross-wound cotton yarn packages, *Journal of the Textile Institute*, 55 (4), 228-242.
- Denton, M. J.** (1974a). The extraction of water from cotton-yarn packages by centrifugal force. Part I: Spinning in a basket centrifuge, *Journal of the Textile Institute*, 65 (8), 409-415.
- Denton, M. J.** (1974b). The extraction of water from cotton-yarn packages by centrifugal force. Part II: The distribution of moisture in axial spinning, *Journal of the Textile Institute*, 65 (8), 416-420.
- EN:60456** (2011). *Clothes washing machines for household use methods for measuring the performance* Retrieved from <https://shop.bsigroup.com>.
- Eruğur, A.** (2016). *Dokuma Tekniği*, Retrieved from <http://www.acarerugur.com>
- Forcheimer** (1901). Wasserbewegung durch Boden, *Z Ver Deutsch Ing.*, 45, 1782-1788.
- Ford, J. E.** (1966). *Fibre Data Summaries*. Shirley Institute, Manchester

- GfK** (2014). *Market Analyses*. Retrieved from <http://www.gfk.com>
- Greitzer, E. M., Tan, C. S., ve Graf, M. B.** (2004). *Internal flow: Concepts and applications*. Cambridge, U.K: Cambridge University Press.
- Gu, Z. & Wang, H.** (1991). Gravity waves over porous bottoms, *Coast.Eng.*, 15 (5), 497-524.
- Happel, J.** (1958). Viscous flow in multiparticle systems: Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles, *AIChE Journal.*, 4 (2), 197-201.
- Hearne, E. R. & Nossar, M. S.** (1982). Behavior of loose fibrous beds during centrifuging: Part I: Compressibility of fibrous beds subjected to centrifugal forces, *Textile Res. J.*, 52 (10), 609-614.
- Hearne, E. R. & Nossar, M. S.** (1983a). Behavior of loose fibrous beds during centrifuging: Part II: Bulk density of fibrous beds subjected to centrifugal forces, *Textile Res. J.*, 53 (1), 8-14.
- Hearne, E. R. & Nossar, M. S.** (1983b). Behavior of loose fibrous beds during centrifuging: Part III: Location, shape, and size of droplets of surface moisture, *Textile Res. J.*, 53 (4), 236-252.
- Hearne, E. R. & Nossar, M. S.** (1983c). Behavior of loose fibrous beds during centrifuging: Part IV: Prediction of final regain, *Textile Res. J.*, 53 (5), 303-312.
- Hsu, C. T. & Cheng, P.** (1990). Thermal dispersion in a porous medium, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33 (8), 1587-1597.
- Hwang, K. & Chou, K.** (2007). Effect of cake compression on the performance of centrifugal dewatering, *Separation Science and Technology*, 36 (12), 2693-2706.
- Hwang, K., Chu, W. ve Lu, W.** (2001). A method to determine the cake properties in centrifugal dewatering, *Drying Technology: An International Journal*, 24 (10), 1263-1270.
- Kaviany, M.** (2012). *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. New York: Springer Science & Business Media.
- Loeb, L.** (1963). Water retention by cotton fabric during centrifuging, *Textile Res. J.*, 33 (7), 521-526.
- Loeb, L.** (1965). Water retention by cotton fabric under compressional loading, *Textile Res. J.*, 35 (7), 621-626.
- Matsumoto, T.** (2016). *Germany Patent No. DE112014003395 (T5)*. Retrieved from Espacenet.
- Merediz, A.** (2009). *Modeling of dehydration processes in controlled spinning of washing machines*, (Yüsek lisans tezi), Chalmers, Göteborg
- Minayoshi, H.** (2015). *European Patent No. EP2860297 (A1)*. Retrieved from Espacenet.
- Nergis, B. U.** (2008). *İplik Teknolojisine Giriş*. İstanbul: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.

- Patnaik, A., Rengasamy, R. S., Kothari, V. K. ve Ghosh, A.** (2006). Wetting and Wicking in Fibrous Materials, *Textile Progress*, 38 (1), 1-105
- Peirce, F. T.** (1937). *J. Text. Inst.*, 28, 45-112
- Polli, H.** (2015). *U.S. Patent No. US2015330009 (A1)*. Retrieved from Espacenet.
- Preston, J. M. & Nimkar, V. M.** (1950). *Journal of the Textile Institute*, 41, T446.
- Preston, J. M. & Nimkar, V. M.** (1952). *Journal of the Textile Institute*, 43 (8), 402-422.
- Richter, T.** (2005). Energy efficient laundry process. New York: GE internal report.
- Rainer, J.** (2016). *European Patent No. EP3004448 (A1)*. Retrieved from Espacenet.
- Rieger, T.** (2009). *European Patent No. EP2053152 (A1)*. Retrieved from Espacenet.
- Simsek, T.** (2013). *Korean Patent No. KR101319148 (B1)*. Retrieved from Espacenet.
- Slattery, J. C.** (1969). Single-phase flow through porous media, *AIChE Journal*, 15 (6), 866-872.
- Urquhart, A. R. & Eckersall N.** (1930). *Journal of the Textile Institute*, 21, T449.
- Vadasz, P.** (1998). Transport Phenomena in Porous Media. In D. B. Ingham & I. Pop (Eds.), *Free convection in rotating porous media* (pp.285-312). Oxford: Pergamon.
- Wakeman R. J. & Rushton A.,** (1977). Dewatering properties of particulate beds, *Journal of Powder and Bulk Solids Technology*, 1 (2), 64-69
- Wakeman, R. J.** (1979). *Filtration and Separation*, 16, 655.
- Wakeman, R. J.** (1982). *J. Separ. Proc. Technol.*, 1, 32.
- Wakeman, R. ve Tartelon S.** (2005). *Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration*. Oxford: Elsevier.
- Wakeman R. J. ve Vince, A.** (1986). Engineering model for the kinetics of drainage from centrifuge cakes, *Chem. Eng. Res. Des*, 64 (2), 104–108
- Ward, D.** (2000). Modelling of a horizontal-axis domestic washing machine, *The Journal of The Textile Institute*, 91 (2), 207-234.
- Whitaker, S.** (1967). Diffusion and dispersion in porous media, *AIChE J*, 13, 420-427.
- Whitaker, S.** (1996). The Forchheimer equation: a theoretical development, *Transp. Porous Media.*, 25 (1), 27-61.
- Zhu, T., Waluga, C., Wohlmuth, B. ve Manhart, M.** (2014). A study of the time constant in unsteady porous media flow using direct numerical simulation. *Transport in Porous Media*, 104 (1), 161-179.



EKLER

EK A : Tekstil apı ve kalınlığı hesabı

EK B : Ham deney verileri

EK C : $\ln(\epsilon)$, $\ln(P/gpL)$ ve katman sayısı arasındaki ilişki

EK D : Kılcal basıncın elde edildiği regresyon analizi

EK E : Katı faz için şekil değiştirmeye neden olan gerilmenin belirlendiği regresyon analizi

EK F : Geçirgenliğin belirlendiği regresyon analizi

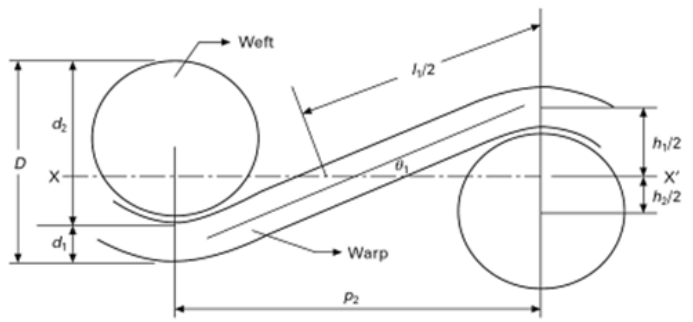
EK G : özüm algoritma kodları

EK H : Zamana bağlı sıkma ve debi eğrileri

EK I : Suyun fiziksel özellikleri

EK A

Bu bölümde tekstil kalınlığı ve iplik çapı için yapılan ölçümlerin teorik hesaplama ile karşılaştırılması yapılır. Seçilen numunenin örgü tipi en temel örgülerden biri olan 1/1 bezayağıdır. Bezayağı örgü tipinde çözgü ipliği kumaş uzunluğu boyunca atkı ipliklerinin bir altı ve bir üstünden geçer (Başer, 2004). Örgü tipi 1/1 bez ayağı olan kumaşlarda teorik hesaplamalar için Pierce (1937) tarafından geliştirilen modelden yararlanılır. Pierce (1937) modelinin şematik çizimi Şekil A.1’ de yer almaktadır. Şekilde de yer aldığı üzere iplikler dairesel kesite sahiptir ancak birbirlerine temas ettikleri noktalarda eğri segmentleri yer almaktadır.



Şekil A.1 : Pierce modeli (Behera ve Hari, 2010).

Behera ve Hari (2010) temel geometriye sahip kumaşın; mekanik deformasyon hesabı, su ve hava geçirgenlik değerinin belirlenmesi ve ortalama kumaş yoğunluğu hesabı gibi konularda avantaja sahip olduğunu iddia etmektedir. Örgü tipi 1/1 bez ayağı olan kumaşlar için de geçerli olan denklem A.1 kullanılarak olarak nominal iplik çapı belirlenir (Eruğur, 2016);

$$d = 4.0 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T_{\text{tex}}}{\rho_s}} \quad (\text{A.1})$$

Denklemden yer alan T_{tex} ifadesi tekstil iplik numarasıdır ve kullanılan çarşaf numunesi için Çizelge 4.1’ de belirtilen 33 değeri alınmaktadır. Bu denklemden hesaplanan iplik çapı 0.188 mm’dir. Bu değer, Şekil 4.1’ de mikroskopla ölçülen 0.187-0.204 mm aralığı içerisinde kalmaktadır ve ölçüm sonucuna yakın bir değer elde edilmektedir. Kalınlık hesabı için gerekli olan kıvrım oranı değeri denklem A.2 kullanılarak hesaplanır (Behera ve Hari, 2010);

$$c = \left(\frac{3\delta}{8/s} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

Denklemde yer alan c kıvrım oranıdır ve birimsizdir, s sıklığı ifade eder ve adet/cm birimindedir. δ ise ölçülen numune kalınlığını belirtmektedir. Denklem sonucunda kıvrım oranı değeri 0,130 olarak elde edilmektedir. Kıvrım oranı değeri belirlendikten sonra kıvrım yüksekliği denklem A.3 uygulanarak hesaplanır (Behera ve Hari, 2010);

$$f = \frac{\sqrt{2c}}{s} \quad (A.3)$$

Denklem sonucunda kıvrım yüksekliği 0,212 mm olarak bulunmuştur. Elde edilen veriler ışığında en son olarak kalınlık değeri denklem A.4 kullanılarak hesaplanır;

$$\delta = \frac{d + f}{2} \quad (A.4)$$

Denklem sonucunda çarşaf tabaka yüksekliği 0,399 mm olarak hesaplanmaktadır. Tek bir katman mikroskop altında incelendiğinde, 0.390-0.400 mm aralığı içerisinde ölçüm elde edilmekte ve tekil katman için ölçüm değeri ile hesaplanan değer yakın olduğu görülmektedir. Hem deneylerde hem de teorik hesaplamada tek bir tabakanın kalınlığının aynı mertebede olduğu görülmektedir.

EK B**Çizelge B.1** : Deney öncesi kuru kütle, deney sonu toplam kütle, sıkma sırasında ortalama su sıcaklığı ve deney sonu hesaplanan sıkma indeksi değerleri.

Deney No	Kuru Kütle, m_d [kg]	Toplam Kütle, m_w [kg]	Ortalama Sıcaklık, T [°C]	Terazide Toplanan Su Miktarı [gr]	Deney Sonu Sıkma İndeksi, R_∞
1	1,95	3,64	18,8	7758	0,87
2	1,95	3,20	20,0	8351	0,64
3	1,95	2,93	18,9	8656	0,50
4	4,15	7,17	21,2	6550	0,73
5	4,15	6,57	22,6	7113	0,58
6	4,15	6,02	24,2	7695	0,45
7	8,02	13,71	21,3	11527	0,71
8	8,02	12,46	21,5	12806	0,55
9	8,02	11,78	23,1	13531	0,47
10	1,95	3,56	52,5	7795	0,82
11	1,95	3,18	51,0	8111	0,63
12	1,95	2,91	50,6	8407	0,49
13	4,15	7,10	53,3	8325	0,71
14	4,15	6,41	51,3	8858	0,54
15	4,15	5,94	51,2	9451	0,43
16	8,02	13,42	50,7	11680	0,67
17	8,02	12,25	49,8	12862	0,53

Çizelge B.2 : Deney 1 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	101	3,68	1,56E-05
10	236	3,34	5,32E-05
22	406	2,74	4,97E-05
32	553	2,28	4,87E-05
44	612	2,00	6,52E-06
54	612	1,95	3,01E-06
66	610	1,92	1,00E-06
76	613	1,90	1,00E-06
88	616	1,88	1,00E-06
98	615	1,87	1,00E-06
110	614	1,85	1,00E-06
120	616	1,84	1,00E-06
132	616	1,83	1,00E-06
176	613	1,80	1,00E-06
220	617	1,78	5,02E-07
264	617	1,76	5,02E-07
308	615	1,75	0,00E+00
352	614	1,74	0,00E+00
396	617	1,73	5,02E-07
440	616	1,72	0,00E+00
484	614	1,71	5,02E-07
528	614	1,70	0,00E+00
572	614	1,70	5,02E-07
616	617	1,69	0,00E+00

Çizelge B.3 : Deney 2 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	116	3,16	5,55E-05
10	231	2,65	5,19E-05
22	380	2,07	3,86E-05
31	504	1,75	9,53E-06
43	651	1,67	3,62E-06
53	777	1,64	1,04E-06
65	926	1,62	1,54E-06
75	976	1,60	1,03E-06
87	976	1,59	1,00E-06
96	975	1,57	1,00E-06
108	979	1,56	1,54E-06
118	978	1,55	1,55E-06
130	980	1,54	9,95E-07
173	981	1,51	0,00E+00
216	981	1,49	0,00E+00
260	982	1,47	0,00E+00
303	981	1,46	5,05E-07
347	983	1,45	5,05E-07
390	979	1,44	0,00E+00
433	979	1,43	0,00E+00
477	981	1,43	0,00E+00
520	979	1,42	0,00E+00
566	981	1,41	4,97E-07
609	979	1,41	0,00E+00

Çizelge B.4 : Deney 3 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	109	3,97	1,05E-05
5	162	3,93	2,20E-05
11	233	3,71	4,66E-05
17	298	3,46	5,16E-05
23	375	3,19	3,98E-05
28	434	3,00	2,72E-05
34	507	2,73	4,40E-05
40	575	2,52	4,17E-05
46	646	2,32	2,30E-05
51	714	2,19	1,55E-05
57	787	2,06	2,10E-05
62	848	1,97	2,10E-05
69	924	1,88	1,46E-05
92	1200	1,64	7,76E-06
114	1388	1,46	0,00E+00
137	1388	1,39	2,91E-06
160	1393	1,34	2,91E-06
183	1392	1,31	0,00E+00
206	1395	1,29	1,94E-06
229	1393	1,27	9,71E-07
252	1393	1,25	1,91E-06
275	1390	1,24	0,00E+00
297	1392	1,22	9,71E-07
320	1393	1,21	0,00E+00
343	1392	1,20	0,00E+00
366	1392	1,19	0,00E+00
389	1394	1,19	0,00E+00
412	1394	1,18	9,70E-07
435	1393	1,17	0,00E+00
458	1390	1,17	9,57E-07
482	1396	1,16	9,57E-07
504	1392	1,15	0,00E+00
527	1392	1,15	0,00E+00
550	1396	1,15	9,57E-07
573	1392	1,14	9,71E-07
596	1391	1,14	0,00E+00
619	1392	1,13	0,00E+00

Çizelge B.5 : Deney 4 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	104	7,28	0,00E+00
5	166	7,26	7,66E-06
11	249	7,23	1,07E-05
17	329	7,21	0,00E+00
23	408	7,21	0,00E+00
28	483	7,20	0,00E+00
34	569	7,20	9,57E-07
40	612	7,20	0,00E+00
46	611	7,19	0,00E+00
51	609	7,19	8,61E-06
57	612	7,15	4,79E-06
62	613	6,94	6,79E-05
69	612	6,44	9,62E-05
92	615	4,42	6,90E-05
114	615	3,86	1,05E-05
137	614	3,72	3,88E-06
160	615	3,64	2,91E-06
183	615	3,59	1,91E-06
206	617	3,55	1,94E-06
229	615	3,52	0,00E+00
252	613	3,50	9,57E-07
275	618	3,48	0,00E+00
297	616	3,46	0,00E+00
320	618	3,45	9,58E-07
343	612	3,43	0,00E+00
366	617	3,42	0,00E+00
389	613	3,41	0,00E+00
412	617	3,40	0,00E+00
435	613	3,39	0,00E+00
458	612	3,38	0,00E+00
480	618	3,38	0,00E+00
503	612	3,37	9,57E-07
526	618	3,36	0,00E+00
549	613	3,36	0,00E+00
572	616	3,35	9,57E-07
595	616	3,35	0,00E+00
618	614	3,34	0,00E+00
641	614	3,34	0,00E+00
664	614	3,33	0,00E+00

Çizelge B.6 : Deney 5 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	99	7,33	9,57E-07
5	216	7,31	1,07E-05
11	297	7,28	5,74E-06
17	353	7,15	4,78E-05
23	438	6,81	7,85E-05
28	497	6,42	7,76E-05
34	569	5,93	7,97E-05
40	632	5,51	8,04E-05
46	703	5,00	8,16E-05
51	760	4,61	6,41E-05
57	843	4,26	4,41E-05
62	902	4,04	3,69E-05
69	976	3,85	3,30E-05
92	976	3,40	1,24E-05
114	973	3,26	2,92E-06
137	980	3,18	2,87E-06
160	989	3,12	1,91E-06
183	983	3,08	0,00E+00
206	975	3,05	0,00E+00
229	974	3,01	1,94E-06
252	981	2,99	0,00E+00
275	980	2,97	0,00E+00
297	989	2,95	0,00E+00
320	982	2,93	1,94E-06
343	985	2,92	9,58E-07
366	979	2,90	1,94E-06
389	986	2,89	9,72E-07
412	983	2,87	0,00E+00
435	986	2,86	2,92E-06
458	976	2,85	0,00E+00
480	975	2,84	0,00E+00
503	974	2,83	0,00E+00
526	985	2,83	0,00E+00
549	978	2,82	0,00E+00
572	984	2,81	0,00E+00
595	978	2,80	0,00E+00
618	973	2,79	9,58E-07
641	986	2,78	0,00E+00
664	983	2,78	0,00E+00
686	977	2,76	0,00E+00

Çizelge B.7 : Deney 6 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	100	7,33	0,00E+00
5	158	7,31	2,91E-06
11	232	7,27	6,70E-06
17	293	7,13	4,85E-05
23	369	6,77	7,94E-05
28	435	6,35	8,80E-05
34	509	5,84	6,60E-05
40	566	5,42	8,70E-05
46	638	4,88	7,86E-05
51	701	4,49	5,93E-05
57	782	4,15	4,86E-05
62	841	3,94	3,50E-05
69	913	3,74	2,97E-05
92	1184	3,26	1,53E-05
114	1394	2,95	1,17E-05
137	1387	2,78	5,74E-06
160	1397	2,69	3,83E-06
183	1393	2,62	3,89E-06
206	1400	2,57	2,87E-06
229	1398	2,53	0,00E+00
252	1391	2,50	1,94E-06
275	1399	2,47	1,91E-06
297	1390	2,44	0,00E+00
320	1389	2,42	0,00E+00
343	1393	2,40	1,91E-06
366	1391	2,38	1,91E-06
389	1395	2,37	1,94E-06
412	1388	2,35	9,58E-07
435	1389	2,34	0,00E+00
458	1395	2,32	0,00E+00
480	1395	2,31	1,91E-06
503	1392	2,30	0,00E+00
526	1395	2,29	9,72E-07
549	1389	2,28	0,00E+00
572	1395	2,27	1,91E-06
595	1394	2,26	9,71E-07
618	1396	2,25	9,57E-07
641	1390	2,24	0,00E+00
664	1393	2,22	0,00E+00

Çizelge B.8 : Deney 7 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	102	13,40	0,00E+00
5	152	13,38	6,70E-06
11	232	13,32	1,17E-05
17	307	13,26	2,82E-05
23	389	12,96	7,67E-05
28	471	12,42	1,48E-04
34	557	11,45	1,74E-04
40	615	10,58	1,63E-04
46	613	9,62	1,52E-04
51	612	8,89	1,23E-04
57	613	8,31	5,84E-05
62	611	8,03	3,25E-05
69	613	7,83	2,43E-05
92	616	7,43	1,17E-05
114	616	7,23	6,70E-06
137	616	7,10	1,94E-06
160	616	7,00	9,72E-07
183	616	6,91	9,58E-07
206	615	6,85	2,92E-06
229	618	6,80	2,92E-06
252	612	6,76	2,87E-06
275	615	6,71	1,94E-06
297	616	6,68	1,91E-06
320	614	6,65	1,91E-06
343	616	6,62	0,00E+00
366	615	6,59	1,91E-06
389	614	6,56	2,87E-06
412	618	6,54	0,00E+00
435	614	6,52	0,00E+00
458	615	6,50	0,00E+00
480	613	6,48	0,00E+00
503	614	6,46	1,91E-06
526	613	6,45	0,00E+00
549	615	6,43	1,94E-06
572	613	6,41	1,91E-06
595	612	6,40	9,57E-07
618	615	6,39	0,00E+00
641	614	6,37	0,00E+00
664	614	6,36	9,57E-07

Çizelge B.9 : Deney 8 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	103	13,98	0,00E+00
5	152	13,95	2,30E-05
11	210	13,82	1,26E-05
17	273	13,73	2,33E-05
23	349	13,51	6,51E-05
28	410	13,13	1,18E-04
34	488	12,26	1,65E-04
40	549	11,44	1,57E-04
46	616	10,44	1,50E-04
51	674	9,66	1,31E-04
57	763	8,85	1,08E-04
62	816	8,31	9,47E-05
69	889	7,78	7,29E-05
92	1159	6,61	4,18E-05
114	1393	6,00	1,82E-05
137	1397	5,63	1,16E-05
160	1397	5,40	7,77E-06
183	1398	5,24	5,74E-06
206	1397	5,14	9,72E-06
229	1399	5,04	2,87E-06
252	1389	4,97	2,87E-06
275	1398	4,91	2,92E-06
297	1395	4,85	2,87E-06
320	1398	4,81	1,91E-06
343	1397	4,76	0,00E+00
366	1392	4,72	1,92E-06
389	1390	4,68	0,00E+00
412	1398	4,66	1,94E-06
435	1389	4,62	0,00E+00
458	1390	4,60	1,92E-06
480	1400	4,57	1,95E-06
503	1388	4,55	0,00E+00
526	1396	4,53	1,92E-06
549	1392	4,50	1,95E-06
572	1397	4,48	9,58E-07
595	1387	4,47	0,00E+00
618	1394	4,45	0,00E+00
641	1394	4,41	9,58E-07

Çizelge B.10 : Deney 9 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
113	0	13,58	3,83E-06
173	5	13,53	1,07E-05
236	11	13,48	1,72E-05
298	17	13,39	1,34E-05
367	23	13,31	7,65E-06
422	28	13,18	4,69E-05
505	34	12,76	9,90E-05
563	40	12,16	1,40E-04
642	46	11,30	1,41E-04
694	51	10,57	1,40E-04
776	57	9,72	1,39E-04
828	62	8,91	8,05E-05
907	69	8,37	8,32E-05
979	92	6,85	4,78E-05
982	114	6,22	1,94E-05
973	137	5,97	6,70E-06
979	160	5,82	3,83E-06
987	183	5,71	1,91E-06
986	206	5,63	2,87E-06
986	229	5,57	2,87E-06
973	252	5,51	2,92E-06
972	275	5,46	1,91E-06
974	297	5,42	0,00E+00
974	320	5,38	1,94E-06
975	343	5,33	0,00E+00
978	366	5,31	1,94E-06
974	389	5,28	1,94E-06
980	412	5,26	0,00E+00
977	435	5,23	0,00E+00
990	458	5,21	1,94E-06
982	480	5,19	1,92E-06
973	503	5,17	9,72E-07
983	526	5,15	0,00E+00
982	549	5,13	0,00E+00
974	572	5,11	1,94E-06
985	595	5,10	0,00E+00
973	618	5,08	0,00E+00
986	641	5,06	0,00E+00
977	664	5,05	0,00E+00
989	686	5,04	0,00E+00

Çizelge B.11 : Deney 10 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	99	3,64	1,94E-06
5	180	3,64	1,94E-06
11	268	3,63	9,84E-07
17	339	3,63	2,91E-06
23	429	3,62	1,97E-06
28	505	3,60	5,91E-06
34	615	3,57	2,95E-06
40	609	3,56	3,84E-05
46	610	3,31	4,65E-05
51	609	3,06	3,84E-05
57	609	2,79	4,46E-05
62	612	2,54	4,85E-05
69	614	2,28	4,17E-05
92	611	1,97	3,94E-06
114	613	1,91	1,94E-06
137	614	1,88	1,94E-06
160	614	1,86	1,97E-06
183	613	1,84	0,00E+00
206	615	1,83	9,68E-07
229	613	1,82	0,00E+00
252	615	1,81	9,68E-07
275	614	1,80	0,00E+00
297	613	1,79	0,00E+00
320	613	1,79	0,00E+00
343	615	1,79	9,68E-07
366	616	1,78	0,00E+00
389	616	1,78	0,00E+00
412	613	1,78	0,00E+00
435	615	1,77	0,00E+00
458	615	1,77	0,00E+00
481	611	1,77	0,00E+00
503	614	1,77	9,80E-07
526	613	1,77	0,00E+00
549	612	1,77	0,00E+00
572	616	1,77	0,00E+00
595	617	1,77	0,00E+00
618	614	1,76	0,00E+00
641	613	1,76	9,81E-07

Çizelge B.12 : Deney 11 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	111	3,71	0,00E+00
5	165	3,70	4,92E-06
11	238	3,69	1,94E-06
17	303	3,68	0,00E+00
23	370	3,68	0,00E+00
28	443	3,67	3,88E-06
34	509	3,65	3,94E-06
40	573	3,63	3,88E-06
46	646	3,42	4,72E-05
51	705	3,17	4,63E-05
57	784	2,92	3,20E-05
62	840	2,72	4,82E-05
69	918	2,47	4,56E-05
92	970	1,86	1,77E-05
114	982	1,58	5,90E-06
137	983	1,51	9,69E-07
160	977	1,47	1,97E-06
183	986	1,45	0,00E+00
206	983	1,43	9,68E-07
229	986	1,43	0,00E+00
252	988	1,41	0,00E+00
275	987	1,41	9,67E-07
297	983	1,40	0,00E+00
320	978	1,40	0,00E+00
343	973	1,39	0,00E+00
366	980	1,39	0,00E+00
389	987	1,39	0,00E+00
412	987	1,38	0,00E+00
435	979	1,38	0,00E+00
458	973	1,38	0,00E+00
480	987	1,38	0,00E+00
503	972	1,38	0,00E+00
526	984	1,38	0,00E+00
549	977	1,38	0,00E+00
572	981	1,38	0,00E+00
595	975	1,38	0,00E+00
618	984	1,38	0,00E+00
641	979	1,38	0,00E+00
664	975	1,38	0,00E+00
686	986	1,38	0,00E+00

Çizelge B.13 : Deney 12 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
100	0	3,75	0,00E+00
157	5	3,74	1,94E-06
229	11	3,73	0,00E+00
290	17	3,72	0,00E+00
373	23	3,71	9,84E-07
434	28	3,71	0,00E+00
504	34	3,69	3,94E-06
568	40	3,68	0,00E+00
638	46	3,59	3,94E-05
703	51	3,37	5,12E-05
775	57	3,09	3,97E-05
845	62	2,89	4,52E-05
915	69	2,65	4,94E-05
1190	92	1,97	1,97E-05
1386	114	1,66	7,86E-06
1382	137	1,46	1,07E-05
1396	160	1,33	3,93E-06
1397	183	1,27	1,97E-06
1387	206	1,24	0,00E+00
1397	229	1,22	9,83E-07
1389	252	1,20	0,00E+00
1397	275	1,19	0,00E+00
1389	298	1,18	0,00E+00
1388	320	1,18	0,00E+00
1394	343	1,17	0,00E+00
1387	366	1,16	0,00E+00
1390	389	1,16	9,66E-07
1396	412	1,16	9,66E-07
1389	435	1,15	0,00E+00
1397	458	1,15	0,00E+00
1396	481	1,15	0,00E+00
1396	503	1,14	0,00E+00
1398	526	1,14	0,00E+00
1398	549	1,14	9,65E-07
1391	572	1,14	0,00E+00
1386	595	1,14	0,00E+00
1392	618	1,14	0,00E+00
1396	641	1,14	0,00E+00
1384	664	1,14	0,00E+00
1394	687	1,14	0,00E+00

Çizelge B.14 : Deney 13 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	101	7,15	2,95E-06
5	163	7,14	9,71E-07
11	240	7,10	9,85E-07
17	312	7,09	1,97E-06
23	407	7,08	0,00E+00
28	474	7,07	2,95E-06
34	558	7,01	1,16E-05
40	612	6,96	6,79E-06
46	609	6,85	4,65E-05
51	608	6,47	1,02E-04
57	609	5,84	1,03E-04
62	611	5,31	9,98E-05
69	609	4,71	8,76E-05
92	614	3,74	1,16E-05
114	616	3,59	1,94E-06
137	615	3,51	2,95E-06
160	612	3,46	2,91E-06
183	612	3,43	0,00E+00
206	614	3,40	1,97E-06
229	617	3,38	1,94E-06
252	614	3,37	1,94E-06
275	615	3,35	0,00E+00
297	613	3,34	0,00E+00
320	615	3,33	0,00E+00
343	615	3,32	0,00E+00
366	615	3,32	0,00E+00
389	618	3,31	0,00E+00
412	615	3,30	0,00E+00
435	612	3,30	0,00E+00
458	617	3,29	0,00E+00
480	612	3,29	0,00E+00
503	613	3,29	0,00E+00
526	614	3,28	0,00E+00
549	616	3,28	0,00E+00
572	615	3,28	0,00E+00
595	612	3,27	0,00E+00
618	612	3,27	0,00E+00
641	614	3,27	0,00E+00

Çizelge B.15 : Deney 14 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	105	7,14	1,57E-05
5	150	7,10	3,93E-06
11	225	7,09	3,94E-06
17	287	7,07	0,00E+00
23	365	7,06	3,88E-06
28	417	7,04	9,83E-07
34	496	7,03	3,88E-06
40	562	6,98	7,75E-06
46	631	6,94	5,81E-06
51	702	6,82	5,52E-05
57	769	6,38	8,75E-05
62	822	5,93	8,62E-05
69	901	5,37	1,02E-04
92	969	3,85	3,68E-05
114	970	3,28	1,94E-05
137	979	3,05	5,90E-06
160	973	2,95	1,94E-06
183	984	2,89	0,00E+00
206	976	2,85	2,95E-06
229	981	2,81	9,68E-07
252	981	2,79	1,96E-06
275	974	2,76	0,00E+00
297	986	2,74	0,00E+00
320	980	2,72	1,96E-06
343	981	2,71	0,00E+00
366	976	2,70	0,00E+00
389	974	2,69	9,81E-07
412	981	2,68	0,00E+00
435	984	2,66	0,00E+00
458	973	2,66	1,96E-06
480	985	2,64	0,00E+00
503	976	2,63	0,00E+00
526	974	2,63	0,00E+00
549	986	2,62	0,00E+00
572	976	2,62	0,00E+00
595	973	2,62	9,80E-07
618	983	2,61	0,00E+00
641	985	2,61	0,00E+00
664	973	2,60	0,00E+00
686	974	2,60	0,00E+00

Çizelge B.16 : Deney 15 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	105	7,10	1,16E-05
5	143	7,04	5,81E-06
11	221	7,02	1,97E-06
17	284	7,02	7,75E-06
23	354	7,00	9,83E-07
28	409	7,00	1,97E-06
34	499	6,99	0,00E+00
40	558	6,99	8,86E-06
46	632	6,95	5,81E-06
51	691	6,93	2,23E-05
57	764	6,60	7,66E-05
62	823	6,16	9,21E-05
69	903	5,61	8,33E-05
92	1177	3,98	4,72E-05
114	1390	3,35	2,81E-05
137	1395	2,97	7,87E-06
160	1386	2,71	6,88E-06
183	1388	2,59	2,90E-06
206	1397	2,52	3,93E-06
229	1390	2,46	2,95E-06
252	1396	2,41	2,90E-06
275	1390	2,37	1,96E-06
297	1388	2,34	0,00E+00
320	1395	2,32	1,93E-06
343	1394	2,29	1,96E-06
366	1387	2,28	0,00E+00
389	1387	2,26	0,00E+00
412	1395	2,24	0,00E+00
435	1389	2,23	0,00E+00
458	1387	2,22	1,93E-06
481	1387	2,21	0,00E+00
503	1389	2,20	9,66E-07
526	1395	2,19	0,00E+00
549	1387	2,18	0,00E+00
572	1386	2,17	0,00E+00
595	1393	2,17	0,00E+00
618	1393	2,16	0,00E+00
641	1385	2,16	0,00E+00
664	1397	2,15	0,00E+00
686	1384	2,15	0,00E+00

Çizelge B.17 : Deney 16 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	116	13,20	3,93E-06
5	187	13,18	9,83E-07
11	270	13,17	2,91E-06
17	338	13,16	1,96E-06
23	423	13,16	1,94E-06
28	502	13,15	1,94E-06
34	583	13,15	0,00E+00
40	613	13,09	1,94E-05
46	611	12,99	1,16E-05
51	608	12,86	7,16E-05
57	609	12,21	1,44E-04
62	612	11,39	1,59E-04
69	609	10,35	1,68E-04
92	616	7,54	4,45E-05
114	615	7,01	1,28E-05
137	614	6,79	5,89E-06
160	615	6,66	3,87E-06
183	614	6,56	3,93E-06
206	616	6,49	2,94E-06
229	615	6,44	3,87E-06
252	613	6,39	1,96E-06
275	615	6,35	2,94E-06
297	616	6,31	1,93E-06
320	614	6,28	1,96E-06
343	613	6,25	0,00E+00
366	614	6,23	0,00E+00
389	615	6,21	0,00E+00
412	615	6,19	9,81E-07
435	614	6,17	1,93E-06
458	617	6,15	1,96E-06
480	617	6,13	0,00E+00
503	613	6,12	1,93E-06
526	615	6,11	1,96E-06
549	617	6,09	0,00E+00
572	614	6,08	9,65E-07
595	616	6,07	0,00E+00
618	612	6,06	0,00E+00
641	613	6,05	0,00E+00
664	613	6,04	1,96E-06

Çizelge B.18 : Deney 17 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
0	111	12,98	1,07E-05
5	172	12,94	1,16E-05
11	244	12,90	1,94E-06
17	302	12,87	1,16E-05
23	381	12,84	1,97E-06
28	432	12,83	1,16E-05
34	521	12,80	1,97E-06
40	572	12,74	1,38E-05
46	650	12,64	1,57E-05
51	712	12,55	1,67E-05
57	783	12,27	7,94E-05
62	845	11,75	1,31E-04
69	916	10,90	1,46E-04
92	967	7,96	8,93E-05
114	971	6,65	4,22E-05
137	972	6,01	1,64E-05
160	978	5,76	9,82E-06
183	973	5,62	2,90E-06
206	989	5,52	3,87E-06
229	985	5,43	3,93E-06
253	973	5,37	2,94E-06
276	976	5,32	2,94E-06
298	986	5,27	2,90E-06
321	977	5,23	9,81E-07
344	973	5,19	9,81E-07
367	987	5,16	0,00E+00
390	974	5,13	1,96E-06
413	987	5,10	1,96E-06
436	973	5,08	0,00E+00
459	973	5,06	9,79E-07
482	974	5,04	0,00E+00
504	981	5,02	9,65E-07
527	978	5,00	0,00E+00
550	983	4,98	1,93E-06
573	973	4,97	0,00E+00
596	986	4,95	0,00E+00
619	977	4,93	0,00E+00
642	986	4,92	0,00E+00
665	971	4,91	0,00E+00
687	977	4,90	1,93E-06

Çizelge B.19 : Deney 18 zaman, devir, yükteki su kütlesi ve debi verileri.

Zaman (sn)	Devir (d/dk)	Yükteki Su Kütlesi (kg)	Suyun Debisi (m3/s)
112	0	15,18	2,67E-05
167	5	15,08	2,27E-05
246	11	14,93	2,80E-05
309	17	14,79	2,86E-05
377	23	14,63	4,53E-06
442	28	14,61	1,53E-05
517	34	14,50	2,43E-05
579	40	14,39	3,69E-05
655	46	14,12	4,44E-05
719	51	13,90	3,21E-05
778	57	13,64	9,52E-05
845	62	13,09	1,55E-04
923	69	12,07	1,80E-04
1195	92	8,34	1,07E-04
1394	114	6,73	4,31E-05
1383	137	5,93	2,86E-05
1397	160	5,42	1,52E-05
1399	183	5,12	1,00E-05
1388	206	4,93	6,50E-06
1393	229	4,80	4,21E-06
1388	252	4,69	3,88E-06
1397	275	4,61	2,93E-06
1393	297	4,55	2,59E-06
1399	320	4,49	1,94E-06
1388	343	4,44	1,62E-06
1397	366	4,40	1,62E-06
1390	389	4,36	1,62E-06
1388	412	4,33	1,62E-06
1383	435	4,30	1,62E-06
1392	458	4,27	6,46E-07
1398	480	4,25	9,74E-07
1396	503	4,22	1,29E-06
1388	526	4,20	3,25E-07
1391	549	4,18	6,49E-07
1386	572	4,16	1,29E-06
1383	595	4,14	6,46E-07
1390	618	4,12	9,74E-07
1391	641	4,11	6,46E-07
1394	664	4,09	6,46E-07

EK C

General Regression Analysis: ln(porozite) versus ln(P/gpL); Katman				
Regression Equation				
$\ln(\text{porozite}) = -0,278196 - 0,013971 \ln(P/gpL) - 0,000631327 \text{ Katman} - 0,00150626 \ln(P/gpL) * \ln(P/gpL)$				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,278196	0,0030385	-91,5569	0,000
ln(P/gpL)	-0,013971	0,0008549	-16,3416	0,000
ln(P/gpL)*ln(P/gpL)	-0,001506	0,0001558	-9,6705	0,000
Katman	-0,000631	0,0000426	-14,8052	0,000
Summary of Model				
$S = 0,00653182$ $R\text{-Sq} = 98,79\%$ $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 98,69\%$ $PRESS = 0,00181918$ $R\text{-Sq}(\text{pred}) = 98,53\%$				

Şekil C.1 : ln(ε), ln(P/gpL) ve katman sayısı arasındaki ilişki.

EK D

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0,05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	6,12299	1,22460	435046,33	0,000
ln(n2)	1	0,00052	0,00052	185,52	0,000
ln(R)	1	0,00003	0,00003	9,05	0,011
Katman Sayısı, nk	1	0,06792	0,06792	24127,96	0,000
Katman Sayısı, nk*Katman Sayısı, nk	1	0,07790	0,07790	27673,80	0,000
ln(n2)*Katman Sayısı, nk	1	0,00002	0,00002	8,78	0,012
Error	12	0,00003	0,00000		
Total	17	6,12302			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0016778	100,00%	100,00%	100,00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	3,8266	0,0314	121,82	0,000
ln(n2)	0,07736	0,00568	13,62	0,000
ln(R)	0,0523	0,0174	3,01	0,011
Katman Sayısı, nk	-0,046613	0,000300	-155,33	0,000
Katman Sayısı, nk*Katman Sayısı, nk	0,000245	0,000001	166,35	0,000
ln(n2)*Katman Sayısı, nk	-0,000067	0,000023	-2,96	0,012

Term	VIF
Constant	
ln(n2)	100,88
ln(R)	86,58
Katman Sayısı, nk	515,96
Katman Sayısı, nk*Katman Sayısı, nk	169,25
ln(n2)*Katman Sayısı, nk	119,81

Regression Equation

$$\ln(n1) = 3,8266 + 0,07736 \ln(n2) + 0,0523 \ln(R) - 0,046613 \text{ Katman Sayısı, nk} + 0,000245 \text{ Katman Sayısı, nk} * \text{Katman Sayısı, nk} - 0,000067 \ln(n2) * \text{Katman Sayısı, nk}$$

Şekil D.1 : Kılcal basıncın elde edildiği regresyon analizi.

EKE

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	2095330593	698443531	465899,19	0,000
Strain	1	41566019	41566019	27726,76	0,000
Strain*Strain	1	50595477	50595477	33749,89	0,000
Strain*nk	1	487123951	487123951	324937,73	0,000
Error	11002	16493430	1499		
Lack-of-Fit	9637	16493430	1711	2,73610E+09	0,000
Pure Error	1365	0	0		
Total	11005	2111824023			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	38,7186	99,22%	99,22%	99,22%	
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Strain	-2284,3	13,7	-166,51	0,000	59,44
Strain*Strain	10456,0	56,9	183,71	0,000	49,42
Strain*nk	35,9952	0,0631	570,03	0,000	4,41
Regression Equation					
Acorr = -2284,3 Strain + 10456,0 Strain*Strain + 35,9952 Strain*nk					

Şekil E.1 : Katı faz için şekil değiştirmeye neden olan gerilmenin belirlendiği regresyon analizi.

EK F

Regression Analysis: ln (k) versus ln(S); Katman, nk					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	449,03	224,516	1581,19	0,000
ln(S)	1	378,47	378,469	2665,42	0,000
Katman, nk	1	36,12	36,116	254,35	0,000
Error	301	42,74	0,142		
Total	303	491,77			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0,376819	91,31%	91,25%	91,15%	
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-25,5790	0,0672	-380,47	0,000	
ln(S)	9,183	0,178	51,63	0,000	1,01
Katman, nk	-0,011432	0,000717	-15,95	0,000	1,01
Regression Equation					
ln (k) = -25,5790 + 9,183 ln(S) - 0,011432 Katman, nk					

Şekil F.1 : Geçirgenliğin belirlendiği regresyon analizi.

EK G

```
clc
clear all
TT=xlsread('Tablo2.xlsx','B2:B19');
M_yuk=xlsread('Tablo2.xlsx','C2:C19');
Hedef_devir=xlsread('Tablo2.xlsx','D2:D19');
Ivme=xlsread('Tablo2.xlsx','F2:F19');
Sure=xlsread('Tablo2.xlsx','G2:G19');
Katman=xlsread('Tablo2.xlsx','H2:H19');
R0=xlsread('Tablo2.xlsx','J2:J19');
Sikma_Tablo=(0*(1:length(TT)))';
Santrifuj_Basinc=(0*(1:length(TT)))';
Capillary_Number=(0*(1:length(TT)))';
Saturation=(0*(1:length(TT)))';
Porosity=(0*(1:length(TT)))';
Toplam_Hacim=(0*(1:length(TT)))';
P_dimensonless=(0*(1:length(TT)))';
Tum_Debi=0;
Tum_Sikma=0;
Tum_Zaman=0;
for z=1:length(TT)
d_dis=0.465;
w=0.335;
T=TT(z);
m_yuk=M_yuk(z);
hedef_devir=Hedef_devir(z);
ivme=Ivme(z);
sure=Sure(z);
porosity=0.756;
R=R0(z);
n=Katman(z);
t=0;
devir=100;
global_t=0;
global_devir=0;
global_sikma=0;
global_S=0;
global_debi=0;
[P_cap,Sikma,porosity,devir,S,global_t,global_devir,global_sikma,global_S,global_debi,V_toplam]=a
lgoritma(n,d_dis,w,m_yuk,T,hedef_devir,porosity,R,devir,sure,ivme,global_t,global_devir,global_sik
ma,global_S,global_debi);
Sikma_Tablo(z)=Sikma;
Santrifuj_Basinc(z)=P_cap;
Saturation(z)=S;
Porosity(z)=porosity;
Toplam_Hacim(z)=V_toplam;
Tum_Debi(z,1:length(global_debi))=global_debi;
Tum_Sikma(z,1:length(global_sikma))=global_sikma;
Tum_Zaman(z,1:global_t)=1:global_t;
end
Tum_Debi=Tum_Debi'
Tum_Sikma=Tum_Sikma'
Tum_Zaman=Tum_Zaman'
xlswrite('Tablo2.xlsx',Sikma_Tablo,'Q2:Q19');
xlswrite('Tablo2.xlsx',Santrifuj_Basinc,'T2:T19');
xlswrite('Tablo2.xlsx',Saturation,'W2:W19');
xlswrite('Tablo2.xlsx',Porosity,'Z2:Z19');
-----
```

```

function[P_cap,Sikma,porosity,devir,S,global_t,global_devir,global_sikma,global_S,global_debi,V_to
plam]=algoritma(n,d_dis,w,m_yuk,T,hedef_devir,porosity,R,devir,sure,ivme,global_t,global_devir,gl
obal_sikma,global_S,global_debi);
l=pi*d_dis;
Alan=w*l;
ro_su=0.00002*T*T*T-0.00616*T*T+0.02247*T+1000.00601;%%((2.0E-5)*T^3)-
(0.006*T^2)+0.0209*T+1000.1;
mu_su=(0.000000424*T*T*T*T-0.0000103477*T*T*T+0.0010219181*T*T-
0.0548711759*T+1.7660352439)/1000;
st_su=(-0.0003*T*T-0.1363*T+75.545)/1000;%%0.077811-0.00020692*T;
ro_fiber=1550;
d_fiber=0.000200;
m_kati=m_yuk/1.08;
m_regain=m_yuk-m_kati;
m_su(1)=m_yuk*R+m_regain;
kalinlik=0.0004533;
ro_yuk=(1-porosity(1))*ro_fiber;
V_toplam=m_kati/ro_yuk;
d_ic(1)=sqrt((d_dis^2)-(V_toplam/(pi*0.25*w)));
delta_t=1;
zaman=0:delta_t:sure;
gozeneklilik=porosity(1);
for i=1:1:length(zaman);
    W(i)=devir(i)*2*pi/60;
    V_toplam=pi*0.25*w*((d_dis^2)-(d_ic(i)^2));
    porosity(i)=gozeneklilik;
    V_su(i)=m_su(i)/ro_su;
    m_toplam(i)=m_kati+m_su(i);
    d_ic_prime(i)=0.96*d_dis;
    ro_yuk_prime(i)=(ro_su+ro_fiber)*0.5;
    P_prime(i)=0.5*(ro_yuk_prime(i))*(W(i)^2)*(((d_dis/2)^2)-((d_ic_prime(i)/2)^2));
    L_prime(i)=(d_dis-d_ic_prime(i))/2;
    gozeneklilik=exp(-0.278196-0.013971*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i)))-
0.000631327*n-
0.00150626*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i)))*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i))
));
    for z=1:5;
        V_toplam=(pi*0.25*w)*((d_dis^2)-(d_ic(i)^2));
        S(i)=(m_su(i)/ro_su)/(V_toplam*gozeneklilik);
        if S(i)<=1;
            ro_yuk_prime(i)=(1-gozeneklilik)*ro_fiber+gozeneklilik*ro_su;
            P_prime(i)=0.5*(ro_yuk_prime(i))*(W(i)^2)*(((d_dis/2)^2)-((d_ic_prime(i)/2)^2));
            L_prime(i)=(d_dis-d_ic_prime(i))/2;
            gozeneklilik=exp(-0.278196-0.013971*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i)))-
0.000631327*n-
0.00150626*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i)))*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i))
));
            V_pore_prime=m_su(i)/ro_su;
            V_toplam_prime=V_pore_prime/gozeneklilik;
            V_solid_prime=V_toplam_prime*(1-gozeneklilik);
            d_ic_prime(i)=sqrt((d_dis^2)-(V_toplam_prime/(pi*0.25*w)));
            m_solid_prime=V_solid_prime*ro_fiber;
            m_solid_prime_prime=m_kati-m_solid_prime;
            V_solid_prime_prime=m_solid_prime_prime/ro_fiber;
            d_ic(i)=sqrt((d_ic_prime(i)^2)-((V_solid_prime_prime/(1-gozeneklilik))/(pi*0.25*w)));
            ro_yuk(i)=(1-gozeneklilik)*ro_fiber+S(i)*gozeneklilik*ro_su;
            P_centrifuge(i)=0.5*(ro_yuk(i))*(W(i)^2)*(((d_dis/2)^2)-((d_ic(i)/2)^2));
        else
            ro_yuk_prime(i)=(1-gozeneklilik)*ro_fiber+gozeneklilik*ro_su;
            P_prime(i)=0.5*(ro_yuk_prime(i))*(W(i)^2)*(((d_dis/2)^2)-((d_ic(i)/2)^2));

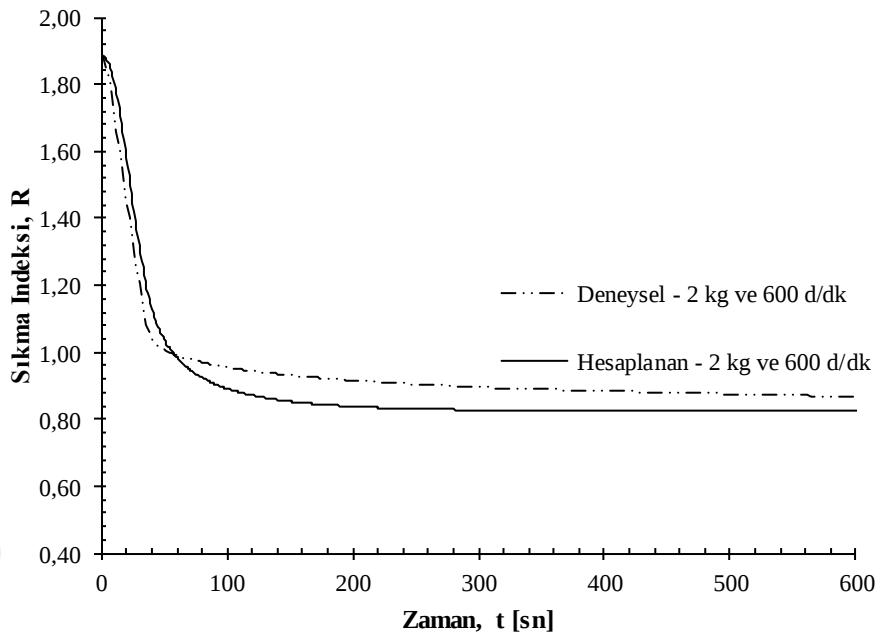
```

```

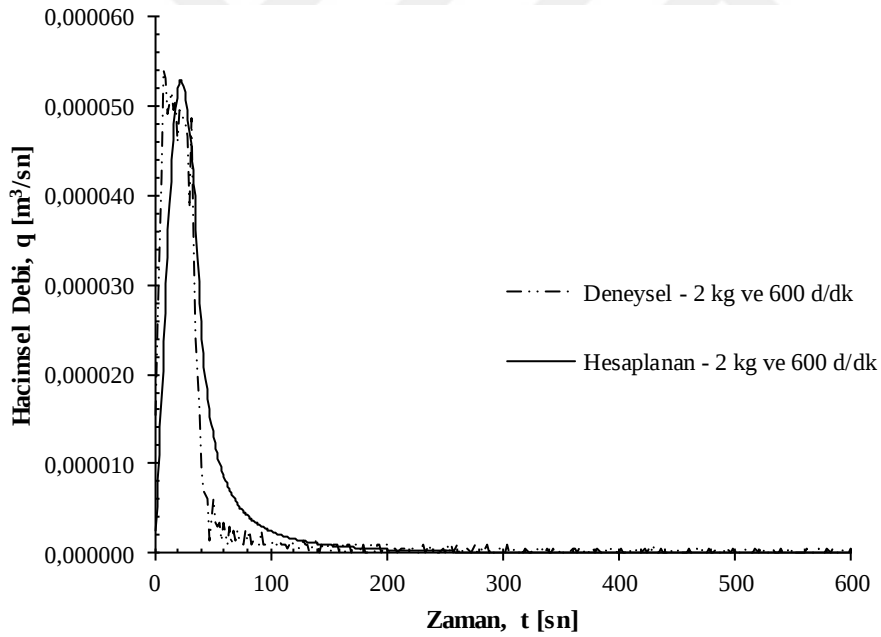
    L_prime(i)=(d_dis-d_ic(i))/2;
    gozeneklilik=exp(-0.278196-0.013971*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i)))-
0.000631327*n-
0.00150626*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i)))*log(P_prime(i)/(9.81*ro_fiber*L_prime(i))
);
    V_solid_prime=m_kati/ro_fiber;
    V_toplam_prime=V_solid_prime/(1-gozeneklilik);
    V_pore_prime=V_toplam_prime*gozeneklilik;
    d_ic(i)=sqrt((d_dis^2)-(V_toplam_prime/(pi*0.25*w)));
    m_liquid_prime=V_pore_prime*ro_su;
    m_liquid_prime_prime=m_su(i)-m_liquid_prime;
    V_liquid_prime_prime=m_liquid_prime_prime/ro_su;
    d_ic_prime(i)=sqrt((d_ic(i)^2)-(V_liquid_prime_prime/(pi*0.25*w)));
    ro_yuk(i)=(1-gozeneklilik)*ro_fiber+gozeneklilik*ro_su;
    P_centrifuge(i)=0.5*(ro_yuk(i))*(W(i)^2)*(((d_dis/2)^2)-((d_ic(i)/2)^2));
    end
    V_toplam=(pi*0.25*w)*((d_dis^2)-(d_ic(i)^2));
    porosity(i)=gozeneklilik;
    end
    ro_yuk=ro_yuk(i);
    r_dis=d_dis/2;
    r_ic=d_ic(i)/2;
    r_s=(2*(r_dis^3-r_ic^3))/(3*(r_dis^2-r_ic^2));
    sikma(i)=(m_su(i)-m_regain)/m_yuk;
    if S(i)>=1
        S(i)=1;
    end
    Santrifuj_terim=S(i)*V_toplam*porosity(i)*ro_su*W(i)*W(i)*r_s;
    P_cap=((r_dis-r_ic)*9.81*ro_yuk)*exp(4.466-3.580*log(sikma(i))-0.03073*n+0.000193*n*n);
    Kilcal_terim=-2*pi*w*S(i)*gozeneklilik*r_s*P_cap;
    k=exp(-31.8481+5.366*log(sikma(i))+0.06558*n-2.390*log(sikma(i))*log(sikma(i))-0.000442*n*n-
0.00432*log(sikma(i))*n);
    v(i)=k*(Santrifuj_terim+Kilcal_terim)/(mu_su*S(i)*V_toplam*porosity(i));
    if Kilcal_terim*(-1)>Santrifuj_terim
        v(i)=0;
    end
    V_su(i+1)=V_su(i)-delta_t*v(i)*Alan;
    S(i+1)=V_su(i+1)/(V_toplam*porosity(i));
    sikma(i+1)=((V_su(i+1)*ro_su)-m_regain)/m_yuk;
    m_su(i+1)=V_su(i+1)*ro_su;
    d_ic(i+1)=sqrt((d_dis^2)-(V_toplam/(pi*0.25*w)));
    if devir(i)<hedef_devir;
    devir(i+1)=devir(i)+ivme;
    else
    devir(i+1)=devir(i);
    end
    global_t=global_t+1;
    global_devir(global_t)=devir(i);
    global_sikma(global_t)=sikma(i);
    global_S(global_t)=S(i);
    global_debi(global_t)=v(i)*Alan;
    end
    Sikma=sikma(i);
    porosity=porosity(i);
    devir=devir(i);
    S=S(i);
    end

```

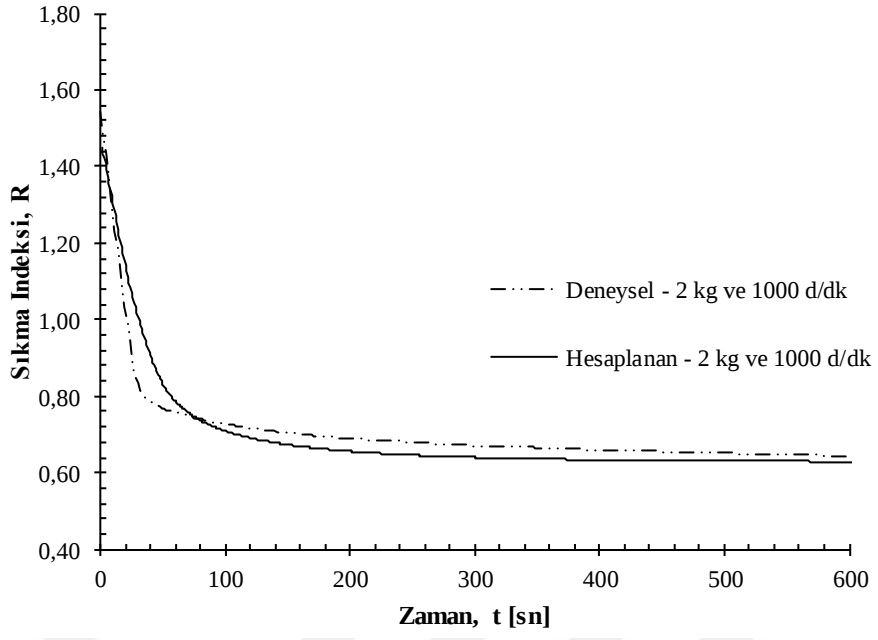
EK H



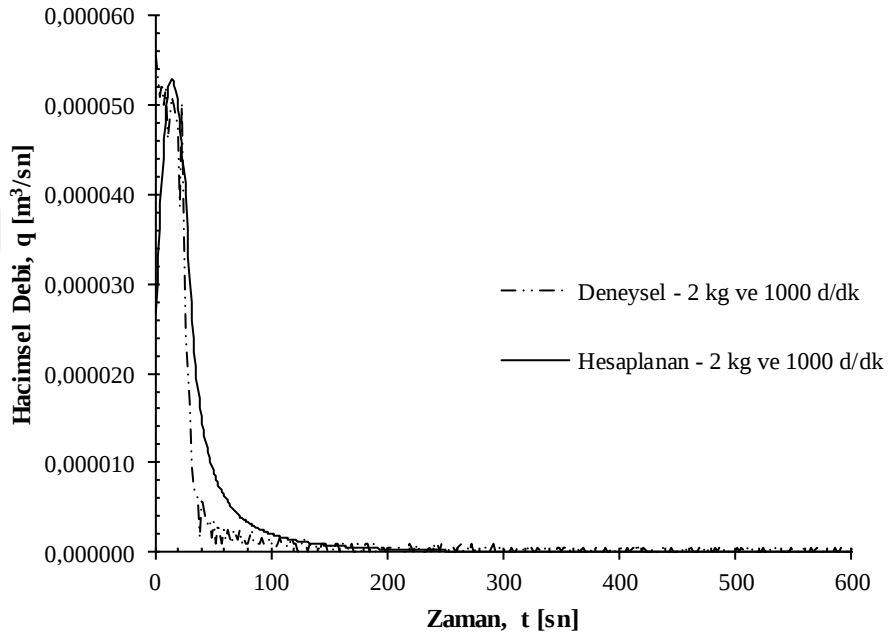
Şekil H.1 : 2 kg yük 600 d/dk sıkma eğrisi.



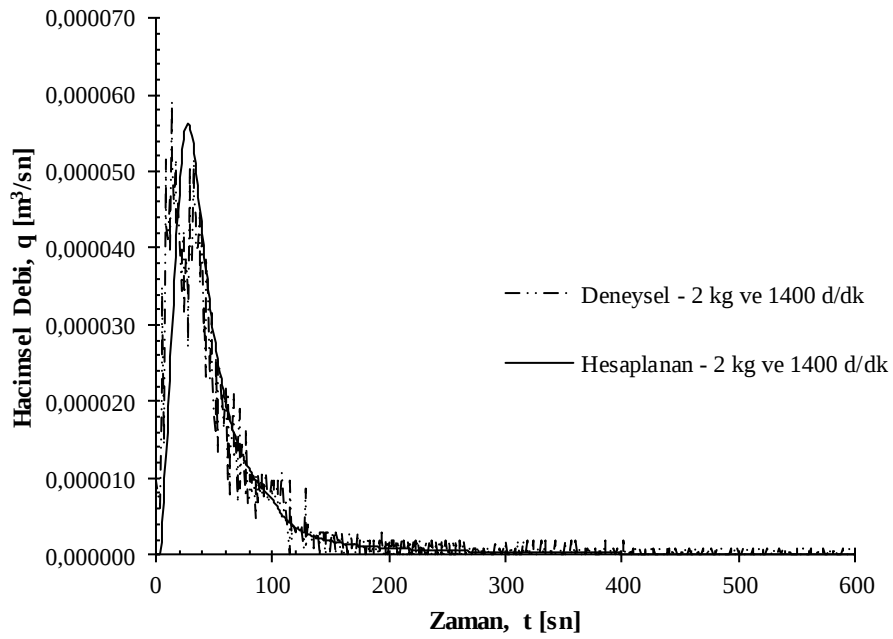
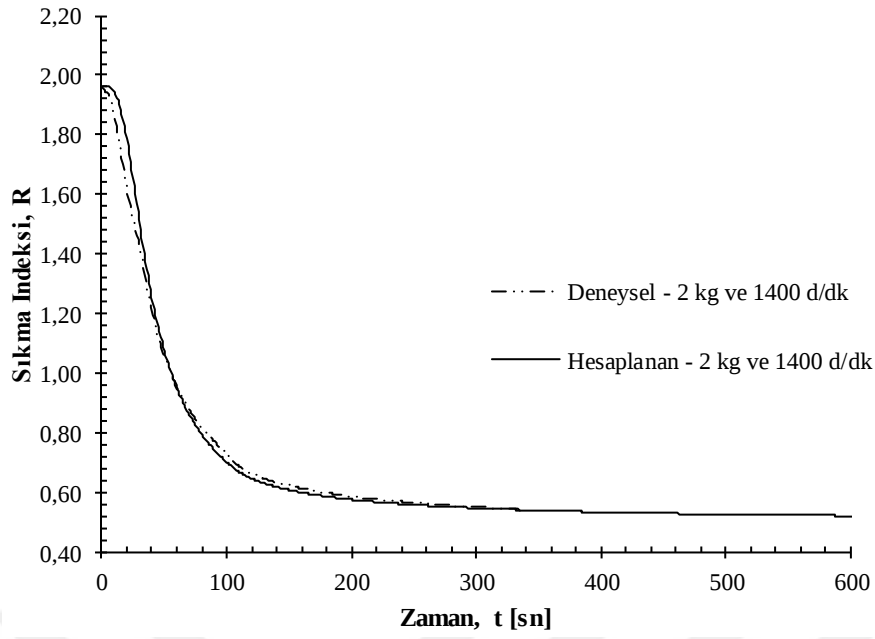
Şekil H.2 : 2 kg yük 600 d/dk debi eğrisi.

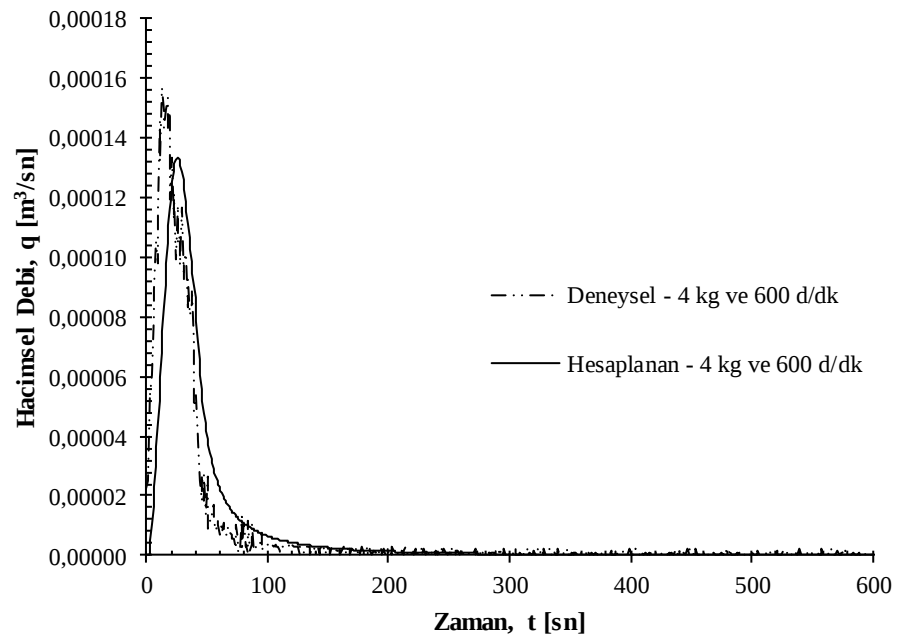
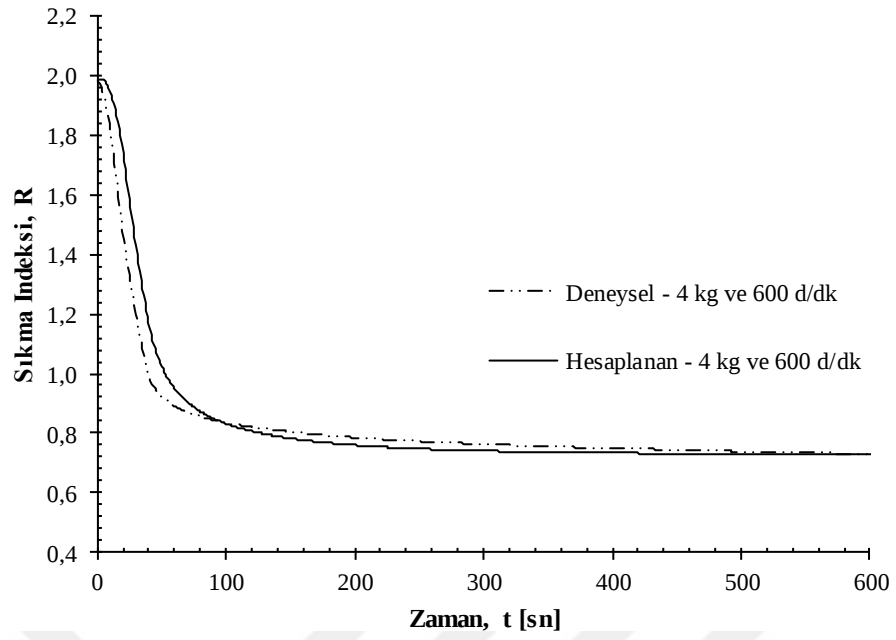


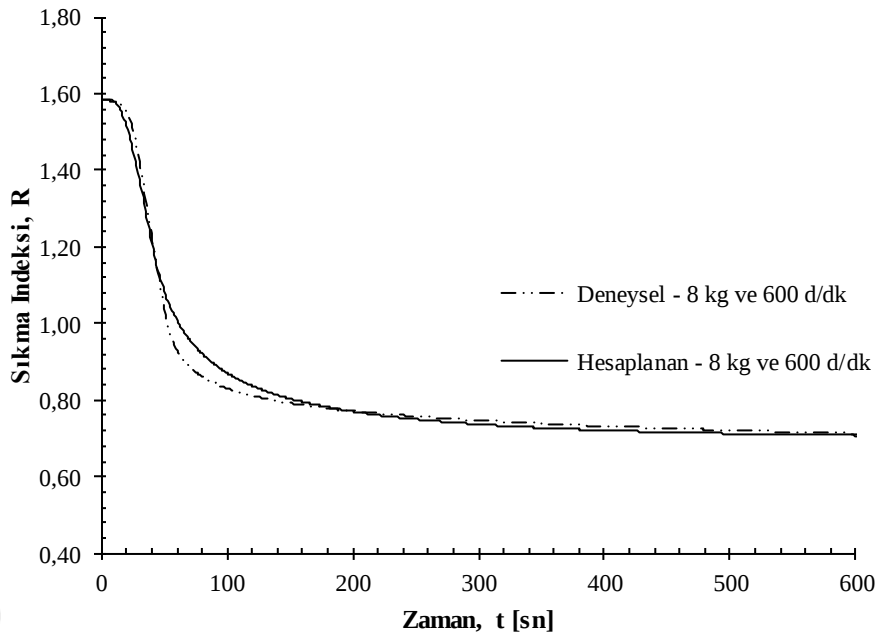
Şekil H.3 : 2 kg yük 1000 d/dk sıkma eğrisi.



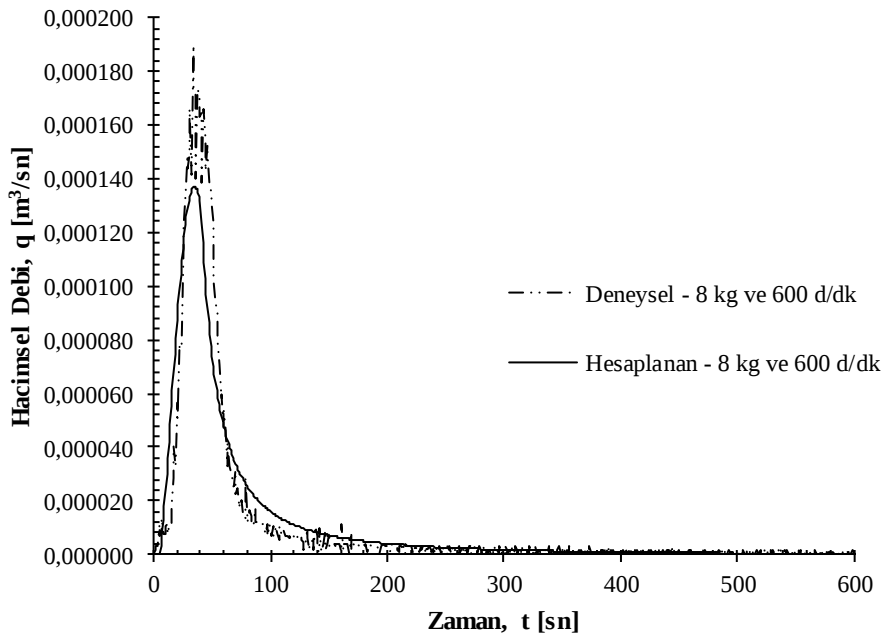
Şekil H.4 : 2 kg yük 1000 d/dk debi eğrisi.



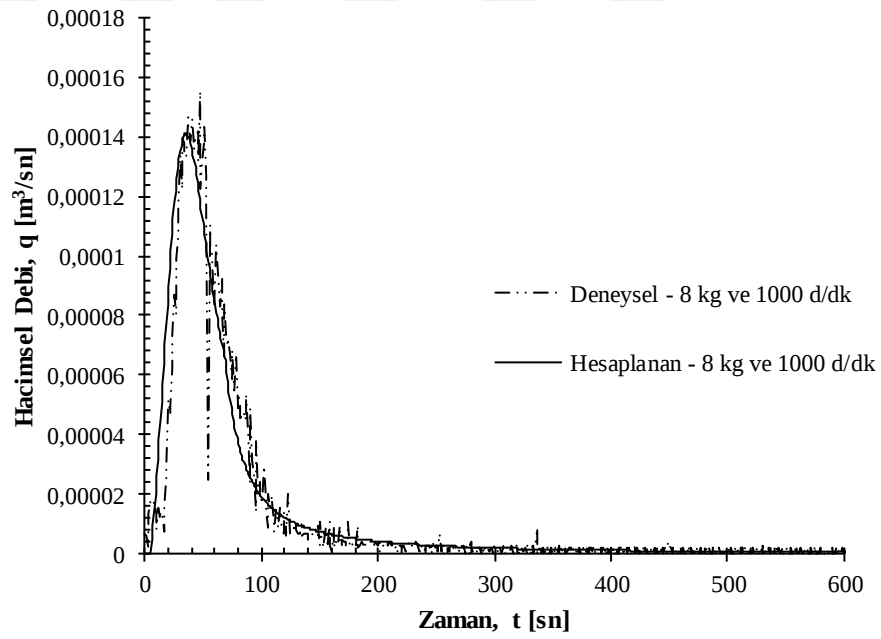
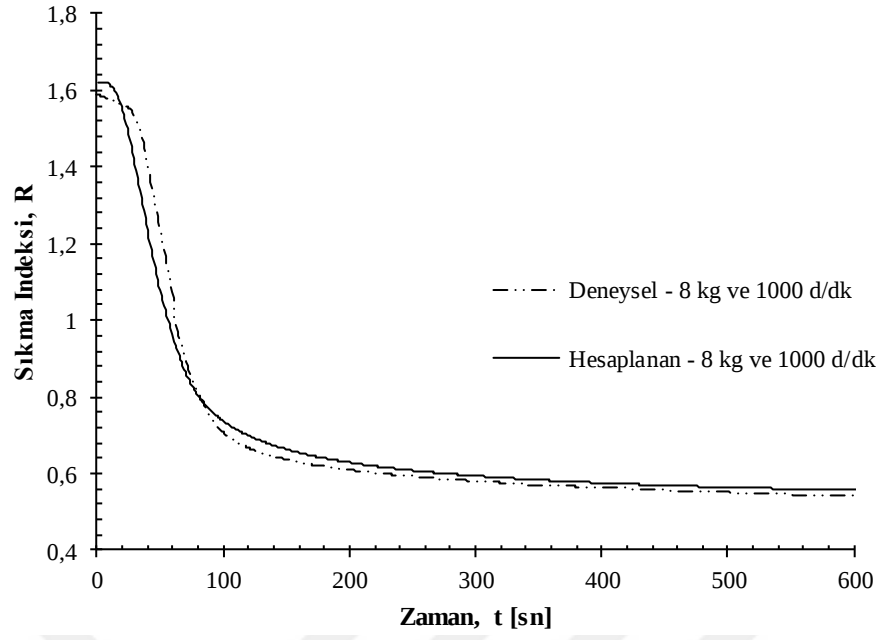


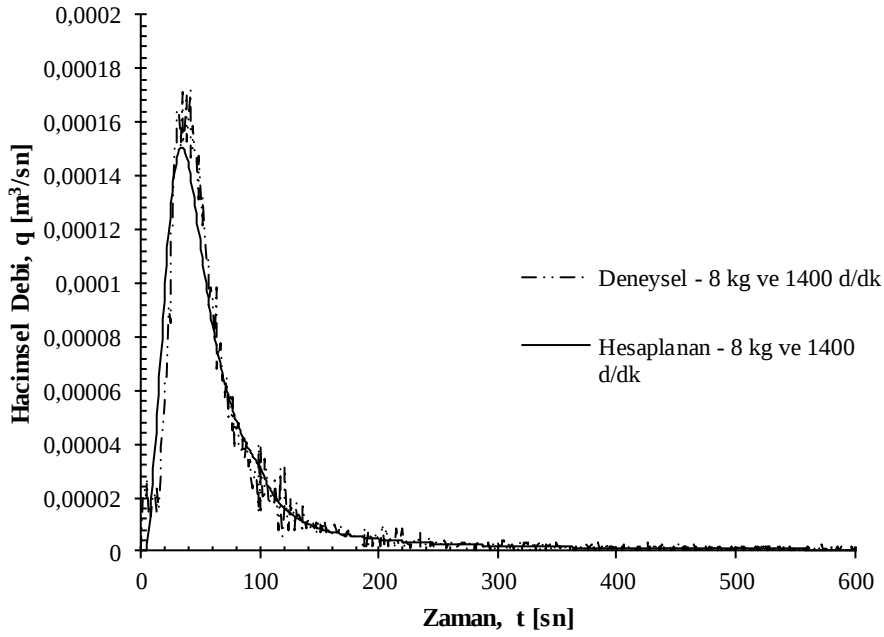
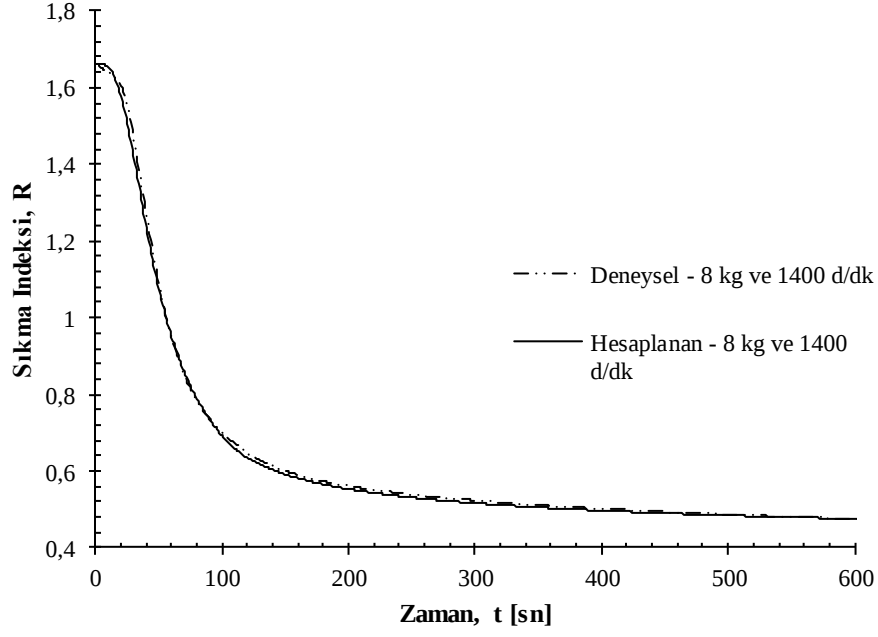


Şekil H.9 : 8 kg yük 600 d/dk sıkma eğrisi.



Şekil H.10 : 8 kg yük 600 d/dk debi eğrisi.





EK I

Çizelge I.1 : Suyun fiziksel özellikleri.

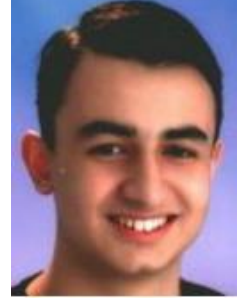
Sıcaklık, T [°C]	Su yoğunluğu, ρ_l [kg/m ³]	Yüzey Gerilimi, σ_l [mN/m]	Viskozite, μ_l [mPa.s]
10	999,7	74,2	1,306
20	998,2	72,8	1,002
30	995,6	71,2	0,797
40	992,2	69,6	0,653
50	988,0	67,9	0,547
60	983,2	66,2	0,466

Hesaplamalarda kullanılan denklemler aşağıda yer almaktadır.

$$\begin{aligned}
 \rho_l \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) &= 0,00002T^3 - 0,00616T^2 + 0,02247T + 1000,006 \\
 \sigma_l \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right) &= \frac{-0,0003T^2 - 0,1347T + 75,528}{1000} \\
 \mu_l (\text{Pa. s}) &= \frac{424T^4E - 10 - 103T^3E - 7 + 102T^2E - 5 - 548TE - 4 + 1,76}{1000}
 \end{aligned} \tag{H.1}$$



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Fatih KASAP
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.11.1986, Karabük
E-posta : fatih.kasap@arcelik.com ve kasap78@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isı-Akışkan Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2008-2011 yılları arasında Friterm Termik Cihazlar A.Ş.' de Ar-Ge Müh. olarak çalıştı.
- 2011 yılından beri Arçelik A.Ş. Ar-Ge Direktörlüğü Temizleme Teknoloji Ailesi'nde görev almaktadır.
- 2013-2017 yılları arasında Arçelik A.Ş. buluş ödülleri aldı.
- 2017 yılında Arçelik A.Ş.' de Yılım Buluşu Ödülü'nü aldı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE

PATENTLER:

- **Kasap, F.** & Özdemir, M. 2018. Determination of Saturation versus Centrifugal Dewatering for Multilayer Porous Textile: Experimental Study, *AATCC Journal of Research*, 5 (1), 21-28.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Çorlu C., **Kasap F.**, Tüfekçi M. 2010. Cebri Taşınımli Isı Geri Kazanım Sistemlerinin BIN Methodu ile Termoekonomik Analizi. *IX. Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu*, Mayıs 3-5, 2010 İstanbul, Türkiye.
- Acül H., Canbaz H., Erbil S., **Kasap F.** 2011. R744 Soğutucu Akışkanlı Soğutma Sistemleri, Kanatlı Borulu R744 (CO2) Evaporatör ve Gaz Soğutucu Tasarım

Esasları. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, Nisan 13-16, 2011 İzmir, Türkiye.

- **Kasap F.**, Özgüç A. F. 2011. CO2 Akışkanlı Transkritik Soğutma Sistemleri için Gaz Soğutucu Hesaplama Modülünün Geliştirilmesi. *Anadolu Enerji Sempozyumu*, Haziran 22-24, 2011 Elazığ, Türkiye.
- Aktaş M. K., Duru C., Farnoud A. T., **Kasap F.**, Şahin Y. 2013. Spreyle Soğutma İşleminin Sayısal Analizi. *ULBITAK' 13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Eylül 9-12, 2013 Samsun, Türkiye
- Bulut B., Ersolmaz B. T., **Kasap F.** 2013. Removal of Hardness Ions by Nanofiltration and Reverse Osmosis for Water Softening. *International Conference on Environmental Science and Technology*, June 18-21, 2013 Nevşehir, Turkey.
- Balioğlu Ö., **Kasap F.**, Koç Y., Özaydın H. C., Sır G., 2014. Heat Pump Type Laundry Dryer And Method Of Drying Laundry Using The Same. Patent numarası: WO2014187494 (A1)
- Çağlar T., **Kasap F.**, Tatar H., Top A.B. 2015. Laundry Washing And Drying Machine. Patent numarası: CN104822873 (A)
- **Kasap F.**, Şahin Y., Yakartaş B. 2015. A Laundry Washing And Drying Machine Comprising A Dispenser. Patent numarası: EP2938771 (A1)
- Balioğlu Ö., **Kasap F.**, Koç Y., Özaydın H. C., Sır G., 2016. Heat Pump Laundry Dryer With System For Monitoring Level Of Dryness. Patent numarası: EP3039182 (A1)
- Bulut B., **Kasap F.** 2016. A Washing Machine Comprising A Filtration Unit. Patent numarası: EP2994564 (A1)
- Hatipoğlu Ö., **Kasap F.**, Sarıtaş U., Sendinç T. 2016. A Laundry Washing And Drying Machine Comprising A Condenser. Patent numarası: WO2016162230 (A1)
- Hatipoğlu Ö., **Kasap F.**, Sarıtaş U., Sendinç T., Şahin Y. 2016. A Washing Machine Comprising A Cleaning Agent Dispenser. Patent numarası: WO2016139235 (A1)
- **Kasap F.**, Kaya M., Özer Ö. S., Şahin Y. 2016. A Laundry Washing And/Or Drying Machine Comprising An Air-Cooled Condenser. Patent numarası: WO2016107699 (A1)
- Aydınтуğ Ç., Kandemir N., Kantaş M., **Kasap F.**, Mert S., Şahin Ç., Tınar E., Yağcı A. 2017. A Hairdryer And A Method Of Functioning Of A Hairdryer. Patent numarası: WO2017080575 (A1)
- Bulut B., Efe S., Erdem İ., **Kasap F.** 2017. A Washing Machine Having An Improved Nanofiltration System And Method Thereof. Patent numarası: PL2941497 (T3)
- Ertiş V. K., İpek M., Kandemir N., **Kasap F.**, Şahin Y. 2017. A Laundry Washing And Drying Machine Comprising An Air-Cooled Condenser. Patent numarası: WO2017137323 (A1)

- Hatipoğlu Ö., **Kasap F.**, Sarıtaş U., Şahin Y. 2017. A Laundry Washing And Drying Machine With Improved Washing Performance. Patent numarası: WO2017005525 (A1)





