

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

**KONVEKSİYON ETKİLERİNİN GÖRÜNÜR KÜTLE
ÖLÇÜMÜNDE OLUŞTURDUĞU DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Haldun DİZDAR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

Nisan 2006

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

**KONVEKSİYON ETKİLERİNİN GÖRÜNÜR KÜTLE
ÖLÇÜMÜNDE OLUŞTURDUĞU DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Haldun DİZDAR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 07 / 04 / 2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. H Rıza GÜVEN
Jüri Başkanı

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ
Üye

Prof. Dr. Fehim FINDIK
Üye

Prof. Dr. H. İbrahim SARAÇ
Üye

Prof. Dr. Zafer GÜL
Üye

ÖNSÖZ

Tezin hazırlanmasında bana her türlü desteği veren hocam sayın Prof. Dr. İsmail Ekmekçi' ye, TÜBİTAK – UME Kütle Laboratuvarında görev yapan arkadaşlarıma, deney düzeneğinin hazırlanması ve ölçümlerin alınması süreçlerinde yardımlarda bulunan Hacim – Yoğunluk, Viskozite, Direnç ve Empedans Laboratuvarında görevli arkadaşlara deneysel çalışmam boyunca yapmış oldukları tüm katkı ve emeklerden dolayı teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince maddi manevi büyük desteğini gördüğüm eşim Tuğba Dizdar'a teşekkürü borç bilirim.

Haldun DİZDAR

Nisan 2006

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	5
1.1.1. Bu alanda düşey bir silindirdeki ısı transferi problemi üzerine yapılmış çalışmalar.....	6
1.1.2. Metroloji alanında bu konuda yapılan çalışmalar	7
BÖLÜM 2.	
KÜTLE METROLOJİSİ.....	17
2.1. Giriş.....	17
2.1.1. Kütle metrolojisine göre ağırlıkların doğruluk sınıfları.....	19
2.1.1.1. E1 doğruluk sınıfı.....	19
2.1.1.2. E2 doğruluk sınıfı.....	20
2.1.1.3. F1 doğruluk sınıfı.....	20
2.1.1.4. F2 doğruluk sınıfı.....	20
2.1.1.5. M1 doğruluk sınıfı.....	21
2.1.2. Kütle ölçüm yöntemi.....	23
2.1.3. Terazi metrolojisi.....	25
2.1.3.1. Otomatik olmayan terazi.....	25
2.1.3.2. Otomatik terazi.....	26

2.1.4. UME kütle ölçüm laboratuvarı şartları.....	26
BÖLÜM 3.	
KONVEKTİF ETKİLER ÜZERİNE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA.....	27
3.1. Giriş.....	27
3.1.1. Deney numunelerinin özellikleri.....	27
3.1.2. Deney düzeneği ve ölçümler.....	29
3.1.2.1. Deney düzeneği.....	29
3.2. Deneysel Ölçüm Yöntemi ve Deney Düzeneği Elemanları.....	34
3.2.1. Deney düzeneği elemanları.....	35
3.2.1.1. Hassas terazi.....	35
3.2.1.2. Soğutma aparatı.....	37
3.2.1.3. Isıtma aparatı.....	38
3.2.1.4. Süpertermometre.....	39
3.2.1.5. Termistörler.....	40
3.2.1.6. Fırın.....	45
3.3. Deneysel Ölçüm.....	45
3.4. Havanın Kaldırma Kuvveti Nedeniyle Görünür Kütle Ölçümündeki Değişim.....	55
3.5. Deneysel Çalışmanın Hata Analizi.....	57
BÖLÜM 4.	
SAYISAL ANALİZ.....	61
4.1. Giriş.....	61
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
5.1. Giriş.....	67
5.1.1. Kütlelerin mesh edilmiş modelleri.....	67
5.1.2. Kütlelerde yüzey kayma gerilmeleri değişimi.....	71
5.1.3. Kütlelerde basınç dağılımı değişimi.....	73
5.1.4. Kütlelerde hız vektörleri değişimi.....	76
5.1.5. Görünür kütle zaman değişimi.....	78
5.1.6. Görünür kütle sıcaklık değişimi.....	84
5.2. Elde Edilen Sonuçların Genel Özeti	91

5.3. Öneriler	94
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

U	: $\bar{Z}$ Ekseni yönündeki hız
V	: $\bar{r}$ Ekseni yönündeki hız
T	: Sıcaklık
R	: Silindir yarıçapı
T	: Zaman
α	: Isı taşınım katsayısı
K	: Isı iletim katsayısı
β	: Isıl genleşme katsayısı
ν	: Kinematik viskozite
G	: Yerçekimi ivmesi
ϕ	: Bağıl nem
μ	: Dinamik viskozite
τ	: Kayma gerilmesi
F	: Kesme kuvveti
A	: Yüzey alanı
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
BIPM	: Uluslar arası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu
CIPM	: Uluslar arası Ölçü ve Ağırlıklar Komitesi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
EUROMET	: Avrupa Metroloji Enstitüleri Organizasyonu
ISO	: Uluslar arası Standartlar Organizasyonu
OIML	: Uluslar arası Yasal Metroloji Organizasyonu
SI	: Uluslar arası Birim Sistemi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Terazi ölçüm düzeneği	26
Şekil 3.1.	Deneysel çalışmada kullanılan kütleler	30
Şekil 3.2.	Deney düzeneğinin şematik görünümü	32
Şekil 3.3.	Deney düzeneğinin detaylı şematik görünümü	33
Şekil 3.4.	Deney düzeneğinin genel bir fotoğrafı	34
Şekil 3.5.	Deneysel çalışmada kullanılan hassas terazi	37
Şekil 3.6.	Deneysel ölçümlerde kullanılan soğutma aparatının genel bir fotoğrafı	38
Şekil 3.7.	Deneysel ölçümlerde kullanılan ısıtma aparatının genel bir fotoğrafı	39
Şekil 3.8.	Süpertermometre ölçüm devresinin basitleştirilmiş diyagramı	41
Şekil 3.9.	Deneysel ölçümlerde kullanılan süpertermometrenin genel bir fotoğrafı	41
Şekil 3.10.	1 nolu termistör kalibrasyonu için yapılan regresyon analizi	42
Şekil 3.11.	1,2,3,4 ve 5 nolu termistör kalibrasyonu için yapılan regresyon analizi	45
Şekil 3.12.	Deneysel ölçümlerde kullanılan fırının genel bir fotoğrafı	46
Şekil 3.13.	1 kg'lık kütlede ($\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) olması durumunda yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi	47
Şekil 3.14.	1 kg'lık kütlede yüzey sıcaklığı ortamla aynı sıcaklık değerinde iken daralanmış ağırlıkta on saat boyunca gözlenen değişim	47
Şekil 3.15.	1 kg'lık kütlede farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi	48
Şekil 3.16.	1 kg'lık kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi	49
Şekil 3.17.	1 kg'lık kütlede farklı ΔT değerleri için görünür-kütle değerinin	49

	değişimi	
Şekil 3.18.	500 g'lık kütlede ($\Delta T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) olması durumunda yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi	50
Şekil 3.19.	500 g'lık kütlede yüzey sıcaklığı ortamla aynı sıcaklık değerinde iken daralanmış ağırlıkta on saat boyunca gözlenen değişim	50
Şekil 3.20.	500 g'lık kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi	51
Şekil 3.21.	500 g'lık kütlede farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi	51
Şekil 3.22.	500 g'lık kütlede çeşitli (ΔT) değerlerine göre görünür - kütle değerinin değişimi	52
Şekil 3.23.	300 g'lık kütlede ($\Delta T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) olması durumunda yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi	53
Şekil 3.24.	300 g'lık kütlede yüzey sıcaklığı ortamla aynı sıcaklık değerinde iken daralanmış ağırlıkta on saat boyunca gözlenen değişim	54
Şekil 3.25.	300 g'lık kütlede farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi	54
Şekil 3.26.	300 g'lık kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişim	55
Şekil 3.27.	300 g'lık kütlede çeşitli (ΔT) sıcaklık farkı için, zamana göre görünür - kütle değerinin değişimi	55
Şekil 4.1.	Fiziksel model	62
Şekil 4.2.	Sayısal analizde kullanılan duvar sınır koşulu	66
Şekil 5.1.	1 kg'lık silindirik kütlelerin sayısal analiz için hazırlanmış modeli ..	69
Şekil 5.2.	500 g'lık silindirik kütlelerin sayısal analiz için hazırlanmış modeli	70
Şekil 5.3.	300 g'lık silindirik kütlelerin sayısal analiz için hazırlanmış modeli	71
Şekil 5.4.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) iken yüzey kayma gerilmelerindeki değişim	72
Şekil 5.5.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) iken yüzey kayma	

	gerilmelerindeki değişim	73
Şekil 5.6.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken yüzey kayma gerilmelerindeki değişim	74
Şekil 5.7.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim	75
Şekil 5.8.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim	76
Şekil 5.9.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim	76
Şekil 5.10.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken bağıl hız vektörü dağılımı	77
Şekil 5.11.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken bağıl hız vektörü dağılımı	78
Şekil 5.12.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken bağıl hız vektörü dağılımı	79
Şekil 5.13.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	80
Şekil 5.14.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	80
Şekil 5.15.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	81
Şekil 5.16.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	81
Şekil 5.17.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	82
Şekil 5.18.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	82
Şekil 5.19.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	83
Şekil 5.20.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	83
Şekil 5.21.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle	

	değişimi	84
Şekil 5.22.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	84
Şekil 5.23.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	85
Şekil 5.24.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi	85
Şekil 5.25.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	86
Şekil 5.26.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	86
Şekil 5.27.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	87
Şekil 5.28.	1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	87
Şekil 5.29.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	88
Şekil 5.30.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	88
Şekil 5.31.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	89
Şekil 5.32.	500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	89
Şekil 5.33.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	90
Şekil 5.34.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	90
Şekil 5.35.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	91
Şekil 5.36.	300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle – yüzey sıcaklığı değişimi	91

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Tartım işlemine etki eden faktörler	4
Tablo 2.1.	Kütle standartları hiyerarşisi	18
Tablo 2.2.	Maksimum izin verilen hata sınırları	23
Tablo 3.1.	Deneylerde kullanılan kütlelerin boyutsal özellikleri	30
Tablo 3.2.	Deneyssel ölçümlerde kullanılan termistörler için yapılan kalibrasyon ölçüm sonuçları ve belirsizlikleri	43
Tablo 3.3.	Deneyssel ölçümlerde kullanılan termistörlerin kalibrasyonu için yapılan regresyon analizi sonucu elde edilen katsayılar	44
Tablo 3.4.	Havanın kaldırma kuvveti etkisiyle görünür kütle ölçümünde değişimler	57
Tablo 3.5.	Farklı ΔT ($^{\circ}\text{C}$) değerlerine göre $ \Delta W $ (mg) görünür kütle değişimleri	61
Tablo 4.1.	Sayısal analizde kullanılan referans değerler	66
Tablo 5.1.	Farklı ΔT ($^{\circ}\text{C}$) değerlerine göre ΔW_d , ΔW_h , $\Delta \mu$ değişimleri.....	91

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Görünür Kütle, Doğal Konveksiyon, Konvektif Etki

Kütle tartım işleminde; ortam koşulları ,terazi kefesi ve kütlenin oluşturduğu bir sistem içerisinde sıcaklık dağılımı homojen olmadığında (özellikle kütlesi belirlenecek olan ağırlığın sıcaklığı çevre sıcaklığından farklı olduğunda) sistem içindeki ısııl denge durumu bozulur. Sıcaklık dağılımının homojen olmaması kütle yüzeyi üzerinde bölgesel olarak ısınma ya da soğumalara neden olur, bu ısınma ya da soğuma etkisi nedeniyle kütle yüzeyi üzerindeki hava yoğunluğu değişeceğinden ağırlık ile ortam arasında konveksiyonla ısı transferi meydana gelir. Konveksiyon etkisiyle oluşan hava hareketi kütlenin dikey yüzeyi boyunca sürtünme kuvvetlerini, yatay yüzeyi üzerinde ise basınç kuvvetlerini oluşturur, bunun sonucu yapılan hassas kütle belirlemesi işleminde terazi göstergesinden hatalı okumalar meydana gelir. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte kütle metrolojisi alanında yüksek çözünürlük ve performansa sahip elektronik kütle komparatörlerinin kullanımının yaygınlaşması sonucu, konveksiyon etkilerin kütle ve kütle komparatörleri üzerindeki önemi, belirgin biçimde artmıştır. Bu çalışmada, konveksiyon etkilerinin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimlerin incelenmesi amacıyla deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde, konveksiyon etkileri en ideal biçimde gözlemleyebilmek için, görünür kütle ölçümünün yapıldığı ortamdaki havanın sıcaklığı ısıtma ve soğutma aparatı kullanılmak suretiyle 20 °C' ye sabitlenmiştir. Ölçümün yapıldığı fanusun içindeki havanın sıcaklığının 20 °C' ye sabitlenmesi fanusu çepeçevre saran ısıtma aparatının içindeki saf suyla ve bu saf suyun sıcaklığının ısıtma ve soğutma aparatlarının kontrollü çalışmalarıyla gerçekleştirilmektedir. Deney düzeneğinde yüzey sıcaklığı ölçümünde sıcaklık hassasiyeti 0,01 °C olan termistörlerden, görünür kütle değişimlerinde, maksimum kapasitesi 1109 g, olan analitik mikro hassas terazi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, 300 g, 500 g ve 1 kg'lık farklı nominal değerlere sahip silindirik kütlelerde, ısııl stabilizasyon süresinin değişimi, görünür kütle değişimi ve kütle yüzey sıcaklıkları değişimi ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca dikey silindirde laminar sınır tabakada zamana bağlı doğal konveksiyon ısı transferi probleminin çözümü için nümerik çalışma yapılmıştır, 1 kg, 500 g ve 300 g'lık nominal değerlere sahip silindirik kütleler için hesaplamalı akışkanlar mekaniği konusu kapsamında, sonlu hacim yöntemine göre yapılan sayısal analiz çalışmasıyla bu kütlelerin mesh edilmiş modelleri, yüzey kayma gerilmeleri değişimleri, yüzey basınç vektörleri dağılımları elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerden ve sayısal modelden elde edilen sonuçlar, çeşitli sıcaklık farklılıklarına göre görünür kütle değerlerinin zamanla değişimi grafiklerinde sunulmuştur.

INVESTIGATION OF CONVECTION EFFECT ON APPARENT MASS MEASUREMENT

SUMMARY

Key Words: Apparent Mass, Natural Convection and Convection Effect

Thermal gradients are cause of instability and possible error in the result obtained from both manual and automatic mass comparators. Thermal gradients cause convective currents to be set up in the air within the balance case. These currents affect the apparent mass of the weight applied to the balance pan. At best these effects will result in poor balance performance shown by a worse repeatability or standard deviation. At worst they can introduce a systematic error in the results, which is not obvious from the balance performance and is therefore not accounted for in the uncertainty budget. The convection effect on weights and mass comparators is of increasing significance to mass metrology with the growing use of electronic mass comparators and their increasing resolution and performance. The large amounts of data show us these comparators are capable of generating draws attention to their sensitivity to convection effects both in the short and long term. This study deals with a new experimental analysis and numerical solution of natural convection airflow and convective effects on apparent mass. A new experimental setup has been developed to observe the temperature distribution of the convective air currents around heated mass body after passing enough thermal stabilization time and this experimental setup was arranged by using thermostatic and cooling bath in order to control surrounding temperature of mass. The amount of wall shear stress has been quantified by developing finite volume solution. Firstly, it has been presented objectives of the research and importance of convection effect in mass metrology; also it is given a place of literature survey about the topic. Experimental set up and all its equipments have been detailed. Change of thermal stabilization time have been declared for 0 °C, 5 °C, 10 °C 15 °C and 20 °C temperature difference sequentially, for three different nominal valued weight 300 g, 500 g, 1 kg. Problem of transient laminar natural convection heat transfer from vertical cylinder solution has been investigated in analytically; thesis consists of results obtained from both experimental study and numerical solution with respect to change of surface shear stress, pressure distribution, velocity vectors, variation of apparent mass difference with time and change of apparent mass difference with temperature difference.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Metroloji sözcük anlamı olarak "ölçme bilimi"dir. Bütün ölçü sistemlerinin temeli olan birim sistemlerinin (SI ve benzerleri) tanımlanması metrolojinin başlıca görevidir. Bu birimlerin mümkün olan en yüksek doğrulukla tanımlanabilmesi için, yüksek duyarlıklı ölçme tekniklerinin ve fiziğin en yeni bilgilerinin kullanılması gereklidir. Bu da her ulusun metroloji enstitüsü tarafından sağlanır. Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği günümüzde, bilimsel araştırma, sanayi, ticaret, ulusal savunma, sağlık gibi alanlarda yapılan çalışmaların başarıyla sonuçlandırılması hassas, güvenilir ve doğru ölçümlere bağlıdır. Bugün toplumun hemen her kesiminin sahip olmayı olağan saydığı ev eşyalarının, otomotiv ürünlerinin v.s. ekonomik olabilmesini sağlayan seri üretim, bu ürünleri oluşturan yüzlerce parçanın hassas olarak aynı karakterde yapılabilmesinin sonucudur. Bu ise boyutların, sıcaklığın, ağırlığın, gücün, empedansın, akımın, basıncın ve çeşitli malzeme karakteristiklerinin doğru olarak ölçülebilmesiyle sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra giderek artan uluslararası işbölümü, bir ürünü oluşturan parçaların değişik ülkelerde üretilip daha sonra birleştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu durum, ürün kontrolü için ölçülen parametrelerin benzer koşullarda aynı sonuçları vermesiyle olasıdır. İşte bu nedenle en hassas standartları elinde bulunduran ulusal metroloji enstitüleri birkaç yıllık aralıklarla uluslararası karşılaştırmaya giderler. Böylelikle uluslararası seviyede de ölçü birliği sağlanmış olur. ISO 9000 aracılığıyla üreticilere aktarılan kalite düzeyi durağan değildir, düzenli aralıklarla üretici sürekli olarak kontrol edildiğinden dolayı, üretilen ürünün gelecekteki kalitesi hakkında da kuşkuya yer bırakmamaktadır. Gelişmekte olan ülkeler sınıfında olduğumuzu göz önünde bulundurursak, dünya pazarında yer alabilmemiz ancak ve ancak bu uluslararası ölçü birliğini sağlamakla elde edilecektir.

SI ve türevleri içindeki temel birimlerden biri olan kütle birimi "kg", yoğunluğu 21500 kg/m^3 olan %90 Platin - %10 İridyum alaşımından yapılmış, 39 mm çapında

ve 39 mm yüksekliğinde silindir biçimindeki ağırlıktır [1]. Kütle birimi “kg”ın çok küçük bir ölçüm belirsizliği ile gerçekleştirilmesi, yasal ve endüstriyel metroloji için önemli olduğu kadar, bilimsel çalışmalar içinde önemlidir. Ayrıca türetilmiş fiziksel büyüklükler olan kuvvet, yoğunluk ve basınç gibi birimlerinde oluşturulması, kütle biriminin çok yüksek hassasiyette gerçekleştirilmesine bağlıdır [2-5].

Yüksek hassasiyetli kütle belirlemeleri sıcaklık, basınç ve nem gibi ortam koşullarına doğrudan bağlıdır. Özellikle hassas ölçümlerde terazi kefesi üzerine etki eden ağırlık kuvveti havanın kaldırma kuvveti etkisiyle azalır, bu durum; neden olur [6]. Havanın kaldırma kuvvetinin oluşturduğu bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için ortamın hava yoğunluğu ve kütlesi belirlenecek olan ağırlığın hacmi hesaplanıp havanın kaldırma kuvveti düzeltilmesi işlemi yapılır. Hava ortamında yapılan tartım işleminde, havanın kaldırma kuvveti düzeltilmesi önemli bir büyüklüktür, bunun gibi tartım esnasında etkili olan faktörlerde hassas kütle belirlemesi işleminde hesaplamalara dahil edilmelidir. Tablo 1.1’de tartım işlemine etki eden faktörler verilmiştir. Genellikle çevresel tesirler hem teraziye, hem de ölçümü yapılacak olan kütleyle etki eder [7-8]. Ortam koşulları ,terazi kefesi ve ağırlığın oluşturduğu bir sistem içerisinde sıcaklık dağılımı homojen olmadığında (özellikle kütlesi belirlenecek olan ağırlığın sıcaklığı çevre sıcaklığından farklı olduğunda) sistem içindeki ısı denge durumu bozulur. Sıcaklık dağılımının homojen olmaması kütle yüzeyi üzerinde bölgesel olarak ısınma ya da soğumalara neden olur, bu ısınma ya da soğuma etkisi nedeniyle kütle yüzeyi üzerindeki hava yoğunluğu değişeceğinden ağırlık ile ortam arasında konveksiyonla ısı transferi meydana gelir [9-10]. Konveksiyon etkisiyle oluşan hava hareketi ağırlığın dikey yüzeyi boyunca sürtünme kuvvetlerini, yatay yüzeyi üzerinde ise basınç kuvvetlerini oluşturur, bunun sonucu yapılan hassas kütle belirlemesi işleminde terazi göstergesinden hatalı okumalar meydana gelir. Ayrıca terazi ölçüm odası içerisinde sıcaklık zamanla sabit değilse, sıcaklık değişimi elektromanyetik kuvvet kompensasyonlu terazinin manyetik ve elektriksel özelliklerinin değişimine, mekanik eş kollu terazilerde de uzunluk değişimine neden olur [11]. Bu, terazi göstergesinin sürekli değişmesine ve de kaymasına, böylece terazinin ayarı ve hassasiyetinin değişmesine sebep olur. Özellikle ilaç ve kimya sektörü gibi hassas kütle ölçümü işleminin yapıldığı sektörlerde bu durum oldukça önemlidir.

Tablo 1.1. Tartım işlemine etki eden faktörler

Tartım işlemine etki eden faktörler	Etkilenen	Sonuç
Zamanla sıcaklık değişimi	Terazi	Terazi hassasiyetinde değişimler, Terazi göstergesinde kaymalar
Sıcaklık farklılıkları ve gradyentler	Terazi / Kütle	Sistematik hatalar ve standart sapmada artışlar
Sıcaklık $\neq 20^{\circ}\text{C}$	Kütle	Hacim değişimleri

Aynı malzemeden farklı nominal değerlere sahip kütlelerde termal stabilizasyon süresinin görünür kütle ölçümündeki etkileri araştırılmıştır. Görünür kütle değişimini etkileyen konvektif kuvvetlerin minimum düzeyde ölçümü etkilemesi için ne kadarlık bir stabilizasyon süresi dahilinde terazi içinde kütlenin bekletilmesi gerektiği incelenmiştir, böylece farklı ortamlardan farklı sıcaklık değerlerinde gelen kütlelerin kalibrasyonlarına başlanabilmesi için gerekli süreler belirlenmiştir. Ölçüm belirsizliğini olumsuz yönde etkileyen konvektif kuvvetlerin belirlenmesi için sonlu hacim yöntemine dayalı olarak çalışan ticari bir paket program ile yapılan matematiksel analizle yüzey kayma gerilmeleri, yüzey basınç dağılımları ve yüzey hız vektörleri dağılımları çıkarılmış ve bunların görünür kütle değişimine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen nümerik sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

Konveksiyon etkilerinin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimlerin incelenmesi amacıyla bugüne kadar yapılan çalışmalar deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Bu deneysel çalışmalarda genellikle farklı nominal değerlerde üretilen paslanmaz çelik kütleler üzerinde konveksiyon etkilerinin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimlerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir ve bu amaçla aynı özelliklere sahip olarak imal edilen iki kütleden biri referans, diğeri test kütlesi

olarak seçilip, karşılaştırmalı kütle ölçümü yapan komparatörlerden yararlanılmıştır. Doğal konveksiyon hava akımlarının hassas kütle ölçümündeki etkisini tam olarak inceleyebilmek için gerekli olan terazi tartım odası içerisindeki sıcaklık kontrol edilmemiştir. Isı transferi ve akışkanlar mekaniği konularındaki temel denklemler seçilmiş ancak deneysel çalışmalar geçici rejim ısı transferi yöntemine göre gerçekleştirilirken, yapılan deneyleri modellemek için kullanılan çözümler sürekli rejim ısı transferi yöntemini içermiştir. Bu konu kapsamında bugüne kadar yapılan çalışmaları iki alt başlık altında inceleyebiliriz.

1.1.1. Bu alanda düşey bir silindirdeki ısı transferi problemi üzerine yapılmış çalışmalar

Ostrach, Sparrow ve Gregg (1955), çeşitli Pr sayıları için dikey plaka ve dikey silindir üzerindeki laminar hava akışını ve doğal konveksiyon ısı transferi problemini incelemiştir. Böylece, dikey yüzey üzerine etkiyen hız ve sıcaklık dağılımı profillerini çıkarmışlardır.

Millsaps ve Pohlhausen (1956), dikey bir silindirdeki doğal konveksiyon ısı transferi probleminde, benzerlik dönüşümleri sonucu elde denklemlere sayısal çözüm tekniklerini uygulamak için ilk adımı atmışlardır.

Yang (1960), dikey plaka ve silindirde iki boyutlu, geçici rejimdeki doğal konveksiyon ısı transferi problemlerine benzerlik dönüşümleri yapmak suretiyle oluşturduğu çözümler üzerinde çalışmıştır. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini gerekli sınır şartlarını kullanarak diferansiyel denklemler şekline dönüştürmüştür. Bu denklem sistemlerinin analitik bir çözümü bulunmadığından sayısal çözüm yöntemlerini araştırmıştır.

Goldstein Briggs ve Hauptmann (1964), dikey bir silindir ve plakada konvektif etkilere bağılı olan ısı transferi mekanizması çözümü üzerinde yarı analitik yaklaşımlar oluşturmuşlardır.

1.1.2. Metroloji alanında bu konuda yapılan çalışmalar

Bütün ölçü sistemlerinin temeli olan birimlerin (SI ve benzerleri) tanımlanması metrolojinin başlıca görevidir. Bu birimlerin mümkün olan en yüksek doğrulukla tanımlanabilmesi için, yüksek duyarlılıklı ölçme tekniklerinin ve fiziğin en yeni bilgilerinin kullanılması gereklidir. Bu da her ulusun metroloji enstitüsü tarafından sağlanır. Avrupa metroloji enstitüleri birliği “Euromet” avrupadaki her ulusun metroloji enstitüsünün ortak üye statüsünde katılımı sonucu oluşturulmuş olan bir organizasyondur. Bu birliğin misyonu, ulusal ölçüm standartlarını belirlemede ülkeler arası işbirliğini özendirmek, kaynak ve servislerin kullanımını optimize etmek, ölçme olanaklarını geliştirmek ve bu olanakları tüm üyelerin erişimine açmaktır. Bu misyon çerçevesinde Euromet organizasyonunun ortak üye statüsündeki metroloji enstitülerinin katılımıyla gerçekleştirdiği projeler bulunmaktadır. Konveksiyon etkilerinin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimlerin incelenmesi konusu Euromet bünyesinde gerçekleştirilen 395 nolu “Convection Effect in Mass Calibration due to Temperature Differences or Gradients” isimli bir proje olup, bu proje kapsamında bugüne kadar yapılan literatür araştırmalarına aşağıda yer verilmiştir.

Massen (1986), bu alanda yapılmış olan ilk çalışmadır, terazi tartım odası içinde terazi kefesi civarındaki sıcaklığın terazi kefesi üzerindeki sıcaklıktan daha büyük olduğunu kabul edip sıcaklık farkı nedeniyle oluşacak olan konvektif hava akımı hızlarının cm.s^{-1} şiddetinde olacağını araştırmış, böylece ölçüm sonuçlarının (μg) bazında ne kadar değişeceğini incelemiştir. Massen bu çalışmayı yaparken terazi tartım odasının sıcaklığını, tartım odası içindeki en düşük sıcaklık değeri ile en yüksek sıcaklık değerinin ortalamasını alarak bulmuştur. Bu durum çerçevesinde

denge denklemlerinden yararlanıp sıcaklık farklılıkları sonucu oluşan hava hareketinin terazi kefesi üzerinde oluşturduğu sürtünme kuvveti değerini (F_f) formüle etmiştir. Ayrıca terazi tartım odası duvarından oda içindeki havaya geçen ısı miktarını sürekli rejim durumunu göz önünde bulundurarak ifade etmiştir. Tartım odası içinde türbülanslı hava akışı için sürtünme kuvveti ifadesini çıkarmıştır. İncelemeye aldığı terazi tartım odası içindeki kefenin dairesel geometriye sahip oluşu nedeniyle iç sürtünme kuvvetlerini ihmal etmiş, böylece laminar akış için sürtünme kuvveti ifadesini havanın viskozitesine bağlı olarak yeniden elde etmiştir. Hem türbülanslı hem de laminar hava akımı için oluşturduğu eşitlikleri çözebilmek için terazi tartım odası içindeki sıcaklık farkı (ΔT), terazi tartım odası duvarından oda içindeki havaya geçen ısı miktarı (Q), tartım odası içinde türbülanslı hava akışı durumunda oluşan sürtünme kuvveti (F_f) ve hava akış hızı (v) ifadesinin çözümünü araştırmıştır. Terazi tartım odası içinde, türbülanslı hava akışı için hız değişimini; tartım odası içindeki yüksek sıcaklık, tartım odası ortalama sıcaklığı, hava yoğunluğu ve tartım odası içindeki hava akımı sonucu oluşan sürtünme kuvvetine bağlı olarak çıkartmıştır. Laminar akış için çıkardığı hız ifadesinde, laminar olmayan hava akımı için elde etmiş olduğu hız ifadesinde kullanmış olduğu parametrelerin yanında, tartım odası içindeki hava yoğunluğunu, viskozitesini ve ısı taşınım katsayısını kullanarak, hız ifadesi eşitliğini elde etmiştir. Tartım odası içindeki logaritmik sıcaklık değerleri değişimini, hız değerinin logaritmik olarak değişimine göre ifade etmiştir. Terazi tartım odası içindeki hava akış hızı, terazi tartım odasındaki konveksiyon uzunluğu ve havanın viskozitesi parametrelerini dikkate aldığı anda 800 değerindeki reynolds sayısının laminar akış için bir limit olacağını belirtmiştir.

Massen yapmış olduğu çalışmada, terazi tartım odası içinde doğal konveksiyon sonucu oluşan hava akış hızı ve sürtünme kuvveti değerlerinin değişimine yönelik ısı transferi ve akışkanlar mekaniği disiplinlerinin temel denklemlerini kullanarak oluşturduğu matematiksel yaklaşım, oldukça kaba ve genel bir yaklaşımdır ve deneysel bir çalışma içermemektedir. Bunun yanında, Massen'in yaptığı kabulün tersine, terazi tartım odası içinde sıcaklık farklılıkları sonucu hiçbir şekilde türbülanslı hava akışı gerçekleşmemektedir.

Glaeser (1990)'ın yaptığı çalışma, bu konuda yapılmış en kapsamlı deneysel çalışmadır. Nominal değerleri 20 g olan kulplu ve silindirik boru geometrisinde kütleler kullanarak, ölçümün yapıldığı çevre ile tartım kefesi arasında ısıl denge durumu olmadığında yani ölçümü yapılan kütlenin yüzey sıcaklığı terazi tartım odası içi sıcaklığından farklı olduğunda, görünür kütle ölçümünde meydana gelen değişimleri terazi tartım odası sıcaklığını kontrol etmeksizin deneysel olarak yaptığı çalışmalarda araştırmıştır. Havanın kaldırma kuvveti, adsorpsiyon ve doğal konveksiyon parametrelerinin görünür kütle ölçümündeki değişimlerle ilişkisini elde ettiği sonuçları birbiriyle karşılaştırmak yoluyla incelemiştir. Görünür kütle ölçümündeki değişimlerin; tartımın yapıldığı ortamdaki hava yoğunluğunun, yerçekimi ivmesinin, elektrostatik kuvvetlerin, adsorpsiyonun, ısıl gradyentlerin ve malzemenin ferromanyetik olması durumunda manyetik kuvvetlerin etkisinde olacağını düşünmüştür, tüm bu etkilerin hassas kütle belirlemesi işlemindeki önemini belirlemek amacıyla, deneysel ölçümlerinde maksimum kapasitesi 30 g, okunabilirliği 1 µg ve standart sapması 2 µg olan hassas bir terazi kullanmıştır. Deneysel ölçümlere başlamadan önce nominal değerleri 20 g olan iki adet silindirik boru geometrisine sahip ve iki adet kulplu paslanmaz çelik kütleler imal ettirmiştir. Silindirik geometriye sahip olan kütlenin standart kulplu kütleyle olan yüzey alanı oranını 3,7 olarak belirlemiştir. Yaptığı deneysel ölçümlerde Glaeser, kullandığı kütlelerden birini referans diğerini ise test kütlesi olarak kabul edip karşılaştırmalı kütle ölçümleri yapmıştır. Böylece görünür kütle ölçümlerindeki değişimleri incelemiştir. Glaeser yapmış olduğu deneyler sonucunda elde ettiği görünür kütle değişimini; sıcaklık farkının (ΔT), zamanın ve ($\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{K}$)'lik sıcaklık farkı için ölçümlerin başlangıcında elde etmiş olduğu görünür kütle değişiminden gelen katsayının (k_0), fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Deneyler sonucu terazi tartım odası içinde sıcaklık farklılıkları nedeniyle görünür kütle ölçümünde oluşan değişikliklerin sırasıyla havanın kaldırma kuvveti etkisine, kütle yüzeyinin su buharı soğurması etkisine ve doğal konveksiyon etkisine bağlılığını incelemiştir. Bu kapsamda havanın kaldırma kuvveti etkisini 1981 yılında Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Konferansında kabul edilip yayınlanan CIPM formülünden hesaplamıştır. Sıcaklık, kütlenin hacmi, ortalama hava yoğunluğu, kütlenin ısıl genleşme katsayısı, ölçümün yapıldığı ortamın ortalama hava basıncı, kuru havanın molar kütlesi, havanın sıkıştırılabilirlik faktörü, gaz sabiti ve havadaki su buharının molar yüzdesini bulup sıcaklık farkı

sonucu oluşacak kaldırma kuvveti hesabını gerçekleştirmiştir. İmal ettiği paslanmaz çelik kütlelerin su buharını soğurmaları nedeniyle belirli sıcaklık farkında oluşacak görünür kütle ölçümlerinde görülecek değişimini incelemiştir. Ayrıca doğal konveksiyon sonucu görünür kütle ölçümündeki değişimi analiz etmiştir. Yapmış olduğu deneylerin sonucunda Glaeser, havanın kaldırma kuvvetinin ve kütle yüzeyinin su buharını soğurmasının, görünür kütle ölçümündeki farklılıkları tam olarak karşılayamadığı sonucunu çıkarmıştır. Doğal konveksiyon kuvvetlerinin etkisinin görünür kütle ölçümündeki değişimin asıl parametresini oluşturduğunu tespit etmiştir.

Glaeser çalışmasında karşılaştırmalı kütle ölçümü yapan komparatörden yararlanmıştır, terazi tartım odası içerisindeki sıcaklığı kontrol etmemiştir, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği konularındaki temel denklemleri seçmiş olduğu kütle geometrilerine uygulamış ancak genel bir sonuca ulaşamamıştır. Ayrıca yasal metroloji kapsamında bilinen ve kabul gören bir gerçek hassas kütle belirlemede en etkin olan parametrenin havanın kaldırma kuvvetinden gelen parametre olduğudur.

Glaeser ve J.Y.Do (1993), tarafından yapılan deneysel çalışmada, 1 kg'lık kütle standartları için doğal konveksiyon nedeniyle görünür kütle ölçümünde oluşan farklılıklar belirlenmiştir. Bu çalışmada, 1990 yılında 20 g'lık kütleler kullanılarak kurulmuş olan model geliştirilmiştir. Doğal konveksiyon sonucu kütleden terazi tartım odasına geçen ısı transferi araştırılmış ve terazi tartım odası içerisindeki hava akımlarını içeren bir model geliştirilip, kurulan modelden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 1 kg maksimum kapasiteye, 1 µg okunabilirliğe ve 5 µg standart sapmaya sahip hassas terazi deneysel ölçümlerde kullanılmıştır. Deneylerde biri standart kulplu kütle, diğeri silindirik, nominal değerleri 1 kg olan ikişerden 4 adet paslanmaz çelik kütle kullanılmıştır. Deneysel ölçümlerde karşılaştırmalı ölçüm yöntemi dikkate alınıp, kullanmış olduğu standart kulplu 1 kg nominal değere sahip kütlelerden birini referans diğerini test kütlesi kabul ederek, görünür kütle ölçümünde iki benzer kütle standardı kullanılmıştır. Referans kütle standardı komparatör içinde döner tabla üzerinde T_1 sıcaklığında bırakılmış, diğer kütle termostat içinde T_2 sıcaklığında

saklanmıştır. ($\Delta T = T_2 - T_1$) sıcaklık farkı kütle kıyaslamasında iki kütle içinde başlangıç sıcaklığı değeri olarak alınmıştır. Yaptığı deneyler sonucunda görünür kütle değişimini zamana ve (ΔT) sıcaklık farkına bağlı olarak tanımlamıştır. Sürekli rejim ısı transferi durumunu dikkate alıp silindirik bir kütlenin yanal yüzeyine etki eden sürtünme kuvvetini ve yatay yüzeyine etki eden basınç kuvvetini temel denklemleri kullanarak ifade etmiştir.

Deneysel çalışmada kullandığı kütlelerden terazi tartım odasına geçen ısı transferini hesap etmek için ;

- (i) Kütle yüzeyinin üniform sıcaklık dağılımına sahip olduğu,
 - (ii) Hava akışının laminar ve sürekli olduğu,
 - (iii) Kütlenin her bir yüzeyinde oluşan ısı transferi oranlarının konvektif etkiler sonucu oluşan hava akış hızını etkilediği,
- kabullerini yapmak suretiyle kütlenin yanal, alt ve üst yüzeyleri için Nu ve Gr sayıları arasındaki ilişkiyi hesap etmiştir.

Glaeser yaptığı çalışmada kütlenin yanal yüzeyi için doğal konveksiyon ısı transferi modeline bağlı ifadeleri kullanmıştır, yatay yüzey için ise zorlanmış konveksiyon ısı transferi modelini tanımlamıştır. Oysa deneysel ölçümde terazi tartım odası içindeki hava hareketini etkileyecek bir fan ya da pompa sistemi olmadığı için zorlanmış konveksiyon modelinin kullanılması yanlıştır, ayrıca kullanılan terazi komparatör prensibine göre çalışan bir terazi olup deneyler süresince terazi tartım odası içerisinde hiçbir sıcaklık kontrolü sağlanmamıştır.

Glaeser (1999), 1 kg ve 50 kg'lık kütlelerin farklı depolama ortamlarındaki ısı stabilizasyon sürelerinin değişimini ve terazi tartım odası ortamıyla kütleler arasındaki sıcaklık farklılıkları sonucu görünür kütle ölçümünde meydana gelen değişimleri araştırmıştır.

Bu amaçla;

1. Zamanın fonksiyonu olarak sıcaklığın değişimini,
2. Sıcaklığının fonksiyonu olarak görünür kütle ölçümündeki değişimi baz alan iki ayrı fiziksel model tanımlamıştır.

Glaeser tanımladığı fiziksel modelleri doğrulamak için 1 kg ve 50 kg nominal değerlerine sahip kütlelerle deneysel çalışmalar yapmıştır. Sıcaklık ölçümünde Pt 100 termokupl çiftlerini kullanmıştır, deney düzeneğindeki termokuplların ölçüm noktalarından birini kütle üzerine, diğerini ise kütle üzerinden yatay konumda 200 mm uzaklıktaki hava ortamına yerleştirmiştir, bazı ölçümler için kütleden 10 mm yatay doğrultudaki uzaklıklara ilave termokupllar da yerleştirmiştir. Kütle komparatörü içindeki sıcaklığı diğer bir Pt 100 sıcaklık sensörüyle ölçmüştür. Ölçümler esnasında dijital voltmetre, tarayıcı ve bilgisayar kullanıp, 1 kg'lık kütlenin boyunun ortasına 20 mm' lik derinlikte ve 3 mm çapında delikler delmiş ve yalıtılmış termokupllar yerleştirmiştir. 50 kg'lık kütle üzerine ise biri, kütlenin üst yüzeyine diğeri kütlenin yan tarafına iki termokupl yapıştırmıştır. Böylece ısı stabilizasyon süresinin farklı nominal değerlere sahip kütlelerdeki etkisini gözlemlemiştir. Glaeser yapmış olduğu deneysel çalışmalarının sonucu olarak konvektif etkilerin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimler çerçevesinde yasal metroloji kapsamında OIML R111 talimatında çeşitli doğruluk sınıflarında yer alan 50 kg'dan 1kg'a kadar olan kütleler için belirli sıcaklık farkı değerlerine göre oluşacak görünür kütle ölçümünde gözlenen değişim değerlerini deneylerden elde ettiği sonuçları genelleştirerek ifade etmiştir.

Matilla (1998), yapmış olduğu deneysel çalışmada doğal konveksiyon hava akımları sonucu oluşan sürtünme kuvvetlerinin görünür kütle ölçümündeki değişimleri ne oranda etkilediğini analiz etmiştir. Bu amaçla Matilla kütle üzerinde zamana bağlı olarak oluşacak ΔT sıcaklık farkını ve sıcaklık farkının sonucu oluşacak Δm görünür kütle ölçümü değişimini bulmayı amaçlamıştır. Terazi tartım odası sıcaklığını kontrol etmeksizin termal stabilizasyon süreleri ile görünür kütle değişimleri arasındaki ilişkiyi gözlemlemiştir. Nominal değeri 1 kg olan kütleler kullanarak yaptığı çalışmada, başlangıçta kütle ve terazi tartım odası arasında $\Delta T = 10,846$ °C sıcaklık farkının olduğu durumda terazi tartım odası bünyesinde bulunan döner tablanın hareket süresine bağlı olarak birinci çevrimde görünür kütle farkını $\Delta m = 0,9994$ mg olarak ölçmüş, diğer çevrimde ise kütle ile ortam arasında $\Delta T = 5,283$ °C sıcaklık farkı için görünür kütle değerinin $\Delta m = 0,430$ mg olduğunu belirlemiştir. Bu işlemler silsilesi içinde Matilla bazı kabuller yapmıştır. Buna göre;

- a-) Doğal konveksiyonla ısı transferi olayını incelerken ele alınan bütün katsayılar en basit geometrik şekle sahip kütle için kullanılacaktır.
- b-) İncelenen kütlenin yanal yüzeyini etkileyen doğal konveksiyon ısı transferi problemi için dikkate alınan Nu sayısı, bu kütlenin üst yatay yüzeyi için yapılacak zorlanmış konveksiyon hesabında kullanılacak Nu sayısına eşittir.
- c-) Matilla yapmış olduğu çalışmada iletim ve ışınlama oluşacak ısı transferinin kütle üzerindeki etkisini hesaba katmamıştır.
- d-) Deneysel çalışmada izlediği ölçüm prosedürü Glaeser'in gerçekleştirmiş olduğu prosedürün aynısıdır.

Standart kulplu kütle üzerine 3 tane, biri kütlenin üst yüzeyine yakın, diğeri kütlenin alt yan yüzeyine yakın ve sonuncusu terazi tartım odasının üst köşesinde bulunan üç adet sensör kullanmak suretiyle terazi tartım odasının sıcaklık dağılımını belirlemiştir. Bu işlemi yaparken kütle yüzey sıcaklığının üniform olarak dağıldığını kabul etmiştir. Sensör 2'yi kullanarak, ısı sınır tabaka ifadesini çıkarmıştır. Karşılaştırmalı kütle ölçümü yöntemine göre kütle ölçümlerini yapmıştır. Deneylerinde farklı nominal değerlerde 200 g – 20 kg arasındaki kütlelerin deneysel ölçümlerini yapmıştır. Deney ortamında sıcaklık kontrolü amacıyla Pt 100 sıcaklık sensörlerini kullanmıştır. Deneysel ölçümler süresince terazi tartım odasının sıcaklığı kontrol etmemiştir. Yapmış olduğu ölçüm sonuçlarında; çeşitli sıcaklık farklılıklarına göre zamana bağlı olarak görünür kütle ölçümündeki değişimi araştırmıştır.

Pinot (1998), terazinin ve kütlenin içinde bulunduğu kabindeki havanın stabilitesini yani basınç, sıcaklık ve nem değerlerinin değişimini on beşer dakikalık periyotlarda on iki saat süresince ölçmüştür. Ölçümleri sonucunda terazi tartım odası içinde oluşacak ısı gradyentlerin ölçüm hassasiyetini etkileyeceğini belirtmiştir. Isıl gradyentler nedeniyle homojen olmayan hava hareketi oluşacağını böylece hassas kütle belirlemesi işleminde ve havanın kaldırma kuvveti düzeltilmesi hesabında hataların meydana geleceğini araştırmıştır. Ölçüm yaptığı ortamın sıcaklık hassasiyetinin $\pm 0,2$ °C olduğunu ve ölçüm esnasında teraziden kaynaklanan kararsızlıkların büyük çoğunluğunun ısı gradyentler sonucu oluştuğunu gözlemlemiştir. Pinot, yapmış olduğu deneysel çalışmanın sonucunda terazi kefesinin yanında ölçmüş olduğu t_1 sıcaklığı, terazinin döner tablası yanında ölçmüş olduğu t_2

sıcaklığı, terazi kabini içinde ölçtüğü p basıncı, çığ noktası sıcaklığı t_r ile servo kontrol voltajı v arasında basit bir model oluşturdu.

Riski (1998), maksimum kapasiteleri sırasıyla 21 g, 240 g, 2010 g, 10050 g ve 20050 g olan kütle komparatörleri içindeki sıcaklık gradyentlerinin değişimini Pt 100 sıcaklık sensörlerini kullanarak gerçekleştirmiştir. Bu sensörleri kullanmadan önce su banyosunda ± 5 mK'lik sıcaklık aralığında kalibre etmiştir. Riski yapmış olduğu çalışmada sadece terazi döner tablası civarındaki sıcaklık değişimlerini incelemiştir.

Mana (2002), nominal değeri 1 kg olan silikon küre ve 1 kg'lık standart kulplu kütle üzerinde doğal konveksiyon etkisiyle meydana gelen görünür kütle ölçümündeki değişimleri incelemek için deneysel çalışmanın yanında sayısal analiz çalışması da yapmıştır. Sayısal analiz çalışmasında üç boyutlu sonlu elemanlar modelini seçmiştir. Sınır koşulu ve başlangıç koşullarını kurmuş olduğu deneysel düzenden yararlanarak belirlemiştir. Ortamla kütleler arasında 0,6 K'lik çok düşük sıcaklık farkı oluşturulduğunda görünür kütle ölçümündeki değişimin hem 1 kg nominal değere sahip standart kulplu kütlede hem de silikon küre de 300 μ g düzeyinde olduğunu belirlemiştir. Mana deneysel çalışmasında modifiye edilmiş mekanik bir terazi kullanmış, bu terazinin dışını ahşap koruyucu kabinle örtmüştür. Sayısal analiz çalışmasında kullanacağı başlangıç ve sınır şartlarını belirlemek için mekanik terazinin dışında bulunan kabinin her bir köşesine sıcaklık sensörü yerleştirip deneysel ölçümler boyunca bu noktaların sıcaklık değerlerini bilgisayara kaydetmiştir. Deneysel ölçümlerinde karşılaştırmalı kütle ölçüm yöntemlerine göre görünür kütle ölçümündeki değişimleri ölçmüş, ancak sadece çok küçük sıcaklık farklılıkları için görünür kütle değişimini belirlemiştir. Deneysel ölçümlerinde elde ettiği görünür kütle değişimlerini açıklamak için Glaeser'in 1999'da ortaya atmış olduğu modeli kullanmış, bu modelden elde ettiği sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Deneysel çalışmalarında geçici rejim ısı transferi durumuna göre ölçümler yapmasına rağmen sayısal analiz çalışmasında silikon küre üzerinde sürekli rejim ısı transferi durumuna göre basınç dağılımını kayma gerilmesi dağılımını ve akış hız vektörlerini bulmuştur, deneysel çalışmasında terazinin bulunduğu kabin içerisinde hiçbir sıcaklık kontrolü yapmadığı için ölçümlerde doğal konveksiyon

etkisi sonucu görünür kütle değişimini ölçtüğünü sanıp gerçekte havanın kaldırma kuvveti etkisi nedeniyle görünür kütlede meydana gelen değişimleri incelemiştir.

Matilla (2004), infrared termografi yöntemiyle, belirli sıcaklıklara kadar ısıtılmış kütlenin yanal yüzeyi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimini ölçmüştür. Bu amaçla öncelikle 24 saat süresince belirli sıcaklık derecesine kadar ısıtılmış kütleler üzerinde sıcaklık gradyentlerinin dağılımını ve doğal konveksiyon sonucu oluşacak hava akımlarını incelemiştir. Yüksek hassasiyetli kütle belirlemelerinde doğal konveksiyonla ısı transferi sonucu oluşan kuvvetlerin görünür kütle değerini ne kadar etkilediğini araştırmıştır. Yapmış olduğu deneysel çalışma esnasında ısıtılmış kütle üzerinde oluşacak yansıma ve radyasyon etkisini en aza indirmek için kütleyi kapalı bir ortamda tutmuş, böylece görsel olarak kütle yüzey sıcaklığının dağılımını elde etmiştir. Bunun yanında infrared termografi yöntemini kullanarak yüzey sıcaklığı değişimi değerlerini çıkartmıştır. Deneysel çalışmasında 1 kg nominal değere sahip standart kulplu kütle kullanmış, 100 °C dereceye kadar bu kütleyi ısıtmış, ancak ölçümlere başladığı andaki sıcaklık değerini 40°C olarak ölçmüştür. Deneyler sonucunda infrared termografi yöntemiyle 1 kg'lık kütle çevresindeki sıcaklık ve hız profilini deneysel yolla elde etmiştir. Matilla bu çalışmayı yaparken ısı transferi ve akışkanlar mekaniği konularının bünyesinde bulunan temel ısıl sınır tabaka ve hız sınır tabakası profillerini elde etmek istemiştir. Ancak yapmış olduğu deneysel çalışmada ortam sıcaklığını kontrol etmemiştir, bu nedenle doğal konveksiyon sonucu oluşan etkiler nedeniyle görünür kütle ölçümündeki değişimi belirleyememiştir, gözlemlediği sadece havanın kaldırma kuvveti etkisi olmuştur.

Literatür araştırmalarına göre, yaptığım çalışmanın bugüne kadar yapılmış olan çalışmalardan farkı aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

1-) Bu güne kadar yapılan deneysel çalışmaların hepsinde terazi tartım odası sıcaklığı hiçbir şekilde kontrol edilmemiştir, bu çalışmada için kurulan deney düzeneğinde ısıtma ve soğutma aparatlarının kullanımıyla ölçüm ortamındaki havanın sıcaklığı 20 °C sabitlenmiştir. Böylece konvektif kuvvetlerin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimler açık biçimde incelenmiştir.

2-) Yapılan deneysel çalışmalarda ktle belirlemesi işlemine karşılaştırma ktle ölçümü yapan komparatör teraziler kullanılmıştır. Bizim deneyimizde, tek kefeli 10 μg okunabilirliğinde hassas terazi kullanılmıştır.

3-) Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçların yanında, hassas ktle ölçümünü olumsuz yönde etkileyen konvektif kuvvetlerin belirlenmesi için sonlu hacim yöntemine dayalı olarak çalışan ticari bir paket program ile yapılan matematiksel analizle yüzey kayma gerilmeleri, yüzey basınç dağılımları ve yüzey hız vektörleri dağılımları çıkarılmış ve bunların görünür ktle değişimine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen nümerik sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

4-) Diğer çalışmalardaki deney düzeneğinden tamamen farklı ve zgn bir deney düzeneği oluşturulmuştur.

BÖLÜM 2. KÜTLE METROLOJİSİ

2.1. Giriş

Kütle birimi kilogram, Sevres’de (BIPM’de) muhafaza edilen Uluslararası Kilogram Prototipin kütlesi olarak 1889 yılında yapılan I. Ölçüler ve Ağırlıklar Konferansı’nda (CIPM) kabul edilmiştir ve 1901 yılında yapılan II. Ölçüler ve Ağırlıklar Konferansı’nda tanımlanmıştır:

“Kütle birimi kilogram; yoğunluğu 21500 kg / m^3 olan %90 Platin - %10 İridyum alaşımından yapılmış, 39 mm çapında ve 39 mm yüksekliğinde silindir biçimindeki ağırlıktır.”

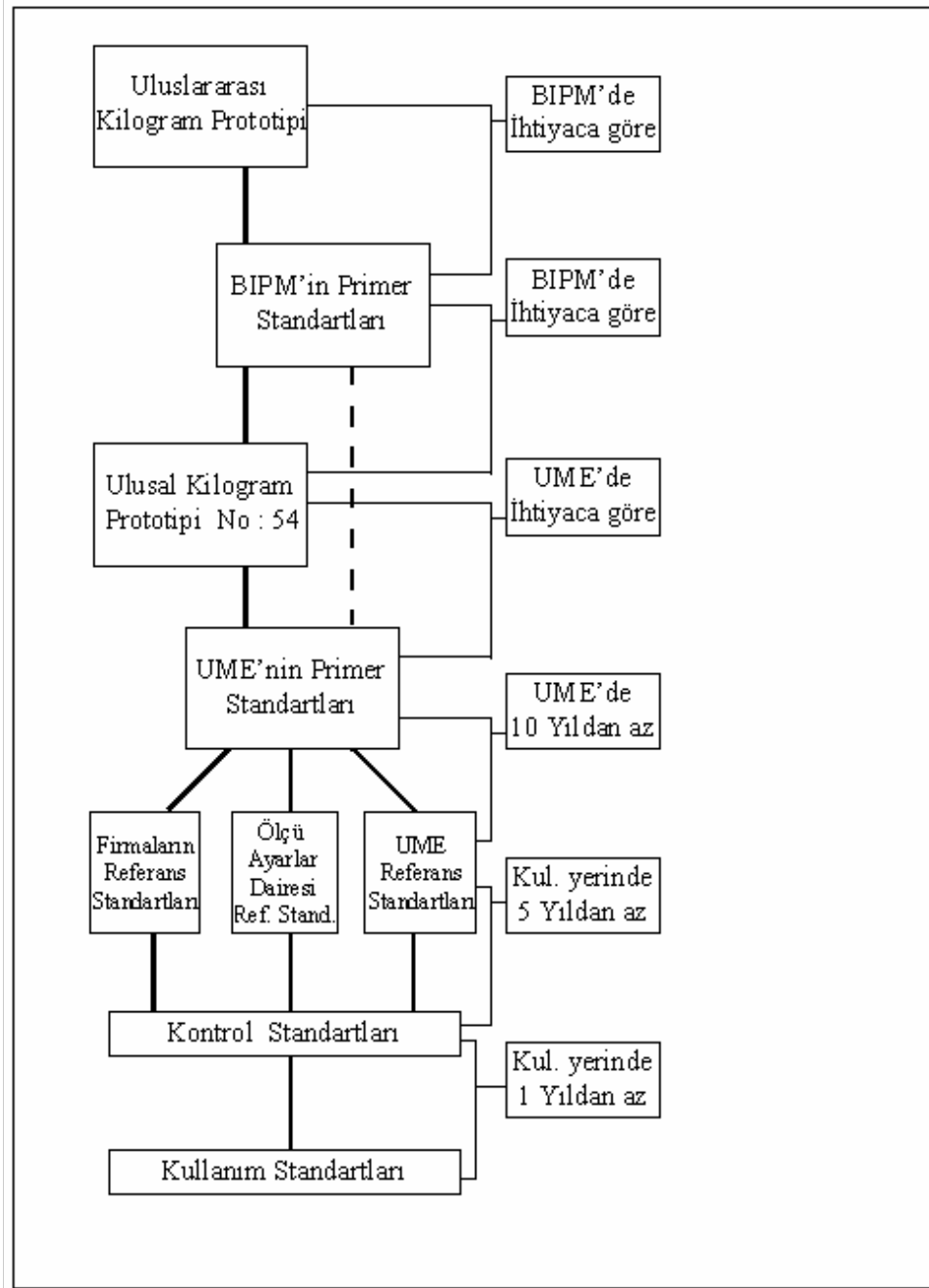
Türkiye 54 nolu ulusal kilogram prototipine sahiptir. Ulusal kilogram prototipimizin kütlesi, BIPM’de Mayıs 1989 ve Ekim 1992 tarihleri arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda;

$1 \text{ kg} + 0,203 \text{ mg}$ (23 Şubat 1991)

olarak belirlenmiştir. Prototipin kütle değerine atfedilen bileşik hata u_c : 0.0023 mg ’dır ve 0 °C ’de 54 nolu prototipin hacmi $46,3916 \text{ cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Kütle birimi kilogram ile diğer temel birimler arasındaki temel fark; kilogram biriminin gerçekleştirilmesi ve tanımlanmasında el yapımı bir nesneye bağlı kalınmasıdır. Mümkün olan en yüksek hassasiyetle kütle biriminin iletimini kontrol altına alabilmek için kütle standartları hiyerarşisi zinciri oluşturulmuştur. Bu hiyerarşi zinciri uluslararası kilogram prototipi ile başlar ve çalışma standartları ile biter. Kütle biriminin iletiminde kütle standartları veya ağırlıklar kullanılır. Ağırlıklar; şekil, boyut, malzeme, yüzey kalitesi, maksimum izin verilebilir hata

payları gibi fiziksel ve metrolojik karakteristiklere, uluslararası tavsiyelere ve de ulusal talimatlara göre imal edilir.

Tablo 2.1. Kütle standartları hiyerarşisi



Ölçü ve ayar merkezlerinde, kalibrasyon laboratuvarlarında veya endüstri firmalarının test merkezlerinde yüksek hassasiyette tartım işlemleri için referans

standart kütleler kullanılır. Hiyerarşik zincir içerisinde, referans standartları ulusal kilogram prototipine izlenebilir. Ulusal metroloji enstitülerinin birincil seviye standartları 5×10^{-8} kg'dan daha küçük bağıl bir hatayla belirlenir. Tekrar kalibrasyon aralığı süresince, kütle değişiminin çok küçük olması malzemenin özelliklerine (mekaniksel dayanıklılık, elektriksel ve manyetik özellikler, korozyona karşı direnç vb.) ve yüzey kalitesine bağlıdır. Yasal metroloji (OIML) kapsamında, hiyerarşik bir yapı içinde 1mg - 50 kg aralığında en yüksek doğruluktan, en düşük doğruluğa kadar kütle biriminin iletilebilmesi için ağırlıkların doğruluk sınıflarını tanımlamıştır. Bu tanımlamaya göre ağırlık sınıfları E1, E2, F1, F2, M1, M2 ve M3'tür. Ağırlıkların kütlelerinin nominal değerleri, 1×10^n kg, 2×10^n kg veya 5×10^n kg'dır. Kütle setleri genellikle; $(1,2,2,5) \times 10^n$ kg, $(1, 1, 1, 2, 5) \times 10^n$ kg, $(1, 1, 2, 5) \times 10^n$ kg, $(1, 1, 2, 2, 5) \times 10^n$ kg şeklindedir ve burada n; pozitif ya da negatif bir tamsayıdır veya sıfırdır.

2.1.1. Kütle metrolojisine göre ağırlıkların doğruluk sınıfları

Yasal metroloji organizasyonu çerçevesinde farklı doğruluk sınıflarına göre kullanılan kütleler genellikle kulplu geometriye sahiptir. Ancak konvektif etkilerin görünür kütle ölçümünde oluşturduğu değişimlerin incelenmesi için silindirik geometriye sahip Cr- Ni 304 malzemesinden imal edilen kütleler kullanılmıştır. DeneySEL ölçümlerde kullanılan bu kütleler de en az E1 doğruluk sınıfına sahip kütleler kadar hassas özelliklere sahiptir.

2.1.1.1. E1 doğruluk sınıfı

E1 sınıfı kütleler referans standardı olarak kullanılır. Uluslararası kilogram prototipine izlenebilir olan ulusal standartlar ile E2 sınıfı ağırlıklar arasında izlenebilirlik sağlar. Bu kütlelerin imalatında kullanılan malzeme anti-manyetik olmalıdır ayrıca dayanıklılığı ve aşınmaya karşı direnci en az östenik paslanmaz

çeliğinkine kadar olmalıdır. Ağırlıkların yüzeylerinde veya kulpunda, sınıflarına ve nominal değerlerine ilişkin herhangi bir değer bulunmaz.

2.1.1.2. E2 doğruluk sınıfı

E2 sınıfı ağırlıklar, F1 sınıfı ağırlıkların kalibrasyonlarında ve I. sınıf terazilerde kullanılır. E2 sınıfı ağırlıklar, E1 sınıfı ağırlıklar gibi tek parça olarak imal edilir. Ağırlıkların yüzeylerinde veya kulpunda sınıflarına ve nominal değerlerine ilişkin herhangi bir değer bulunmaz.

2.1.1.3. F1 doğruluk sınıfı

F1 sınıfı ağırlıklar, F2 sınıfı ağırlıkların kalibrasyonlarında ve I. sınıf terazilerde kullanılır. F1 sınıfı ağırlıkların, imalatında kullanılan malzemenin sertliği ve kırılganlığı, en az çekme piriç kadar olmalıdır. F1 sınıfı ağırlıkların kulpunda, sadece nominal değer belirtilir.

2.1.1.4. F2 doğruluk sınıfı

F2 sınıfı ağırlıklar, M1 sınıfı ağırlıkların kalibrasyonlarında ve II. sınıf terazilerde kullanılır. F2 sınıfı ağırlıkların imalatında kullanılan malzemenin sertliği ve kırılganlığı, en az çekme piriç kadar olmalıdır. F2 sınıfı ağırlıkların kulpunda nominal değer ve F işareti bulunur.

2.1.1.5. M1 doğruluk sınıfı

M1 sınıfı ağırlıklar, M2 sınıfı ağırlıkların kalibrasyonlarında ve II. sınıf terazilerde kullanılır. 5 kg'dan 50 kg'a kadar ağırlıklar, gri dökme demirden, 10 kg'dan daha küçük ağırlıklar pirinçten imal edilir. 1 g ve daha küçük ağırlıklar, oksidasyona karşı dayanıklı malzemeden yapılır. M1 sınıfı ağırlıkların üzerinde nominal değer, birim ve sınıfını belirten M1 işareti bulunur.

Yasal metroloji kapsamında çeşitli doğruluk sınıflarına ait kütlelerin (mg) cinsinden oluşturduğu maksimum izin verilen hata sınırları tablosu oluşturulmuştur.

Tablo 2.2. Maksimum izin verilen hata sınırları

Nominal Değer	δm (mg)						
	E1 Sınıfı	E2 Sınıfı	F1 Sınıfı	F2 Sınıfı	M1 Sınıfı	M2 Sınıfı	M3 Sınıfı
50 kg	25	75	250	750	2500	7500	25000
20 kg	10	30	100	300	1000	3000	10000
10 kg	5	15	50	150	500	1500	5000
5 kg	2,5	7,5	25	75	250	750	2500
2 kg	1,0	3,0	10	30	100	300	1000
1 kg	0,5	1,5	5	15	50	150	500
500 g	0,25	0,75	2,5	7,5	25	75	250
200 g	0,10	0,30	1,0	3,0	10	30	100
100 g	0,05	0,15	0,5	1,5	5	15	50
50 g	0,030	0,10	0,30	1,0	3,0	10	30
20 g	0,025	0,080	0,25	0,8	2,5	8	25
10 g	0,020	0,060	0,20	0,6	2	6	20
5 g	0,015	0,050	0,15	0,5	1,5	5	15
2 g	0,012	0,040	0,12	0,4	1,2	4	12
1 g	0,010	0,030	0,10	0,3	1,0	3	10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5	
200 mg	0,006	0,020	0,06	0,20	0,6	2,0	
100 mg	0,005	0,015	0,05	0,15	0,5	1,5	
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4		
20 mg	0,003	0,010	0,03	0,10	0,3		
10 mg	0,002	0,008	0,025	0,08	0,25		
5 mg	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20		
2 mg	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20		
1 mg	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20		

2.1.2. Kütle ölçüm yöntemi

Yüksek hassasiyetli kütle belirlemelerinde yerine geçirme yöntemi uygulanır. Referans standardı M_R ve test ağırlığı M_T aynı yük taşıyıcısında tartılır ve tartılan kütlelerin tartım farkı belirlenir.

$$\Delta m_w = m_{wT} - m_{wR} \quad (2.1)$$

Kütle belirlemede, özellikle sıcaklık değişimleri terazi göstergesinde lineer kaymalara sebep olacağından dolayı, referans standardı ve test ağırlığı arasında birden fazla karşılaştırma yapılır. Her bir tartım çevrimi ardı ardına yapılan dört tartımı içerir, yani; öncelikle referans kütlenin tartımı, test kütlesinin tartımı tekrar test kütlesinin ve ardından referans kütlenin tartımı gerçekleştirilir. Tartım farkı Δm_W , ardı ardına yapılan dört tartım değerinden elde edilir.

$$\Delta m_W = (m_{WT1} + m_{WT2} - m_{WR1} - m_{WR2}) / 2 \quad (2.2)$$

Kütle karşılaştırmalarında kullanılan terazilerde, gerçekte kuvvetler karşılaştırılır. Hava ortamında yapılan kütle karşılaştırmalarında havanın kaldırma kuvvetine dikkat edilmelidir. m_R kütleli ve ρ_R yoğunluklu referans standardı, m_T kütleli ve ρ_T yoğunluklu test ağırlığı yerine geçirme yöntemine göre karşılaştırıldığında;

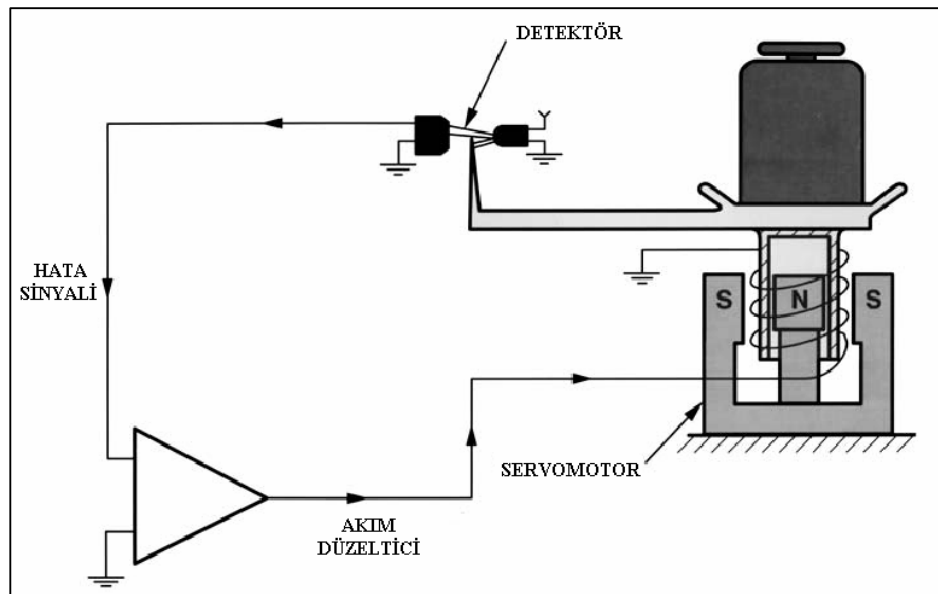
$$m_T = m_R + \rho_h \cdot (V_T - V_R) + \Delta m_W \quad (2.3)$$

kütle tartım denklemi elde edilir. [34] Bu denklemde kullanılan ifadeler sırasıyla,

m_T, m_R	:	Test ağırlığın ve referans standardın kütlesi (kg)
ρ_h	:	Hava yoğunluğu (kg.m ⁻³)
V_T, V_R	:	Test ağırlığın ve referans standardın hacmi (m ³)
Δm_W	:	Tartım cihazının düzeltilmiş gösterge farkı (kg)
$\rho_h (V_T - V_R)$	:	Havanın kaldırma kuvveti düzeltilmesi (kg)

2.1.3. Terazî metrolojisi

Terazi, bir cismin üzerindeki yerçekimi etkisinden yararlanarak o cismin kütlelerinin belirlenmesinde kullanılan ölçüm cihazıdır. Günümüzde metrolojik amaçla kullanılan hassas teraziler elektro manyetik kuvvet kompanzasyonu prensibine göre çalışırlar. Şekil 2.1’de basitleştirilmiş terazi ölçüm düzeneğine yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Terazî ölçüm düzeneği

2.1.3.1. Otomatik olmayan terazi

Otomatik olmayan yükün, yük taşıyıcısı üzerine konulmasında, kaldırılmasında ve tartım sonuçlarının alınmasında bir operatörün müdahalesini gerektiren tartım cihazıdır. Bu tür teraziler gösterge tertibatlı veya tertibatsız olabilirler. Ayrıca kendiliğinden dengelenen, yarı kendiliğinden dengelenen veya dengelenmeyen tipte olabilirler.

2.1.3.2. Otomatik terazi

Yükün, yük taşıyıcısı üzerine konulmasında, kaldırılmasında ve tartım sonuçlarının alınmasında bir operatörün müdahalesini gerektirmeyen tartım cihazıdır.

Ayrıca teraziler doğruluk sınıflarına göre;

Özel doğruluklu teraziler;	Mikro analitik teraziler,
Yüksek doğruluklu teraziler;	Analitik teraziler,
Orta doğruluklu teraziler;	Ticari amaçlı kullanılan teraziler,
Kaba doğruluklu teraziler;	Kaba teraziler,

olarak sınıflara ayrılırlar.

2.1.4. UME kütle ölçüm laboratuvarı şartları

UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) binası ve bu bina bünyesinde bulunan kütle laboratuvarı çok hassas kütle belirlemesi ölçümlerinin yapılmasına olanak verecek şekilde özel bir tasarımla inşa edilmiştir. Buna göre,

Laboratuvar çalışma ortamı;

- 1 -) Titreşimlerden minimum etkilenecek yapıdadır.
- 2 -) Laboratuvar bünyesinde kütle tartım işleminin yapıldığı tartım masası oda içerisinde titreşimin en az olduğu köşelere yerleştirilmiştir.
- 3 -) Laboratuvarın doğrudan güneş ışığına ve rüzgara maruz kalmaması için laboratuvarlar zemin altına inşa edilmiştir ve her bir laboratuvarın tek bir giriş kapısı vardır.

4 -) Laboratuvar bünyesinde bulunan kütle tartım işleminin yapıldığı tartım masasının stabil olması zamanla eğrilme, bel verme v.b. durumların olmaması için bu masalar mermer blok malzemelerden yapılmıştır.

5 -) Tartım masaları elektrostatik yüklenmelere karşı korunmalı yada anti-manyetik yapıdadır.

6 -) Laboratuvar ortam sıcaklığı, sıcaklık dalgalanmalarına karşı en küçük oranda etkilenecek şekildedir. $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassasiyeti ile laboratuvar şartlandırılmaktadır.

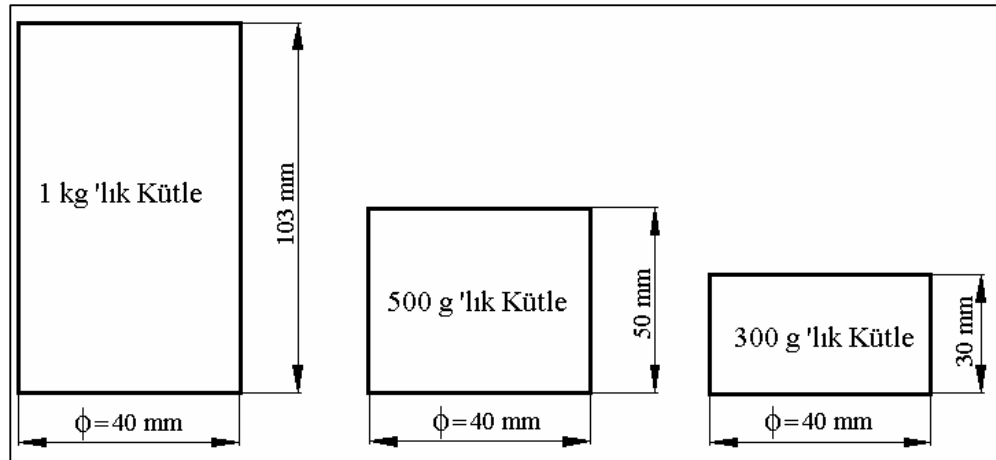
7 -) Bağıl nem oranı $\% 45 \pm \% 5$ arasında değişeceği şekilde şartlandırılmaktadır.

BÖLÜM 3. KONVEKTİF ETKİLER ÜZERİNE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş

3.1.1. Deney numunelerinin özellikleri

Deneylerde kullanılmak üzere nominal değerleri sırasıyla 1 kg ,500 g ve 300 g olan Cr – Ni 304 çeliğinden kütleler imal edildi. İmal edilen bu kütlelerin tasarımında deney düzeneğinde montaj edilecek yere uygunluk, deney süresince kütlelerin yanal ve yatay yüzeylerine etkiyecek havanın kaldırma kuvveti, sürtünme ve basınç kuvvetleri, dikkate alınarak silindirik bir geometri tasarımı seçildi. Şekil 2.1’de deneysel çalışmada kullanılan kütleler ve boyutları verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan kütleler

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan kütlelerin boyutsal özellikleri

Kütleler	Yanal Yüzey Alanı (cm ²)	Hacim (cm ³)
1 kg	129,4710	32,3584
500 g	62,8500	15,7080
300 g	37,7100	9,4248

Tüm kütleler için taban alanı; 3,1416 cm²

Tüm kütleler için taban çevresi; 12,1700 cm

Yapılan deneysel ölçümler süresince ölçümün yapıldığı ortamda etkili olan hava yoğunluğu yasal metroloji kapsamındaki kütle belirlemelerinde kullanılan yaklaşım formülünün uygulanması ile bulundu [34]. Buna göre yaklaşım formülü;

$$\rho_h = \frac{0,34848444 \cdot p - \phi \cdot (0,00252 \cdot t - 0,020582)}{273,15 + t} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir [34].

Yaklaşım formülünde kullanılan;

ρ_h : Ölçüm ortamındaki hava yoğunluğunu, (kg.m⁻³)

p : Basınç değerini, (mbar)

t : Ölçüm ortamının sıcaklığını, (°C)

ϕ : Bağıl nem değerini, (%) belirtmektedir.

Yaklaşım formülünün yanında hava yoğunluğu belirlemesinde CIPM formülü de kullanılmaktadır [34]. Bu formül basınç, sıcaklık, bağıl nem ve karbondioksit parametrelerini içermektedir. Hava yoğunluğu denklemi, ideal olmayan gaz denkleminde hesaplanır.

$$\rho = p \cdot M \cdot (Z \cdot R \cdot T)^{-1} \quad (3.2)$$

Buna göre, molar kütlesi M_v olan nemli havanın içindeki su buharı oranı x_v ve molar kütlesi M_a olan kuru havanın içindeki mol fraksiyonu $(1 - x_v)$ alırsak, gazın M molar kütlesi;

$$M = (1 - x_v)M_a + x_v.M_v = M_a - x_v(M_a - M_v) \quad (3.3)$$

veya

$$M = M_a \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (3.4)$$

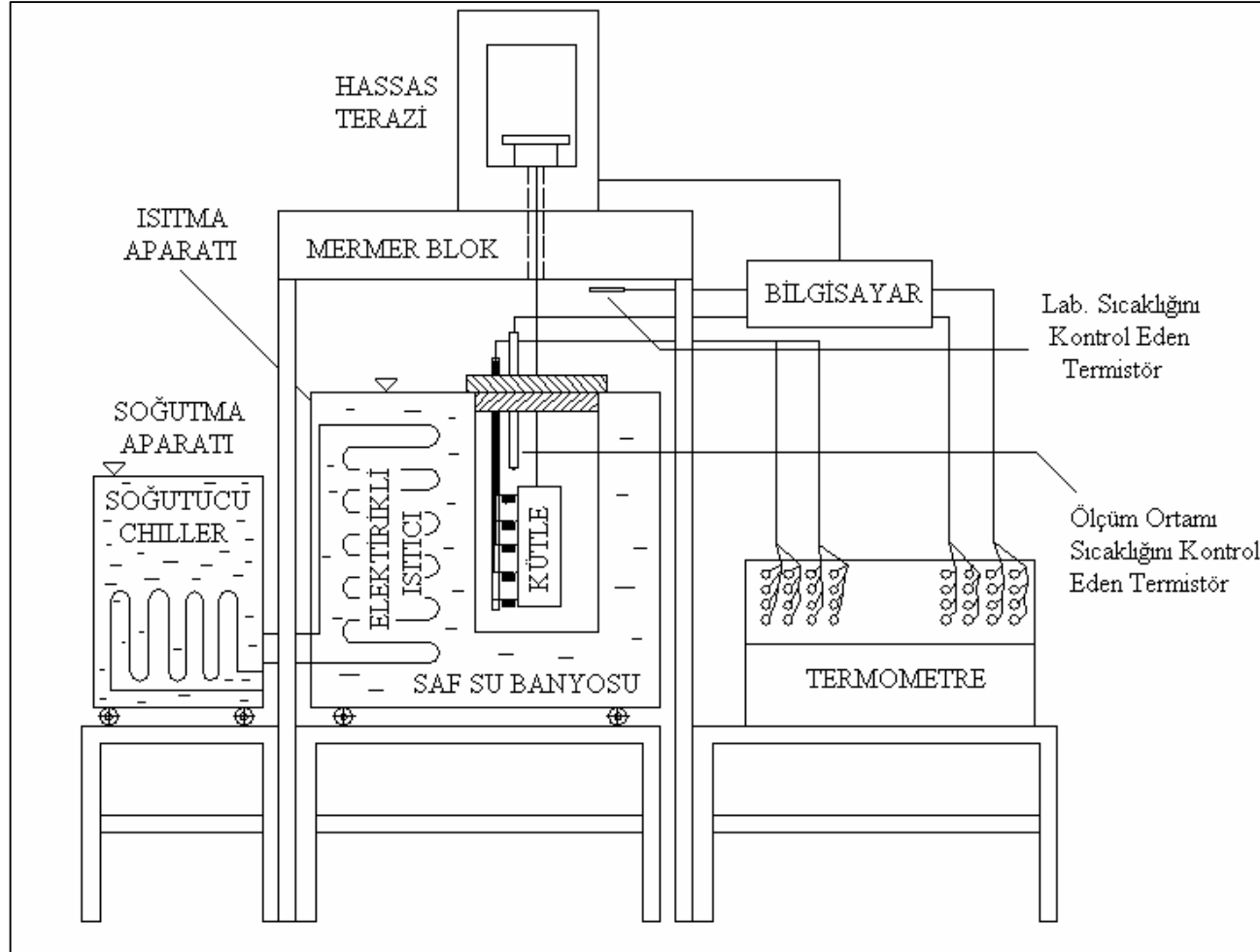
bulunur, denklem (3.2)'de bu ifadeyi yerine koyarsak, hava yoğunluğu ρ ;

$$\rho = \frac{p \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (3.5)$$

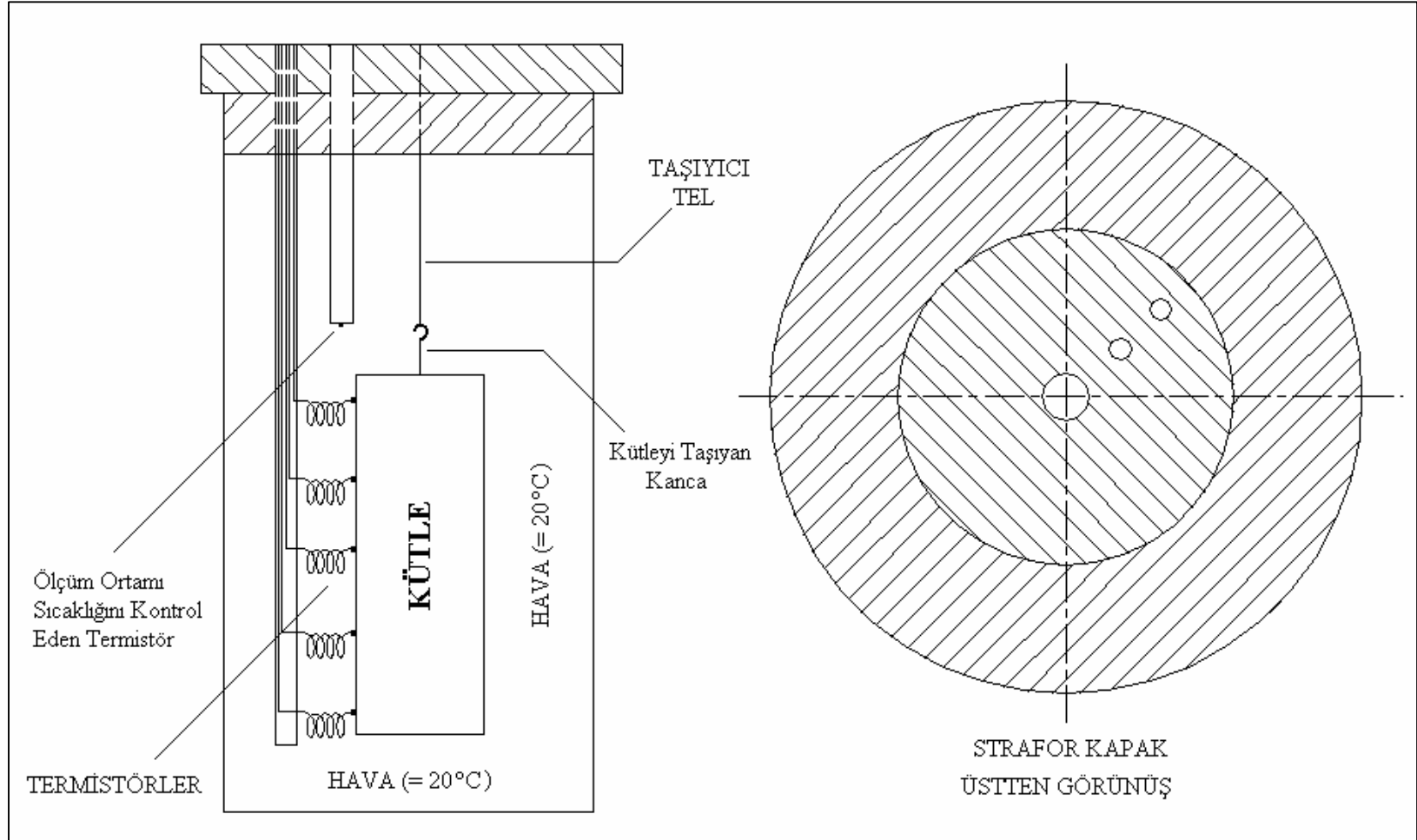
elde edilir. Nemli hava yoğunluğunun hesabında kullanılan bu eşitlik, Kütle Danışma Komisyonun 1981 haziran ayında toplanan kurulunda ve Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Komitesi CIPM tarafından 1981' Ekim ayında onaylanmıştır [34].

3.1.2. Deney düzeneği ve ölçümler

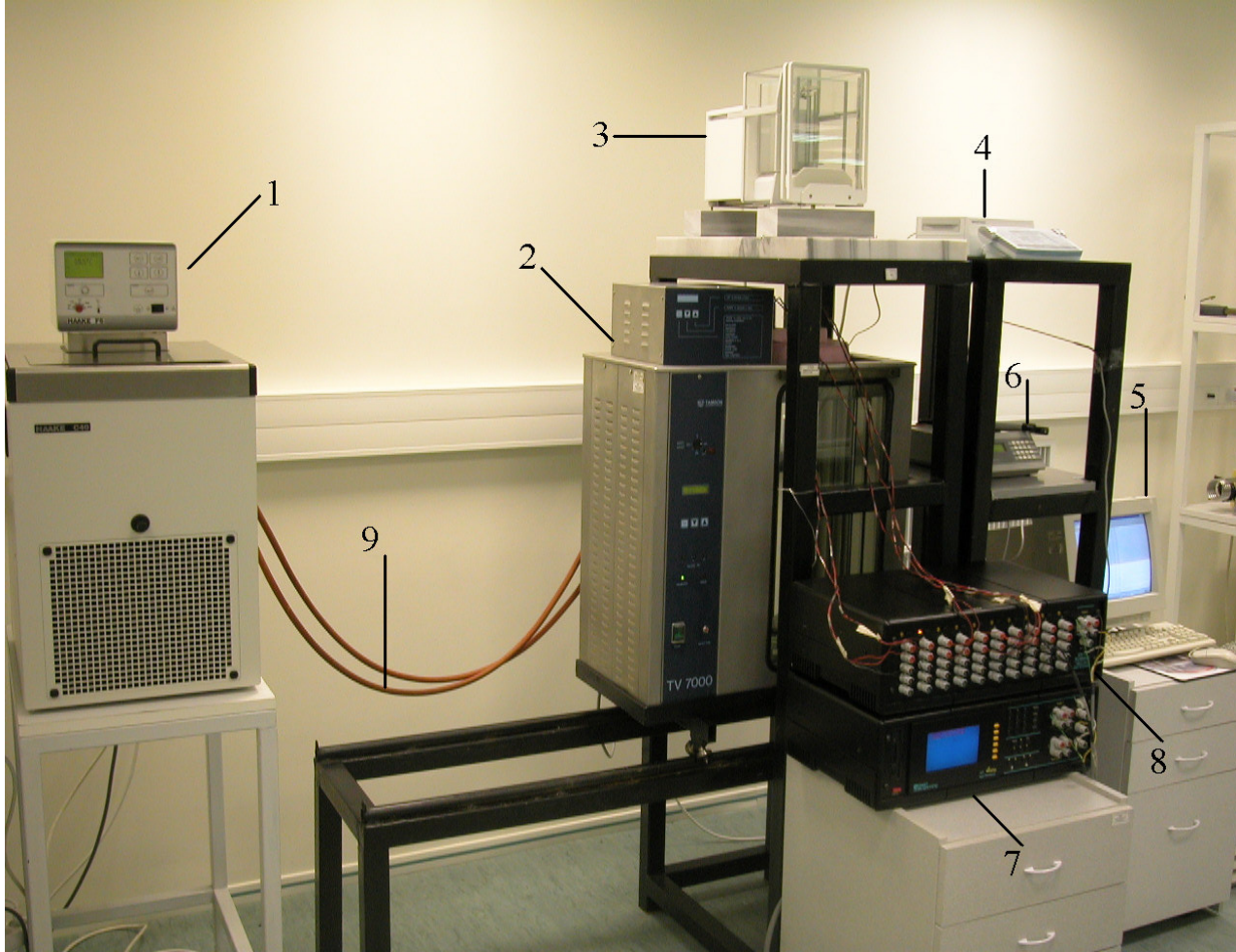
Konveksiyon etkilerinin görünür kütlede oluşturduğu değişimlerin incelenmesi çalışması kapsamında yapılan deneyler, TÜBİTAK – Ulusal Metroloji Enstitüsünde (UME) gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kurulan deney düzeneği ve deney düzeneğinin ayrıntılı şematik gösterimine şekil 3.2 ve şekil 3.3'de detaylı olarak yer verilmiştir.



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.3. Deney düzeneğinin detaylı şematik görünümü



- 1 – Soğutma Aparatı
- 2 – Isıtma Aparatı
- 3 – Hassas Terazi
- 4 – Hassas Terazi Göstergesi
- 5 – Bilgisayar
- 6 – Sıcaklık ve Nem Ölçer
- 7 – Süpertermometre
- 8 – Tarayıcı
- 9 – Soğutulmuş Su

Şekil 3.4. Deney düzeneğinin genel bir fotoğrafı

3.2. Deneysel Ölçüm Yöntemi ve Deney Düzeneği Elemanları

Şekil.3.2.- 3.3.'de şematik resmi ve şekil 3.4.'de genel bir fotoğrafı görülen deney düzeneğindeki ısıtma aparatı içinde ve şekil 3.3'te detaylı şematik resmi verilen camdan silindirik fanus vardır. Fanusta konveksiyon etkileri en ideal biçimde gözlemleyebilmek için sıcaklığı, ısıtma ve soğutma aparatı kullanılarak 20 °C' ye sabitlenmiş hava bulunmaktadır. Fanustaki havanın sıcaklığının 20 °C' ye sabitlenmesi fanusu çepeçevre saran ısıtma banyosu içindeki saf suyla ve bu saf suyun sıcaklığının ısıtma ve soğutma banyosunun eş zamanlı çalışıp banyo sıcaklığını kontrol etmesiyle gerçekleştirilmektedir. Nominal değerleri 1 kg, 500 g ve 300 g olan kütlelerin konveksiyon etkileri sonucu görünür kütlelerinde meydana gelen değişimleri incelemek üzere yapılan deneylerde sırasıyla aşağıda belirtilen adımlar izlenmiştir.

1 - Ölçümlere başlamadan önce 20 °C yüzey sıcaklığına sahip kütlelerin 20 °C' deki kontrollü ortam sıcaklığında dura değerleri alındı.

2 - Görünür kütlelerinde meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacıyla, 1 kg'lık nominal değere ve 20 °C yüzey sıcaklığına sahip silindirik kütle, yüzeyi ile aynı sıcaklıkta olan ortamda 10 saat boyunca ölçüldü. Ölçüm süresince kütlelerin yanal yüzeyindeki sıcaklık değişimi beş ayrı termistör ile okunup RS 232 seri haberleşmesi aracılığıyla 1 mK sıcaklık ölçüm hassasiyetine sahip süpertermometreden bilgisayara kaydedildi.

3 – Daha sonra, 1 kg'lık nominal değere sahip kütle ilk olarak 40 °C'ye kadar fırında ısıtıldı. Isıtma işleminin ardından kütle, ısı yalıtımı amacıyla üstten strafor kapakla örtülmüş içinde sıcaklığı 20 °C'ye sabitlenmiş hava bulunan cam silindirik fanusun içinde 10 saat boyunca sıcaklığı 20 °C'lik ortam sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakıldı. Soğuma işlemi süresince kütlelerin yanal yüzeyindeki sıcaklık değişimi yine beş ayrı termistör ile okundu. Bu zaman aralığı süresince görünür kütle değişimi de bilgisayara kaydedildi.

4 - Sırasıyla 1 kg'lık nominal değere sahip silindirik kütle önce 35 °C'ye ısıtıldı. Isıtma işleminin ardından kütle, ısı yalıtımı amacıyla üstten strafor kapakla örtülmüş sıcaklığı 20 °C'ye sabitlenmiş hava bulunan cam silindirik fanusun içinde 10 saat boyunca sıcaklığı 20 °C'lik ortam sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakıldı. Soğuma işlemi süresince kütlenin yanal yüzeyindeki sıcaklık değişimi yine beş ayrı termistör ile okundu. Bu zaman aralığı süresince görünür kütle değişimi de bilgisayara kaydedildi. 40 °C ve 35 °C için izlenen prosedür, aynı kütlenin 30 °C ve 25 °C'ye ısıtılıp 20 °C'ye kadar soğutulması ve geçen bu süre zarfında yüzey sıcaklığı ile görünür kütle değişimlerinin kaydedilmesi işlemleriyle tamamlandı.

5 - Yukarıdaki adımlarda 1 kg nominal değere sahip kütle için uygulanan yöntemler sırasıyla 500 g ve 300 g'lık nominal değere sahip kütleler içinde uygulandı.

3.2.1. Deney düzeneği elemanları

3.2.1.1. Hassas terazi

Terazi; bir cismin üzerindeki yerçekimi etkisinden yararlanarak o cismin kütlesinin belirlenmesinde kullanılan bir ölçüm cihazıdır. Teraziler, otomatik ve otomatik olmayan teraziler olarak ikiye ayrılırlar. Otomatik terazide; yükün, yük taşıyıcısı üzerine konulmasında, kaldırılmasında ve tartım sonuçlarının alınmasında bir operatörün müdahalesi gerekmez. Otomatik olmayan terazilerde ise yükün, terazi kefesi üzerine konulmasında, kaldırılmasında ve tartım sonuçlarının alınmasında bir operatörün müdahalesi gereklidir. Bu tür teraziler gösterge tertibatlı veya gösterge tertibatsız olabilirler. Terazilerde okunabilirlik, terazinin göstergesi tarafından belirlenebilen en küçük işaret anlamına gelen farkın kütle biriminde tanımlanmış değeridir. Tekrarlanabilirlik ise tanım olarak aynı yük ve (ölçüm metodu, kullanım

koşulları, gözlemci, zaman, terazi, konum gibi) aynı koşullar altında ölçüm cihazının aynı ölçüm değerini gösterme kabiliyeti şeklinde belirtilebilir. Deneyler süresince;

Maksimum ölçüm kapasitesi :	1109 g ,
Okunabilirliği :	0,01 mg,
Stabilizasyon süresi :	10 s - 20 s,
Çalışma sıcaklığı :	10 °C – 30 °C,
Boyutları :	241 x 433 x 289 mm,

olan Mettler Toledo marka AX1005 terazisi kullanılmıştır. Kullanılan hassas terazi karşı ağırlık prensibine göre çalışmakta olup 1 kg, 500 g ve 300 g'lık nominal değerlere sahip kütlelerin ağırlık ölçümüne imkan vermektedir.



Şekil 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan hassas terazi

3.2.1.2. Soğutma aparatı

Deneysel çalışma boyunca, ölçüm yapılan cam fanus içindeki havanın sıcaklığının 20 °C' nin üstüne çıkması durumunda devreye soğutma aparatı girmiş ve sıcaklık değerini tekrar 20 °C' lik seviyeye düşürmüştür. Haake C35P modeli soğutma aparatı kullanılmış olup sıcaklık stabilitesi $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ' dir. Deneyler süresince kullanılan soğutma aparatının boyutları 300 x 110 x 280 x 515 mm –(D x L x W x H), hacmi 8 l, soğutma kapasitesi 400 W, çalışma sıcaklığı - 35 °C – 200 °C,' dir. Şekil 3.6' da deneysel ölçümlerde kullanılan soğutma aparatının genel bir fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.6. Deneysel ölçümlerde kullanılan soğutma aparatının genel bir fotoğrafı

3.2.1.3. Isıtma aparatu

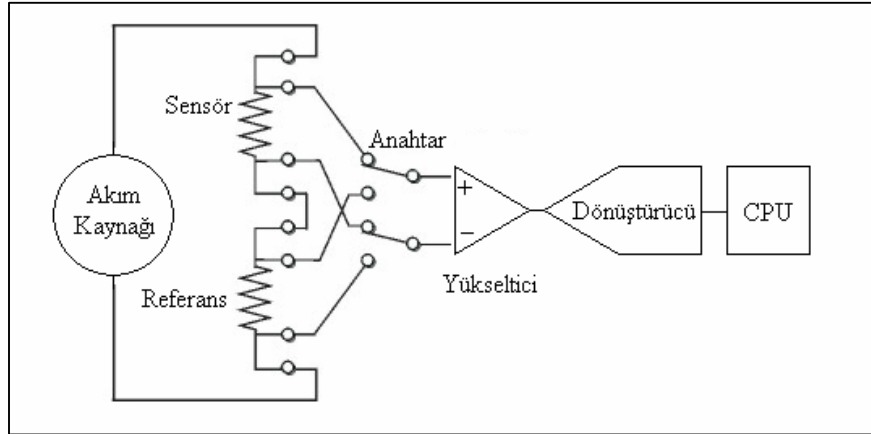
Isıtma aparatu deneyler süresince bünyesindeki saf suyun sıcaklığını sahip olduğu mikro prosesor modülüne bağı olarak çalışan Pt 100 sıcaklık sensörleri vasıtasıyla kontrol etmiştir. Isıtma aparatu bünyesinde bulunan, banyonun gerçek sıcaklığı ile banyonun set edilen sıcaklığı arasındaki farka bağı olarak bünyelerindeki ısıtıcıyı kısmen ya da tam olarak devreye alma kapasitesine sahip olup, istenen sıcaklığa ulaşıldığında $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ hassasiyette banyonun sıcaklık stabilitesini sağlamıştır. Deneyler süresince Tamson TV 7000 modeli ısıtma aparatu kullanılmış olup, ısıtma aparatının boyutları 600 x 350 x 630 x 885 mm –(D x L x W x H) hacmi 70 l, ısıtma gücü 2800 W, ısıtma sıcaklığı 280 $^{\circ}\text{C}$ ’ dir. Şekil 3.7’ de deneysel ölçümlerde kullanılan ısıtma aparatının genel bir fotoğrafı görölmektedir



Şekil 3.7. Deneysel ölçümlerde kullanılan ısıtma aparatının genel bir fotoğrafı

3.2.1.4. Süpertermometre

Deneyler süresince boyutları 515 x 320 x 178 mm –(W x D x H), ölçüm aralığı 0 k Ω – 500 k Ω , ölçüm hassasiyeti ± 1 mK, Hardscientific marka 1575 model süpertermometre kullanılmıştır. Bu cihaz RS 232 seri haberleşmeye uygun, çok kanallı ve deneysel ölçümler süresince kütle yüzey sıcaklıkları değerlerini belirlemek için kullanılan termistörlerin bağlı olduğu bir cihazdır. Şekil 3.8’den görülebileceği gibi süpertermometre temel olarak akım kaynağı ve bu akım kaynağına bağlı olarak çalışan kalibreli referans, termistör, yükseltici, dönüştürücü, cpu ve anahtardan oluşan bir ölçüm devresinden oluşmaktadır. Süpertermometrede akım kaynağı olarak termistörler, SPRT, Pt 100 veya termokupl benzeri cihazlar kullanılabilir. Bunların ölçüm aralığına göre cihazın ölçüm aralığı değişmektedir.



Şekil 3.8. Süpertermometre ölçüm devresinin basitleştirilmiş diyagramı

3.2.1.5. Termistörler

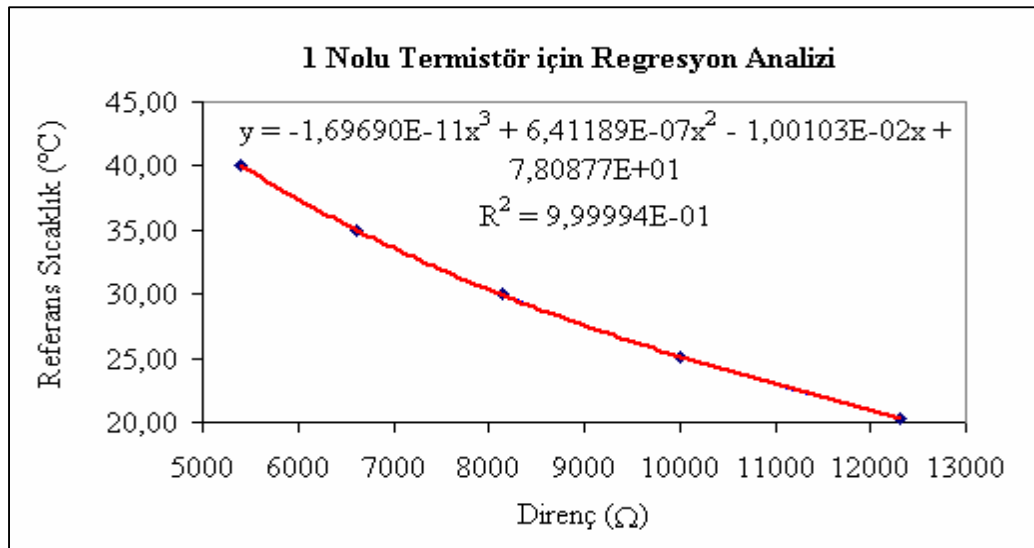
Deney süresince kütle yüzey sıcaklığı ölçümünde beş adet termistör kullanılmıştır, bunlar 0,0 °C – 40,0 °C arasındaki sıcaklık bölgesinde uluslararası sıcaklık ölçeği 1990’a göre UME sıcaklık standartları laboratuvarı referans termometresi kullanılarak karşılaştırma metodu ile kalibre edilmiştir. Ölçümlerde 0,0 °C – 40,0 °C arasında yağ banyosu kullanılarak sıcaklık standartları laboratuvarı referans termometresinin gösterdiği sıcaklık değerlerine karşılık, test termistörünün okuduğu direnç değerleri karşılaştırılmıştır. 1 nolu termistörün gösterdiği direnç değerleri kullanılarak, yapılan regresyon analizi sonucu aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$t_{ref} = a + b \cdot R + c \cdot R^2 + d \cdot R^3 \quad (3.6)$$

t_{ref} : Referans termometreden okunan sıcaklık değeri, / °C

R : 1 nolu termistörden okunan direnç değeri, / Ω

a, b, c, d : 1 nolu termistörle yapılan sıcaklık ölçümünde kullanılan denklemin katsayılarıdır.



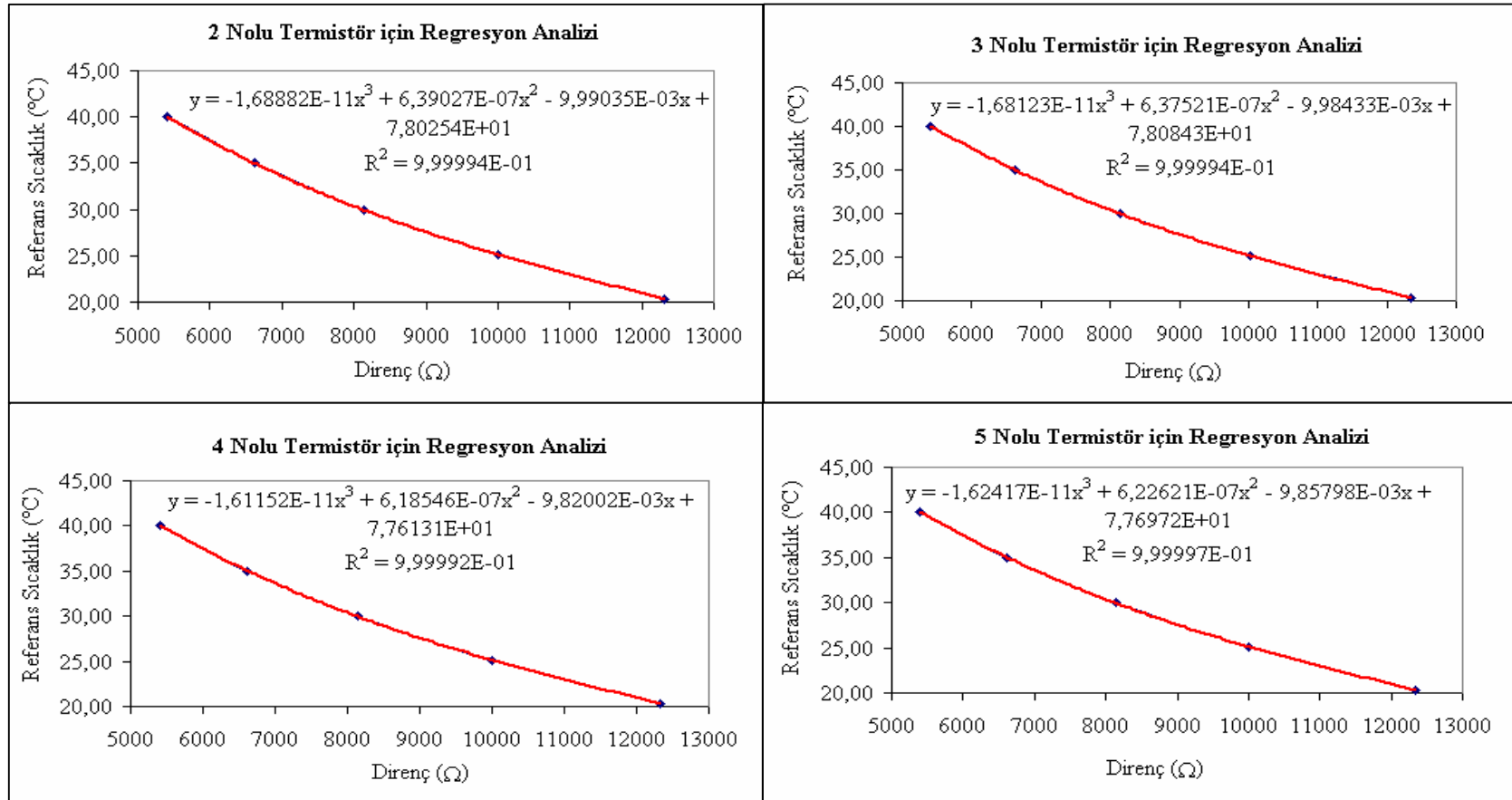
Şekil 3.9. 1 nolu termistör kalibrasyonu için yapılan regresyon analizi

Tablo 3.2. Deneysel ölçümlerde kullanılan termistörler için yapılan kalibrasyon ölçüm sonuçları ve belirsizlikleri

Referans Sıcaklık Değeri / °C	1 nolu Termistörden Okunan Direnç Değeri / Ω	2 nolu Termistörden Okunan Direnç Değeri / Ω	3 nolu Termistörden Okunan Direnç Değeri / Ω	4 nolu Termistörden Okunan Direnç Değeri / Ω	5 nolu Termistörden Okunan Direnç Değeri / Ω	Belirsizlik / °C
20,36	12316,30	12319,60	12343,60	12331,80	12330,50	0,01
25,13	9996,60	9997,50	10017,00	10003,20	9999,30	0,01
29,98	8133,90	8133,90	8150,50	8147,40	8135,70	0,01
35,00	6612,80	6612,50	6627,10	6622,30	6618,30	0,01
40,07	5398,90	5397,80	5410,80	5405,20	5399,60	0,01

Tablo 3.3. Deneyisel ölçümlerde kullanılan termistörlerin kalibrasyonu için yapılan regresyon analizi sonucu elde edilen katsayılar

Regresyon Analizi Sonucu Elde Edilen Katsayılar	1 nolu Termistör İçin Elde Edilen Katsayılar	2 nolu Termistör İçin Elde Edilen Katsayılar	3 nolu Termistör İçin Elde Edilen Katsayılar	4 nolu Termistör İçin Elde Edilen Katsayılar	5 nolu Termistör İçin Elde Edilen Katsayılar
a	$7,80877 \times 10^{+01}$	$7,80254 \times 10^{+01}$	$7,80843 \times 10^{+01}$	$7,76131 \times 10^{+01}$	$7,76972 \times 10^{+01}$
b	$-10,01031 \times 10^{-03}$	$-9,99035 \times 10^{-03}$	$-9,98433 \times 10^{-03}$	$-9,82002 \times 10^{-03}$	$-9,85798 \times 10^{-03}$
c	$6,41189 \times 10^{-07}$	$6,39027 \times 10^{-07}$	$6,37521 \times 10^{-07}$	$6,18546 \times 10^{-07}$	$6,22621 \times 10^{-07}$
d	$-1,69690 \times 10^{-11}$	$-1,68882 \times 10^{-11}$	$-1,68123 \times 10^{-11}$	$-1,61152 \times 10^{-11}$	$-1,62417 \times 10^{-11}$
R ²	9,99994E-01	9,99994E-01	9,99994E-01	9,99992E-01	9,99997E-01



Şekil 3.10. 1,2,3,4 ve 5 nolu termistör kalibrasyonu için yapılan regresyon analizi

3.2.1.6. Fırın

Deneyde kullanılan küteleri ısıtmak amacıyla dış boyutları 530 x 760 x 360 mm, iç boyutları 430 x 750 x 340 mm, 113 l hacminde, üç raflı, 500 W ısıtma kapasiteli fırın kullanıldı.



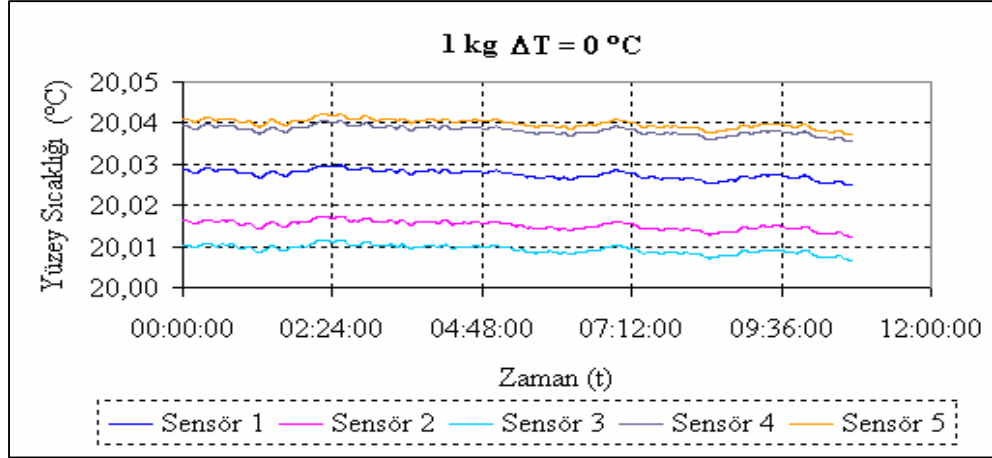
Şekil 3.11. Deneysel ölçümlerde kullanılan fırının genel bir fotoğrafı

3.3. Deneysel Ölçüm

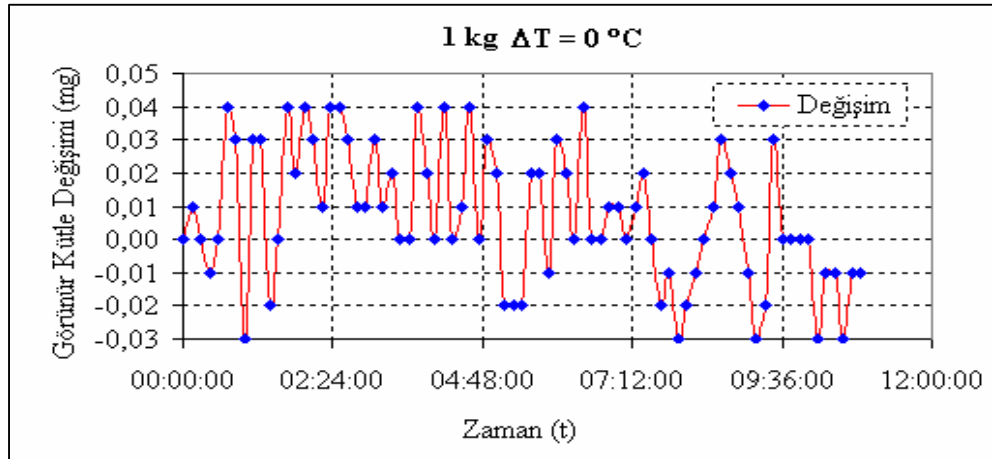
Deneysel ölçümlerde kullanılan nominal değerleri 1 kg, 500 g ve 300 g olan kütelerin konveksiyon etkileri sonucu görünür kütlelerinde meydana gelen değişimleri incelemek üzere; ölçümlere başlamadan önce 20 °C yüzey sıcaklığına sahip kütelerin 20 °C’ deki kontrollü ortam sıcaklığında tara değerleri alındı, görünür kütlelerinde meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacıyla, 1 kg’lık nominal değere ve 20 °C yüzey sıcaklığına sahip silindirik kütle, yüzeyi ile aynı sıcaklıkta olan ortamda 10 saat boyunca görünür kütlelerinde oluşan değişimleri

gözlemlemek amacıyla ölçüldü. Ölçüm süresince kütlenin yanal yüzeyindeki sıcaklık değişimi beş ayrı termistör ile okunup RS 232 seri haberleşmesi aracılığıyla süpertermometreden bilgisayara kaydedildi. 1 kg'lık nominal değere sahip kütle ilk olarak 40 °C'ye kadar fırında ısıtıldı. Isıtma işleminin ardından kütle, ısı yalıtımı amacıyla üstten strafor kapakla örtülmüş içinde sıcaklığı 20 °C'ye sabitlenmiş hava bulunan cam silindirik fanusun içinde 10 saat boyunca sıcaklığı 20 °C'lik ortam sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakıldı. Soğuma işlemi süresince kütlenin yanal yüzeyindeki sıcaklık değişimi yine beş ayrı termistör ile okundu. Bu zaman aralığı süresince görünür kütle değişimi de bilgisayara kaydedildi. Daha sonra sırasıyla 1 kg'lık nominal değere sahip silindirik kütle önce 35 °C'ye ısıtıldı. Isıtma işleminin ardından kütle, ısı yalıtımı amacıyla üstten strafor kapakla örtülmüş sıcaklığı 20 °C'ye sabitlenmiş hava bulunan cam silindirik fanusun içinde 10 saat boyunca sıcaklığı 20 °C'lik ortam sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakıldı. Soğuma işlemi süresince kütlenin yanal yüzeyindeki sıcaklık değişimi yine beş ayrı termistör ile okundu. Bu zaman aralığı süresince görünür kütle değişimi de bilgisayara kaydedildi. 40 °C ve 35 °C için izlenen prosedür, aynı kütlenin 30 °C ve 25 °C'ye ısıtılıp 20 °C'ye kadar soğutulması ve geçen bu süre zarfında yüzey sıcaklığı ile görünür kütle değişimlerinin kaydedilmesi işlemleriyle tamamlandı. Yukarıdaki adımlarda 1 kg nominal değere sahip kütle için uygulanan yöntemler sırasıyla 500 g ve 300 g'lık nominal değere sahip kütleler içinde uygulandı.

Şekil 3.12. ve şekil 3.13'te görülen 1 kg'lık nominal değere sahip kütlede ($\Delta T = 0$ °C) olması durumunda kütle yüzeyi sıcaklığının 20,01 °C ile 20,04 °C sıcaklık değerleri arasında değiştiği ölçülmüştür. 10 saat boyunca yapılan bu ölçüm sonucu yüzey sıcaklığı değerlerinin değişimi, deney düzeneğinde kullanılan ısıtma ve soğutma aparatlarının sağlamış olduğu kararlılığı göstermektedir.



Şekil 3.12. 1 kg'lık kütlede ($\Delta T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) olması durumunda yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi



Şekil 3.13. 1 kg'lık kütlede yüzey sıcaklığı ortamla aynı sıcaklık değerinde iken daralanmış ağırlıkta on saat boyunca gözlenen değişim

1 kg, 500 g ve 300 g nominal değerlere sahip kütleler deneysel ölçüm prosedürüne göre sırasıyla 25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C yüzey sıcaklığına kadar ısıtılmışlardır. Isıtılan bu kütlelerin deney süresince, 20 °C 'lik ortam sıcaklığına ulaşınca dek gösterdiği değişim deneysel verilere uygulanan eğri uydurma işlemi yöntemi sonucu elde edilen üssel değişim sayesinde aşağıda grafikler de görüldüğü gibi çıkarılmıştır. Şekil 3.14'dan görülebileceği gibi 20, 15, 10 ve 5 °C'lik (ΔT) sıcaklık farkında, 1 kg nominal değerindeki kütle yüzey sıcaklığı değerleri yapılan ölçüm sonucu 10 saat

süresince 20 °C'lik ortam koşulu sıcaklığına stabil olarak ulaşmıştır. Yapılan eğri uydurma işlemleri sonucu aşağıdaki denklemler elde edilmiştir. Buna göre ;

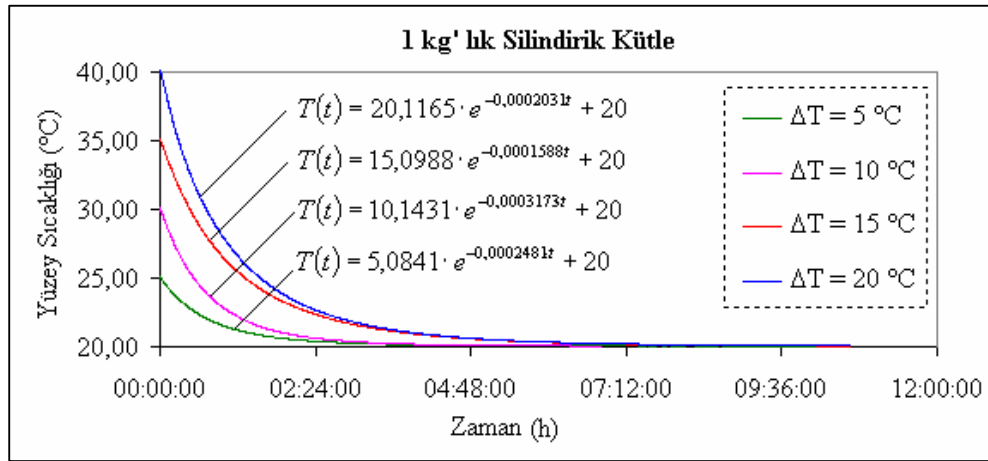
$$\Delta T = 20 \text{ °C için; } T(t) = 20,1165 \cdot e^{-0,0002031t} + 20 \quad (3.7)$$

$$\Delta T = 15 \text{ °C için; } T(t) = 15,0988 \cdot e^{-0,0001588t} + 20 \quad (3.8)$$

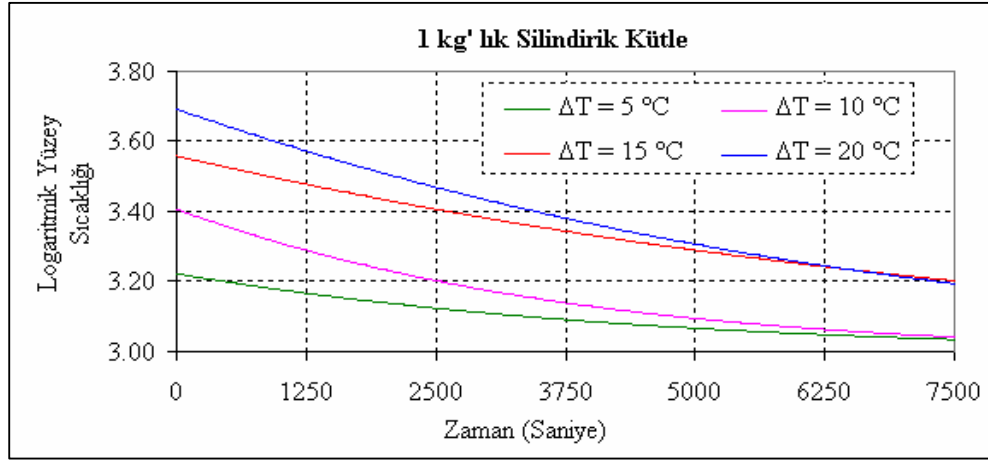
$$\Delta T = 10 \text{ °C için; } T(t) = 10,1431 \cdot e^{-0,0003173t} + 20 \quad (3.9)$$

$$\Delta T = 5 \text{ °C için; } T(t) = 5,0841 \cdot e^{-0,0002481t} + 20 \quad (3.10)$$

soğuma eğrileri denklemleri elde edildi.

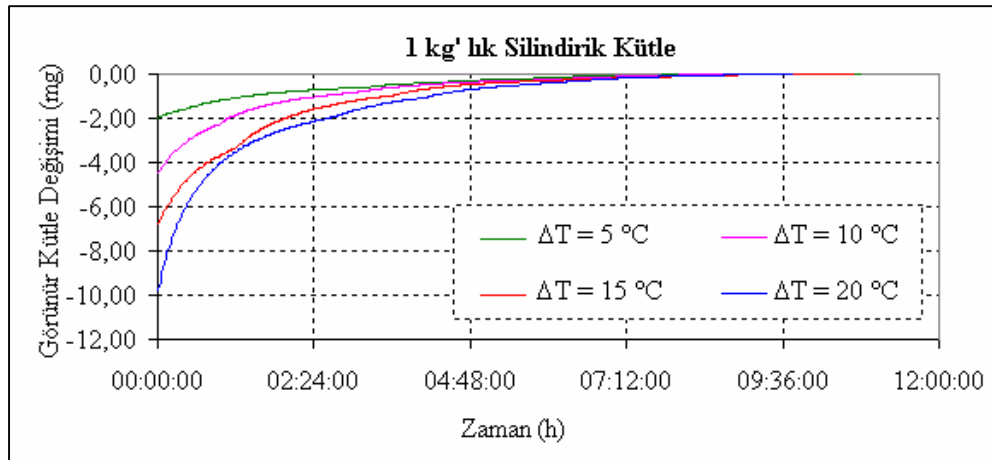


Şekil 3.14. 1 kg'lık kütlede farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi

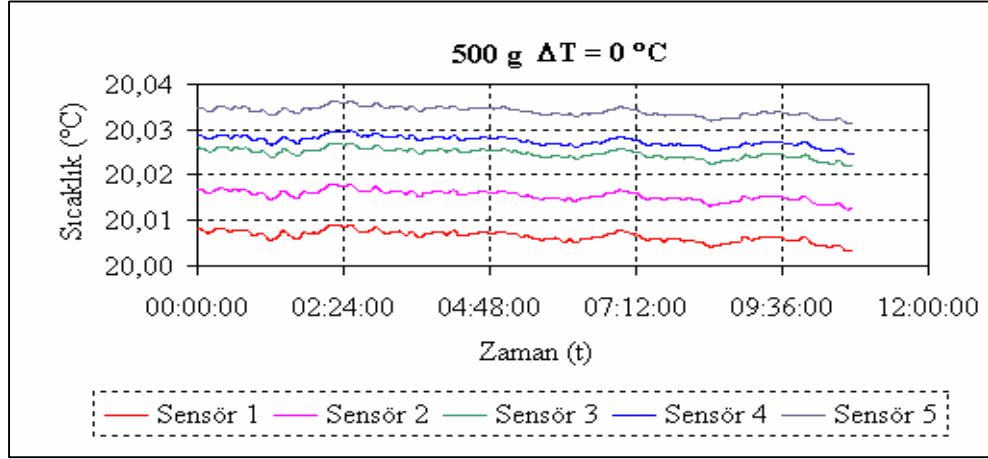


Şekil 3.15 1 kg'lık kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi

Şekil 3.15'den görülebileceği gibi 1 kg'lık nominal değere sahip silindirik kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değişimi 7500 s' lik bir zaman diliminde doğrusal değişim göstermektedir.

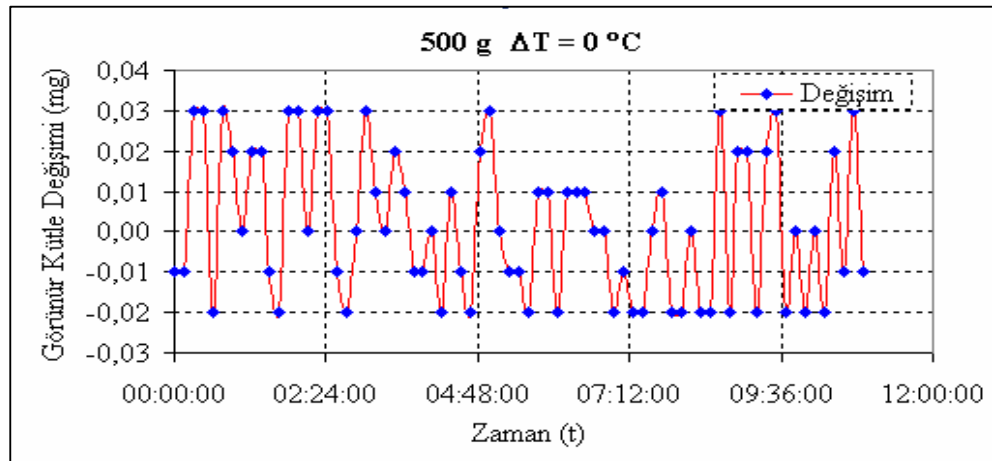


Şekil 3.16. 1 kg'lık kütlede farklı ΔT değerleri için görünür-kütle değerinin değişimi



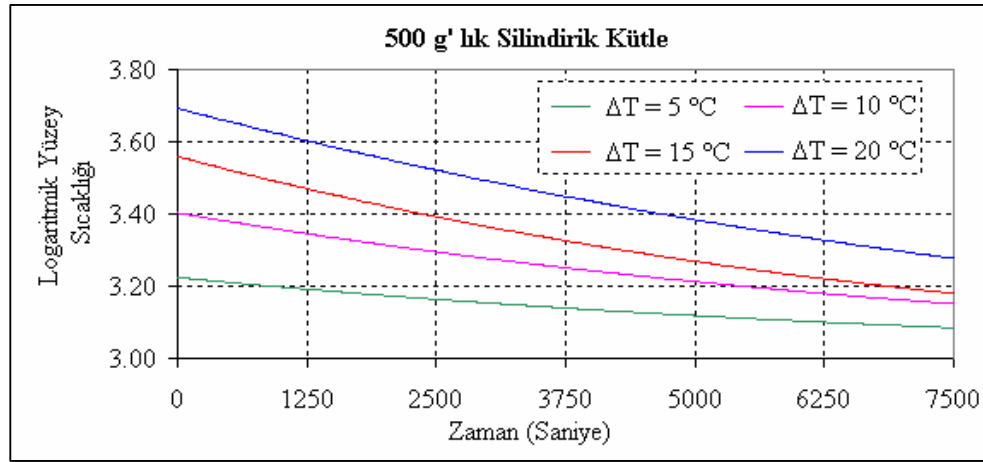
Şekil 3.17. 500 g'lık kütlede ($\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) olması durumunda yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi

Şekil 3.17'da görülen 500 g'lık nominal değere sahip kütlede $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında 10 saat boyunca yapılan ölçüm sonucunda kütle yüzeyi sıcaklığının $20,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $20,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri arasında değiştiği ölçülmüştür.



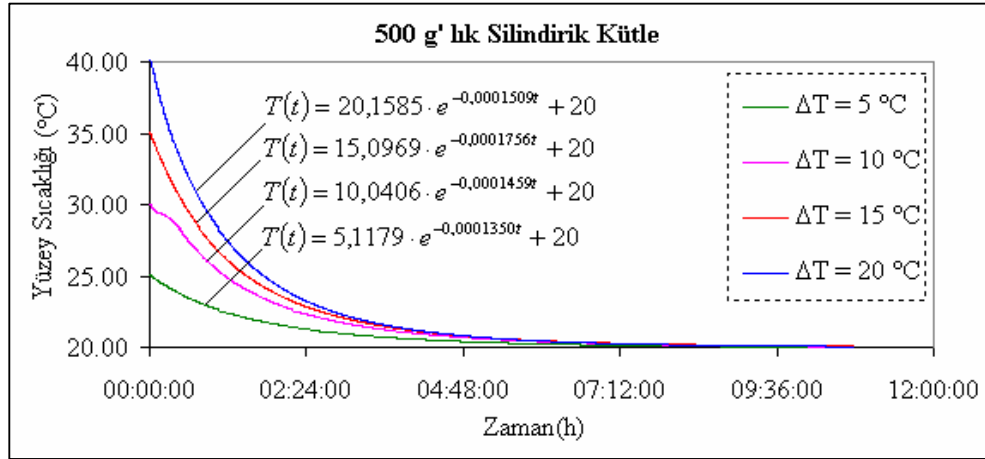
Şekil 3.18. 500 g'lık kütlede yüzey sıcaklığı ortamla aynı sıcaklık değerinde iken daralanmış ağırlıkta on saat boyunca gözlenen değişim

Şekil 3.18'den görülebileceği gibi 500 g'lık nominal değere sahip kütlede yüzey sıcaklığı 20 °C iken daralanmış olan ağırlıkta on saat boyunca yapılan ölçümler sonucu görünür kütle değerinin 0,03 mg ile – 0,02 mg değerleri arasında değişim gösterdiği ölçülmüştür, bu ölçümde on saat boyunca hassas terazinin maksimum 50 µg'lık sapma yapabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.19 500 g'lık kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi

Şekil 3.19'dan görülebileceği gibi 500 g'lık nominal değere sahip silindirik kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değişimi 7500 s' lik bir zaman diliminde doğrusal değişim göstermektedir.



Şekil 3.20. 500 g'lık kütlede farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 3.20'den görülebileceği gibi 20, 15, 10 ve 5 °C'lik (ΔT) sıcaklık farkında 500 g nominal değerindeki kütlenin yüzey sıcaklığı değerlerinin, 10 saat süresince yapılan ölçümler sonucu 20 °C'lik ortam sıcaklığına stabil olarak ulaştığı ölçülmüştür. Ayrıca grafikte görüldüğü gibi yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi deneysel verilere uygulanan eğri uydurma işlemi sonucu elde edilen üssel değişim sayesinde aşağıda grafikler de görüldüğü gibi çıkarılmıştır. Buna göre;

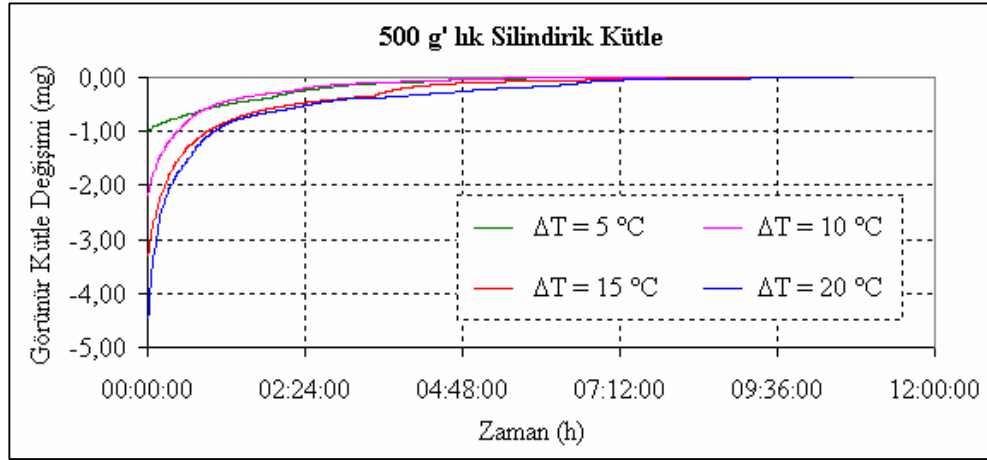
$$\Delta T = 20 \text{ °C için; } T(t) = 20,1585 \cdot e^{-0,0001509t} + 20 \quad (3.11)$$

$$\Delta T = 15 \text{ °C için; } T(t) = 15,0969 \cdot e^{-0,0001756t} + 20 \quad (3.12)$$

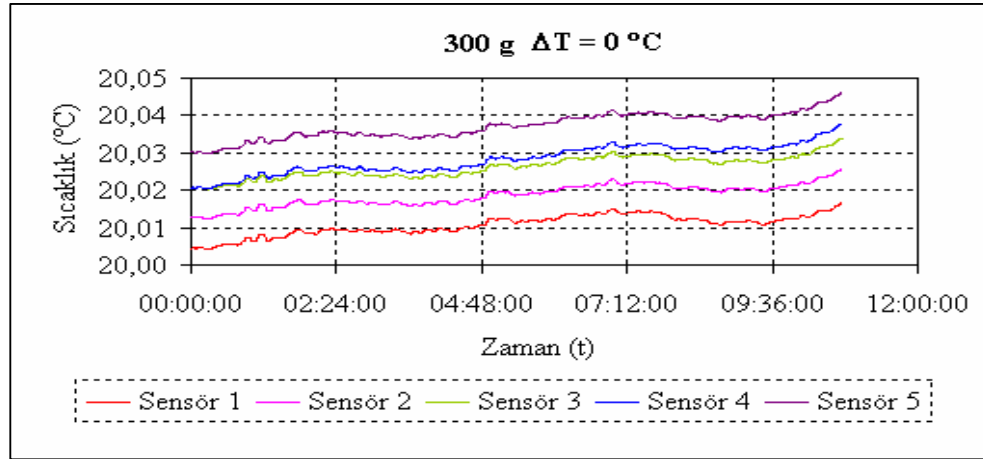
$$\Delta T = 10 \text{ °C için; } T(t) = 10,0406 \cdot e^{-0,0001459t} + 20 \quad (3.13)$$

$$\Delta T = 5 \text{ °C için; } T(t) = 5,1179 \cdot e^{-0,0001350t} + 20 \quad (3.14)$$

şeklindedir.

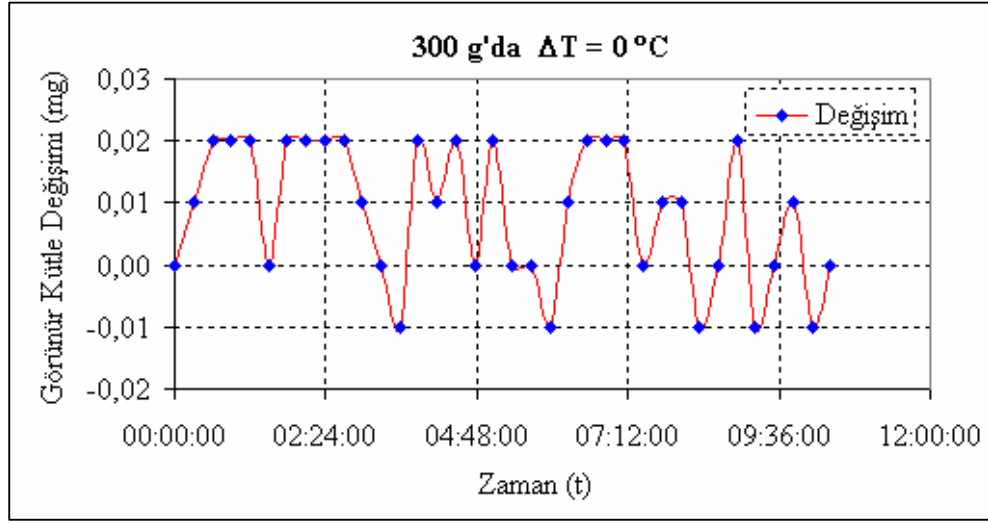


Şekil 3.21. 500 g'lık kütlede çeşitli (ΔT) değerlerine göre görünür kütle değerinin değişimi



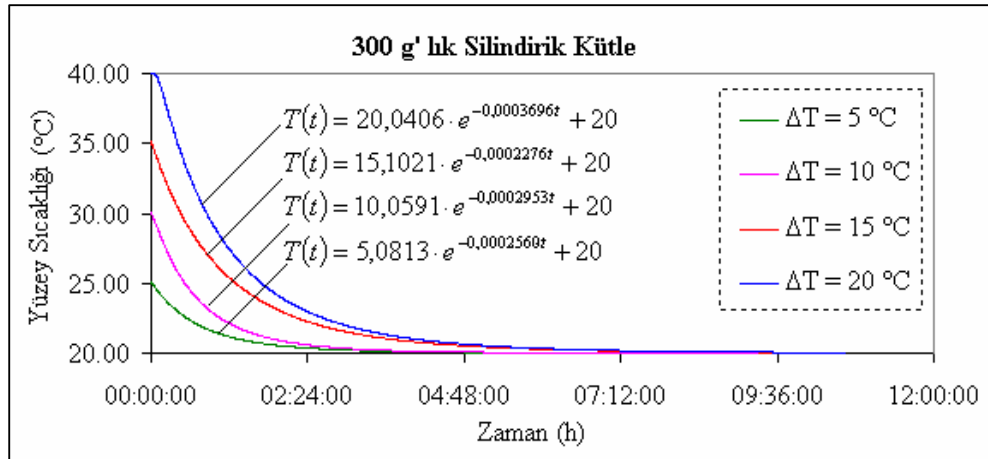
Şekil 3.22. 300 g'lık kütlede ($\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) olması durumunda yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi

Şekil 3.22'de görülen 300 g'lık nominal değere sahip kütlede, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında kütle yüzeyi sıcaklığının $20,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $20,045\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerleri arasında değiştiği ölçülmüştür.



Şekil 3.23. 300 g'lık kütlede yüzey sıcaklığı ortamla aynı sıcaklık değerinde iken daralanmış ağırlıkta on saat boyunca gözlenen değişim

Şekil 3.23'de 300 g'lık nominal değere sahip kütlede yüzey sıcaklığı 20 °C iken on saat boyunca yapılan gözlemler sonucu 0,02 mg ile – 0,01 mg değerleri arasında bir değişim gösterdiği ölçülmüştür, bu durum yapılan ölçümün on saat boyunca maksimum 30 µg'lık sapmalar yapabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.24. 300 g'lık kütlede farklı yüzey sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 3.24’den görülebileceği gibi 20, 15, 10 ve 5 °C’lik (ΔT) sıcaklık farkında 300 g nominal değerindeki kütle yüzey sıcaklığı değerleri 10 saat süresince yapılan ölçüm sonucu 20 °C’lik ortam koşulu sıcaklığına stabil olarak ulaşmıştır. Grafikten de görülebileceği gibi yüzey sıcaklığı değerinin zamana bağlı değişimi eğri uydurma işlemi yapılmak suretiyle aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Buna göre ;

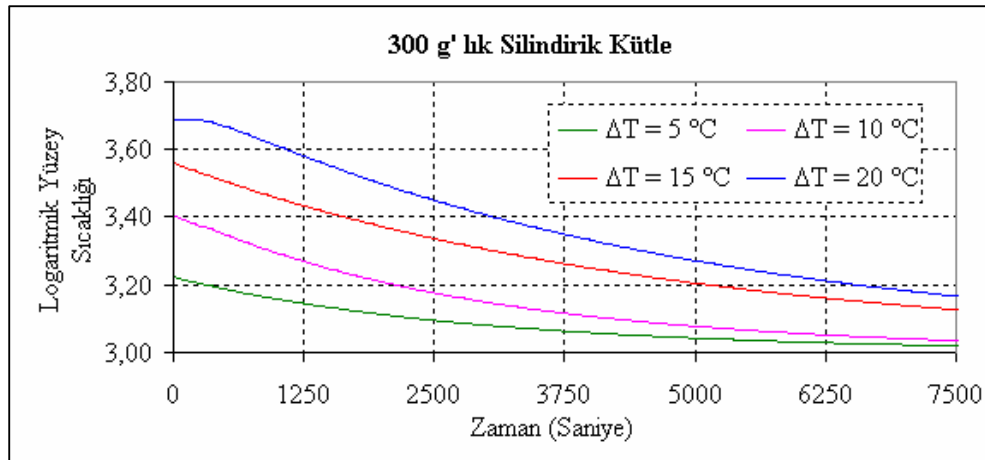
$$\Delta T = 20 \text{ °C için; } T(t) = 20,0406 \cdot e^{-0,0003696t} + 20 \quad (3.15)$$

$$\Delta T = 15 \text{ °C için; } T(t) = 15,1021 \cdot e^{-0,0002276t} + 20 \quad (3.16)$$

$$\Delta T = 10 \text{ °C için; } T(t) = 10,0591 \cdot e^{-0,0002953t} + 20 \quad (3.17)$$

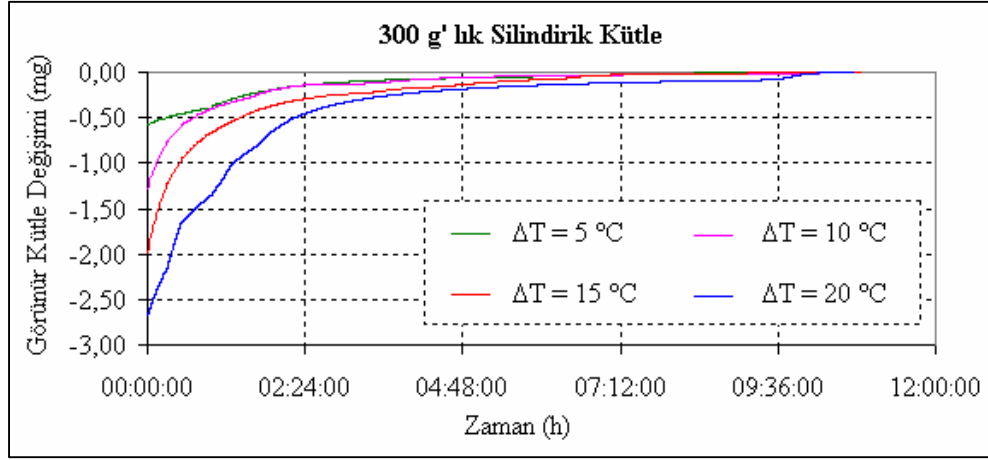
$$\Delta T = 5 \text{ °C için; } T(t) = 5,0813 \cdot e^{-0,0002560t} + 20 \quad (3.18)$$

şeklindedir.



Şekil 3.25. 300 g'lık kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değerinin zamanla değişimi

Şekil 3.25’den görülebileceği gibi 300 g’lık nominal değere sahip silindirik kütlede logaritmik yüzey sıcaklığı değişimi 7500 s’ lik bir zaman diliminde doğrusal değişim göstermektedir.



Şekil 3.26. 300 g'lık kütlede çeşitli (ΔT) sıcaklık farkı için, zamana göre görünür kütle değerinin değişimi

3.4. Havanın Kaldırma Kuvveti Nedeniyle Görünür Kütle Ölçümündeki Değişim

Deneyler süresince 1 kg, 500 g, 300 g gibi farklı nominal değerlerdeki kütleler için, 25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C gibi farklı yüzey sıcaklığı değerlerinde ölçüm ortamında havanın kaldırma kuvveti nedeniyle görünür kütle ölçümünde oluşacak değişim; aşağıda verilen ve 1981 yılında Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Komitesi'nde (CIPM) kabul edilen hava yoğunluğu formülünden hesaplanır. Bu formülde etkin olan parametreler sıcaklık, basınç, bağıl nem, CO₂ miktarıdır. Buna göre;

$$W' = W - \rho_h \cdot V , \quad (3.19)$$

$$\Delta W = - \left(\frac{dV}{dT} \cdot \rho_h + V \cdot \frac{\partial \rho_h}{\partial T} \right) \cdot \Delta T, \quad (3.20)$$

$$\frac{dV}{dT} = 3 \cdot \alpha \cdot V, \quad (3.21)$$

Havadaki su buharı oranının molar kesri olan (x_v)'nin sabit değeri için;

$$\frac{\partial \rho_L}{\partial T} = - \frac{p \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T^2}, \quad (3.22)$$

Formüllerde kullanılan ifadeler sırasıyla ;

V (cm³), ölçümlerde kullanılan kütlelerin hacmini, ρ_h (g / cm³), ölçümler boyunca etkili olan ortalama hava yoğunluğunu, T (K), kontrollü ölçüm ortamındaki hava sıcaklığını, α , ölçümlerde kullanılan Cr-Ni 304 kütleleri için ısı genleşme katsayısı, p (Pa), ölçümler süresince etkili olan ortalama hava basıncı, M_a (g / mol), ölçümler boyunca etkili olan kuru havanın molar kütlesi Z , ($P = 101325$ Pa, $T = 293$ K ve % 50) bağıl nemdeki havanın sıkıştırılabilirlik faktörü, R (J.mol⁻¹ K⁻¹), havanın molar gaz sabiti, olmak üzere havanın kaldırma kuvveti etkisi ile görünür kütle ölçümünde meydana gelecek değişikliklerde, 1kg, 500 g ve 300 g için hacim değerleri,

$$\rho_h = 1,18374 \cdot 10^{-3} \text{ g / cm}^3 \text{ ortalama hava yoğunluğu,}$$

$$T = 293 \text{ K, ölçüm ortamındaki } 20 \text{ °C'ye sabitlenmiş havanın sıcaklığı,}$$

$$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ K,}$$

$$P = 101325 \text{ Pa ortamın hava basıncı,}$$

$$M_a = 28,9635 \text{ g / mol,}$$

$$Z = 0,999598$$

$R = 8,31451 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ değerleri hesaplamalarda kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar tabloda verilmiştir.

Tablo 3.4. Havanın kaldırma kuvveti etkisiyle görünür kütle ölçümünde değişimler

Kütle	ΔT (°C)	$\frac{dV}{dT} \cdot \rho_h \cdot \Delta T$ (mg)	$V \cdot \frac{\partial \rho_h}{\partial T} \cdot \Delta T$ (mg)	$ \Delta W_{H.K.K} $ (mg)
1kg	20,00	0,04	-2,66	2,62
	15,00	0,03	-2,00	1,97
	10,00	0,02	-1,33	1,31
	5,00	0,01	-0,67	0,66
500 g	20,00	0,02	-1,29	1,27
	15,00	0,01	-0,97	0,96
	10,00	0,01	-0,65	0,64
	5,00	0,00	-0,32	0,32
300 g	20,00	0,01	-0,78	0,76
	15,00	0,01	-0,58	0,57
	10,00	0,01	-0,39	0,38
	5,00	0,00	-0,19	0,19

3.5. Deneysel Çalışmanın Hata Analizi

Yapılan tüm deneysel çalışmalarda hata analizi hesabı için ölçümün girdi büyüklüklerinin dikkate alınıp modellenmesi gerekir, buna göre;

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3.23)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{N,k}) \quad (3.24)$$

Ölçümü yapılacak olan W ifadesini bu denkleme göre düzenlersek ;

$$W = f(\rho_h, V, \Delta W) \quad (3.25)$$

$$W' = W - \rho_h \cdot V \quad (3.26)$$

Hava yoğunluğundan gelen hataları hesaplarken, hava yoğunluğu denkleminin kendisinden gelen hataları ve hava yoğunluğu denkleminin uygulandığı andaki, ölçülen büyüklüklerden gelen hataları göz önünde bulundurmamız gerekir.

Bu durumda denklemin kendisinden gelen hata $U_f / \rho_h = 2 \times 10^{-4}$ dür. 20 °C ortam sıcaklığında, % 45 nemde ve 1010 mbar basınç ortamında hava yoğunluğunun hatasını belirleye bilmek için, denklemin p,T,φ'ye göre kısmi türevleri alınır. Böylece;

$$\partial \rho_h / \rho_h \partial p \cong 1 \times 10^{-3} \times U_p$$

$$\partial \rho_h / \rho_h \partial \phi \cong - 1 \times 10^{-4} \times U_\phi$$

$$\partial \rho_h / \rho_h \partial T \cong - 4 \times 10^{-3} \times U_T$$

ifadeleri elde edilir. Toplam hava yoğunluğundan gelen hata ise;

$$\left[\frac{U_c(\rho_h)}{\rho_h} \right]^2 = \left[\frac{U_f}{\rho_h} \right]^2 + \left[\frac{\partial \rho_h}{\rho_h \partial p} U(p) \right]^2 + \left[\frac{\partial \rho_h}{\rho_h \partial T} U(T) \right]^2 + \left[\frac{\partial \rho_h}{\rho_h \partial \phi} U(\phi_v) \right]^2 \quad (3.27)$$

$$U_{\rho_h} = 0,0027368 \text{ mg / cm}^3, \text{tür.}$$

Buna göre 1 kg nominal değere sahip silindirik kütle için çeşitli sıcaklık farkı değerlerine göre deneysel olarak belirlenen görünür kütle ölçümündeki değişimlerin hesaplanmasında hata; 20 °C ortam sıcaklığında, % 45 nemde ve 1010 mbar basınç ortamında hava yoğunluğunun değeri ve bu denklemin hatası kullanılır,

$$\rho_h = \frac{0,34848444 \cdot p - \phi \cdot (0,00252 \cdot t - 0,020582)}{273,15 + t}$$

$$\rho_h = 1,1959291 \text{ mg/cm}^3,$$

Konvansiyonel kütle belirlemesi işleminde referans olarak belirlenen hava yoğunluğu değeri $\rho_{\text{href}} = 1,2 \text{ mg /cm}^3$ dür.

Basınç ölçüm cihazından gelen hata: $U_p = 2,3 \text{ mbar}$,

Bağıl nem ölçüm cihazından gelen hata: $U_\phi = \% 1$,

Sıcaklık ölçümünü gerçekleştiren termistörlerden gelen hata: $U_T = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$,

Hava yoğunluğu ifadesinin hatası denklem (3.26)'nın kullanılması ile:

$$U_{\rho_h} = 0,0027368 \text{ mg / cm}^3\text{'tür.}$$

1 kg nominal değere sahip Cr-Ni 304 malzemesinden üretilmiş silindirik kütlenin

$$\rho_k = 7,9 \text{ g/cm}^3 \text{ için, hacmi } V = 126,582278 \text{ cm}^3,$$

bağıl hacim hatası (U_V / V) = 0,006'dır.

Yapılan deneysel işlemde hacimsel genleşme sonucu kullanılan kütlede oluşacak hata ;

$$V_t = V_{t(20)} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - t_{20})) \quad (3.28)$$

ise 20 °C sıcaklık farkında hacimsel genleşmeden dolayı meydana gelecek farklılık ;

$$V_{20} = 126,582278 \text{ cm}^3, V_{40} = 126,622785 \text{ cm}^3\text{'tür.}$$

Bağıl hacimsel hataya bağlı olarak 1 kg'lık kütlenin 40 °C'deki hacimsel hatası;

$$U_{V40} = 1,2662278 \text{ cm}^3 \text{ ve } 20 \text{ }^\circ\text{C'deki hacimsel hatası ; } U_{V20} = 1,2658228 \text{ cm}^3$$

Deneysel ölçümler sırasında kullanılan terazinin standart sapması;

$$U_T = 0,010 \text{ mg'dır.}$$

Buna göre 1 kg nominal değere sahip kütlede maksimum sıcaklık farkını dikkate alarak yapılan deneysel ölçümler sonucu bulunan hata;

$$U_W = 2 \cdot \sqrt{(\rho_h \cdot (V_{40} - V_{20}))^2 + (U_{\rho_h} - 1,2)^2 \cdot (U_{V_{40}}^2 - U_{V_{20}}^2) + (2,3 \cdot U_T / \sqrt{3})^2}$$

$U_W = 0,0266$ mg'dır.

Yapılan hata analizi işlemleri sonucu 1 kg, 500 g ve 300 g nominal değerlerine sahip silindirik kütlelerde 5 C, 10 C, 15 C ve 20 C sıcaklık farkı değerleri sonucu deneysel çalışmada gelen hata değerinin 0,0266 mg olduğu bulunmuştur. Tablo 3.8'de ise hem havanın kaldırma kuvveti etkisi hem de konvektif etkiler sonucu çeşitli sıcaklık farkı değerlerine göre görünür kütle ölçümünde meydana gelen değişimlere hata analizinden gelen sonuçlarla birlikte yer verilmiştir.

Tablo 3.5. Farklı ΔT (°C) değerlerine göre $|\Delta W|$ (mg) görünür kütle değişimleri

Kütle	ΔT (°C)	$ \Delta W_{H.K.K} $ (mg)	$ \Delta W_{K.E} $ (mg)	$ \Delta W_{TOPLAM} $ (mg)
1kg	20,00	2,62	7,18	9,80
	15,00	1,97	4,79	6,76
	10,00	1,31	2,48	3,79
	5,00	0,66	1,30	1,96
500 g	20,00	1,27	3,19	4,46
	15,00	0,96	2,35	3,31
	10,00	0,64	1,53	2,17
	5,00	0,32	0,66	0,98
300 g	20,00	0,76	1,92	2,68
	15,00	0,57	1,42	1,99
	10,00	0,38	0,90	1,28
	5,00	0,19	0,38	0,57

Regresyon analizi sonucu, 1 kg için $|\Delta W|$ görünür kütle değerinin ΔT sıcaklık farkı ifadesine göre değişimi;

$$\Delta W = 0,4852 \cdot \Delta T - 0,3760, R^2 = 0,9846 \quad (3.29)$$

Regresyon analizi sonucu, 500 g için $|\Delta W|$ görünür kütle değerinin ΔT sıcaklık farkı ifadesine göre değişimi;

$$\Delta W = 0,223 \cdot \Delta T - 0,036, R^2 = 0,998 \quad (3.30)$$

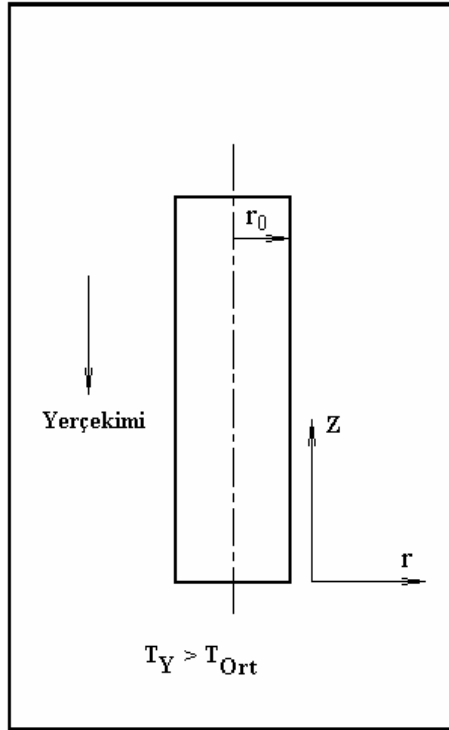
Regresyon analizi sonucu, 300 g için $|\Delta W|$ görünür kütle değerinin ΔT sıcaklık farkı ifadesine göre değişimi;

$$\Delta W = 0,1344 \cdot \Delta T - 0,0340, R^2 = 0,9977 \quad (3.31)$$

BÖLÜM 4. SAYISAL ANALİZ

4.1. Giriş

Bu bölümde, öncelikle dikey bir silindir için laminar sınır tabakada zamana bağlı doğal konveksiyon ısı transferi modeli sunulmuş, ardından 1 kg, 500 g ve 300 g'lık nominal değerlere sahip silindirik kütleler için hesaplamalı akışkanlar mekaniği konusu kapsamında, sonlu hacim yöntemine göre yapılan sayısal analiz çalışmasına yer verilmiştir.



Şekil 4.1. Fiziksel model

Ortam sıcaklığı, (T_∞) sabit kabul edilirse, sırasıyla (r,z) silindirik geometriye sahip bir cisimde boyutsuz koordinat eksenlerini, U - V bu eksenlere bağlı boyutsuz hız ifadelerini göstermek üzere, $T_w > T_\infty$ şartına göre laminar sınır tabakası için sınır tabaka denklemleri yazılırsa:

$$\frac{\partial(r \cdot U)}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot V)}{\partial r} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial z} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial r} = \Gamma + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial z} + V \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial r} = \frac{1}{\sigma} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial r} \right) \quad (4.3)$$

Yukarıda tanımlanan bu denklemler boyutsuz ifadelerden yararlanarak yapılan benzerlik dönüşümleriyle aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$r = \frac{\bar{r}}{\bar{r}_0}, \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{r}_0}, \quad t = \frac{\nu \cdot \bar{t}}{\bar{r}_0^2}, \quad U = \frac{\bar{U} \cdot \bar{r}_0}{\nu}, \quad \Gamma = \frac{g \cdot \beta \cdot \bar{r}_0^3 \cdot (\bar{T} - \bar{T}_\infty)}{\nu^2}$$

$$r = 1, \quad U = V = 0, \quad \Gamma = \Gamma_w(z, t) \text{ ya da } \frac{\partial \Gamma}{\partial r} = -Q(z, t)$$

$$r = \infty, \quad U = 0, \quad \Gamma = 0 \quad (4.4)$$

Denklem , ψ akış fonksiyonunun tanımlanmasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \quad V = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (4.5)$$

$$F(r) = \frac{\psi(z, r, t)}{\Phi(z, t)}, \quad \theta(r) = \frac{\Gamma(z, r, t)}{\Gamma_w(z, t)} \quad (4.6)$$

Uygun dönüşümler yapıldıktan sonra aşağıda belirtilen diferansiyel denklemler elde edilir.

$$r^3 \cdot F''' + r^2 \cdot (b_3 \cdot F - 1) \cdot F'' + r \cdot (b_3 \cdot F - b_2 \cdot r^2 + 1) \cdot F' + b_1 \cdot r^4 \cdot \theta = 0 \quad (4.7)$$

$$r \cdot \theta'' + (\sigma \cdot b_3 \cdot F + 1) \cdot \theta' - \sigma \cdot (b_3 \cdot F' + b_2 \cdot r) \cdot \theta = 0 \quad (4.8)$$

$$b_1 = \frac{\Gamma_w}{\Phi}, \quad b_2 = \frac{1}{\Phi} \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right), \quad b_3 = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (4.9)$$

buradaki sınır koşulları,

$$F(1) = F'(1) = 0 \quad F'(\infty) = 0, \quad \theta(1) = 1 \quad \theta(\infty) = 0 \quad (4.10)$$

şeklindedir.

Bu ve buna benzer problemlerin tam bir analitik çözümü yoktur, ancak sayısal yöntemler uygulanmak üzere bu problemlerin çözümleri elde edilir.

Yapılan sayısal analiz çalışmasında, öncelikle hesaplamalı akışkanlar mekaniği konusunda bir problemin çözümünün gerektirdiği temel kurallar izlenmiştir. Bunlar;

a -) Oluşturulan modelde; sıcaklık farklılıkları sonucu oluşan ısı etkileri neticesinde farklı nominal değerlerdeki kütlelerin ağırlıklarında ne kadarlık değişimler meydana geleceğinin tanımlanması,

b -) Oluşturulan modelde; ısı etkileri sonucu yüzey kayma gerilmelerindeki değişimlerin hesaplanmasıyla ne kadarlık bir görünür kütle değişiminin oluşacağını belirlenmesi,

c -) Bir çok değişken dikkate alınarak, CAD – CAM ortamında analizi yapılacak fiziksel modelin (hesaplama yapılacak yüzey için seçilecek aę yapısının dörtgen veya üçgen olarak seçilip seçilmeyeceği, her bir yüzey için seçilecek aę yapısının çözünürlüğünün ne olması gerektiği, çözüm için gerekli hassasiyeti sağlaması yönüyle seçilen aę yapısının üzerinde adaptasyon yapıp yapılmayacağı, veya aę yapısının ilave çözünürlüğe ihtiyacı olup olmadığı, problemin istenen hassasiyette çözümü için yüzey üzerinde bulunması gereken hücre adedi, çözümü için gerekli bilgisayar hafıza kapasitesi gibi) parametreler dikkate alınıp tasarımın yapılması, ve deney düzeneğine göre tasarlanan modelin çizilmesi,

amaçlarını taşımaktadır. Bunun yanında,

Oluşturulacak olan modelde, şekil 4.1’de fiziksel modeli görülen dikey bir silindir için yazılan zaman bağlı doğal konveksiyon ısı transferi problemi için denklem (4.1), (4.2) ve denklem (4.3)’deki kütle, momentum ve enerji denklemlerindeki her bir değişkenin (U, V, Γ, t) bütün denklemler için aynı anda çözülmesi, bu çözüm kapsamında tablo 4.1’de belirtilen başlangıç kabulleri ve akışkan özellikleri güncellenmesi gerekmektedir.

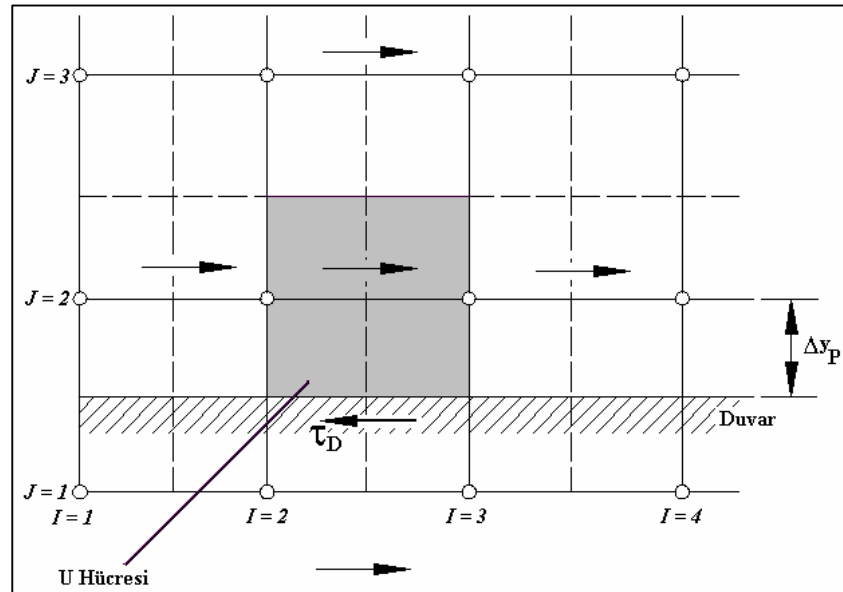
Çözümü yapılan denklemler doğrusal olmadığından ve çözüm için tüm değişkenler aynı anda işlem gördüğünden çözüm döngüsünde yakınsama görülünceye dek birkaç iterasyon uygulaması yapılması gerekmektedir.

Kütle yüzeyi üzerinde oluşturulan aę yapısını meydana getiren her bir hücre için doğrusal olmayan enerji, korunum ve momentum denklemleri doğrusallaştırılıp bağımlı değişkenlerden oluşan denklem sistemleri meydana getirilir. Oluşan N adet bağımlı değişkenler içeren doğrusal denklem sistemleri Gauss – Seidel iterasyon yöntemine göre çözülür. (U, V, Γ, t) değerleri için elde edilen ifadeler güncellenir.

Tablo 4.1. Sayısal analizde kullanılan referans değerler

Hava	
Yoğunluk, ρ (kg / m ³)	1,18374
Sabit Basınç Özgöl Isısı, C_p (J / kg – °K)	1007,25484
Isıl İletkenlik Katsayısı, k (W / m – °K)	0,026
Viskozite, ν (m ² / s)	1,824e-05
Isıl Genleşme Katsayısı, β (1 / °K)	0,00366
Paslanmaz Çelik, Cr-Ni 304	
Yoğunluk, ρ (kg / m ³)	7900
Sabit Basınç Özgöl Isısı, C_p (J / kg – °K)	468
Isıl İletkenlik Katsayısı, k (W / m – °K)	16,27

d -) Sayısal çözümü için oluşturulan model de duvar sınır koşulu kullanıldı, Model de kullanılan duvar sınır koşulundaki yüzey kayma gerilmesi denklem (4.11) ve (4.12)'de gösterildiği üzere hesaplandı.



Şekil 4.2. Sayısal analizde kullanılan duvar sınır koşulu

$$\tau_D = \mu \cdot \frac{u_p}{\Delta y_p} \quad (4.11)$$

Yüzeye etkiyen kesme kuvveti ;

$$F_S = \iint_S (\tau_D \cdot A_{Hücre}) \cdot dS \quad (4.12)$$

$$\Delta W = F_s / g \quad (4.13)$$

e -) Hesaplamalı akışkanlar mekaniği kapsamında sonlu hacim yöntemi kullanılarak yapılan sayısal analizler neticesinde elde edilen sonuçlar, ağırlık zaman değişimleri ve ağırlık sıcaklık değişimi olarak XY grafiklerine aktarıldı.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Giriş

Bu bölümde, önce 1 kg, 500 g ve 300 g'lık nominal değerlere sahip silindirik kütlelerde sayısal analizler sonucunda kütlelerin mesh edilmiş modelleri, yüzey kayma gerilmeleri değişimleri, hız vektörleri dağılımı, basınç dağılımı, ardından yapılan deneysel ölçümler ve tasarlanan model sonucunda sırasıyla, 20 °C , 15 °C , 10 °C , 5 °C' lik sıcaklık farklarına göre zamanla görünür kütle değişimlerinin model - deneyden elde edilen sonuçlarının karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

5.1.1. Kütlelerin mesh edilmiş modelleri

Sayısal analiz çalışmasında, 1kg'lık silindirik geometriye sahip kütlede tek bölmeli, 56711 hücreli, 116776 yüzeyli ve 11230 düğümlü dörtgen mesh yapısı uygulanmıştır.

İstatistiksel olarak mesh bilgileri aşağıda verilmiştir;

Minimum yüzey alanı : 1,682888e-005 m²

Maksimum yüzey alanı : 1,323754e-004 m²

Minimum hacim : 2,082841e-008 m³

Maksimum hacim : 4,532908e-007 m³

Toplam hacim : 8,900295e-003 m³

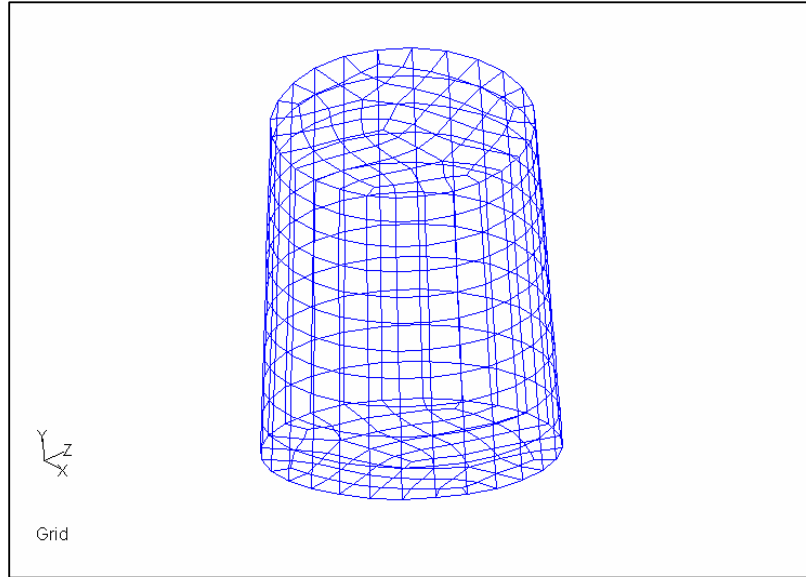
Analiz yapılan alanın koordinatları ;

x-koordinatı: minimum (m) = -9,998869e-002, maksimum (m) = 9,999848e-002

y- koordinatı: minimum (m) = -6,121118e-018, maksimum (m) = 3,000000e-001

z- koordinatı: minimum (m) = -9,999990e-002, maksimum (m) = 1,000000e-001

Sayısal analize başlamadan önce kütle yüzeyinde oluşturulan düğümler için daha stabil sonuçlar alabilmek amacıyla düzleştirme işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.1. 1 kg'lık silindirik kütlenin sayısal analiz için hazırlanmış modeli

Şekil 5.1.'de 1 kg'lık silindirik kütlenin sayısal analizinde kullanılmak üzere hazırlanmış modeli görülmektedir.

Bunun yanında 500 g'lık nominal değere sahip silindirik kütlede tek bölmeli, 57550 hücreli, 118293 yüzeyli, 11223 düğümlü üçgen mesh yapısı uygulanmıştır. Bu kütlenin yüzeyinde oluşturulan düğümler için daha stabil sonuçlar alabilmek amacıyla düzleştirme işlemi yapılmıştır. İstatistiksel olarak uygulanan mesh bilgileri aşağıda verilmiştir;

Minimum yüzey alanı : 1,564320e-005 m²

Maksimum yüzey alanı : 1,269869e-004 m²

Minimum hacim : 2,953870e-008 m³

Maksimum hacim : 4,456261e-007 m³

Toplam hacim : 9,162009e-003 m³

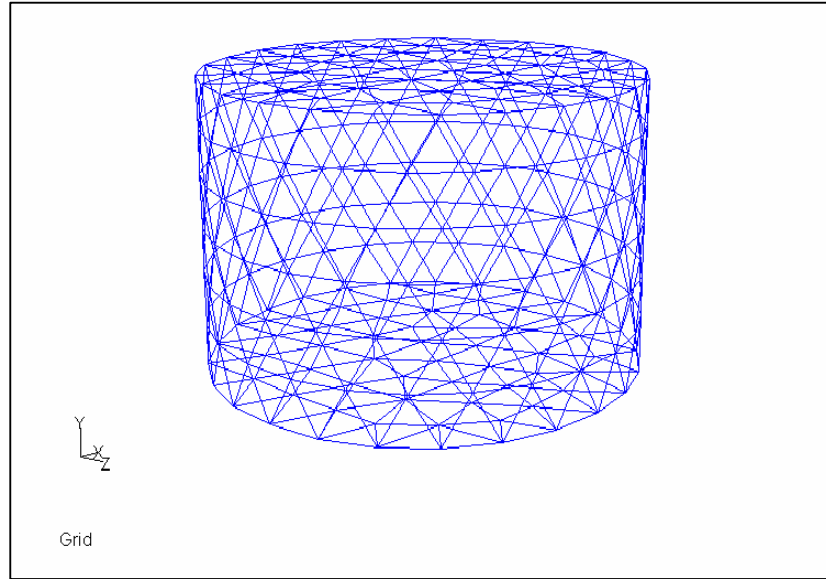
Analiz yapılan alanın koordinatları ;

x-koordinatı: minimum (m) = -9,998869e-002, maksimum (m) = 9,999848e-002

y- koordinatı: minimum (m) = -6,121118e-018, maksimum (m) = 3,000000e-001

z- koordinatı: minimum (m) = -9,999990e-002, maksimum (m) = 1,000000e-001

şeklindedir. Şekil 5.2’de 500 g’lık silindirik kütlenin sayısal analizi için hazırlanmış modeli görülmektedir.



Şekil 5.2. 500 g’lık silindirik kütlenin sayısal analiz için hazırlanmış modeli

300 g'lık silindirik geometriye sahip kütlerde ise tek bölmeli, 58740 hücreli, 120623 yüzeyli ve 11396 düğümlü üçgen mesh yapısı uygulanmıştır. Yapılan sayısal analiz çalışmasından kararlı sonuçlar alabilmek amacıyla, kütle yüzeyini oluşturan düğümlerin düzleştirilmesi yapılmıştır. Bu kütle için yapılan analizde istatistiksel olarak uygulanan mesh bilgileri aşağıda verilmiştir;

Minimum yüzey alanı : $1,647281e-005 \text{ m}^2$

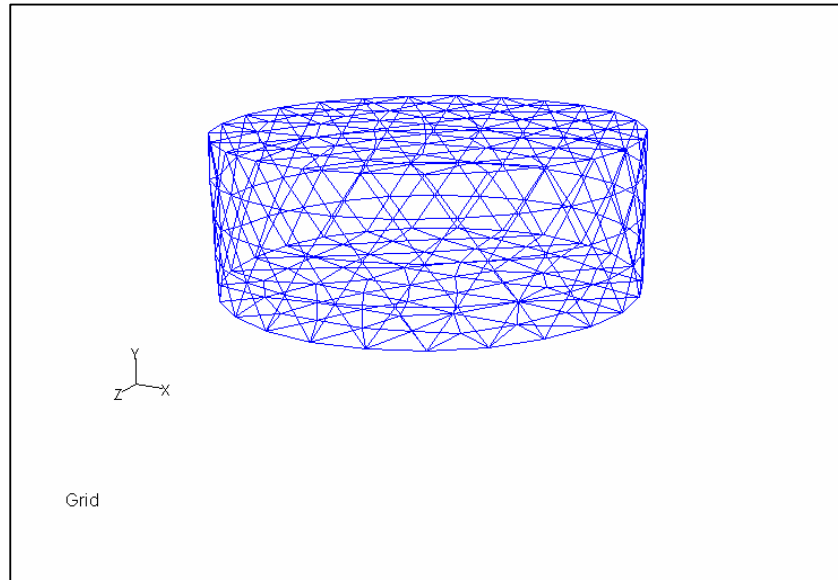
Maksimum yüzey alanı : $1,289673e-004 \text{ m}^2$

Minimum hacim : $3,469493e-008 \text{ m}^3$

Maksimum hacim : $4,076281e-007 \text{ m}^3$

Toplam hacim : $9,263384e-003 \text{ m}^3$

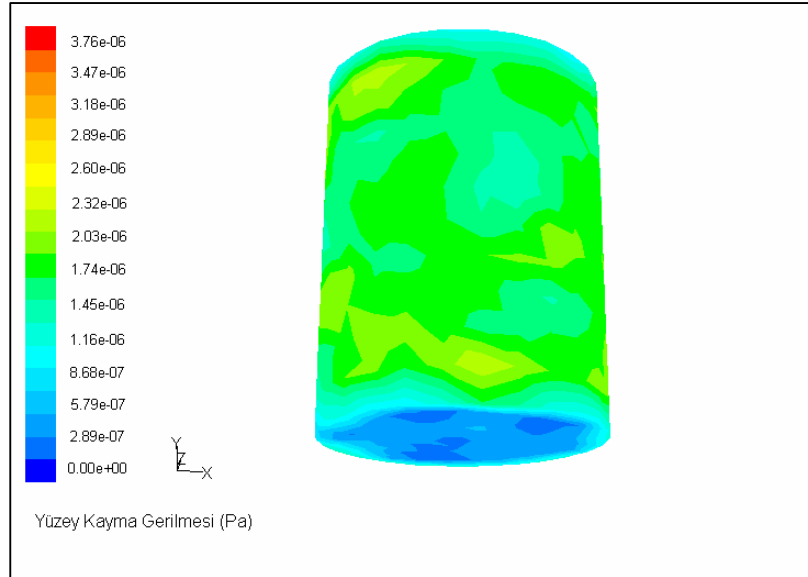
şeklindedir. Deney düzeneği içinde bünyesindeki hava sıcaklığı $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sabitlenmiş olan ve görünür kütle değişimi belirlenecek kütleleri çepeçevre kapsayan silindirik fanus analiz yapılan alanın koordinatlarını oluşturduğu için 300 g'lık kütle için dikkate alınacak koordinatlar 1kg ve 500 g'lık kütleler için analiz yapılan koordinatlara eşittir. Şekil 5.3.'te 300 g'lık silindirik kütlenin sayısal analizi için hazırlanmış modeli görülmektedir.



Şekil 5.3. 300 g'lık silindirik kütlenin sayısal analiz için hazırlanmış modeli

5.1.2. Kütlelerde yüzey kayma gerilmeleri değişimi

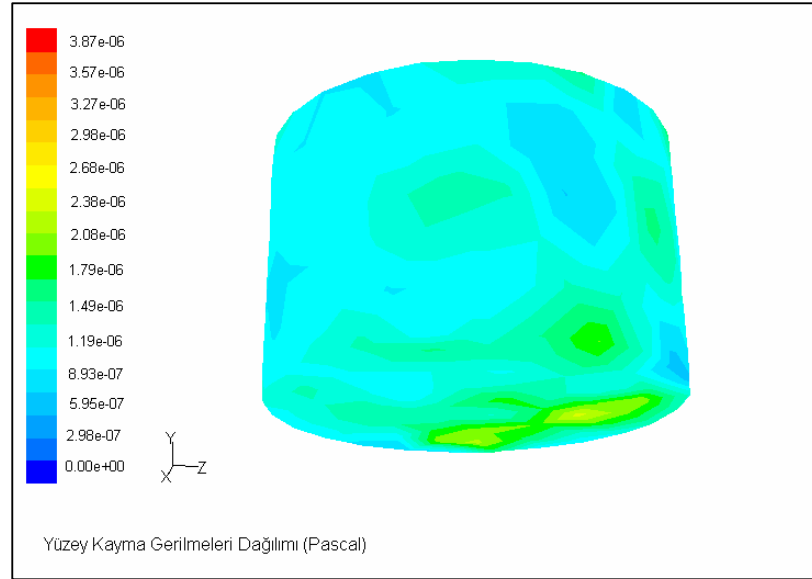
Şekil 5.4’de 1 kg’lık kütlede ($t = 0$) anında $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ iken terazi kefesi üzerindeki görünür kütle değerinin sıcaklık farkına bağlı olarak yüzey kayma gerilmeleri etkisiyle değiştiği görülmektedir. Kütlenin özellikle yanal yüzeylerinde kayma gerilmeleri $8,68 \times 10^{-7}$ Pa değeri ile $2,89 \times 10^{-6}$ Pa değerleri arasında değişmektedir. Bununla birlikte 1 kg’lık nominal değere sahip kütlede yatay yüzeylerde kayma gerilmesi değerinin $8,68 \times 10^{-7}$ Pa ile 0 Pa değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Özellikle kütlenin yanal yüzeylerinde etkin olan yüzey kayma gerilmelerinden çıkarılacak sonuç, (mg) bazında görünür kütle değişiminde yüzey kayma gerilmelerinin baskın parametre olduğu şeklindedir.



Şekil 5.4. 1 kg’lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) iken yüzey kayma gerilmelerindeki değişim

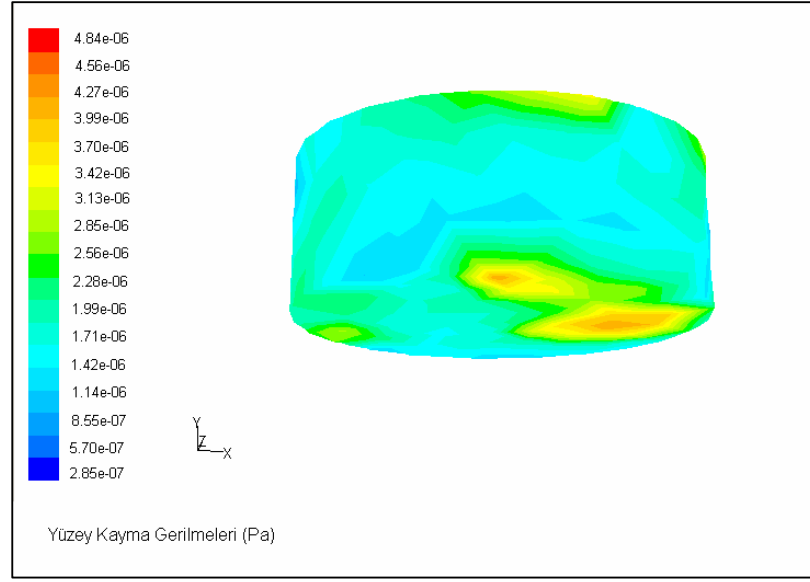
500 g’lık silindirik kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) iken terazi kefesi üzerindeki görünür kütle değerinin sıcaklık farkına bağlı olarak yüzey kayma gerilmeleri nedeniyle farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Kütlenin özellikle yanal yüzeylerinde kayma gerilmeleri değişimi $5,95 \times 10^{-7}$ Pa değeri ile $2,38 \times 10^{-6}$ Pa değerleri arasında değişmektedir. Şekil 5.5’te yüzey kayma gerilmelerinin 500 g’lık kütle üzerindeki

etkileri görülmektedir. Bununla birlikte bu kütlede yatay yüzeylerde kayma gerilmesi değerinin $2,98 \times 10^{-7}$ Pa ile $2,08 \times 10^{-6}$ Pa değerleri arasında olduğu, şekil 5.4'deki grafiğe göre sıcaklık farkı aynı değerde olmasına karşın kullanılan kütlenin nominal değerinin azalması, bunun sonucunda kütlenin boyutlarının küçülmesi etki eden yüzey kayma gerilmelerinin daha düşük bir değerde gerçekleşmesine ve böylece görünür kütle değişiminin daha az bir değerde meydana gelmesine sebebiyet verir.



Şekil 5.5. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey kayma gerilmelerindeki değişim

300 g'lık nominal değere sahip kütlenin özellikle yanal yüzeylerinde kayma gerilmeleri değişimi $2,85 \times 10^{-7}$ Pa değeri ile $3,70 \times 10^{-6}$ Pa değerleri arasında değişmektedir. Ayrıca, 300 g'lık nominal değere sahip kütlede yatay yüzeylerde kayma gerilmesi değerinin $2,85 \times 10^{-7}$ Pa ile $3,42 \times 10^{-6}$ Pa değerleri arasında olduğu görülmektedir. Şekil 5.6'da 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey kayma gerilmelerindeki değişim görülmektedir.



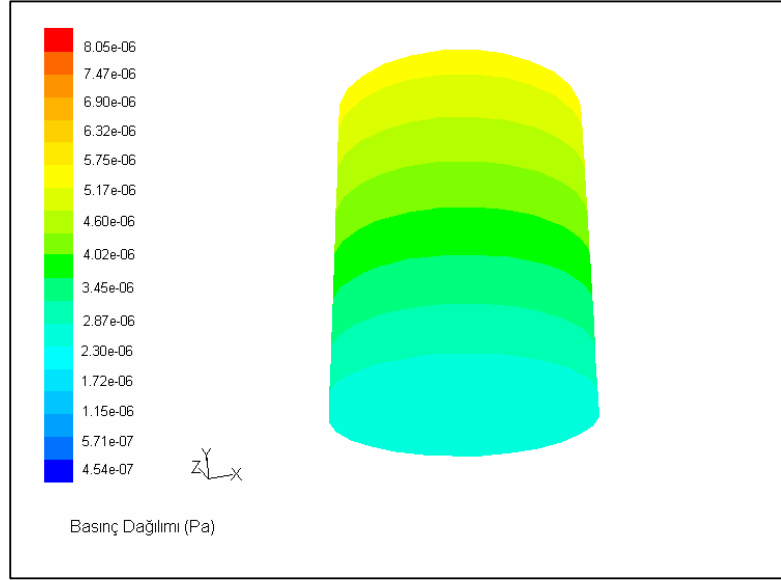
Şekil 5.6. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey kayma gerilmelerindeki değişim

Sayısal analiz sonucu farklı nominal değerlerdeki silindirik kütlelerde yüzey kayma gerilmelerindeki değişim ölçüm süresince nominal değerin azalmasıyla birlikte konvektif kuvvetlerin etki ettiği yüzey alanının da düşmesi sonucu yüzey kayma gerilmelerinin kütlelere etkisi düşmektedir, böylece aynı sıcaklık farkında daha yüksek nominal değere sahip olan kütleye etkiyen yüzey kayma gerilmelerinin daha büyük olması sonucu bu kütlenin görünür kütledeki değişim daha fazla olacaktır.

5.1.3. Kütlelerde basınç dağılımı değişimi

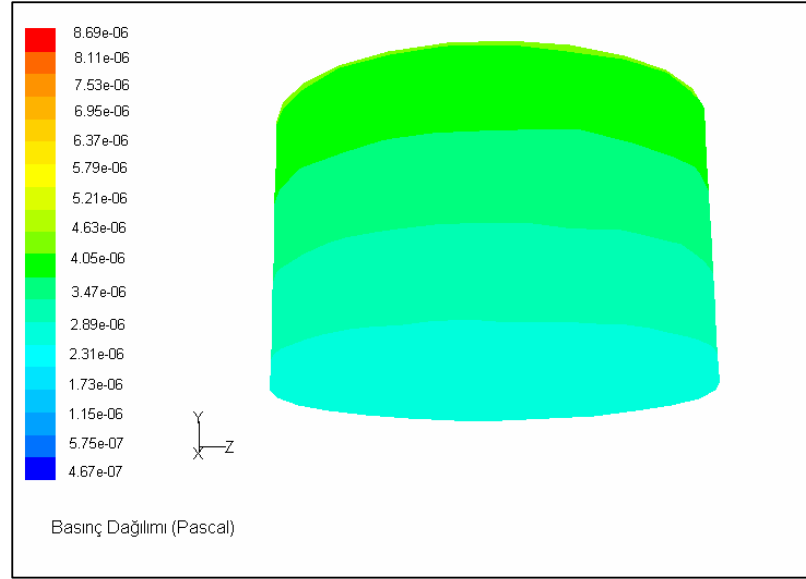
Sayısal analiz süresince kütlelerde oluşan basınç dağılımları da incelenmiştir, kütle yüzeyinde konvektif etkiler sonucu oluşan basınç dağılımlarının değişimi her bir kütle için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 5.7'de 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim görülmektedir. Ölçümler boyunca bu kütlede konvektif etkiler sonucu yanal yüzeyde basınç kuvvetlerinin değişimi $2,30 \times 10^{-6}$ Pa ile $5,75 \times 10^{-6}$ Pa arasında değişmektedir. Ayrıca alt yüzeydeki basınç

dağılımı değeri $2,30 \times 10^{-6}$ Pa ve üst kütle yüzeyindeki değeri ise $5,17 \times 10^{-6}$ Pa değerindedir.

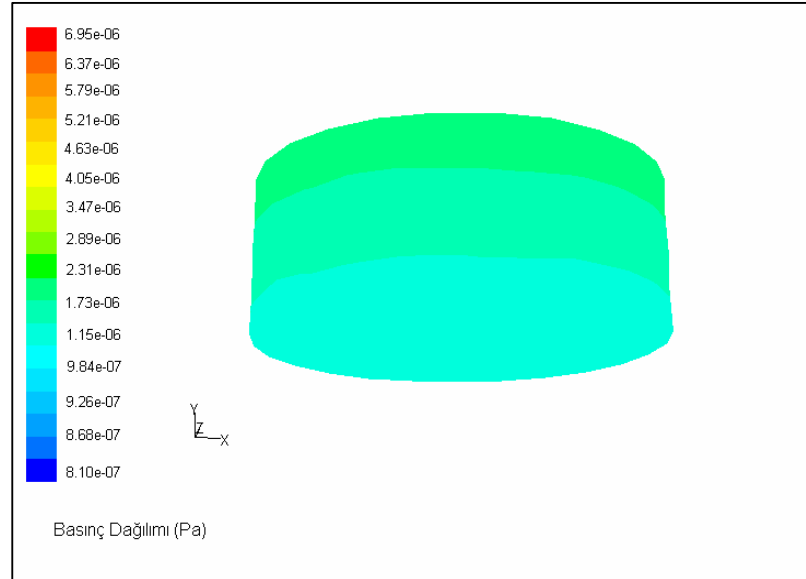


Şekil 5.7. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim

500 g'lık silindirik kütlede ölçümler boyunca konvektif etkiler sonucu yanal yüzeyde basınç kuvvetlerinin değişimi $2,31 \times 10^{-6}$ Pa ile $5,21 \times 10^{-6}$ Pa arasında olduğu, ayrıca alt yüzeydeki basınç dağılımı değerinin $2,31 \times 10^{-6}$ Pa ve kütle üst yüzeyindeki değerinin ise $4,05 \times 10^{-6}$ Pa değerinde olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.8'de 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim görülmektedir. Konvektif etkiler sonucu kütlelerin yanal yüzeylerinde kayma gerilmelerinin, diğer taraftan kütlenin üst yüzeyinde basınç kuvvetlerinin görünür kütle değişiminde etkili olduğu görülmektedir. Kütlenin nominal değerinin azalmasıyla birlikte konvektif (kayma ve basınç) kuvvetlerin etki edeceği yüzey alanı azaldığından nominal değer düşmesi ile birlikte görünür kütle ölçümündeki değişimde azalacaktır.



Şekil 5.8. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim

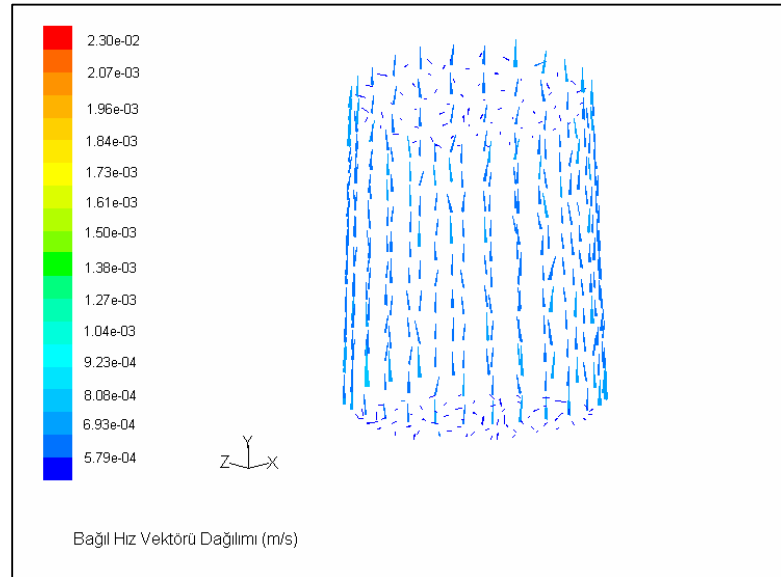


Şekil 5.9. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim

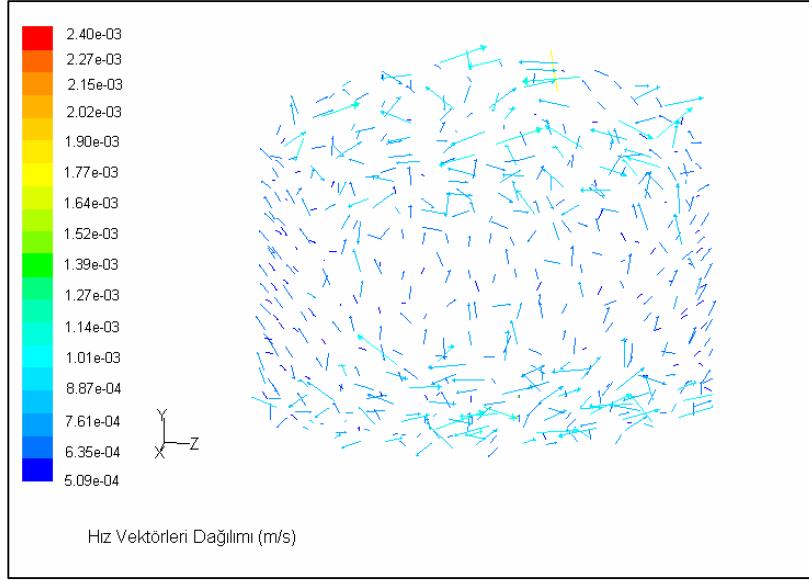
300 g'lık silindirik kütlerde ölçümler boyunca konvektif etkiler sonucu yanal yüzeyde basınç kuvvetlerinin değişimi $9,84 \times 10^{-7}$ Pa ile $3,46 \times 10^{-6}$ Pa arasında olduğu, ayrıca alt yüzeydeki basınç dağılımı değerinin $1,15 \times 10^{-6}$ Pa ve kütle üst yüzeyindeki değerinin ise $2,89 \times 10^{-6}$ Pa değerinde olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.9'da 300 g'lık kütlerde ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken yüzey basınç dağılımlarındaki değişim görülmektedir.

5.1.4. Kütlelerde hız vektörleri değişimi

Sayısal analiz sonucu 1 kg nominal değere sahip kütlerdeki hız vektörü değişimi şekil 5.10'da görüldüğü gibidir. Buna göre konvektif etkiler sonucu kütle yüzeyi üzerindeki hız dağılımı $9,23 \times 10^{-4}$ m/s ile $1,04 \times 10^{-3}$ m/s arasında değişmektedir.

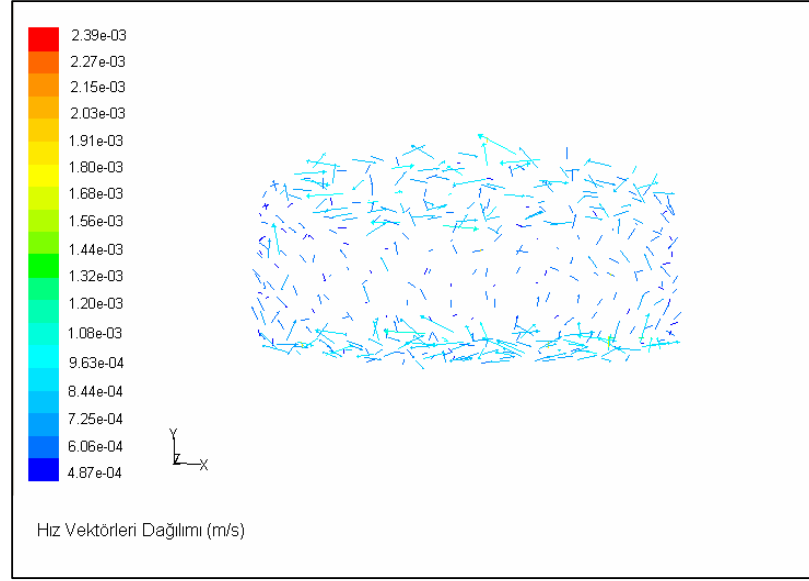


Şekil 5.10. 1 kg'lık kütlerde ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10$ °C) iken bağıl hız vektörü dağılımı



Şekil 5.11. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken bağıl hız vektörü dağılımı

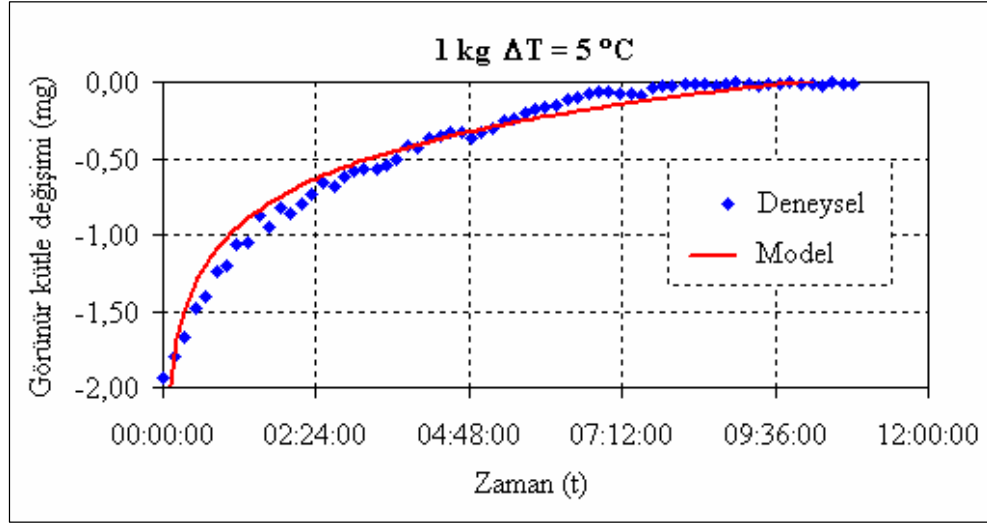
500 g nominal değere sahip kütledeki hız vektörü değişimi şekil 5.11'de görüldüğü gibi değişmektedir. Buna göre konvektif etkiler sonucu kütle yüzeyi üzerindeki hız dağılımı $6,35 \times 10^{-4}$ m/s ile $1,01 \times 10^{-3}$ m/s değerleri arasındadır. Kütle ile içinde bulunduğu camdan silindirik fanusun içindeki hava arasında laminar sınır tabakada meydana gelen doğal konveksiyon hava akışındaki hız vektörü dağılımının ortalama 1 mm/s civarında değiştiği görülmüştür. Şekil 5.12'de 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken bağıl hız vektörü dağılımı görülmektedir. Kütle yüzeyi üzerindeki hız dağılımı $6,06 \times 10^{-4}$ m/s ile $1,20 \times 10^{-3}$ m/s değerleri arasında değişmektedir.



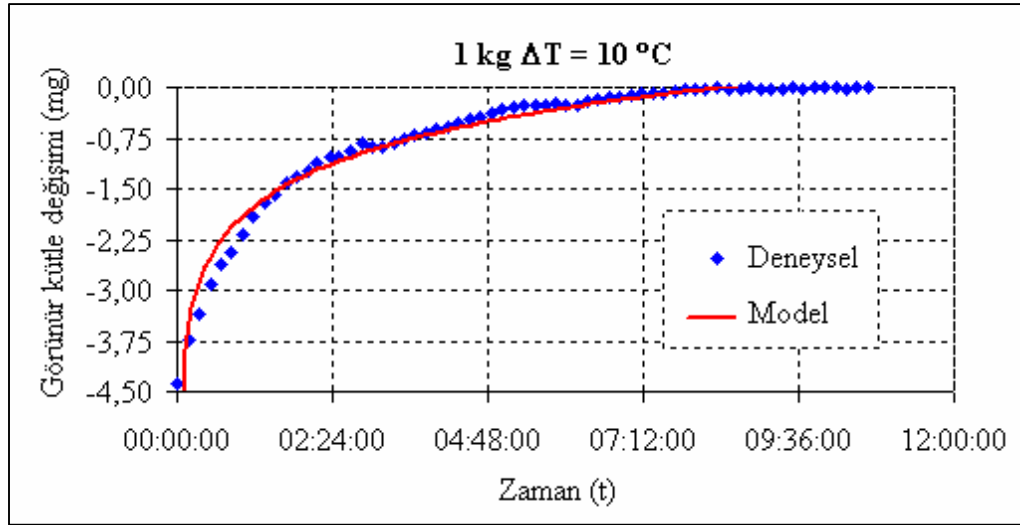
Şekil 5.12. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken bağıl hız vektörü dağılımı

5.1.5. Görünür kütle zaman değişimi

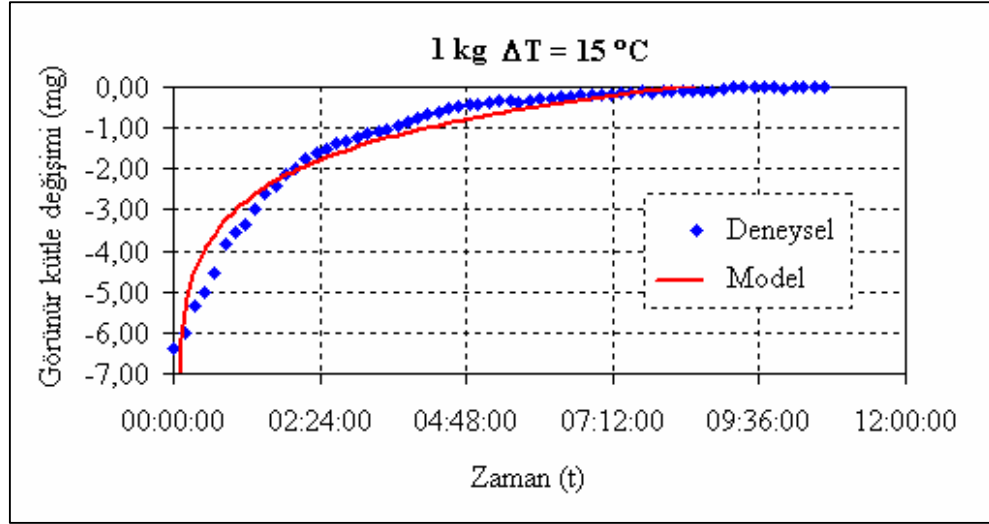
1 kg, 500 g ve 300 g'lık nominal değerlere sahip kütleler için, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farklarına göre zamanla görünür kütlede meydana gelen değişimler deneysel olarak ölçüldü, daha sonra deneysel olarak ölçülen değerlerle modelden elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapıldı. Şekil 5.13' te 1 kg'lık silindirik kütlede yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkı $t = 0$ anında $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, iken görünür kütle değeri başlangıçta deneysel olarak yapılan ölçümler sonucu 1,93 mg olarak ölçüldü. Zamana bağlı laminar sınır tabaka için doğal konveksiyonla ısı transferi çözümüne göre yapılan simülasyon sonucu ise bu değer 1,96 mg olarak belirlendi. Her iki durumda da zamanla kütle yüzey sıcaklığı değeri ağırlığın ısıl stabilizasyona ulaşmasıyla birlikte ortamla aynı sıcaklık değerine ulaştığında, görünür kütle değerinde oluşan farkın azalıp 0 mg' a kadar düştüğü ölçüldü. Şekil 5.14, 5.15, 5.16' da benzer şekilde görünür kütle değerinin ağırlığın termal stabilizasyona ulaşmasıyla birlikte zamanla azalıp sıfır değerini aldığı belirlendi.



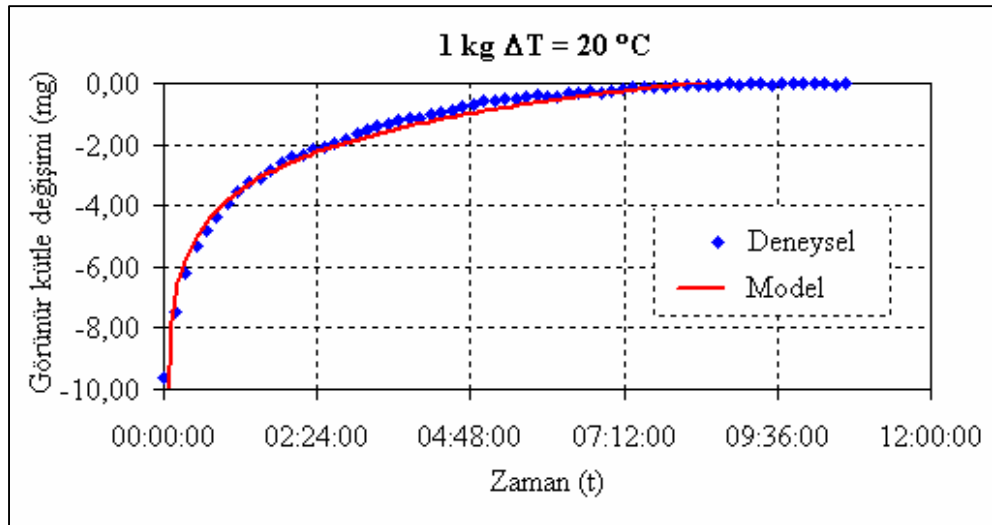
Şekil 5.13. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



Şekil 5.14. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



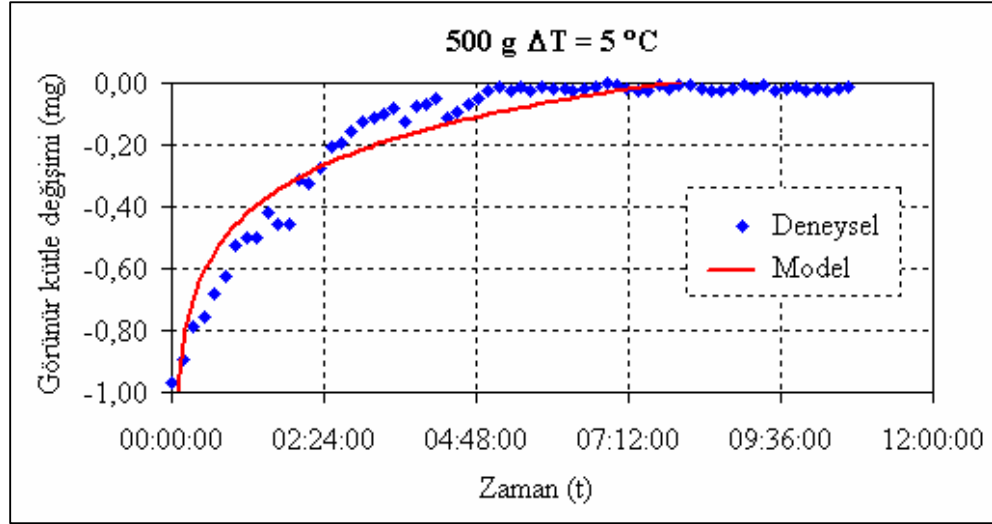
Şekil 5.15. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



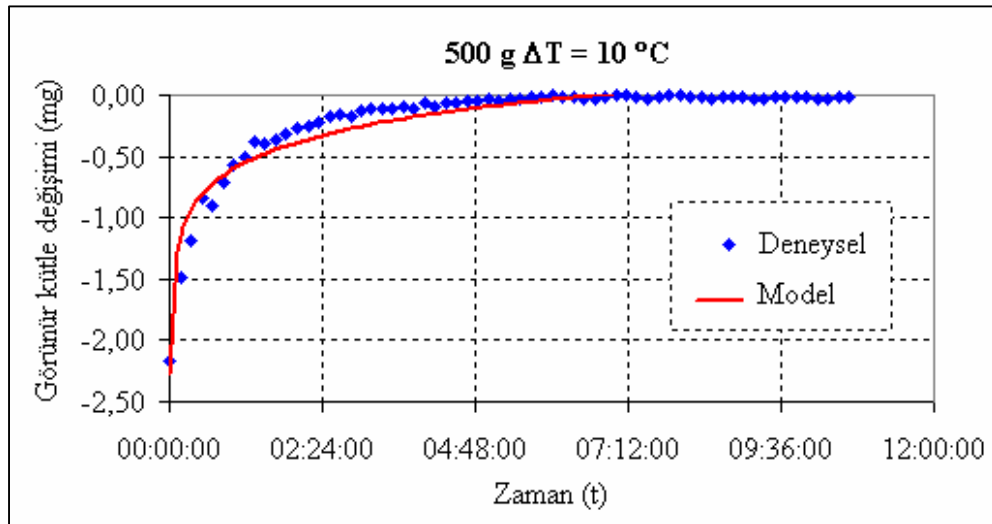
Şekil 5.16. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi

Şekil 5.17'de 500 g'lık silindirik kütlede yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkı $t = 0$ anında 5°C , iken görünür kütle değeri başlangıçta deneysel olarak yapılan ölçümler sonucu 0,97 mg olarak elde edildi. Simülasyon sonucu ise bu değer 0,98 mg olarak bulundu. Her iki durumda da zamanla kütle yüzey sıcaklığı değeri ağırlığın ısı stabilizasyona ulaşmasıyla birlikte ortamla aynı sıcaklık değerine ulaştığında

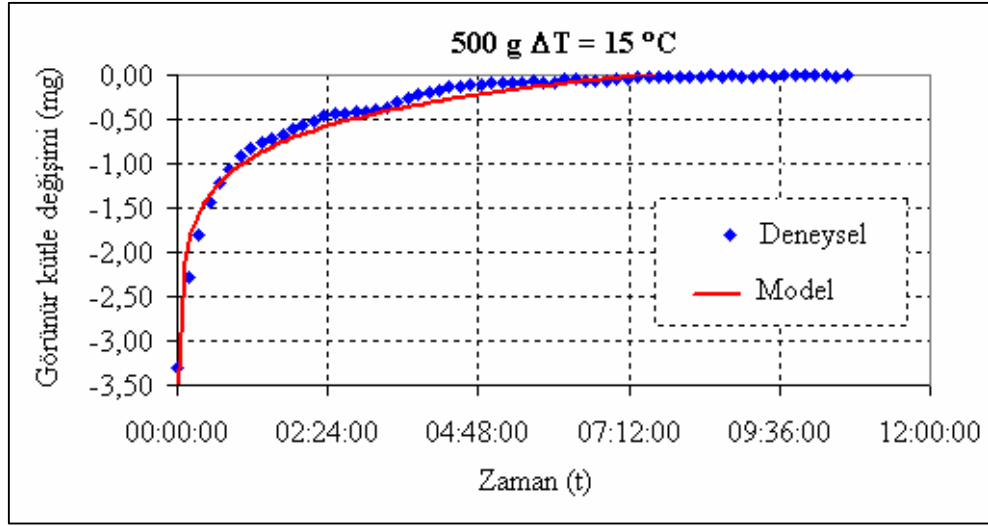
başlangıçta ağırlık değerlerinde oluşan fark azalıp 0 mg' a kadar düşmüştür. Şekil 5.18, 5.19, 5.20'de verilen grafiklerden de görülebileceği gibi görünür kütle değerinin ağırlığın termal stabilizasyona ulaşmasıyla birlikte zamanla azalıp sıfır değerini aldığı belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan kütlenin nominal değerinin azalması başlangıçta belirlenen görünür kütle değerinin de düşük olmasını sağlamaktadır.



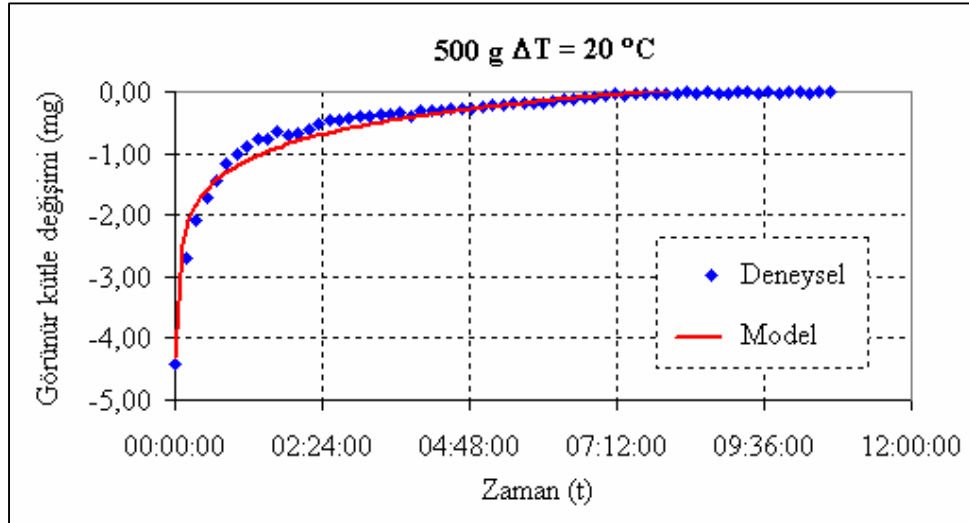
Şekil 5.17. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



Şekil 5.18. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



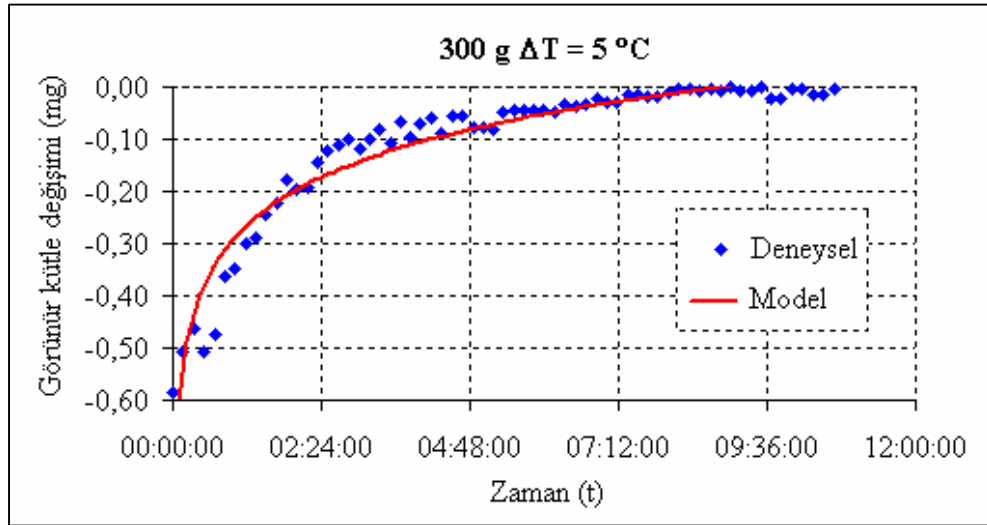
Şekil 5.19. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



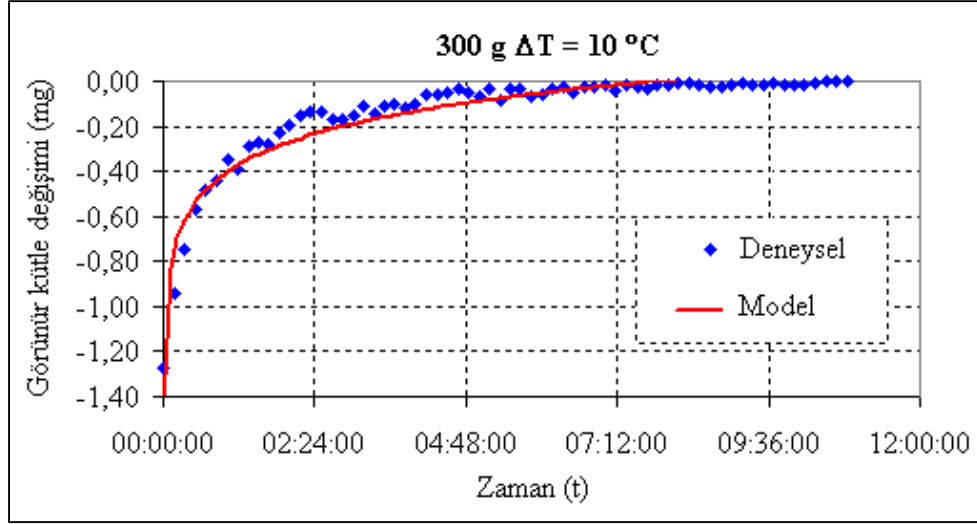
Şekil 5.20. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$) iken görünür kütle değişimi

Şekil 5.21'de 300 g'lık silindirik kütlede yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık farkı $t = 0$ anında 5°C , iken görünür kütle değeri başlangıçta deneysel olarak yapılan ölçümler sonucu 0,58 mg olarak elde edildi. Simülasyon sonucu ise bu değer

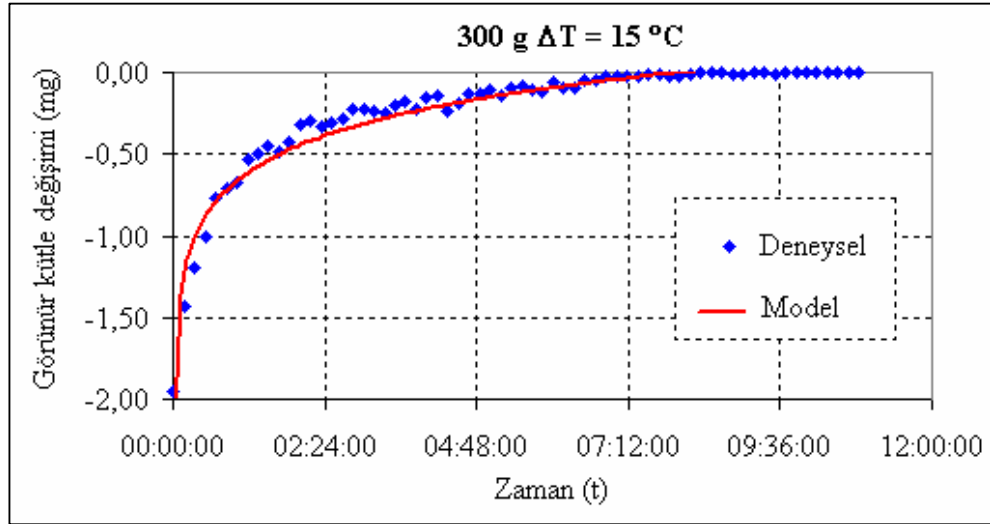
0,57 mg olarak bulundu. Zamanla kütle yüzey sıcaklığı değeri ağırlığın ısı stabilizasyona ulaşmasıyla birlikte sıcaklık banyosu tarafından 20 °C sıcaklıkta sabit tutulan ortamla aynı sıcaklık değerine ulaştığında başlangıçta ağırlık değerlerinde oluşan fark azalıp 0 mg' a kadar düşmüştür. Şekil 5.22, 5.23, 5.24'de verilen grafiklerden de görülebileceği gibi görünür kütle değerinin kütlenin termal stabilizasyona ulaşmasıyla zamanla azalıp sıfır değerini aldığı belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan kütlenin nominal değerinin azalması başlangıçta belirlenen görünür kütle değerinin düşük olmasını sağlamaktadır.



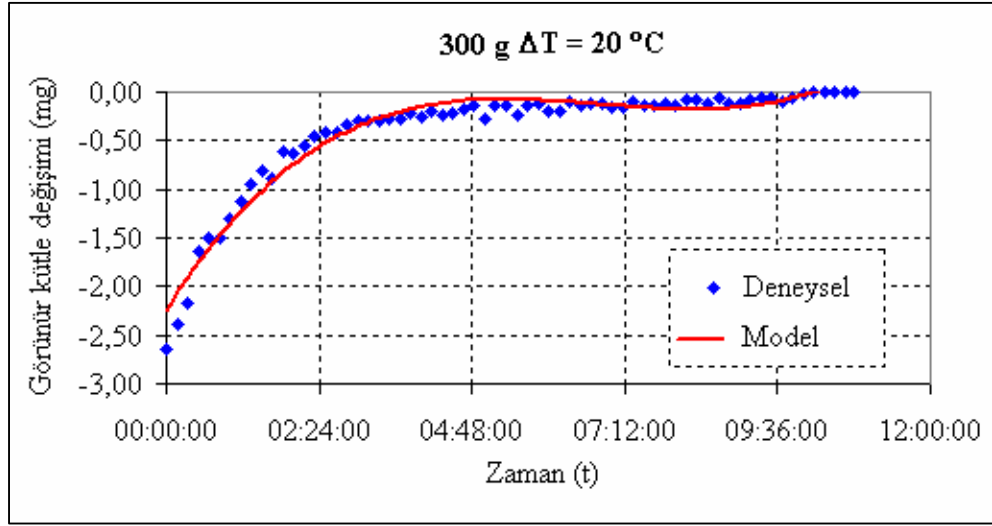
Şekil 5.21. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



Şekil 5.22. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



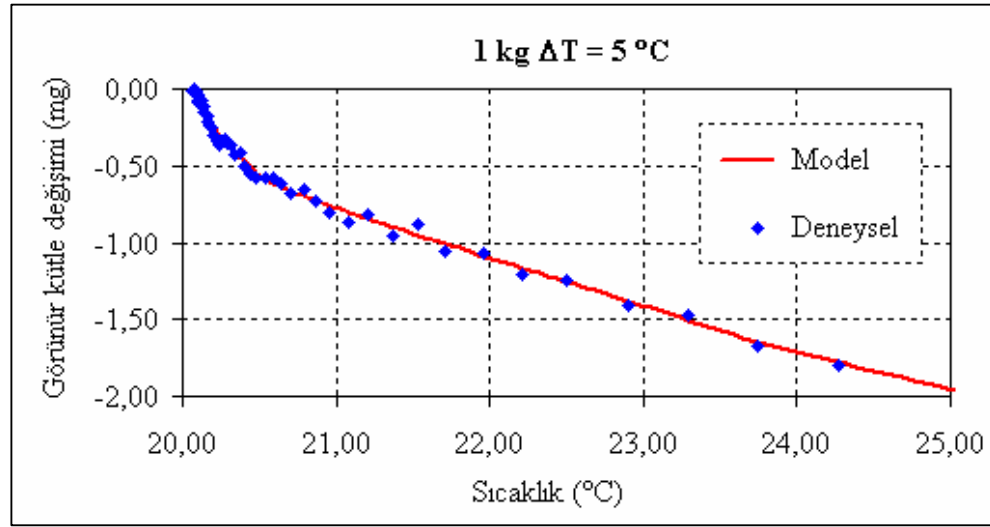
Şekil 5.23. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi



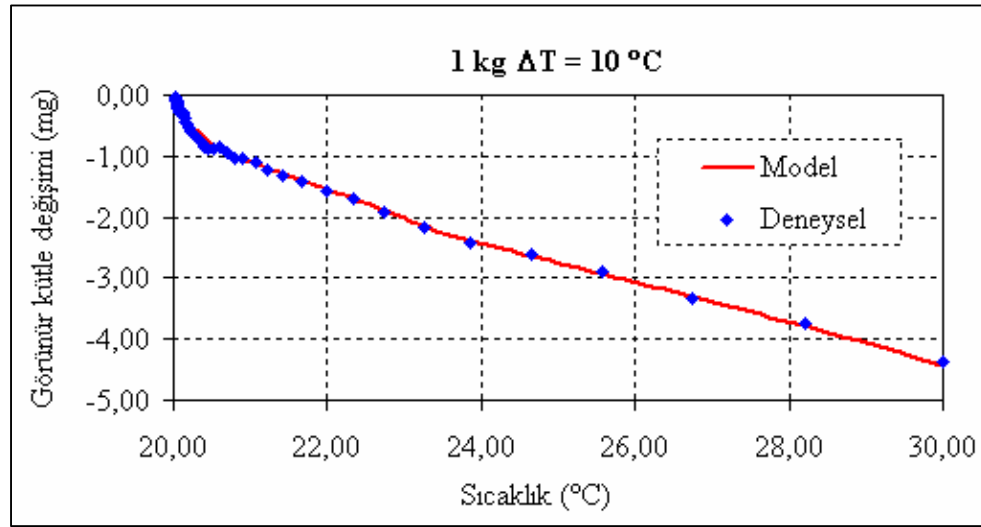
Şekil 5.24. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle değişimi

5.1.6. Görünür kütle sıcaklık değişimi

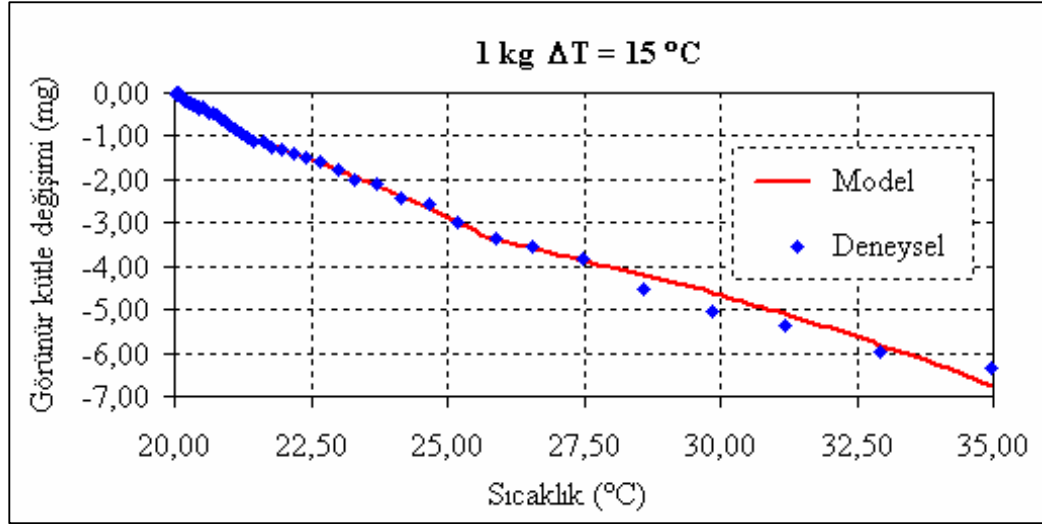
1 kg, 500 g ve 300 g'lık nominal değerlere sahip silindirik kütleler için, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farklarına göre görünür kütle değişimleri şekil 5.25 – 5.28'deki grafiklerde deneysel olarak elde edilen sonuçların, modelden elde edilen değerlerle karşılaştırılması suretiyle verilmiştir.



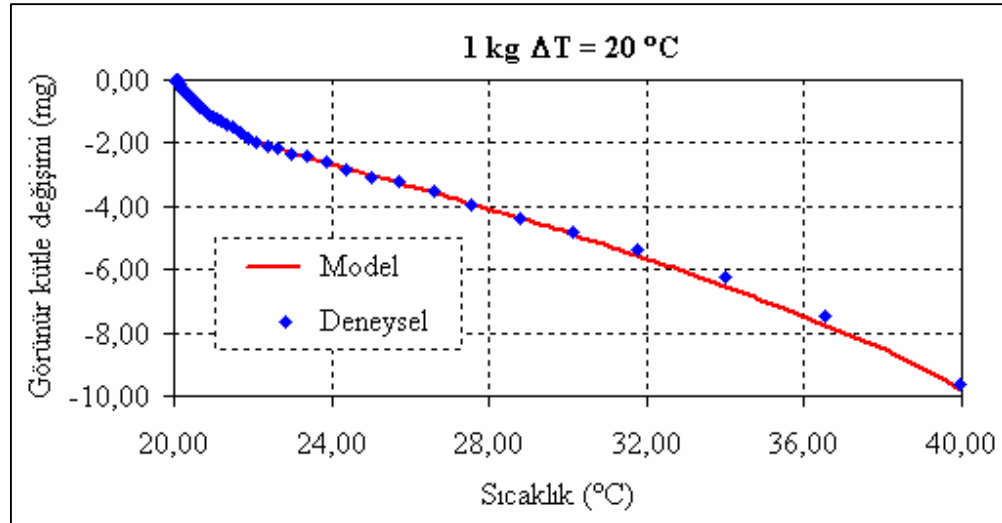
Şekil 5.25. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



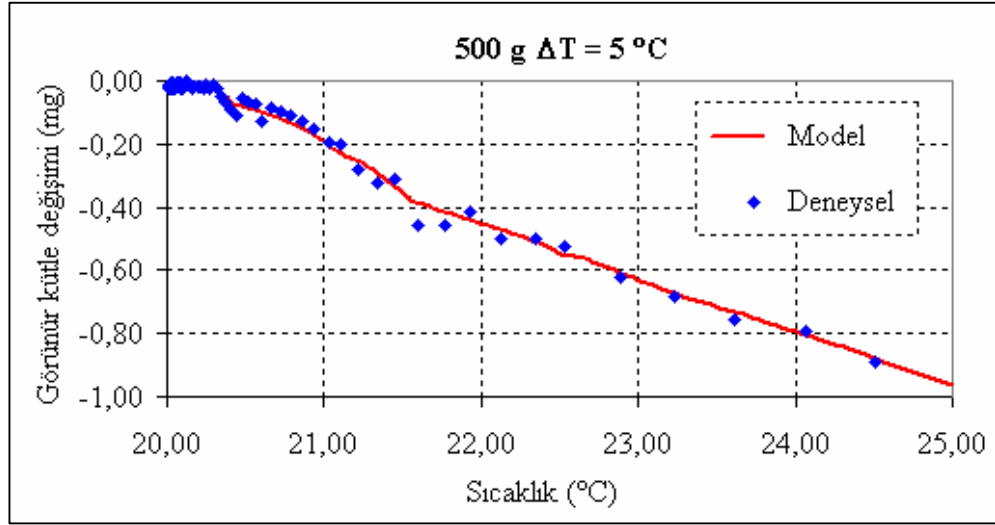
Şekil 5.26. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



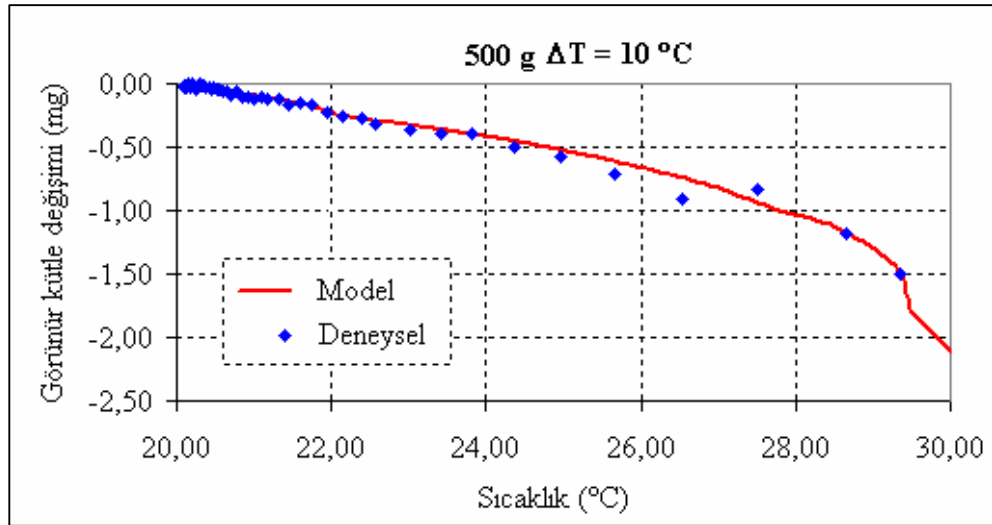
Şekil 5.27. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



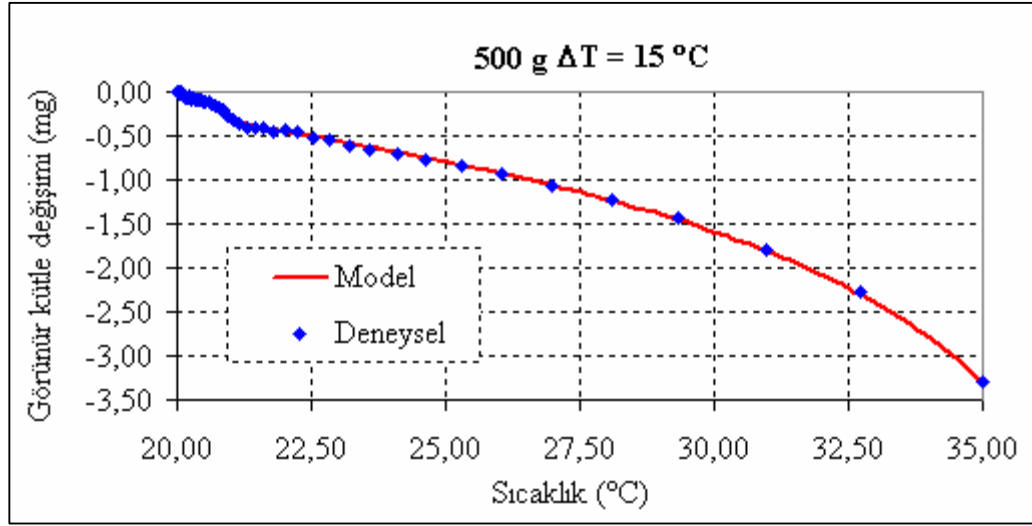
Şekil 5.28. 1 kg'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



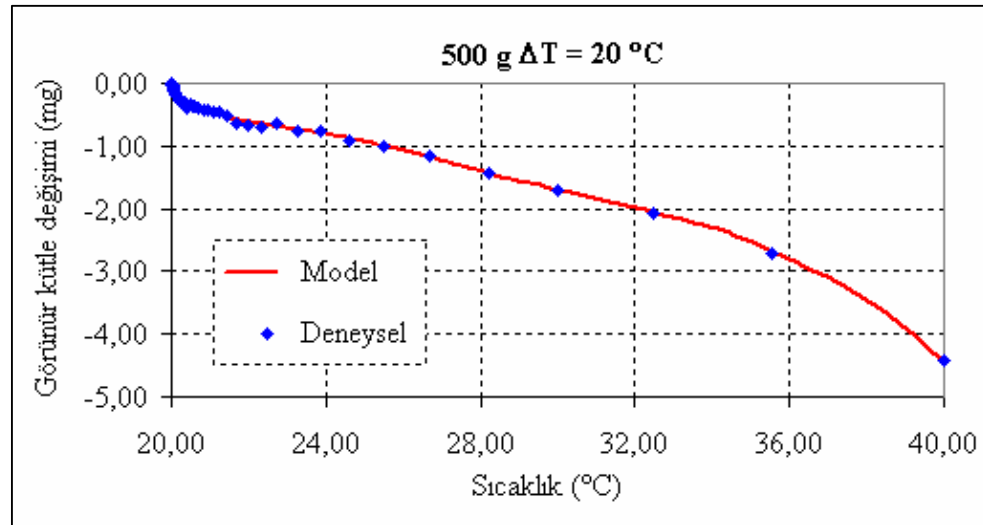
Şekil 5.29. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



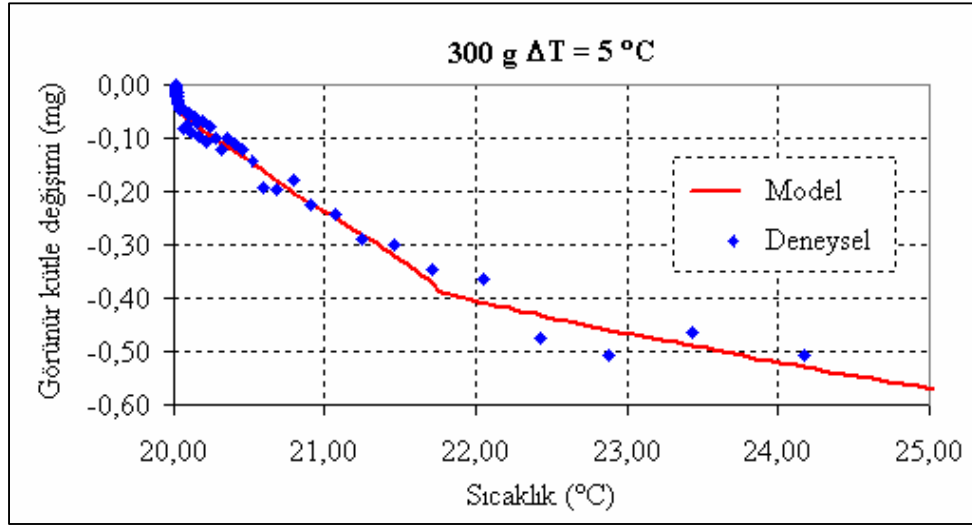
Şekil 5.30. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



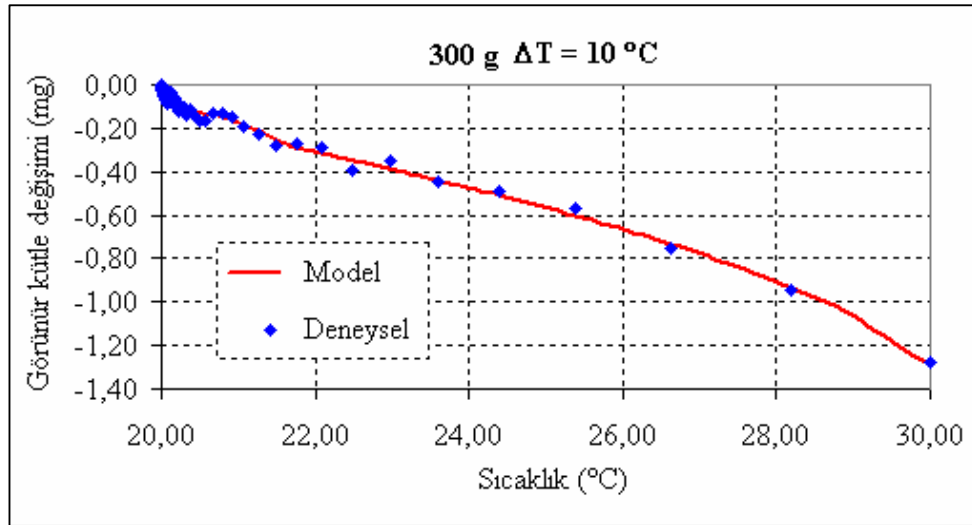
Şekil 5.31. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



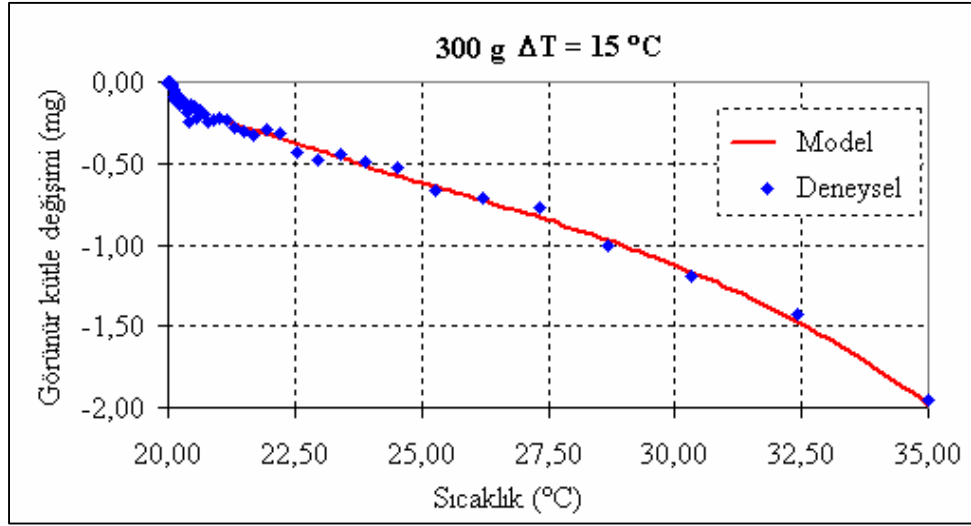
Şekil 5.32. 500 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



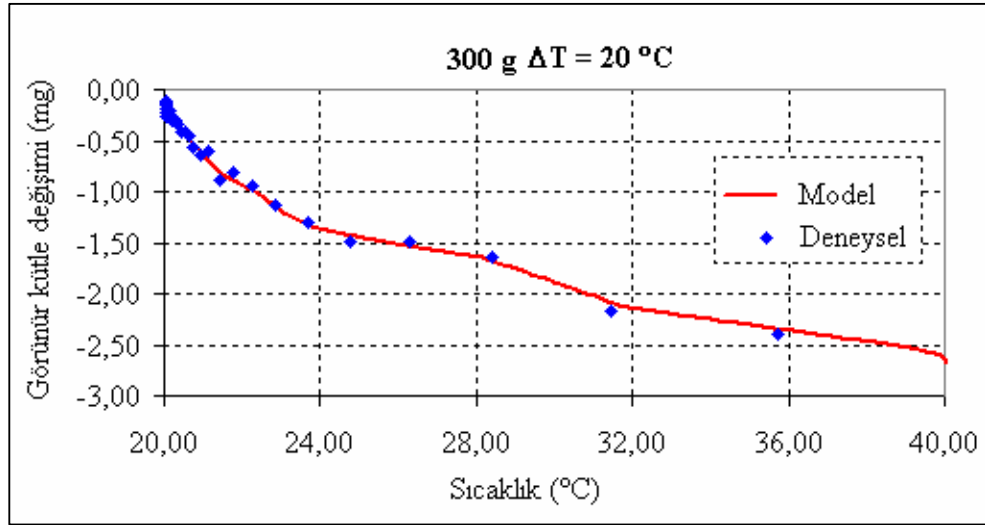
Şekil 5.33. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



Şekil 5.34. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



Şekil 5.35. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi



Şekil 5.36. 300 g'lık kütlede ($t = 0$) anında ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$) iken görünür kütle - yüzey sıcaklığı değişimi

5.2. Elde Edilen Sonuçların Genel Özeti

Bağıl sapma;

$$\Delta\mu = 100 \cdot (|\Delta W_d| - |\Delta W_h|) / (|\Delta W_d| + |\Delta W_h|) / 2 \quad (5.1)$$

formülüyle tanımlanırsa ve tablodaki değerlerden,

ΔT : Ölçümün yapıldığı ortam ile kütle yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını ($^{\circ}\text{C}$),

$\Delta W_{H.K.K}$: Havanın kaldırma kuvveti nedeniyle görünür kütle değişimini (mg),

$\Delta W_{K.E}$: Konvektif etkiler sonucu görünür kütle değişimini (mg), ifade ederse, tablo 5.1'den çeşitli sıcaklık farkı değerleri için görünür kütle değişiminin deneysel sonuçlarını, nümerik analiz sonucu elde edilmiş değerlerini ve bunların karşılaştırmalarını görebiliriz

Tablo 5.1. Farklı ΔT ($^{\circ}\text{C}$) değerlerine göre $|\Delta W_d|$, $|\Delta W_h|$, $|\Delta \mu|$ değişimleri

Kütle	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	$ \Delta W_{HKK} $ (mg)	$ \Delta W_{KE}{}_d $ (mg)	$ \Delta W_{KE}{}_h $ (mg)	$ \Delta W_d $ (mg)	$ \Delta W_h $ (mg)	$ \Delta \mu $ (%)
1kg	20,00	2,62	7,18	7,00	9,80	9,62	1
	15,00	1,97	4,79	4,40	6,76	6,37	2
	10,00	1,31	2,48	2,44	3,79	3,75	0
	5,00	0,66	1,30	1,27	1,96	1,93	1
500 g	20,00	1,27	3,19	3,15	4,46	4,42	0
	15,00	0,96	2,35	2,34	3,31	3,30	0
	10,00	0,64	1,53	1,52	2,17	2,16	0
	5,00	0,32	0,66	0,65	0,98	0,97	0
300 g	20,00	0,76	1,92	1,89	2,68	2,65	0
	15,00	0,57	1,42	1,38	1,99	1,95	1
	10,00	0,38	0,90	0,89	1,28	1,27	0
	5,00	0,19	0,38	0,39	0,57	0,58	1

Bugüne kadar yapılan çalışmalar içinde bir ilk olarak deney düzeneğinde ($\pm 0,1$ °C hassasiyette) ısıtma - soğutma banyosu kullanılmış ve tartım ortamının sıcaklığı 20 °C' ye sabitlenmiştir, böylece ortam sıcaklığı sürekli kontrol altında tutulmak suretiyle zamana bağlı doğal konveksiyonla ısı transferinin ağırlık üzerindeki etkileri, tam olarak ölçülebilmektedir.

1. Böyle bir deney düzeneğinde yüzey sıcaklığı ölçümü için ilk olarak $\pm 0,1$ °C hassasiyete sahip termistörlerin kullanımıyla kütle yüzey sıcaklığı yüksek doğrulukta ve yüksek tekrarlanabilirlikte beş ayrı noktadan ölçülmüştür, yüzey sıcaklığı verileri 0,001 °C çözünürlüğe sahip çok kanallı süpertermometre yardımıyla okunup RS 232 seri haberleşme bağlantısıyla bilgisayara kaydedilmiştir.
2. Deney düzeneğinde ilk olarak, maksimum kapasitesi 1109 g , okunabilirliği 0,01 mg, doğrusallığı $\pm 0,12$ mg, tekrarlanabilirliği 0,02 mg, stabilizasyon süresi 10 s - 20 s, olan bir analitik mikro hassas bir terazi kullanılmış, sıcaklık farklılıkları sonucu oluşacak ısı etkilerinin kütleler üzerinde ne kadarlık bir ağırlık değişimine neden olduğu belirlenmiştir.
3. Farklı nominal değerlerdeki silindirik kütleler için yapılan deneysel çalışmada özellikle ölçümün başladığı ilk iki buçuk saatlik termal stabilizasyon süresince kütle yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığı olan 20 °C' ye doğru hızlı bir soğuma karakteri gösterdiği ve bu zaman dilimi içinde ağırlık (görünür kütle) değişiminin önemli ölçüde farklılık gösterdiği belirlenmiştir.
4. Deneyler sonucunda, farklı nominal değerlere sahip kütlelerde ısı etkileri nedeniyle oluşan görünür kütle değişiminin ne kadarlık bir termal stabilizasyon süresi gerektirdiği belirlenmiştir.
5. Isıl etkiler sonucu oluşan görünür kütle değişiminde yüzey kayma gerilmelerinin etkilerinin ne kadarlık bir sıcaklık farkında kütlelerin ağırlığını ne oranda değiştirdiği yapılan sayısal analiz çalışmasıyla tespit edilmiştir.

6. Sayısal analiz sonucu oluşturulan modelle deneysel bir çalışma yapmaksızın hangi sıcaklık farkında ağırlık üzerinde ne kadarlık bir değişimin görüleceği belirlenebilmektedir.
7. Böylece birincil ve ikincil seviye kütle laboratuvarlarına endüstriden kalibrasyon amaçlı olarak gönderilen ağırlıkların kalibrasyon işlemine başlanmadan önce ne kadarlık bir termal stabilizasyon süresince beklemesi gerektiği, ilaç ve kimya sanayinde kalibrasyon koşullarında sıcaklık farkı sonucu oluşan doğal konveksiyonun mg düzeyinde işlem yapan bu sektör için ağırlık değişimini ne kadar etkileyeceği belirlenmiş olur.

5.3. Öneriler

Bu çalışmada, deney düzeneğinde kullanılan 1 kg, 500 g, 300 g nominal değere sahip silindirik kütlelerde ortalama 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C sıcaklık farkı oluşturmak suretiyle meydana gelen zamana bağlı doğal konveksiyon nedeniyle görünür kütlelerde oluşan değişim hem sayısal modelle hem de deneysel olarak gözlemlendi.

Benzer bir deney düzeneği kurulup bu deney düzeneğinde yine 1 kg, 500 g, 300 g'lık nominal değerlere sahip silindirik kütleler içindeki metalin boşaltılıp yerine elektriksel direnç teli olarak 0,3 mm çapında manganin (CuMo12Ni) teli, rafine edilmiş mineral yağ konulması ve nominal değer olarak yine 1 kg, 500 g ve 300 g değerlerinin yakalanması, ardından (± 25 V) regüleli 0-1 Amper aralığında kısa devre korumalı doğru akım gerilim kaynağı kullanılarak kütlenin sıcaklığının $\pm 0,1$ °C hassasiyetle 25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C ye sabitlenip, kütle yüzeyi ile ortam arasında oluşturulan sıcaklık farkı değerlerin de zamandan bağımsız kararlı durum doğal konveksiyonla ısı transferi sonucu meydana gelecek görünür kütle değişimleri ölçülebilir. Böylece problem daha yalınlaştırılıp kurulacak yeni bir sayısal modelle,

hem zamana bağlı ısı transferi durumuna göre elde edilen sonuçlar hem de zamandan bağımsız kararlı duruma göre ölçülen sonuçlar karşılaştırılabilir.

Paslanmaz  elik malzemelerin yanında kütle standartları hiyerarşisi zincirinde transfer standartları olarak kullanılabilircek seramik, bakır – berilyum gibi malzemelerden üretilmiş kütleler üzerinde de doğal konveksiyon sonucu meydana gelecek görünür kütle değişimleri belirlenebilir.

Yapılan sayısal analizde sonlu hacim metodu kullanılmıştır, sonlu elemanlar metoduna göre sayısal analiz algoritması düzenlenebilir, böylece görünür kütle değişimleri üzerinde ısıl gradyentlerin etkisi bir başka sayısal analiz metodu ile belirlenmiş olur.

KAYNAKLAR

- [1] MASSEN, C.H., PLUIJM, M.J.F.P., LAMMERS, J.T.H., ROBENS, E., POULIS, J.A., "The Influence of Convection on Weighing", *Thermochimica Acta.*, Vol. 103, pp. 45-49, 1986
- [2] GLAESER, M., "Response of Apparent Mass to Thermal Gradients", *Metrologia.*, Vol. 27, pp. 95-100, 1990
- [3] GLAESER, M., DO, J.Y., "Effect of Free Convection on the Apparent Mass of 1 kg Mass Standards", *Metrologia.*, Vol. 30, pp. 67-73, 1993
- [4] MATILLA, V.C., "Study of Waiting Time and Half-Life in a Mass Calibration", *Euromet Project No: 395 Working Document*, 1998
- [5] PINOT, P., "Studies in Connection with Euromet Mass Project No: 395", *Euromet Project No: 395 Working Document*, 1998
- [6] RISKI, K., "Measurement of Temperature Gradients in Mass Comparators", *Euromet Project No: 395 Working Document*, 1998
- [7] GOSSET, A., "Recording of Temperature in the Draft Shield of C 1000S Comparator Close to the Mass Standard Weighing", *Euromet Project No: 395 Working Document*, 1998
- [8] KALLGREN, H., "Earlier Results on Real Weights", *Euromet Project No: 395 Working Document*, 1998
- [9] GLAESER, M., "Change of Apparent Mass of Weights Arising from Temperature Differences", *Metrologia.*, Vol. 36, pp. 183-197, 1999
- [10] MANA, G., PALMISANO, C., PEROSINO, A., PETTORRUSO, S., PEUTO, A., ZOSI, G., "Convective Forces in High Precision Mass Measurements", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, pp. 13-20, 2002
- [11] MATILLA, C., FRUTOS, D.J., CERECEDA, N., "Study of the Free Convection Effect on a Standard Weight Using an Infrared Thermography Imaging System", *Metrologia.*, Vol. 41, pp. 264-271, 2004

- [12] DAVIDSON, S., PEATTIE, G., BUCKLEY, M., PALMER, D., "Investigate Thermal Influence on Weights and on Mass Comparators", NPL Report CMAM 74, 2001
- [13] NAGENDRA, H.R., TIRUNARAYANAN, M.A., RAMACHANDRAN, A., "Free Convection Heat Transfer from Vertical Cylinders Part 1 : Power Law Surface Temperature Variation", Nuclear Engineering and Design., Vol. 16, pp. 153-162, 1970
- [14] NAGENDRA, H.R., TIRUNARAYANAN, M.A., RAMACHANDRAN, A., "Free Convection Heat Transfer from Vertical Cylinders Part 2 : Exponential Surface Temperature Variation", Nuclear Engineering and Design., Vol. 16, pp. 163-168, 1970
- [15] FUJII, T., UEHARA, H., "Laminar Natural Convective Heat Transfer from The Outer Surface of a Vertical Cylinder", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 13, pp. 607-615, 1970
- [16] HAUPTMANN, E.G., "Laminar Boundary Layer Flows with Small Buoyancy Effects", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 8, pp. 289-295, 1965
- [17] GOLDSTEIN, R. J., BRIGGS, D. G., "Transient Free Convection About Vertical Plates and Circular Cylinder", Journal of Heat Transfer, ASME., Vol. 82, pp. 490-500, 1964
- [18] SPARROW, E. M., GREGG, J. L., "Laminar Free Convection Heat Transfer from The Outer Surface of A Vertical Circular Cylinder", Journal of Heat Transfer, ASME., Vol. 78, pp. 1823-1829, 1956
- [19] MILLSAPS, K., POHLHAUSEN, K., "The Laminar Free Convective Heat Transfer from The Outer Surface of A Vertical Circular Cylinder", Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 25 pp. 357-360, 1958
- [20] HANSEN, A. G., "Possible Similarity Solutions of the Laminar Incompressible, Boundary-Layer Equations", Journal of Heat Transfer, ASME., Vol. 80, pp. 1553-1559, 1958
- [21] YANG, K. T., "Possible Similarity Solutions for Laminar Free Convection on Vertical Plates and Cylinders", Journal of Applied Mechanics, ASME., Vol. 27, pp. 230-236, 1960
- [22] ABD-EL-MALEK, B.M., BADRAN, A.N., "Group Method Analysis of Steady Free Convective Laminar Boundary Layer Flow on a Non isothermal Vertical Cylinder", J. of Comp. Appl. Math., Vol. 36, pp. 227-238, 1991

- [23] KULKARNI, A.K., JACOBS, H.R., HWANG, J.J., “Similarity Solution for Natural Convection Flow Over an Isothermal Vertical Wall Immersed in Thermally Stratified Medium”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 691-698, 1987
- [24] OSTRACH, S., “An Analysis of Laminar Free Convection Flow and Heat Transfer About a Flat Plate Parallel to the Direction of the Generating Body Force”, NACA TR 1111, 1953
- [25] GEBHARDT, B., “Transient Natural Convection From Vertical Elements”, *J. of Heat Transfer*, Vol. 83, pp. 61-70, 1961
- [26] MENOLD, E.R., YANG, K., “Asymptotic Solutions for Unsteady Laminar Free Convection on a Vertical Plate”, *J. of Appl. Mechanics*, Vol. 29, pp. 124-126, 1962
- [27] HARLOW, F.H., WELCH, J.E., “A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds”, *J. of Comput. Phys.*, Vol. 8, pp. 197-213, 1971
- [28] HARLOW, F.H., WELCH, J.E., “A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds”, *J. of Comput. Phys.*, Vol. 8, pp. 197-213, 1971
- [29] OZISIK, M.N., “Heat Transfer - A Basic Approach”, McGraw – Hill, New York, 1985
- [30] KIM, S.W., BENSON, T.J., “Comparison of the SMAC, PISO and Iterative Time – Advancing Schemes for Unsteady Flows”, *Comput. Fluids*, Vol. 21, pp. 435-454, 1992
- [31] HUANG, P.G., LAUNDER, B.E., “Comparison of the SMAC, PISO and Iterative Time – Advancing Schemes for Unsteady Flows”, *Comput. Fluids*, Vol. 21, pp. 435-454, 1992
- [32] PATANKAR, S.V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980
- [33] KLEISER, L., ZANG, T. A., “Numerical Simulation of Transition in Wall Bounded Shear Flows”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 495-537, 1991
- [34] KOCHSIEK, M., GLASER, M., “Comprehensive Mass Metrology”, Wiley – VCH, Berlin, 2000

ÖZGEÇMİŞ

Haldun DİZDAR 1974 yılında İzmit’te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı yerde tamamladı. Sırasıyla, 1996 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden Lisans, 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalından Y.Lisans derecesi aldı.

Eylül 2000’ den bugüne TÜBİTAK – UME Kütle Laboratuvarı bünyesinde Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.