

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR SOĞU DEPOLAMA SİSTEMİNİN FARKLI
ÇALIŞMA KOŞULLARINDAKİ PERFORMANSI VE
EKONOMİK ANALİZİ

Nilüfer SÜMBÜL

Ağustos, 2009

İZMİR

**BİR SOĞU DEPOLAMA SİSTEMİNİN FARKLI
ÇALIŞMA KOŞULLARINDAKİ PERFORMANSI
VE EKONOMİK ANALİZİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Termodinamik Bölümü**

Nilüfer SÜMBÜL

**Ağustos, 2009
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

NİLÜFER SÜMBÜL, tarafından **YRD. DOÇ. DR TAHSİN BAŞARAN** yönetiminde hazırlanan “**BİR SOĞU DEPOLAMA SİSTEMİNİN FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARINDAKİ PERFORMANSI VE EKONOMİK ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yrd. Doç. Dr. Tahsin BAŞARAN
.....

Danışman

.....
Doç. Dr. Aytunç EREK
.....

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Gülden GÖKÇEN
.....

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Cahit HELVACI
.....

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tezimin her evresinde bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan, çalıőmalarım süresince sorularımı sabır ve güler yüzle cevaplayan, desteğini ve yardımını hiç bir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Tahsin BAŞARAN'a

Çalıőmalarım esnasında yardım ve desteğini esirgemeyen sevgili arkadaőım Őevket ABACI'ya

Ayrıca deney düzeneğinin hazırlanmasında yardımcı olan Tekniker Alim ZORLUOL'a ve projenin hazırlanmasında bilgilerinden faydalandığım Araő. Gör. Mehmet Akif EZAN'a

Deneysel çalıőmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Makina Mühendisliği bölümünde okuyan arkadaşlarım Erdem ODA'ya, Mustafa BOZNA'ya ve Melih KETME'ye çok teşekkür ederim.

NİLÜFER SÜMBÜL

BİR SOĞU DEPOLAMA SİSTEMİNİN FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARINDAKİ PERFORMANSI VE EKONOMİK ANALİZİ

ÖZ

Isıl enerji depolama sistemlerinden biri olan soğu depolama; gün içi farklı elektrik ücretlendirilmesi sebebiyle kullanıcıya tasarruf sağlamaktadır. Soğutma yükü ihtiyacı genelde elektriğin ucuz olduğu gece boyunca değil, gündüz saatleri boyunca oluşur. Soğu depolama sistemleri, soğutma ihtiyacının olmadığı saatlerde depoladığı enerjiyi soğutma yükünün maksimum olduğu saatlerde kullanır. Ayrıca maksimum enerji ihtiyacının karşılanması için gerekli soğutma sistemi yerine, aynı yükü karşılayacak daha düşük kapasiteli bir enerji depolu soğutma sisteminin kullanımı ilk yatırım maliyetini düşürmektedir. Bu çalışmada, bir soğu enerji depolama sisteminde, boru sarmalı dışında buz oluşturarak depolanan soğu enerjisinin, farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı soğutkan debileriyle değişimi, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, soğutma sisteminin enerji analizi yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak, günlük soğutma yükü ortalama 80000 kJ olan bir ticarethanenin ve bir meskenin soğutma ihtiyacını karşılayacak şekilde soğu depolu bir sistem ve soğu deposuz bir sistem ayrı ayrı karşılaştırılmış ve maliyet hesabı yapılmıştır. Türkiye’de uygulanan elektrik ücretlendirmelerine göre, meskenlerde puant saatlerinde soğutma ihtiyacının olduğu kabulüyle, soğu depolu bir sistem deposuz sistemlere göre daha ekonomik bulunurken; ticarethanelerde soğutma ihtiyacının gündüz saatlerinde olduğu kabulüyle, soğu deposuz bir sistemin kullanımı sisteme soğu deposu eklemekten daha ekonomik bulunmuştur.

Anahtar sözcükler: Isıl Enerji Depolama, Soğu Depolama, Faz Değişimi, Ekonomik Analiz

THE PERFORMANCE OF A COOL STORAGE SYSTEM IN VARIOUS OPERATION CONDITIONS AND ITS ECONOMIC ANALYSIS

ABSTRACT

Cool storage as one of the thermal energy storage systems saves money because of different electricity costs in daytimes. Cooling load is generally demanded during the daytimes besides of the night time in which electricity cost is relatively cheap. Cool storage systems store cool energy during off-peak hours and use the stored energy for cooling purposes at the on-peak hours. Using a cool storage system which met average cooling load instead of cooling system which met maximum cooling load, reduce investment cost. In this study, cool energy storage by ice formation on spiral pipes which are placed in a cool energy storage tank were examined experimentally and numerically for different values of the volumetric flow rate of the coolant and environment temperature. Additionally, energy analysis of the cooling system was also examined. By using of the experimental results, two systems with and without a cool storage tank which were met cooling demand of two environments which were an office and a residence daily cooling load 80000 kJ were compared separately and the cost analysis was made. According to the electric tariff in Turkey, the cost analysis showed that the residence usage of the system with cool storage tank was more economic during the peak cost tariff. But the office usage, the system without cool storage tank was found to be more economic under the assumption of daytime cooling demand.

Keywords: Thermal Energy Storage, Cool Storage, Phase Change, Economic Analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
BÖLÜM İKİ – SOĞU DEPOLAMA.....	5
2.1 Soğu Depolamanın Yararları	5
2.2 Soğu Depolayıcılar	6
2.2.1 Soğuk Su Depolama	6
2.2.2 Buz Depolama	6
2.2.2.1 Dökümlü Buz İle Soğu Depolama.....	7
2.2.2.2 Boru Sarmalı Dışında Buz İle Soğu Depolama	7
2.2.2.3 Boru Sarmalı Üzerinde İçten Eritmeli Buz İle Soğu Depolama.....	7
2.2.2.4 Kapalı Hacimler İçinde Buz İle Soğu Depolama	9
2.2.3 Ötektik Tuz Depolama	9
2.3 İşletme Yöntemlerine Göre Soğu Depolama Sistemleri	9
2.3.1 Tam Depolama	10
2.3.2 Kısmi Depolama.....	10
2.3.2.1 Yük Seviyelemeli Kısmi Depolama	11
2.3.2.2 Talep Belirlemeli Kısmi Depolama.....	11
BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMA	13
3.1 Deney Düzeneği	13
3.2 Deneysel Yöntem	16
3.2.1 Isıl Çiftlerin Sisteme Bağlanması.....	18

3.2.2	Isıl Çiftlerin Kalibrasyonu.....	22
3.2.3	Belirsizlik Analizi	23
3.2.4	Fotoğraf Yardımı ile Buz Kalınlıklarının Belirlenmesi	24
3.3	Isı Kazançları.....	25
3.3.1	Buz Tankında Meydana Gelen Isı Kazancı.....	25
3.3.2	Soğutma Sistemi İle Buz Tankı Arasında Etilen Glikol – Su Karışımının Aktarımını Sağlayan Boru Boyunca Oluşan Isı Kazancı	26
3.3.3	Buz Çapı Ölçümü Sırasında Meydana Gelen Isı Kazancı	29
BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL SONUÇLAR.....		31
BÖLÜM BEŞ – SAYISAL ANALİZ		46
BÖLÜM ALTI – SOĞUTMA SİSTEMİNİN ENERJİ ANALİZİ		53
BÖLÜM YEDİ – MEVCUT BUZ DEPOSUNUN EKONOMİK ANALİZİ		59
BÖLÜM SEKİZ – SONUÇLAR VE YORUMLAR		64
KAYNAKLAR		67
EKLER.....		70
A.1	Buz Deposunun Ayrıntılı Maliyeti	70
B.1	Deney Sırasında Ölçülen Sıcaklık Değerleri.....	71
C.1	Isıl Çiftlerin Kalibrasyon Eğrileri.....	83
D.1	Quick Basic Programında Sayısal Algoritma.....	86
E.1	Bir Ofisin Isı Kazancı Hesabı.....	87
F.1	Semboller.....	94

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Dünyadaki fosil enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve çevreye verdikleri olumsuz etkileri nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının efektif kullanımı önem kazanmış ve bu bağlamda enerjinin depolanması konusunda önemli adımlar atılmaya başlanmıştır.

Enerji depolamadaki amaç, enerji üretiminin fazla, tüketimin az olduğu zaman diliminde depolanarak ihtiyaç duyulan zaman diliminde kullanılmasıdır. Genel olarak enerji, kimyasal, mekanik, elektrik ve ısı enerji olarak depolanabilir.

Isıl enerji depolama, düşük veya yüksek sıcaklıktaki ısı enerji kaynağının daha sonra kullanılması amacıyla depolanmasıdır. Kışın oluşan buzların yazın soğutmada kullanılması, güneş enerjisinin depolanarak gece periyodunda ısıtmada kullanılması ısı enerji depolamaya örnek olarak gösterilebilir. Isı enerjisi, ısı depolayan materyalin iç enerjisinin değişmesi sonucunda, duyulur ısı ve gizli ısı şeklinde depolanabilir.

Birim hacimdeki iç enerji değişimi fazla olan ısı depolama materyallerinin kullanılması durumunda, ısı depolama için gerekli hacim azalır. Isı depolama materyali iç enerjisinin önemli oranda değişmesi, bu materyalin faz değiştirmesine neden olur. Uygun sıcaklık sınırlarında, depolama materyalinin faz değiştirmesiyle ortaya çıkan gizli ısı depolanabilir. Bu nedenle ısı depolama amacıyla, belirli sıcaklıklarda ergime, buharlaşma veya diğer faz değişimlerine uğrayan ve ısı depolama kapasitesi yüksek olan materyallerden yararlanır. Gizli ısı depolama yöntemi, ısı depolama kapasitesinin yüksek olması ve ısı depolama materyali faz değiştirme sıcaklığının sabit sıcaklıkta ısı depolamak için uygun olması nedeniyle, diğer ısı depolama yöntemlerine göre istenilen özelliklere sahiptir (Öztürk, 2005, s.1).

Birçok ülkede, farklı zaman dilimlerinde farklı elektrik tarifesi uygulanması, ayrıca ihtiyaç duyulan elektrik gereksiniminin tepe yükünün azaltılması buna bağlı olarak da ilk yatırım maliyetinin düşmesi sonucu enerji maliyetinde düşüş sağlaması açısından enerji depolama sistemleri önem kazanmıştır.

Bu tezin de ana amacını oluşturan soğu enerjisinin buz olarak depolanmasının getirdiği ekonomik avantaja ilişkin literatürde birçok çalışma mevcuttur. Sponsel ve Hilligweg (2003) yaptıkları çalışmada, konvansiyonel soğutma sistemi ile buz depolama sistemini karşılaştırmışlardır. Buz depolama sistemlerinin, gün içinde düşük tarifeli saatlerde çalıştırılabildiklerinden; elektrik maliyetinin, konvansiyonel soğutma sistemine oranla daha düşük olduğunu saptamışlardır.

Habeebullah (2006) yaptığı çalışmasında, Suudi Arabistan'daki Grand Holy adlı caminin iklimlendirmesinde kullanılan soğutma grubuna buz deposunun ilave edilmesiyle, elektrik tarifesi farkından dolayı, sistemin ekonomik yönden getirisini incelemiştir.

Gün içinde elektrik tarifesinin düşük fiyatlı olduğu zaman diliminde enerji depo edilen ve bu enerjiyi tarifenin yüksek fiyatlı olduğu zaman diliminde kullanımını sağlayan depolama sistemleriyle ilgili bir çalışma Başaran ve Erek (2003) tarafından yapılmıştır.

Doğan (2007) yaptığı çalışmasında, Antalya Side mevkiinde, bir otelin soğutma yükünü belirlemiş ve bu yükü karşılamak için üçlü elektrik tarifesinden yararlanma amaçlı soğu depolu bir soğutma sistemi kurmanın soğu deposuz soğutma sistemlerine göre maddi tasarruf sağlayacağını, yıllık eşdeğer metodu yardımıyla açıklamıştır. Ayrıca, ek depo kurulumunun getirdiği tasarrufla, kurulum maliyetinin basit geri ödeme yöntemiyle 4 yılda kendisini geri ödediği gösterilmiştir.

Soğutma ihtiyacı sabit olmayan bir binada soğu deposu kullanılarak, yük ihtiyacının düşük olduğu zamanlarda depo edilen enerji, pik yükleri karşılamak için

kullanılmış ve bu şekilde daha küçük ebatlı bir soğutma tertibatının aynı yükü karşılayabildiği Hilligweg ve Hoffmann (2003) tarafından gösterilmiştir.

Bir soğu depolama sistemi dizaynının maliyet analizini yapan ve elde edilen tasarrufu hesaplayan bir bilgisayar programının geliştirilmesine ilişkin yapılan çalışmalar Baughman, Jones ve Jacob (1993), Comnes, Kahn, Pignone ve Warren (1988) tarafından detaylı olarak anlatılmıştır.

Enerji depolama sistemlerinin avantajlarından birisi de, yaz aylarında soğutma amaçlı kullanımlarda, gece saatlerinde, gündüz saatlerine oranla dış ortam sıcaklığının daha düşük olmasından dolayı, depo edilen enerjinin miktarında kayda değer artışların meydana gelmesidir. Soğutma sistemlerinin performansı, düşük dış ortam sıcaklıklarında daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Bu çalışmada ısı enerjisi depolama yöntemlerinden biri olan faz değişimli soğu enerjisi depolama sisteminin ısı davranışı incelenmiştir. Tezin ikinci bölümünde soğu depolamaya ilişkin tanımlamalar verilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği sistem, bir soğutma grubuna entegre buz tankından oluşmaktadır. Su dolu tank içinde bulunan polietilen sarmal boruların içinden etilen glikol su karışımı geçirilip; dış yüzeyinde buz kütlesi oluşturularak soğu enerjisi depolanmaktadır. Bu bağlamda deneysel düzenek ve yöntem üçüncü bölümde tanımlanmıştır. Ayrıca sistemin ısı kazançları da aynı bölümün kapsamındadır. Sistem, 10 saat boyunca çalıştırılarak; birer saat arayla sistemin buz ve su kütlesine bağlı olarak depoladığı enerji ve tükettiği elektrik enerjisi ölçülmüştür. Deneysel çalışma, üç farklı ortam sıcaklığında, 20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak ve 50 lt/dak soğutkan debisi değerleri için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar dördüncü bölümde verilmiştir.

İncelenen sistemde, sarmal boruların dış yüzeyinde oluşan buz kütlesi miktarının belirlenmesi için katılaşma probleminin integral yöntemle bir boyutlu çözümü gerçekleştirilmiştir. Çözüm tek bir ortam sıcaklığı ve 30 lt/dak ve 50 lt/dak soğutkan debileri için elde edilmiştir. Yöntem ayrıntılı olarak beşinci bölümde irdelenmiştir.

Deneysel çalışma sırasında, soğutma sisteminde dolaşan soğutucu akışkanın (R22) çevrim elemanlarına giriş – çıkış sıcaklık ve basınçları belirlenmiş ve çevrimin enerji analizi altıncı bölümde yapılmıştır. Ayrıca soğutma sisteminin performans katsayısı da hesaplanmıştır.

İncelenen sistem, saatte yaklaşık 10000 kJ'lük soğutma yükünü karşılayabilecek kapasitede tasarlanmıştır. Günlük soğutma yükü ortalama 80000 kJ olan iki ortamın soğutma ihtiyacını karşılayacak şekilde soğu depolu bir sistem ve soğu deposuz bir sistem ayrı ayrı karşılaştırılmış ve maliyet hesabı yapılmıştır. Mekân olarak ofisler ve meskenler düşünülmüştür. İki ayrı mekânın incelenme sebebi, farklı elektrik tarifesi uygulanması ve ofislerde genelde soğutma ihtiyacının gündüz saatlerinde; konutlarda ise mesai bitimi yani akşam saatlerinde olmasıdır. Gün içinde üç farklı elektrik fiyatlandırmasında tarifeler arasında dikkate değer farklılıklar bulunmaktadır. Bu nedenle sistemin; tarifenin en uygun olduğu saatlerde çalıştırılarak, enerjinin depo edilmesi ve ihtiyaç duyulan saatlerde kullanılması amaçlanmaktadır. Seçilen mekânların günlük soğutma yükünü karşılamak için gerekli elektrik enerjisi hesaplanmış ve sisteme getirilen ek soğutma deposunun ilk yatırım maliyetinin; uygulanan gün içi farklı elektrik tarifesinden dolayı elde edilen tasarrufla ne kadar zamanda karşılandığı yedinci bölümde incelenmiştir. Böylece, soğu depolu bir sistemin aynı yükü karşılayacak soğu deposuz bir sisteme göre maliyet analizi yapılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, alınan dört farklı soğutkan debi değerlerinden 50 lt/dak debi değerinde, diğer debilere oranla daha fazla enerji depolandığı görülmüş, ayrıca üç farklı enerji depolama sisteminin bulunduğu ortam sıcaklığında yapılan deneylerde, ortam sıcaklığının düşmesiyle depolanan enerji miktarının arttığı gözlenmiştir. İncelenen iki ayrı mekân için ise, ofis kullanımı mesken kullanımına göre daha az ekonomik bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar sekizinci bölümde yorumlanmıştır.

BÖLÜM İKİ

SOĞU DEPOLAMA

2.1 Soğu Depolamanın Yararları

Ticari amaçlı kullanılan yapılarda, yaz mevsiminde, gündüz saatleri boyunca maksimum soğutma ihtiyacı oluşur. Bu saatler, dış ortam sıcaklığının gün içinde maksimum olduğu, binaların dolu olduğu, cihazların çalıştığı ve aydınlatmaların da olası kullanıldığı saatlerdir. Kullanılan soğutma sistemi, bu maksimum yükü karşılayabilecek şekilde seçilmelidir.

Türkiye de dâhil olmak üzere dünyada birçok ülkede elektrik tüketim ücretleri gün içinde değişiklik göstermektedir. Binalarda soğutma yükünün maksimum olduğu saatlerde elektrik tüketim ücreti pahalı, soğutma yükünün çok az hatta hiç olmadığı saatlerde elektrik tüketim ücreti ucuzdur. Bu ücret değişikliğinden yola çıkarak, soğu enerjisini elektrik tüketim ücretinin ucuz olduğu saat diliminde depolayıp, pahalı olduğu saat diliminde ise depo edilen enerjiyi kullanma fikri ortaya çıkmıştır.

Soğu depolamalı sistemler maksimum yüke göre değil, ortalama bir yüke göre seçilir. Bu nedenle, depolamalı sistemlerde deposuz konvansiyonel sistemlere göre daha küçük ebatta soğutma ekipmanları mevcuttur. Bu ebatların küçülmesiyle kazanılan maddi kazanç, ilave edilen depo tankı maliyetinden fazlasıyla yüksektir. Daha küçük soğutma ekipmanlarının kullanımı, elektrik şebekesine daha az yük binmesini bu sayede elektrik ekipmanlarının boyutlarının küçülmesini sağlar.

Elektrik tüketim ücretinin farklılık gösterip gündüz saatlerinde pahalı, gece saatlerinde ucuz olması; buna bağlı olarak soğunun gece depolanıp gündüz kullanılması, işletme giderlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Soğu depolama sistemleri, su soğutucu ve deponun birlikte optimum kullanımlarıyla soğutma yükünü karşılamada esneklik sağlar. Ayrıca soğutma sistemlerinin yüksek verimle çalışmasına olanak verir.

Mevcut bir soğutma sisteminin kapasitesi arttırılmak isteniyorsa, konvansiyonel deposuz bir sistemin ilavesi yerine soğu deposu ilavesi çok daha ucuza sağlanabilir. Böyle bir sistemde mevcut su soğutucuları atıl kaldıkları saatlerde ek soğutma yükünü karşılayacak şekilde depo için çalışırlar (İlken,1998).

2.2 Soğu Depolayıcılar

Soğu depolayıcı olarak genellikle su, buz veya faz değıştiren ötektik tuzlar kullanılır. Bu faz değışim malzemelerinin her birinin birim hacim başına depoladıkları enerji miktarları ve depolama sıcaklıkları birbirlerinden farklıdır (İlken,1998).

2.2.1 Soğuk Su Depolama

Bu sistemde, soğu, suyun duyulur ısı kapasitesinden (4,18 kJ/kgK) yararlanılarak depolanır. Su, bir soğutucu tarafından soğutulduktan sonra tankta depolanır. İklimlendirilecek ortamdaki gelen ılık su ise yukarıdan tanka verilir. Depolanan soğu enerjisi, depolanan soğuk su ile yükten gelen ılık su arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Soğuk su depolama sistemlerinde su genellikle 4°C – 6,7°C arasında depolanır. Soğuk su depolarında depolama hacmi, depolanan soğuk su ile dönüş suyu arasındaki tabakalaşma derecesine bağlıdır (ASHRAE, 1999).

2.2.2 Buz Depolama

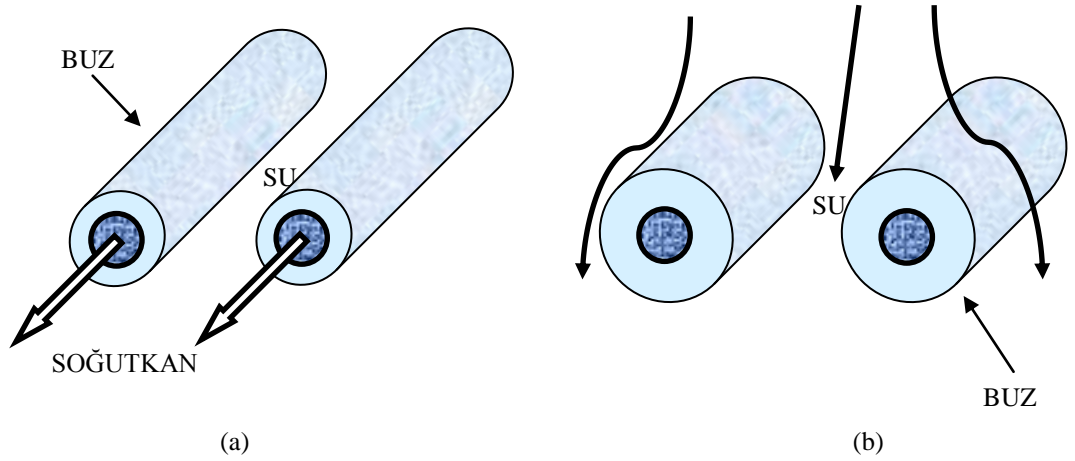
Soğu, buz içerisinde faz değışim gizli ısı (334 kJ/kg), su içerisinde ise suyun duyulur ısı olarak depolanır. Buz yoluyla enerji depolama sistemlerinde buzun depolanması suyun donma noktasında (0°C) meydana gelir. Bu nedenle, soğutkan sıcaklığı –3°C ile –9°C arasında tutulmaktadır. Soğutkan olarak bu sıcaklıklarda soğutmayı sağlayan çalışma akışkanları kullanılmalıdır (ASHRAE, 1999).

2.2.2.1 Dökümlü Buz İle Soğu Depolama

Bu sistem, özel tasarlanmış serpantinli bir evaporatör ve bunun altında; içinde buz ve su karışımı olan bir tanktan oluşur. Soğutma yükünü karşılayan su tanktan evaporatör yüzeyine pompalanır ve su orada dondurulur; oluşan buz tankta depolanır. Soğu geri kazanımında ise, tankın alt kısmından alınan su – buz karışımı soğutulacak ortama gönderilir. Ortamdan geri dönen su tekrar evaporatör yüzeyine pompalanır.

2.2.2.2 Boru Sarmalı Dışında Buz İle Soğu Depolama

Bu sistem, su ile dolu bir depolama tankı içine dizilmiş, iç kısmından sıvı soğutkan geçirilen boru sarmallarından oluşur. Depolama tankı içerisindeki su, boru sarmalı dışında donarak bir buz tabakası oluşturur (Şekil 2.1a). Bu şekilde depolanan soğu, görece ılık geri dönüşüm suyunun tankın içerisine üstten pompalanması ve sarmal üzerindeki buzun eritilmesiyle kullanılmaktadır (Şekil 2.1b).

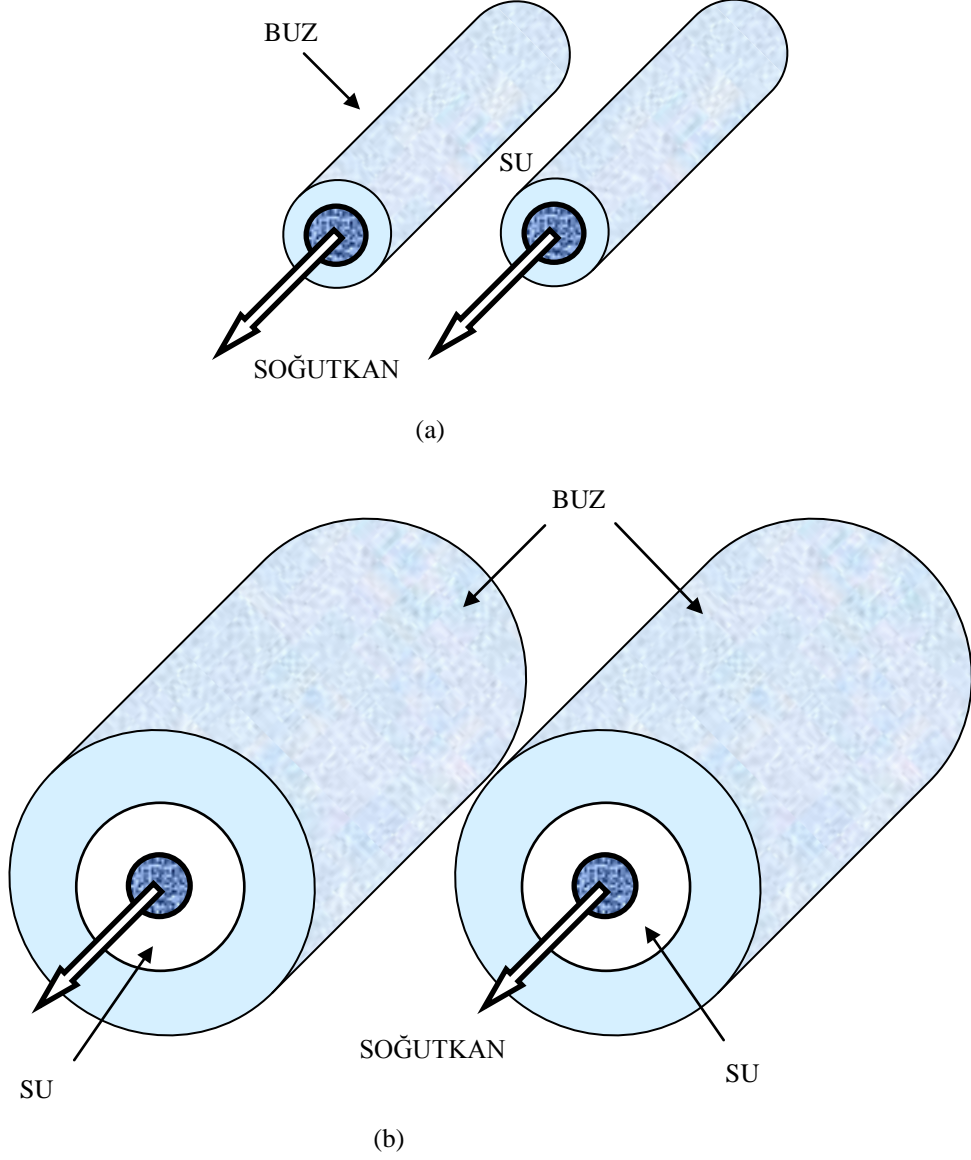


Şekil 2.1 Boru dışında soğu depolama (a) ve soğu geri kazanım (b)

2.2.2.3 Boru Sarmalı Üzerinde İçten Eritmeli Buz İle Soğu Depolama

Bu sistem de, bir önceki boru sarmalı dışında soğu depolama sistemi gibi tasarlanmıştır. Depo aynı şekilde boru sarmalı içerisindeki akışkan (genellikle etilen glikol – su karışımı) geçirilerek, tank içindeki mevcut su, boru çevresinde katılaştırılır ve böylece soğu depolanır (Şekil 2.2a). Fakat soğu geri kazanım diğer

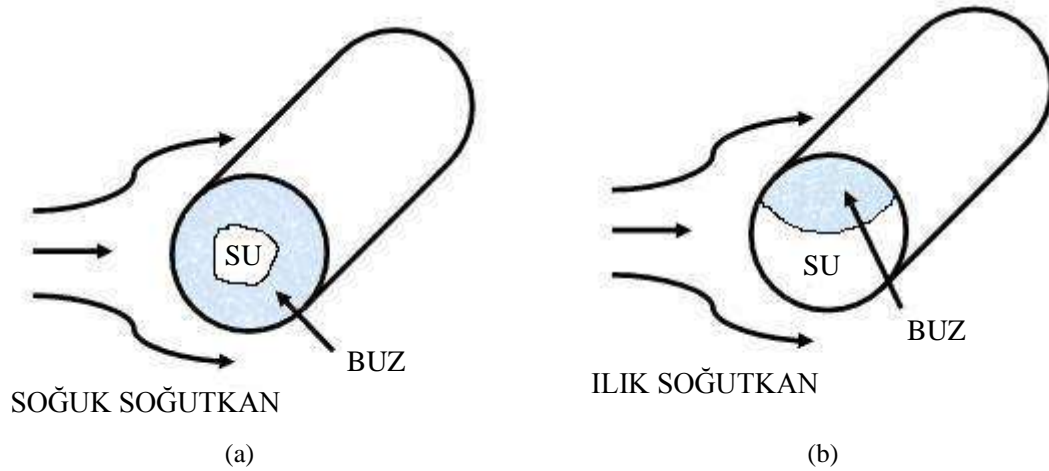
sisteme göre farklılık gösterir. Geri kazanım periyodunda, suyun erime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktaki aynı akışkan boru içerisinde dolaştırılır ve boru dışındaki buz tabakası içten dışa doğru erimeye başlar (Şekil 2.2b). Böylece tank içindeki ılık geri dönüşüm suyu soğutulur.



Şekil 2.2 Boru dışında soğu depolama (a) ve buzdu içten eriterek geri kazanım (b)

2.2.2.4 Kapalı Hacimler İçinde Buz İle Soğu Depolama

Kapalı hacim içindeki suyun dondurulması ve eritilmesi ile soğunun depolanması ve geri kazanımı sağlanır. Su genelde plastik kaplar içerisinde dış yüzeyinden geçirilen soğuk ikincil akışkan (genellikle etilen glikol – su karışımı) vasıtasıyla donar (Şekil 2.3a). Geri kazanım periyodunda ise, kapalı hacmin dış yüzeylerinden ılık akışkan geçirilerek buzun erimesi sağlanır (Şekil 2.3b).



Şekil 2.3 Boru içinde soğu depolama (a) ve soğu geri kazanım (b)

2.2.3 Ötektik Tuz Depolama

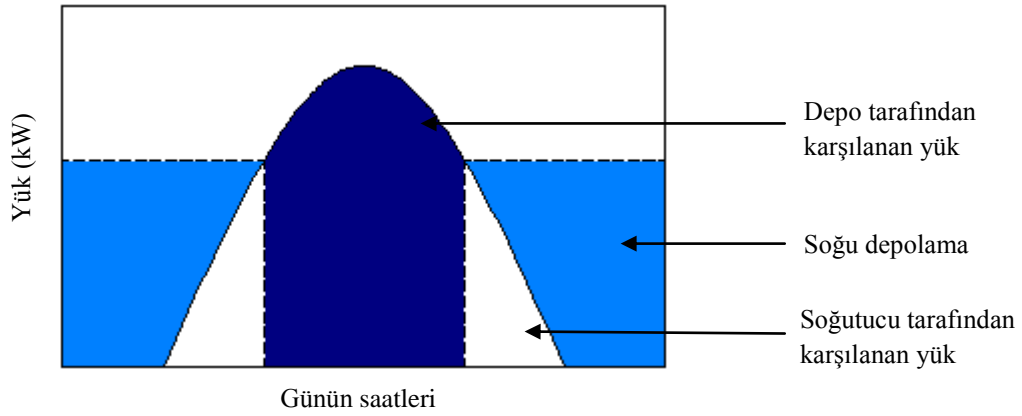
Ötektik tuzlar faz değiştirebilen kimyasal karışımlardır. İçlerinde, organik ve inorganik maddeler bulunabilmektedir. Bu karışımların saf madde gibi sabit birer erime ve donma noktaları mevcuttur. Bu özelliklerinden dolayı, enerji depolama uygulamalarında kullanılabilirler. Bu karışımların faz değişim yoluyla enerji depolamaları için, tipik konvansiyonel su soğutucuları kullanılabilir (İlken, 1998).

2.3 İşletme Yöntemlerine Göre Soğu Depolama Sistemleri

İşletme yöntemlerine göre soğu depolama sistemleri; soğutma yükünün maksimum ve minimum yük miktarına bağlı olarak değişir (İlken,1998).

2.3.1 Tam Depolama

Tam depolamalı sistemlerde, maksimum soğutma yükünün tamamı depo tarafından karşılanır. Bu zaman diliminde soğutma grubu çalışmaz. Diğer zaman dilimlerinde ise soğutma grubu maksimum yükte çalışarak enerjiyi, ya tamamen depolar ya da bir miktarını yükü karşılamak için kullanırken bir miktarını da depo eder (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Tam depolama

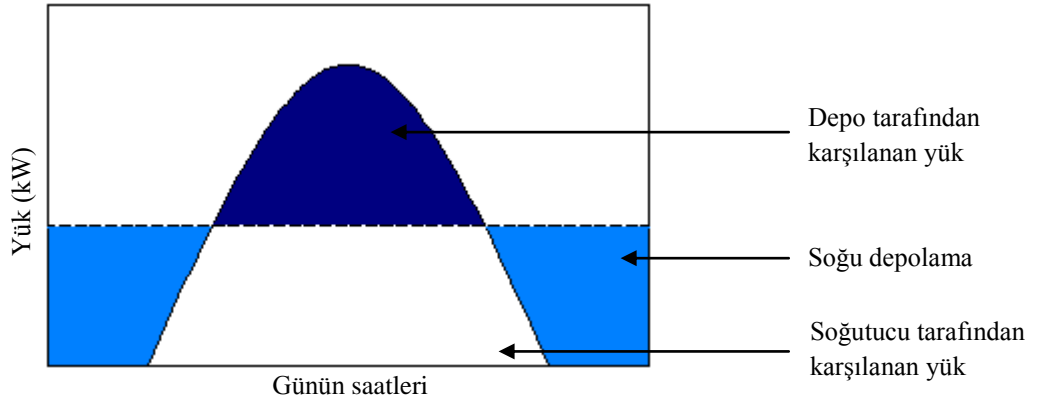
Bu yöntemde, depolanan soğu ile depo tarafından karşılanan yük miktarı eşit olmalıdır. Maksimum yükün olduğu zaman diliminde soğutma grubunun çalışmaması durumu, bu zaman dilimindeki oluşan yükü karşılayacak depo hacmini ve yüksek kapasitede bir soğutma sistemini gerektirir. Tam depolama yöntemi, maksimum soğutma yükünün olduğu zaman aralığı elektrik ücretlerinin en yüksek olduğu zaman dilimine rastlıyorsa ve bu zaman diliminin kısa olması halinde tercih edilebilir.

2.3.2 Kısmi Depolama

Kısmi depolamada, maksimum yükün olduğu zaman aralığında yükün bir kısmı depo tarafından karşılanırken bir kısmı da soğutma grubu tarafından karşılanır. Kısmi depolama yöntemleri iki sınıfta incelenir.

2.3.2.1 Yük Seviyelemeli Kısmi Depolama

Yük seviyelemeli sistemlerde, soğutma grubu tam kapasite olarak 24 saat çalışır. Soğutma ihtiyacı sistem kapasitesinin altında ise, soğu depo edilir, yük soğutma kapasitesini aştığı takdirde yükün bir kısmı depo tarafından karşılanır (Şekil 2.5).

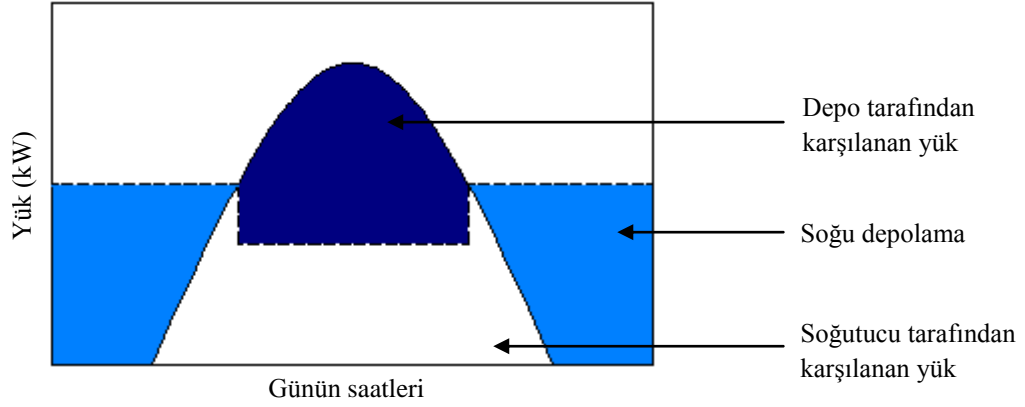


Şekil 2.5 Yük seviyelemeli kısmi depolama

Yük seviyelemeli kısmi depolama sistemleri, maksimum soğutma yükünün ortalama yükten çok fazla olduğu durumlarda tercih edilir.

2.3.2.2 Talep Belirlemeli Kısmi Depolama

Bu yöntemde, soğutma yükünün maksimum olduğu periyotta, soğutma grubu belirlenen düzeyde düşük bir kapasiteyle çalışır. Böylece, yükün bir kısmını soğutma grubu karşılarken diğer kısmı depo tarafından karşılanır. Yük olmadığı zaman ise sistemin tamamı soğunun depolanması için çalışır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Talep belirlemeli kısmi depolama

Bu çalışmada, boru sarmalı dışında buz oluşturarak soğu enerjisi depolayan bir sistem yardımıyla, farklı dış ortam sıcaklıklarının ve farklı soğutkan debilerinin enerji depolamaya etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu sistem, işletme yöntemlerine göre, tam depolama şeklinde çalıştırılmıştır. Fakat tam depolamadan farklı olarak tüm yük depo tarafından karşılanmaktadır. Sistem sadece depolama için çalıştırılmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Düzenegi

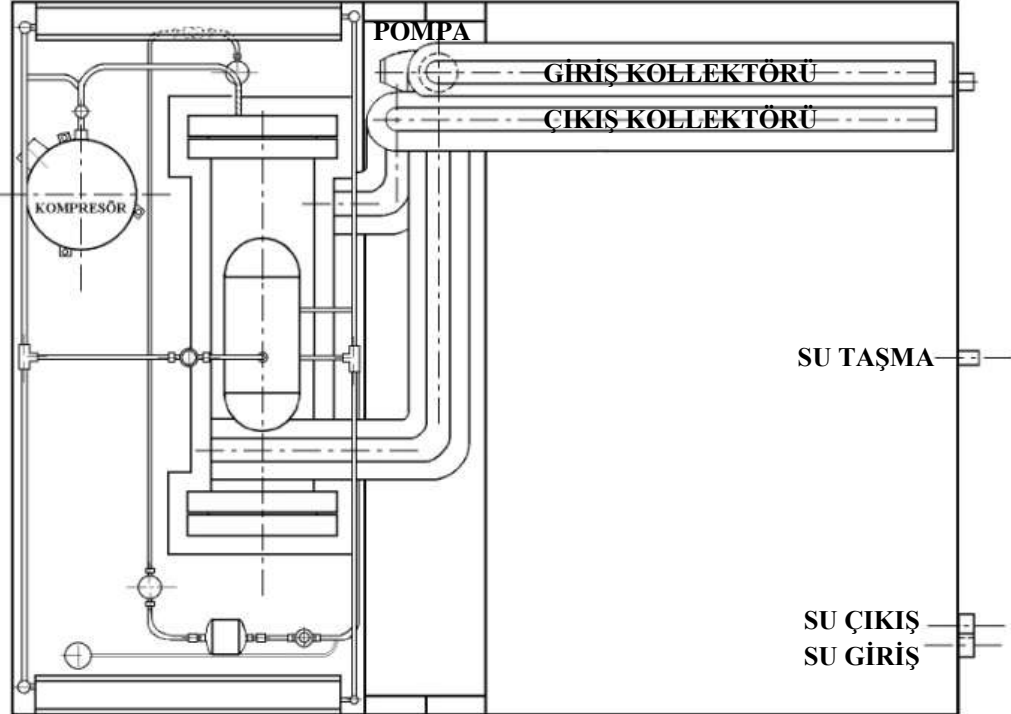
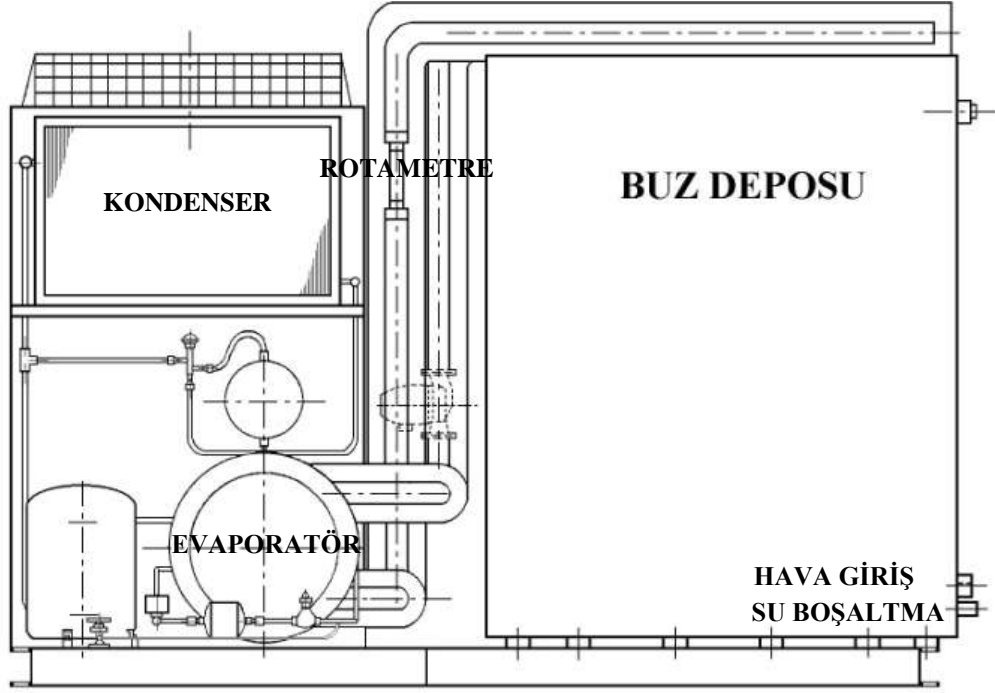
Yapılan deneysel çalışmada, enerji depolamak amacıyla bir soğutma grubuna entegre “buz deposu” kullanılmıştır. Şekil 3.1’de soğutma grubu ve depo ile birlikte etilen glikol – su karışımını sirküle ettiren pompa ve debisinin belirlendiği rotametre görülmektedir. Ayrıca, ön planda yer alan veri toplayıcıdan ısı çiftlerinin sıcaklık ölçüm değerleri alınmaktadır.



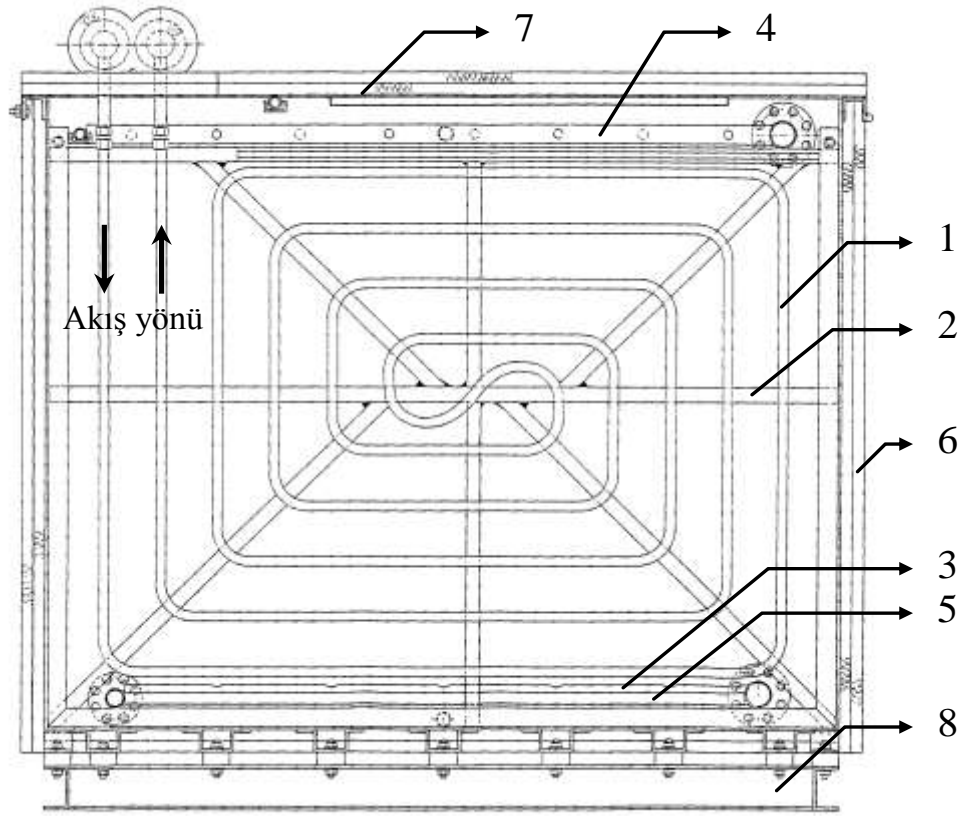
Şekil 3.1 Soğutma grubu ve entegre buz deposu

Şekil 3.2’de soğutma grubu ve ilave buz deposunun teknik çizimi verilmiştir. Soğutma grubunda, soğutucu akışkan olarak freon 22 kullanılmaktadır. Şekil 3.3’de detaylı olarak verilen buz deposu, su ile doldurulmuş ve içerisine 8 adet 13 mm iç çapında ve 17 mm dış çapında 13 m uzunluğundaki polietilen borular (1)

sabitlenmiştir (2). Soğutma grubundaki boru – kovan tipi evaporatörden çıkan %40'lık etilen glikol – su karışımı, giriş kollektörü vasıtası ile buz deposu içerisindeki borulara dağıtılmakta ve çıkış kollektöründen toplanarak, soğutma grubu evaporatörüne gönderilmektedir. Böylece su ile dolu tankın içerisinde bulunan polietilen boruların dış yüzeyinde buz oluşumu sağlanmaktadır. Oluşacak buz kalınlığı göz önüne alınarak, boru eksenleri arasındaki mesafe 20 saatlik çalışma sonucuna göre tasarlanmıştır. Depolama tankının alt kısmına su toplama boruları yerleştirilmiştir (3). Amaca yönelik kullanılan su; daha sonra deponun üzerinden tanka dönmektedir (4). Ayrıca, deponun altına yerleştirilen borulardan hava basılabilmektedir (5). Böylece, ergime sürecini hızlandırmak mümkün olabilmektedir. Buz deposu, ikişer cm kalınlığındaki iki kat cam yünü ile yalıtılmıştır (6). Gerektiğinde, bir kapak yardımıyla buz deposunun içine ulaşma imkânı vardır (7). Buz deposu ve soğutma grubu taşıyıcı, NPU profiller üzerine monte edilmiştir (8) (Başaran, Erek, 2003).



Şekil 3.2 Soğutma grubu ve entegre buz deposu



Şekil 3.3 Buz tankının kesit resmi

3.2 Deneysel Yöntem

Deneylere başlamadan önce, depolama tankı içerisindeki su, sıcaklığı yaklaşık donma noktasına gelene kadar soğutulur. Su, faz değişim sıcaklığına geldiğinde deney başlatılır. Bu andan itibaren tank içerisindeki polietilen boruların dış yüzeyinde buz oluşmaya başlamaktadır. Deneyin başladığı andan itibaren birer saat aralıklarla sistemin farklı noktalarında bulunan ısı çiftleri yardımıyla bu noktaların sıcaklık değerleri HP marka 34970A Data Logger yardımıyla ölçülmüş ve ayrıca sistemin tükettiği elektrik enerjisi not edilmiştir. Her bir polietilen boru üzerinde oluşan buz çapı, fotoğrafma yöntemiyle zamana bağlı olarak belirlenmiş ve 8 adet borunun ortalaması baz alınmıştır. Şekil 3.4’de görüldüğü üzere fotoğraf makinesi polietilen borulara üstten hizalanarak buz miktarı tespit edilmiştir.



Şekil 3.4 Buz kalınlıklarının deney sırasında fotoğraflanması

Depolanan gizli enerjinin hesaplanması için gerekli katılan buz miktarı, hesaplanan ortalama buz çapları kullanılarak elde edilmiştir. Depolanan gizli ısının hesaplanması için tank içinde oluşan buz hacmi, her bir zaman adımı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buna göre buz hacmi;

$$\sum_{i=1}^8 V_{buz} \ t = \frac{\pi}{4} D_{buz}^2 \ t - D_0^2 \ L \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Depolanan gizli enerji ise;

$$Q_{gizli} \ t = m_{buz} \ t \ \Delta H \quad (3.2)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Depolanan toplam enerjiyi elde etmek için gizli enerjinin yanı sıra duyulur enerjiyi de hesaba katmak gerekir. Burada depolanan duyulur enerji, hem suyun hem de buzun sıcaklık farkından doğan enerjidir:

$$Q_{düyulur} t = m_{buz} t c_{buz} [\bar{T}_{buz} t - T_i] + m_{su} t c_{su} [\bar{T}_{su} t - T_i] \quad (3.3)$$

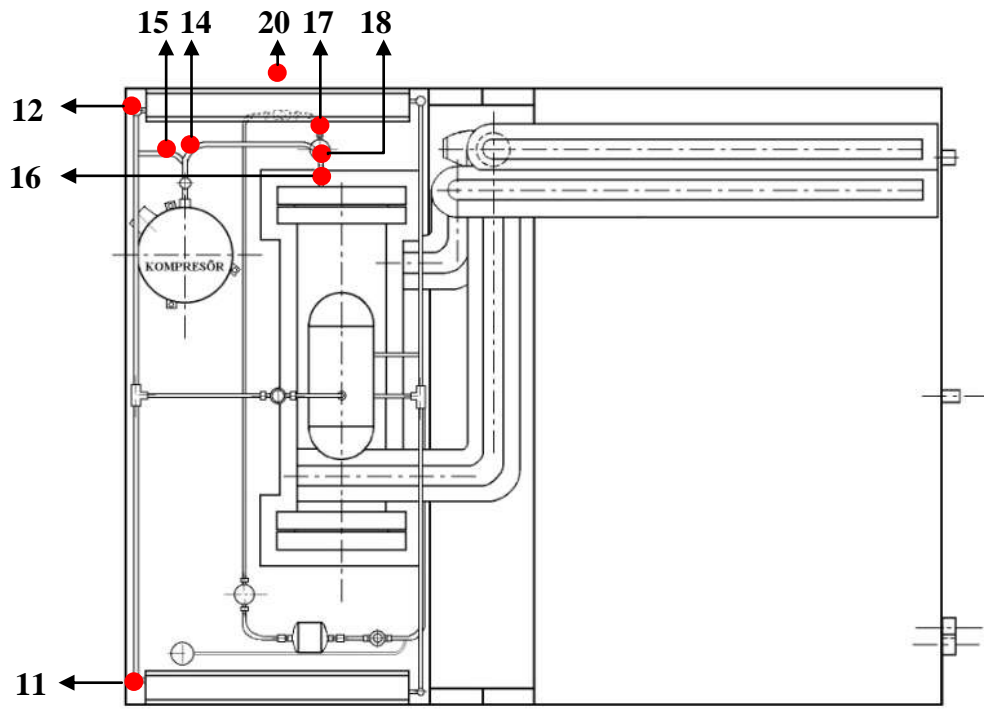
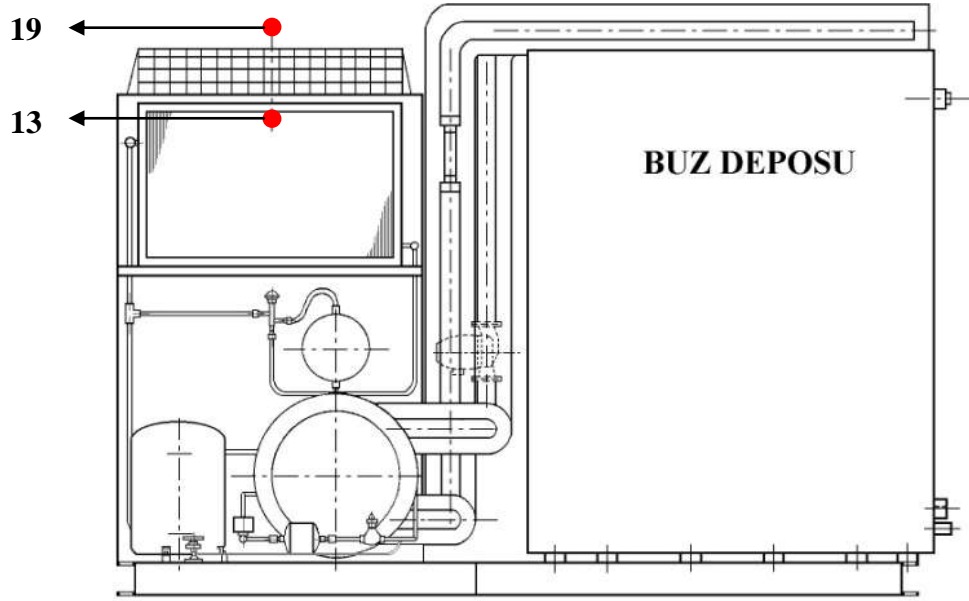
Böylece depolanan toplam enerji,

$$Q_{depolanan} t = Q_{gizli} t + Q_{düyulur} t \quad (3.4)$$

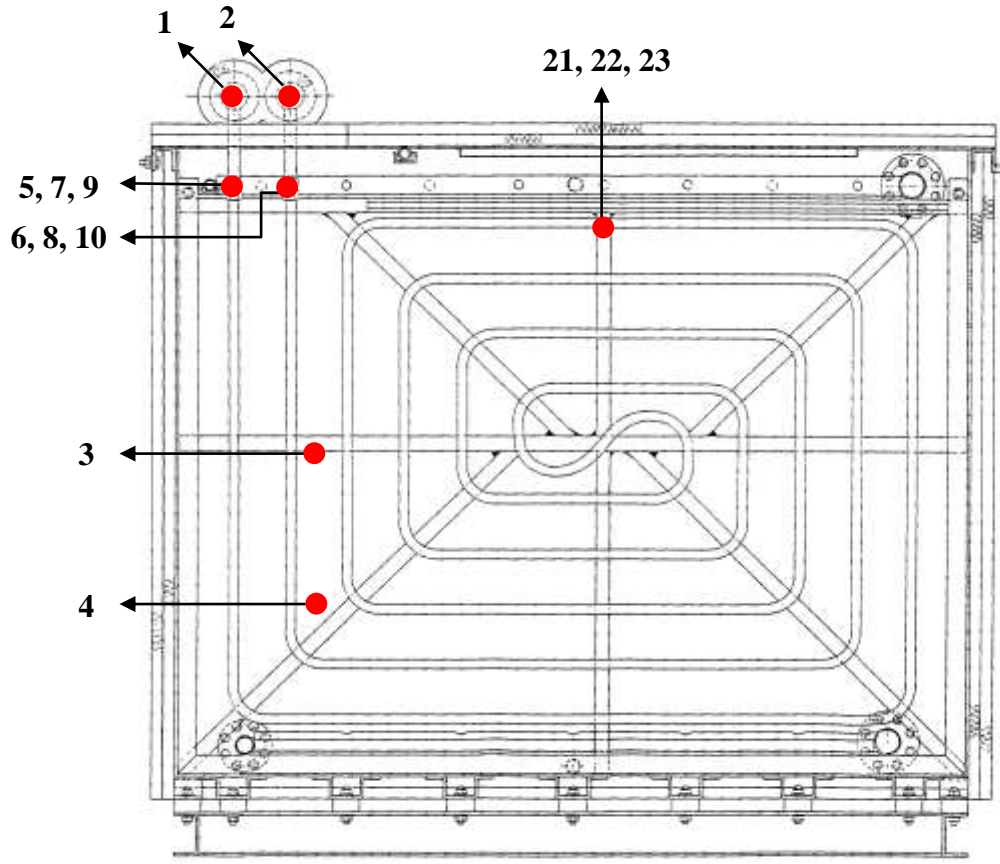
eşitliği ile elde edilir.

3.2.1 Isıl Çiftlerin Sisteme Bağlanması

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da belirtilen noktalar, ısıl çiftlerin sisteme bağlantı noktaları yani deney sırasında sıcaklık değerlerinin okunduğu noktalardır. Şekilde gösterilen her bir sayı ise, bağlı olduğu noktanın ısıl çift numarasını belirtmektedir. Tablo 3.1'de ısıl çiftlerin bağlı olduğu noktaların açıklamaları mevcuttur. Şekil 3.6'da, 5, 7, 9, 6, 8, 10 ve 21, 22, 23 numaralı ısıl çiftlerin bağlantı noktaları aynı yerde gösterilmiştir. Bunun sebebi, hepsinin aynı hizada fakat ardı ardına bulunan farklı boru yüzeylerine bağlı olmasıdır.



Şekil 3.5 Isıl çiftlerin soğutma grubuna bağlantı noktaları



Şekil 3.6 Isıl çiftlerin buz deposuna bağlantı noktaları

Tablo 3.1 Isıl çiftlerin sistem üzerindeki bağlantı noktaları

Isıl Çift Numarası	Isıl Çiftlerin Bağlantı Noktaları	Isıl Çift Numarası	Isıl Çiftlerin Bağlantı Noktaları
1	Etilen glikolün tanka giriş noktası	13	Kondenser içi (fanın emiş alanı)
2	Etilen glikolün tanktan çıkış noktası	14	Kompresör girişi
3	Buz tankının tabanından 63,5 cm yukarıdaki su içerisinde herhangi bir nokta	15	Kompresör çıkışı
4	Buz tankının tabanından 33,5 cm yukarıdaki su içerisinde herhangi bir nokta	16	Evaporatör çıkışı
5	1.borunun dış yüzeyi (giriş noktası)	17	Expantion valf girişi
6	1.borunun dış yüzeyi (çıkış noktası)	18	Expantion valf çıkışı
7	5.borunun dış yüzeyi (giriş noktası)	19	Fan çıkışı
8	5.borunun dış yüzeyi (çıkış noktası)	20	Sistemin bulunduğu ortam
9	8.borunun dış yüzeyi (giriş noktası)	21	1.borunun dış yüzeyi (orta noktası)
10	8.borunun dış yüzeyi (çıkış noktası)	22	5.borunun dış yüzeyi (orta noktası)
11	Kondenser çıkışı (sağ kondenser)	23	8.borunun dış yüzeyi (orta noktası)
12	Kondenser çıkışı (sol kondenser)		

3.2.2 Isıl Çiftlerin Kalibrasyonu

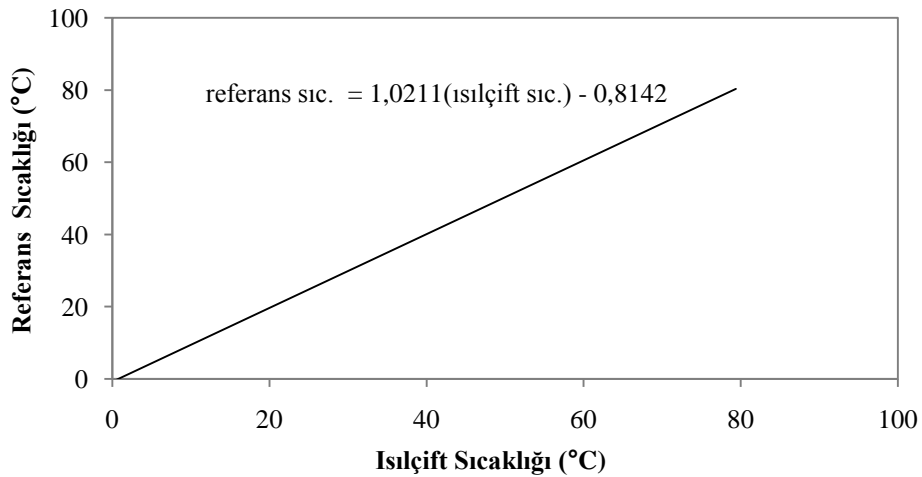
Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan ısıl çiftler, Makina Mühendisleri Odası Kalibrasyon Merkezi'nde (KALMEM), Uzmanlar Metroloji Servisi (UMS) su banyosuna daldırılan PT100 probu ile kalibre edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 KALMEM kalibrasyon odasında bulunan kalibrasyon banyosu ve HP 34970A Data Logger Cihazına bağlı Isıl Çiftler

Kalibrasyonda, T tipi ısıl çiftler, etil alkol ile doldurulan kalibrasyon banyosuna daldırılır ve etil alkol sıcaklığı seçilen değerde sabit kalana kadar beklenilir. Banyo sıcaklığı sabit kaldığında, HP 3458A Multimetre veri okuyucu ile banyonun sıcaklığı 10 kez okutulup banyo içindeki etil alkolün ortalama referans sıcaklık değeri belirlenir. Bir ucu banyo içine daldırılmış ısıl çiftlerin diğer uçları ise buz depolama deneyi sırasında kullanılan HP marka 34970A model Data Logger cihazına bağlanmıştır. Böylece ısıl çiftlerin de banyo referans sıcaklığındaki değerleri, Data Logger cihazı ekranından okunur. Bu işlem seçilen farklı etil alkol sıcaklık değerlerinde tekrarlanır. Yapılan çalışmada, bu değerler, deneysel çalışma koşulları

göz önüne alınarak -10, -5, 0, 20, 30, 40, 50, 60 ve 80°C olarak seçilmiştir. Referans sıcaklıklarına karşılık gelen ısı çift değerleri toplanarak grafik yardımıyla kalibrasyon eğrisi elde edilir. Elde edilen eğriler kullanılarak deney sırasında ölçülen sıcaklıkların gerçek değerleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışma sırasında üç farklı ısı çift kullanılmıştır. Bir ısı çiftin kalibrasyon eğrisi ve bu eğrinin denklemi Şekil 3.8’de verilmiştir. Diğer ısı çiftlerin kalibrasyon eğrileri Ek C.1’de mevcuttur.



Şekil 3.8 -20°C - 80°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ısı çift #1)

3.2.3 Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalar bazı belirsizliklere ve fark edilmeyen hatalara sebep olabilirler. Bu hatalar, deneysel çalışmayı gerçekleştiren kişi tarafından yapılan okuma hataları, çevresel koşulların etkisinden doğan hatalar, deneysel sistemlerin üretimsel hataları ve kalibrasyon hataları olabilir. Bu hatalar, deneysel sonuçlarda bazı sapmalara yol açabilirler.

Yapılan çalışmada, deneysel sonuçların hesabı, sıcaklıklara, soğutkanın hacimsel debisine ve geometrik ölçümlere bağlıdır. Sıcaklık ölçümlerinden kaynaklanan hatalara, hacimsel debi ölçümlerinden kaynaklanan hatalara ve geometrik ölçümlerden kaynaklanan hatalara neden olan belirsizlikler Tablo 3.2’de verilmiştir

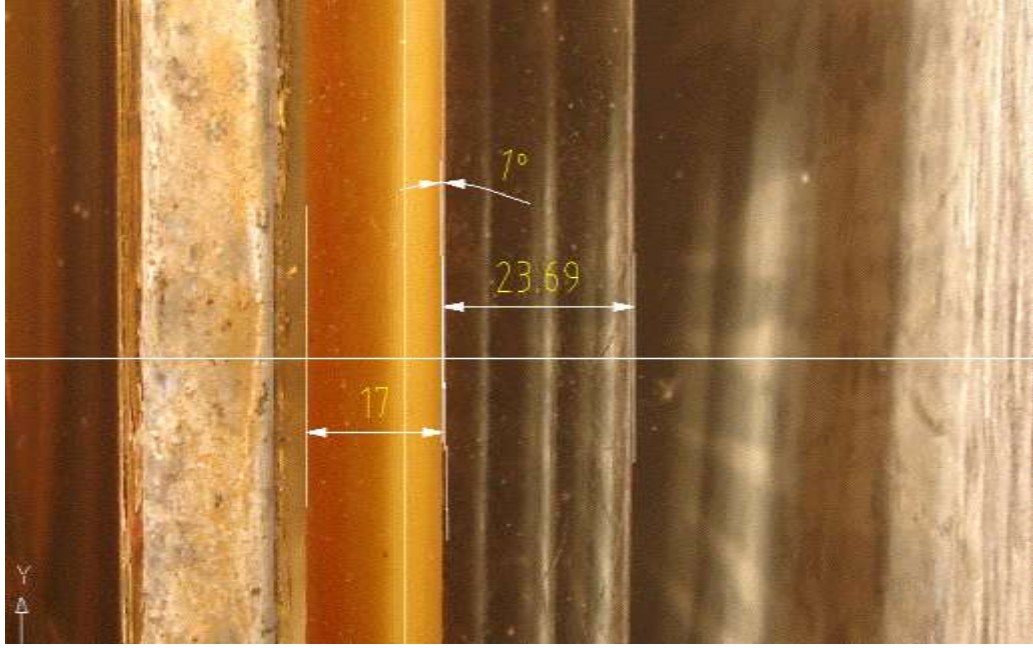
(Asan ve Namlı, 1997). Buna göre sıcaklık ölçümlerinden kaynaklanan toplam belirsizlik $\pm 1,12^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.2 Deneysel parametreler ve belirsizlik yüzdeleri

Parametreler	Belirsizlik Yüzdesi
T-tipi ısı çiftlerinden kaynaklanan belirsizlik	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$
Data Logger cihazından kaynaklanan belirsizlik	$\pm 0,04^{\circ}\text{C}$
Isıl çift bağlantı noktalarından kaynaklanan belirsizlik	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Buz deposuna giren ve çıkan etilen glikol – su karışım sıcaklığının ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Yüzey ve akışkan sıcaklıklarının ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Debimetrede hacimsel debi ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$\pm \% 1,5$
Buz çapı ölçümünden kaynaklanan belirsizlik	$\pm \% 1,0$
Termofiziksel özelliklerden kaynaklanan belirsizlik	$\pm \% 0,15$

3.2.4 Fotoğraf Yardımı ile Buz Kalınlıklarının Belirlenmesi

Deney esnasında tankın içinde bulunan boru sarmalları üzerindeki buz kalınlığı fotoğraflanmış ve bu fotoğraflar üzerinden buz çapını hesaplamak için Autocad çizim programı kullanılmıştır. Fotoğraf görüntüleri Autocad ortamında açılarak Şekil 3.9'da belirtilen biçimde buz kalınlıkları belirlenmiştir. Buz kalınlıkları hesabında aşağıdaki adımlar uygulanmıştır:



Şekil 3.9 Çekilen görüntüler üzerinde yapılan ölçüm örneği (değerler mm cinsindedir)

İlk adım, fotoğrafta görünen polietilen boruların dikliğini sağlamak, ikinci adım ise gerçek değeri bilinen polietilen boru dış çapını (17 mm) referans alarak fotoğrafın ölçeğini gerçek boyuta getirmek. En son adım ise fotoğraf üzerinden polietilen borunun dış çapı ile buzun dış çapı arasındaki mesafenin ölçülmesidir. Daha sonra, bu değere polietilen borunun dış yarıçap değeri eklenmektedir.

3.3 Isı Kazançları

3.3.1 Buz Tankında Meydana Gelen Isı Kazancı

Buz oluşumu ile soğu depolanan tankın dış yüzeyleri, doğal taşınım ile ortam havasına maruz kalmaktadır. Tank içinde yaklaşık 0°C sıcaklığında su varken; dış yüzeyleri daha yüksek sıcaklıktaki havaya maruzdur. Tank yüzeyinden olan ısı geçişi iletim ve taşınım bağıntılarından rahatlıkla hesaplanabileceği gibi deneysel yöntemlerle de hesaplamak mümkündür. Bu çalışmada, buz tankı için ısı kazancı, sistem kapalı konumda iken 24 saat sonunda tank içi su sıcaklık farkından hesaplanmıştır. Gün içi ortalama ortam sıcaklık değerleri 17°C ve 24°C iken iki farklı ısı kazancı hesabı yapılmıştır. Elde edilen değerler Tablo 3.3'de verilmektedir.

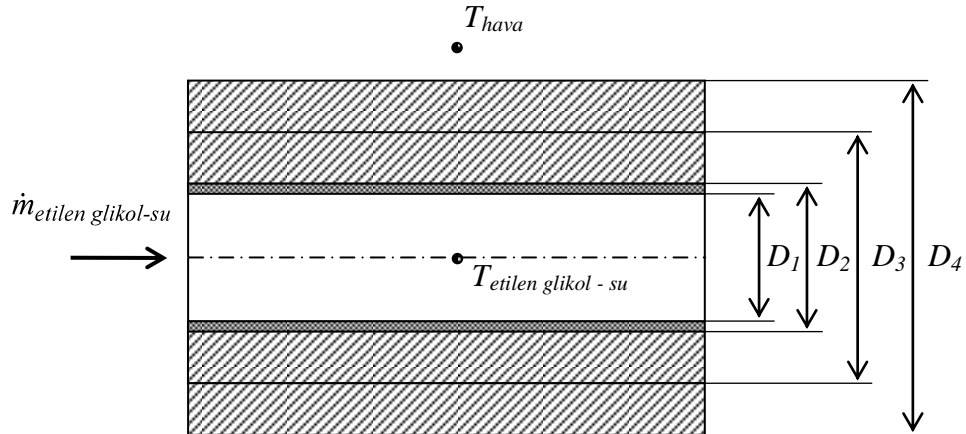
Deneysel parametrelerden biri olan ortam sıcaklığının 31°C olma durumu için ısı kazancı hesabı yapılmadığından ekstrapolasyon ile 14947,2 kJ değeri belirlenmiştir.

Tablo 3.3 Buz tankı için ısı kazancı değerleri

Ortam Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Tarih	Saat	Tank İçi Su Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	24 Saatte Oluşan Isı Kazancı (Q_T) (kJ)
17	12 Şubat 2008	11:25	1,5	12403
	13 Şubat 2008	11:25	3,7	
24	18 Nisan 2008	15:57	2,5	13672
	19 Nisan 2008	15:57	5,0	

3.3.2 Soğutma Sistemi İle Buz Tankı Arasında Etilen Glikol – Su Karışımının Aktarımını Sağlayan Boru Boyunca Oluşan Isı Kazancı

İç kısmından etilen glikol – su karışımı geçmekte olan silindirik şeklindeki $1\ 1/2''$ çaplı galvaniz demir boru, dışarıdan 20 mm kalınlığında yalıtım malzemesiyle iki kat sarılmıştır (Şekil 3.10). Borunun dış yüzeyi ortam havasına maruz kalmaktadır.



Şekil 3.10 Buz tankı – soğutma sistemi bağlantı borusu yan kesit resmi

İçten ve dıştan farklı akışkanlara maruz Şekil 3.10’da kesit resmi verilen silindirik şeklindeki borudan geçen ısı miktarını hesaplamak için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\dot{Q}_B = \frac{T_{hava} - T_{etilen\ glikol-su}}{\frac{1}{2\pi D_1/2 h_1 L} + \frac{\ln D_2/D_1}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln D_3/D_2}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{2\pi D_4/2 h_2 L}} \quad (3.5)$$

(3.5) denkleminde T_{hava} deney süresi boyunca ölçülen ortalama ortam sıcaklığı, $T_{etilen\ glikol-su}$ soğutkanın ortalama sıcaklığı, D_1 boru iç çapı, D_2 boru dış çapı, D_3 birinci kat yalıtım çapı, D_4 ikinci kat yalıtım çapı, h_1 soğutkan ile boru iç yüzeyi arasındaki taşınım katsayısı, h_2 hava ile yalıtım dış yüzeyi arasındaki taşınım katsayısı, k_1 borunun ısı iletim katsayısı, k_2 yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı ve L boru uzunluğudur. Evaporotörden buz tankına etilen glikol – su karışımının girişini sağlayan 3,30 m’lik boru ve buz tankından etilen glikol – su karışımının çıkışını sağlayan 2 m’lik boru için ayrı hesap yapılmıştır. Ayrıca etilen glikol – su karışımının tanka girişinde debimetre bulunmaktadır. Debimetrede oluşan ısı kazancı (\dot{Q}_C)’da denklem (3.5)’e benzer şekilde oluşturulan, iletim direncinin tek olduğu ısı geçiş denklemi ile hesaplanabilir. Debimetre cam malzemedен yapılmış olup dış çapı 51 mm iken iç kısmı konik yapıda olduğu için ortalama olarak 43 mm alınmıştır. Etilen glikol – su karışımının tank çıkış borusuna ise sirkülasyon pompası bağlıdır. Pompadan etilen glikol – su karışımına birim zamanda aktarılan enerji miktarı ve dış ortamdan etilen glikol – su karışımına pompa izole edilmediği için pompa yüzeyinden olan ısı geçişi toplamı (\dot{Q}_{pompa}) 75 W olarak kabul edilmiştir. (3.5) denkleminde etilen glikol – su karışımı ile iç yüzeyi arasındaki ve hava ile dış yüzey arasındaki taşınım katsayıları dışında tüm değerler bilinmektedir. Etilen glikol – su karışımı ile iç yüzey arasındaki taşınım katsayısı boru içi akış için yazılan Nusselt bağıntısından bulunabilir (Incropera, DeWitt, 2001):

$$Nu_D = \frac{f/8 \text{ Re}_D - 1000 \text{ Pr}}{1 + 12,7 \text{ f/8}^{1/2} \text{ Pr}^{2/3} - 1} \quad 3000 \leq \text{Re}_D \leq 5.10^6 \quad (3.6)$$

(3.6) denkleminde Reynolds sayısı (Re_D) ve sürtünme faktörü (f) (Incropera, DeWitt, 2001),

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.7)$$

$$f = 0,790 \ln Re_D - 1,64^{-2} \quad (3.8)$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Akışkanın taşınım katsayısı ise,

$$h_{akışkan} = \frac{Nu_D k}{D} \quad (3.9)$$

eşitliğinden bulunabilir. Burada, Prandtl sayısı (Pr), yoğunluk (ρ), viskozite (μ) ve ısı iletim katsayısı (k) değerleri için akışkanın ortalama sıcaklık değerine karşılık gelen değerler tablolardan seçilmiştir (Genceli, 1998).

Yatay dairesel bir silindir borunun dış yüzeyine etkiyen akışkan için yazılan Nusselt bağıntısından hava ile boru dış yüzeyi arasındaki taşınım katsayısı bulunabilir (Incropera, DeWitt, 2001):

$$Nu_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + 0,559 / Pr^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad (3.10)$$

Burada Rayleigh sayısı (Incropera, DeWitt, 2001),

$$Ra_D = \frac{g \beta (T_b - T_{hava}) D^3}{\nu \alpha} \quad (3.11)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada T_b , boru dış yüzeyindeki yalıtım malzemesinin havayla temas eden yüzeyinin sıcaklık değeri, g yerçekimi ivmesi, β hacimsel ısı genleşme katsayısı, ν havanın kinematik viskozitesi ve α havanın ısı yayılma katsayısıdır. Havanın uygun sıcaklık değerlerine karşılık gelen termofiziksel

özellikleri tablolardan elde edilmiştir (Incropera, DeWitt, 2001). Elde edilen değerler Tablo 3.4’de sunulmaktadır. Burada, debimetre bölgesindeki ısı kazancına ilişkin hesaplamalar da benzer şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar direkt olarak Tablo 3.4’e işlenmiştir. Reynolds ve Rayleigh sayıları denklem (3.7) ve (3.11)’den hesaplanmış ve denklem (3.6) ve (3.10)’da belirtilen aralıklarda bulunmuştur. Böylece Nusselt sayıları denklem (3.6) ve denklem (3.10)’dan hesaplanmıştır. Taşınım katsayıları ise, (3.9) denkleminde bulunabilir.

Tablo 3.4 Evaporatör – buz tankı bağlantı borusundaki ısıl etkileşime dair hesaplamalar

Ortam Sıcaklığı (°C)	Etilen Glikol-Su Karışımının Buz Tankına Giriş Borusu						Etilen Glikol-Su Karışımının Buz Tankından Çıkış Borusu						$\dot{Q}_B + \dot{Q}_C$ (W)
	İç Akış			Dış Akış			İç Akış			Dış Akış			
	Re	Nu	h (W/m ² K)	Ra	Nu	h (W/m ² K)	Re	Nu	h (W/m ² K)	Ra	Nu	h (W/m ² K)	
31	3398	57,27	530,65	1,43.10 ⁶	16,06	3,30	3677	62,74	584,22	1,27.10 ⁶	15,55	3,20	50,25 + 5,94
24	3295	55,73	515,33	1,33.10 ⁶	15,76	3,16	3589	61,47	571,53	1,17.10 ⁶	15,19	3,05	39,74 + 4,77
17	3286	55,60	513,99	1,16.10 ⁶	15,17	2,97	3568	61,15	568,42	1,01.10 ⁶	14,56	2,86	28,79 + 3,45

3.3.3 Buz çapı ölçümü sırasında meydana gelen ısı kazancı

Deneysel çalışma sırasında, birer saat ara ile tank içindeki boru sarmalları dışında oluşan buz çapı ölçümü için fotoğraflama yapılmakta, bu işlem sırasında tankın üst kapağı açık konumda tutulmaktadır. Toplam 10 saat olan deney süresi boyunca yaklaşık 100 dak gibi bir süre buz tankının kapağı açık kalmaktadır. Bu süre zarfında kapaktan doğan ısı kazancı, tank içi su yüzeyi ile hava arasındaki sıcaklık farkından dolayı meydana gelen ısı geçişinden hesaplanabilir. Bunun için taşınım katsayısı hesaplanmalıdır. Yatay yüzey için Nusselt bağıntısı,

$$Nu_L = 0,27 Ra_L^{1/4} \quad 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (3.12)$$

şeklinde tanımlanmıştır (Incropera, DeWitt, 2001). Burada Rayleigh sayısı,

$$Ra_L = \frac{g\beta T_{hava} - T_{su,yüzey} L^3}{\nu\alpha} \quad (3.13)$$

olarak verilmiştir. (3.12) ve (3.13) denklemlerinden hava ile su yüzeyi arasındaki taşınım katsayısı,

$$h = \frac{Nu_L k}{L} \quad (3.14)$$

şeklinde bulunabilir. Birim zamanda su yüzeyinden olan ısı kazancı ise,

$$\dot{Q}_K = hA T_{hava} - T_{su,yüzey} \quad (3.15)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Elde edilen değerler Tablo 3.5’de verilmiştir. Rayleigh sayıları denklem (3.13)’den hesaplanmış ve denklem (3.12)’de belirtilen aralıkta bulunmuştur. Böylece Nusselt sayısı denklem (3.12)’den hesaplanmıştır.

Tablo 3.5 Buz tankının kapağı açıkken hava ile su yüzeyi arasındaki ısı etkileşime dair hesaplamalar

Ortam Sıcaklığı (°C)	Ra	Nu	h (W/m ² K)	\dot{Q}_K (W)
31	$9,44.10^9$	84,17	1,52	60,12
24	$7,24.10^9$	78,76	1,40	39,95
17	$4,98.10^9$	71,72	1,26	23,08

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmada, deney parametresi olarak ortam sıcaklığı ve soğutkan debisi değiştirilmek suretiyle depolanan toplam enerji karşılaştırılmıştır. Deneyler dört farklı hacimsel debi (20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak, 50 lt/dak) ve üç farklı ortam sıcaklığında (ortalama 17°C, 24°C, 31°C) tekrarlanmıştır. Böylece on iki farklı koşulda depolanan enerji değişimini inceleme imkânı bulunmuştur. Parametrelerden biri olan hacimsel debi, polietilen borular içerisinden geçen hacimce %40 etilen glikol – su karışımıdır ve deneye başlamadan önce sistem üzerinde bulunan debimetre yardımıyla istenilen debi değerine ayarlanmaktadır. Diğer parametrelerden biri olan ortam sıcaklığı için ise, yılın farklı dönemlerinde yapılmış ve üç farklı ortam sıcaklığının her biri için ortalama bir sıcaklık dengesi sağlanmaya çalışılmıştır. Deneylerde, on iki farklı koşul için, deney başlangıç anından itibaren on saat süreyle sistem çalıştırılmış ve bu süre boyunca depoladığı soğu enerjisi hesaplanmıştır. Şekil 4.1’de, buz deposunun on saatlik depolama sonunda üstten görünüşü verilmiştir.



Şekil 4.1 10 saatlik depolama sonunda boru yüzeyinde oluşan buz tabakası

Dört farklı soğutkan debisi ve üç farklı ortam koşulu için yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen buz hacmi ve depolanan toplam enerji hesaplanarak tablolara (Tablo 4.1 – Tablo 4.12) aktarılmıştır. Ayrıca, tüm deneyler için, birer saat ara ile harcanan elektrik gücü, deney ortam sıcaklığı (T_o) (20 numaralı ısı çifti ile ölçülmüştür), soğutkan debisinin giriş sıcaklığı (T_g) (1 numaralı ısı çifti ile ölçülmüştür) ve çıkış sıcaklığı (T_c) (2 numaralı ısı çifti ile ölçülmüştür) ve buz tankı içerisindeki ortalama su sıcaklığı ($T_{ort.}$) (3 ve 4 numaralı ısı çifti ile ölçülmüştür) tablolarında belirtilmiştir.

Dört farklı soğutkan debi değeri (20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak, 50 lt/dak) için 14 Eylül 2007, 19 Eylül 2007, 21 Eylül 2007, 25 Eylül 2007 tarihlerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Bu dört deney için deney süreleri boyunca ölçülen ortam sıcaklığı değerleri 28,95°C ila 31,91°C arasında değişmektedir ve dört deneyin ölçülen tüm ortam sıcaklığı değerlerinin ortalaması 30,88°C \approx 31°C olarak hesaplanmıştır. Standart sapması ise 0,88°C'dir. Ortam sıcaklığı ortalama 31°C değerinde iken yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.1, Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'de verilmiştir.

Deneysel çalışma sırasında, soğutkan olarak kullanılan etilen glikol – su karışımının sisteme giriş – çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Deney süresince boru dışında oluşan buz miktarı artmaktadır. Boru yüzeyinde oluşan buz kalınlığı arttıkça, buzun oluşturduğu ısı direnci de artmaktadır. Bu nedenle, sisteme giren soğutkan, buz kalınlığı arttıkça sistemden daha soğuk çıkmaktadır fakat soğutkanın sisteme giriş – çıkış sıcaklık farkı sabit kalmaktadır (Tablo 4.1 – 4.4).

Tablo 4.1 Soğutkan debisi 20 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 31°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\xi} - T_g)$	$T_{\xi}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort.}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	28,95	-9,07	4,53	-4,54	1,60	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,35	29,49	-8,71	4,27	-4,44	0,79	0,0316	9644,57	4829,74	14474,31
2	2,25	29,47	-9,08	4,41	-4,67	0,46	0,0627	19172,71	6851,82	26024,53
3	2,30	29,38	-9,20	4,34	-4,86	0,27	0,0899	27493,18	8014,63	35507,82
4	2,20	29,82	-9,45	4,36	-5,09	0,13	0,1145	34984,46	8892,73	43877,19
5	2,25	29,82	-9,52	4,33	-5,19	0,07	0,1448	44274,21	9371,14	53645,35
6	2,30	29,54	-9,62	4,27	-5,35	0,04	0,1698	51900,59	9639,07	61539,66
7	2,20	29,95	-9,40	4,12	-5,28	0,06	0,1990	60841,56	9613,31	70454,87
8	2,35	29,97	-9,65	4,23	-5,42	0,08	0,2342	71579,84	9703,53	81283,38
9	2,20	29,76	-9,42	4,01	-5,41	0,11	0,2614	79891,50	9650,75	89542,25
10	2,25	29,77	-9,67	4,15	-5,52	0,07	0,2879	88013,47	9942,95	97956,41

Tablo 4.2 Soğutkan debisi 30 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 31°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\xi} - T_g)$	$T_{\xi}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort.}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	30,85	-7,62	2,95	-4,67	1,64	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,50	31,03	-7,54	2,79	-4,75	0,75	0,0381	11641,63	5289,32	16930,95
2	2,50	31,14	-7,72	2,79	-4,93	0,48	0,0699	21373,96	6974,94	28348,90
3	2,30	30,24	-7,97	2,77	-5,20	0,24	0,0994	30377,10	8426,68	38803,78
4	2,25	30,61	-8,00	2,68	-5,32	0,20	0,1253	38304,68	8765,37	47070,05
5	2,45	30,71	-8,21	2,72	-5,49	0,16	0,1542	47133,65	9075,33	56208,98
6	2,30	30,84	-8,24	2,63	-5,61	0,06	0,1824	55755,20	9726,02	65481,22
7	2,35	31,05	-8,33	2,63	-5,70	0,09	0,2050	62672,34	9673,70	72346,03
8	2,35	31,13	-8,50	2,66	-5,84	0,07	0,2418	73904,35	9904,78	83809,13
9	2,35	31,13	-8,58	2,64	-5,94	0,06	0,2723	83245,91	10077,84	93323,75
10	2,40	31,08	-8,64	2,66	-5,98	0,10	0,3006	91869,91	10028,50	101898,41

Tablo 4.3 Soğutkan debisi 40 lt/dak ve ortam sıcaklığı 31°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_c - T_g)$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort.} (^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	31,29	-6,64	2,11	-4,53	1,41	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,40	31,61	-6,99	2,06	-4,93	0,91	0,0438	13384,93	3214,91	16599,83
2	2,40	31,82	-7,28	2,00	-5,28	0,56	0,0746	22789,63	5320,87	28110,50
3	2,45	31,69	-7,45	1,96	-5,49	0,39	0,1011	30916,12	6366,37	37282,49
4	2,45	31,69	-7,62	1,98	-5,64	0,21	0,1348	41205,60	7458,04	48663,64
5	2,35	31,80	-7,88	2,09	-5,79	0,13	0,1602	48952,00	7995,24	56947,24
6	2,45	31,24	-7,88	1,97	-5,91	0,14	0,1997	61026,77	8111,16	69137,93
7	2,40	31,14	-8,03	1,96	-6,07	0,10	0,2318	70864,07	8475,46	79339,53
8	2,45	31,22	-8,13	1,96	-6,17	0,11	0,2632	80447,30	8538,01	88985,31
9	2,25	31,02	-8,27	2,01	-6,26	0,10	0,2913	89044,24	8707,98	97752,22
10	2,35	31,07	-8,31	2,00	-6,31	0,09	0,3185	97351,10	8883,34	106234,44

Tablo 4.4 Soğutkan debisi 50 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 31°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_c - T_g)$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort.} (^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	30,32	-6,17	1,65	-4,52	1,78	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,45	31,43	-6,43	1,62	-4,81	0,71	0,0420	12841,07	6321,08	19162,14
2	2,50	31,48	-6,53	1,62	-4,91	0,47	0,0769	23493,83	7818,38	31312,21
3	2,55	31,89	-6,80	1,56	-5,24	0,25	0,1059	32373,09	9127,20	41500,28
4	2,40	31,91	-7,21	1,64	-5,57	0,09	0,1402	42866,88	10160,16	53027,04
5	2,45	31,69	-7,41	1,66	-5,75	0,08	0,1755	53630,69	10335,39	63966,08
6	2,45	31,66	-7,36	1,48	-5,88	0,11	0,2010	61432,19	10285,52	71717,72
7	2,50	31,62	-7,72	1,67	-6,05	0,08	0,2340	71529,22	10611,72	82140,94
8	2,40	31,80	-7,80	1,65	-6,15	0,09	0,2697	82427,12	10706,79	93133,91
9	2,45	31,71	-7,77	1,63	-6,14	0,10	0,2924	89387,07	10738,49	100125,56
10	2,45	31,66	-7,84	1,59	-6,25	0,07	0,3196	97690,31	10984,31	108674,62

Dört farklı soğutkan debi değeri (20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak, 50 lt/dak) için 17 Nisan 2008, 22 Nisan 2008, 25 Nisan 2008, 29 Nisan 2008 tarihlerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Bu dört deney için deney süreleri boyunca ölçülen ortam sıcaklığı değerleri 22,58°C ila 26,66°C arasında değişmektedir ve dört deneyin ölçülen tüm ortam sıcaklığı değerlerinin ortalaması 24,40°C \approx 24°C olarak hesaplanmıştır. Standart sapması ise 1,26°C'dir. Ortam sıcaklığı ortalama 24°C değerinde iken yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.5 Soğutkan debisi 20 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 24°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\xi} - T_g)$	$T_{\xi}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	23,35	-9,05	4,30	-4,75	1,47	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,20	23,94	-9,28	4,64	-4,64	0,64	0,0459	14038,34	5068,56	19106,90
2	2,30	24,13	-9,46	4,52	-4,94	0,47	0,0720	21994,45	6183,97	28178,42
3	2,40	23,13	-9,64	4,69	-4,95	0,64	0,1039	31756,28	5482,40	37238,68
4	2,40	24,27	-9,79	4,46	-5,33	0,22	0,1336	40825,57	7850,05	48675,62
5	2,30	24,41	-9,85	4,36	-5,49	0,20	0,1703	52049,22	8140,43	60189,64
6	2,30	23,70	-10,21	4,71	-5,50	0,50	0,1983	60615,68	6813,25	67428,93
7	2,20	23,33	-10,28	4,68	-5,60	0,53	0,2298	70251,30	6887,68	77138,97
8	2,40	23,37	-10,32	4,63	-5,69	0,52	0,2661	81331,90	7132,51	88464,40
9	2,30	23,10	-10,13	4,43	-5,70	0,54	0,2872	87775,09	7169,28	94944,37
10	2,30	23,30	-9,55	3,76	-5,79	0,54	0,3228	98681,01	7327,07	106008,08

Tablo 4.6 Soğutkan debisi 30 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 24°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\xi} - T_g)$	$T_{\xi}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	25,93	-6,26	1,49	-4,77	2,69	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,40	25,73	-8,29	2,93	-5,36	1,39	0,0131	3990,10	7482,62	11472,72
2	2,40	24,82	-7,52	3,00	-4,52	0,96	0,0523	15978,04	10193,56	26171,60
3	2,50	24,86	-8,05	3,06	-4,99	0,79	0,0898	27461,92	11441,44	38903,36
4	2,30	24,87	-8,47	3,08	-5,39	0,60	0,1158	35398,69	12593,83	47992,52
5	2,40	26,37	-8,44	2,82	-5,62	0,33	0,1480	45237,16	14159,24	59396,41
6	2,30	26,66	-8,64	2,78	-5,86	0,16	0,1820	55615,96	15201,03	70816,98
7	2,30	26,17	-8,58	2,62	-5,96	0,15	0,2112	64548,18	15376,90	79925,08
8	2,50	26,13	-8,80	2,66	-6,14	0,14	0,2532	77383,71	15649,99	93033,69
9	2,20	26,22	-8,82	2,63	-6,19	0,22	0,2767	84590,71	15381,03	99971,74
10	2,40	26,16	-8,91	2,66	-6,25	0,20	0,3059	93500,95	15609,11	109110,06

Tablo 4.7 Soğutkan debisi 40 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 24°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\zeta} - T_g)$	$T_{\zeta}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	24,90	-6,99	2,11	-4,88	2,80	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,30	25,33	-7,46	2,03	-5,43	1,52	0,0125	3823,49	7364,48	11187,96
2	2,30	25,39	-6,99	1,98	-5,01	0,75	0,0504	15399,41	11934,97	27334,38
3	2,50	25,17	-7,60	2,26	-5,34	0,75	0,0890	27196,27	12193,28	39389,56
4	2,30	25,10	-7,83	2,22	-5,61	0,67	0,1241	37941,12	12861,79	50802,91
5	2,50	24,68	-7,90	2,27	-5,63	0,63	0,1595	48750,52	13314,64	62065,16
6	2,20	25,75	-7,92	1,94	-5,98	0,22	0,1927	58906,37	15538,73	74445,10
7	2,30	24,52	-8,29	2,24	-6,05	0,52	0,2258	69030,92	14262,39	83293,31
8	2,40	25,13	-8,22	2,05	-6,17	0,35	0,2614	79885,90	15256,82	95142,72
9	2,40	25,17	-8,32	2,11	-6,21	0,49	0,2947	90076,30	14786,71	104863,01
10	2,40	26,44	-8,60	2,24	-6,36	0,52	0,3331	101808,40	14893,49	116701,89

Tablo 4.8 Soğutkan debisi 50 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 24°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\zeta} - T_g)$	$T_{\zeta}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	23,37	-6,96	1,83	-5,13	2,70	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,30	23,56	-7,28	1,79	-5,49	1,30	0,0118	3617,40	8002,87	11620,27
2	2,40	23,31	-6,97	1,8	-5,17	0,73	0,0545	16659,81	11477,62	28137,44
3	2,50	22,76	-7,55	1,98	-5,57	0,72	0,0908	27769,21	11827,62	39596,83
4	2,25	22,85	-7,71	1,78	-5,93	0,47	0,1278	39055,69	13363,85	52419,55
5	2,45	23,41	-7,89	1,73	-6,16	0,26	0,1647	50345,82	14624,95	64970,76
6	2,20	22,89	-8,14	1,89	-6,25	0,45	0,2024	61871,60	13933,71	75805,31
7	2,50	23,37	-8,23	1,78	-6,45	0,31	0,2409	73621,25	14799,46	88420,71
8	2,30	23,25	-8,40	1,66	-6,74	0,16	0,2733	83540,96	15659,78	99200,74
9	2,40	23,39	-8,57	1,77	-6,80	0,18	0,3081	94164,45	15732,32	109896,77
10	2,35	22,58	-8,80	1,98	-6,82	0,47	0,3432	104904,85	14657,45	119562,30

Dört farklı soğutkan debi değeri (20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak, 50 lt/dak) için 31 Ocak 2008, 04 Şubat 2008, 11 Şubat 2008, 15 Şubat 2008 tarihlerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Bu dört deney için deney süreleri boyunca ölçülen ortam sıcaklığı değerleri 14,16°C ila 18,79°C arasında değişmektedir ve dört deneyin ölçülen tüm ortam sıcaklığı değerlerinin ortalaması 16,61°C \approx 17°C olarak hesaplanmıştır. Standart sapması ise 1,22°C'dir. Ortam sıcaklığı ortalama 17°C değerinde iken yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.9, Tablo 4.10, Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.9 Soğutkan debisi 20 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 17°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü (kWh)	Ölçülen Sıcaklıklar					Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
		$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\xi}-T_g)$	$T_{\xi}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort.}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	16,27	-7,96	3,52	-4,45	1,39	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,20	16,61	-9,87	4,92	-4,95	0,78	0,0297	9063,28	3692,09	12755,37
2	2,20	16,92	-9,63	4,58	-5,05	0,52	0,0687	20994,87	5413,34	26408,21
3	2,30	16,95	-10,18	4,70	-5,48	0,26	0,1102	33672,53	7056,28	40728,81
4	2,35	17,28	-10,42	4,72	-5,70	0,21	0,1374	41990,34	7480,19	49470,53
5	2,35	16,84	-10,55	4,75	-5,80	0,14	0,1746	53363,13	8031,64	61394,77
6	2,25	16,76	-10,62	4,66	-5,96	0,16	0,2016	61630,80	8048,85	69679,65
7	2,30	16,47	-10,91	4,90	-6,01	0,13	0,2401	73403,14	8420,28	81823,43
8	2,30	16,37	-10,92	4,93	-5,99	0,15	0,2763	84461,97	8489,81	92951,78
9	2,30	16,36	-10,85	4,92	-5,93	0,14	0,3031	92660,55	8643,10	101303,65
10	2,25	16,41	-10,95	4,89	-6,06	0,19	0,3409	104189,14	8586,75	112775,89

Tablo 4.10 Soğutkan debisi 30 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 17°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü (kWh)	Ölçülen Sıcaklıklar					Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
		$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$(T_{\xi}-T_g)$	$T_{\xi}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ort.}(^{\circ}\text{C})$				
0	0,00	17,30	-7,45	1,55	-5,90	1,65	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,30	17,48	-8,27	3,11	-5,16	0,87	0,0518	15840,16	4804,73	20644,89
2	2,35	17,14	-8,81	3,04	-5,77	0,52	0,0891	27227,60	6969,64	34197,25
3	2,20	16,34	-9,29	3,12	-6,17	0,26	0,1219	37255,59	8540,59	45796,18
4	2,40	16,69	-9,53	3,08	-6,45	0,19	0,1597	48819,90	9144,00	57963,90
5	2,30	16,78	-9,09	2,82	-6,27	0,19	0,1946	59488,26	9250,24	68738,50
6	2,30	16,86	-9,32	2,83	-6,49	0,16	0,2217	67761,32	9548,58	77309,89
7	2,40	16,82	-9,54	2,92	-6,62	0,14	0,2546	77832,53	9814,42	87646,95
8	2,30	16,68	-9,68	2,94	-6,74	0,17	0,2927	89480,94	9886,13	99367,07
9	2,30	16,61	-9,66	2,82	-6,84	0,12	0,3248	99266,18	10233,20	109499,38
10	2,30	16,69	-9,72	2,81	-6,91	0,17	0,3595	109890,19	10197,54	120087,73

Tablo 4.11 Soğutkan debisi 40 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 17°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	T _o (°C)	T _g (°C)	(T _ç -T _g)	T _ç (°C)	T _{ort.} (°C)				
0	0,00	17,69	-7,25	1,48	-5,77	1,04	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,40	16,61	-7,79	2,55	-5,24	1,00	0,0575	17581,68	730,86	18312,54
2	2,45	18,03	-8,20	2,28	-5,92	0,43	0,0972	29712,92	4088,44	33801,36
3	2,30	18,48	-8,58	2,31	-6,27	0,32	0,1275	38986,36	4835,83	43822,19
4	2,40	18,66	-8,59	2,20	-6,39	0,18	0,1632	49898,19	5763,97	55662,15
5	2,30	18,79	-8,72	2,15	-6,57	0,17	0,2006	61310,81	5974,95	67285,76
6	2,35	18,43	-9,03	2,21	-6,82	0,11	0,2319	70871,49	6440,10	77311,59
7	2,40	18,40	-9,07	2,15	-6,92	0,12	0,2634	80506,65	6537,16	87043,80
8	2,25	17,83	-8,96	2,16	-6,80	0,18	0,2949	90131,64	6398,52	96530,16
9	2,30	17,22	-9,08	2,14	-6,94	0,18	0,3257	99546,62	6531,14	106077,76
10	2,25	17,28	-9,35	2,21	-7,14	0,15	0,3574	109229,39	6864,53	116093,92

Tablo 4.12 Soğutkan debisi 50 lt/dak ve ortam sıcaklığı ortalama 17°C iken elde edilen veriler

Zaman (Saat)	Harcanan Elektrik Gücü		Ölçülen Sıcaklıklar				Oluşan Buz Hacmi (m ³)	Depolanan Gizli Enerji (kJ)	Depolanan Duyulur Enerji (kJ)	Depolanan Toplam Enerji (kJ)
	(kWh)	T _o (°C)	T _g (°C)	(T _ç -T _g)	T _ç (°C)	T _{ort.} (°C)				
0	0,00	15,31	-7,19	1,81	-5,38	1,49	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	2,25	14,16	-6,94	1,91	-5,03	0,90	0,0414	12665,38	3676,80	16342,18
2	2,30	14,89	-7,44	1,77	-5,67	0,64	0,0890	27190,14	5423,87	32614,01
3	2,35	14,76	-7,76	1,79	-5,97	0,49	0,1251	38232,70	6455,29	44687,98
4	2,40	15,14	-8,07	1,78	-6,29	0,44	0,1630	49813,15	6977,74	56790,89
5	2,40	15,26	-8,35	1,79	-6,56	0,39	0,2021	61766,46	7441,00	69207,46
6	2,30	14,74	-8,11	1,72	-6,39	0,36	0,2309	70579,39	7682,65	78262,04
7	2,35	15,03	-8,14	1,64	-6,50	0,33	0,2783	85055,80	8085,77	93141,56
8	2,35	15,13	-8,33	1,71	-6,62	0,34	0,3105	94904,92	8216,12	103121,04
9	2,40	15,07	-8,32	1,61	-6,71	0,35	0,3426	104713,23	8307,92	113021,15
10	2,35	15,39	-8,46	1,69	-6,77	0,40	0,3812	116529,25	8341,81	124871,06

Yukarıdaki tablolardan hareketle, 10 saatlik depolama sonunda depolanan toplam enerji miktarını, soğutkan debisi ve ortam sıcaklığı parametreleri yönünden karşılaştırma amaçlı Tablo 4.13'de düzenlenmiştir.

Tablo 4.13 Farklı debi ve ortam sıcaklıkları için on saat depolama sonrasında elde edilen enerji miktarı

Soğutkan Debisi (lt/dak)	On Saat Depolama Sonrasında Elde Edilen Enerji Miktarı (kJ)		
	Ortam Sıcaklığı Ortalama 17°C	Ortam Sıcaklığı Ortalama 24°C	Ortam Sıcaklığı Ortalama 31°C
20	112776	106008	97956
30	120088	109110	101898
40	116094	116702	106234
50	124871	119562	108675

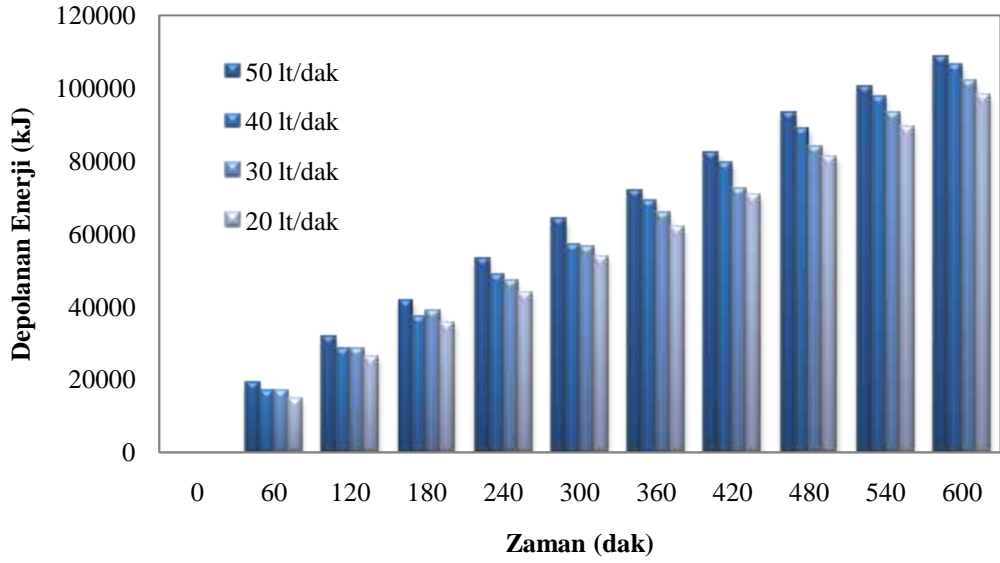
Yapılan çalışmada, üç farklı ortam sıcaklığında (17°C, 24°C, 31°C) ve dört farklı soğutkan debisinde (20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak, 50 lt/dak) depolama gerçekleştirilmiş ve depolamanın zamana göre değişimi gözlenmiştir. Tablo 4.13'e göre ortam sıcaklığı değişmediği takdirde polietilen borulardan dolaşan soğutkan debisi arttırıldığında depolanan enerjide de bir artış gözlenmektedir. Ayrıca sabit debide ortam sıcaklığının değişmesiyle depolanan enerji miktarı da değişmektedir. Deneysel çalışmanın yapıldığı ortam sıcaklığı arttıkça depolanan enerji miktarında azalma söz konusudur.

Deneysel çalışma sırasında Şekil 4.1'de görülen 13m uzunluğundaki 8 adet sıralı polietilen boruların her biri üzerinde oluşan buz çapı birer saat arayla ölçülmüş ve her saat için 8 adet ölçümün ortalaması alınmıştır. Tablo 4.14'de üç farklı ortam sıcaklığı için 50 lt/dak soğutkan debi değerinde 10 saat depolama sonunda 8 adet polietilen boru üzerinde oluşan buz çapı değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları verilmektedir.

Tablo 4.14 50 lt/dak debide 10 saat depolama sonunda elde edilen veriler

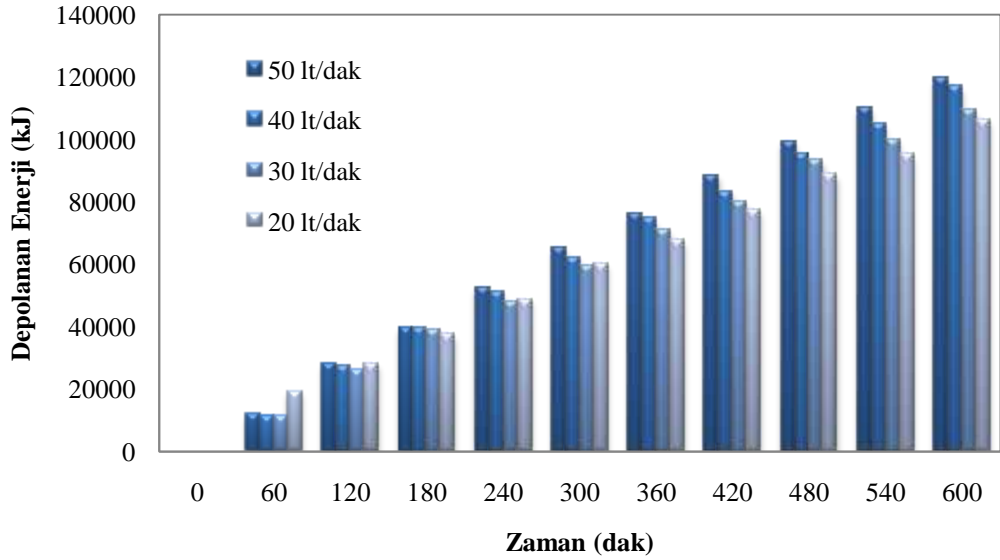
Ortalama Ortam Sıcaklığı (°C)	Ortalama Buz Çapı (mm)	Standart Sapma
31	65,69	2,577
24	67,87	1,982
17	71,24	1,497

Ortam sıcaklığı değeri deney süresi boyunca ortalama 31°C olarak ölçülen ve bu sıcaklık değerinde dört farklı debi için hesaplanan; depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



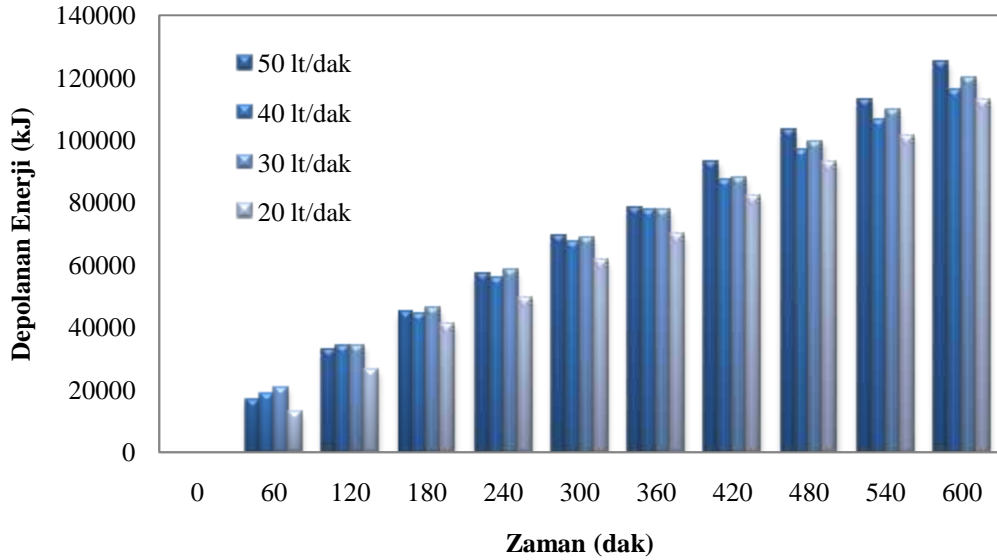
Şekil 4.2 Ortam sıcaklığı ortalama 31°C iken dört farklı debide zamana göre depolanan enerjinin değişimi

Ortam sıcaklığı değeri deney süresi boyunca ortalama 24°C olarak ölçülen ve bu sıcaklık değerinde dört farklı debi için hesaplanan; depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Ortam sıcaklığı ortalama 24°C iken dört farklı debide zamana göre depolanan enerjinin değişimi

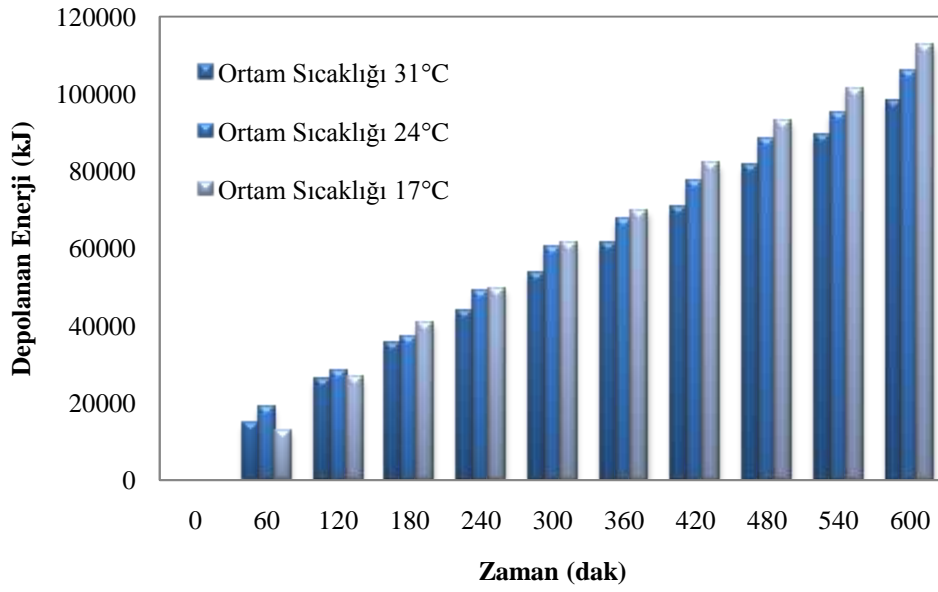
Ortam sıcaklığı değeri deney süresi boyunca ortalama 17°C olarak ölçülen ve bu sıcaklık değerinde dört farklı debi için hesaplanan; depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Ortam sıcaklığı ortalama 17°C iken dört farklı debide zamana göre depolanan enerjinin değişimi

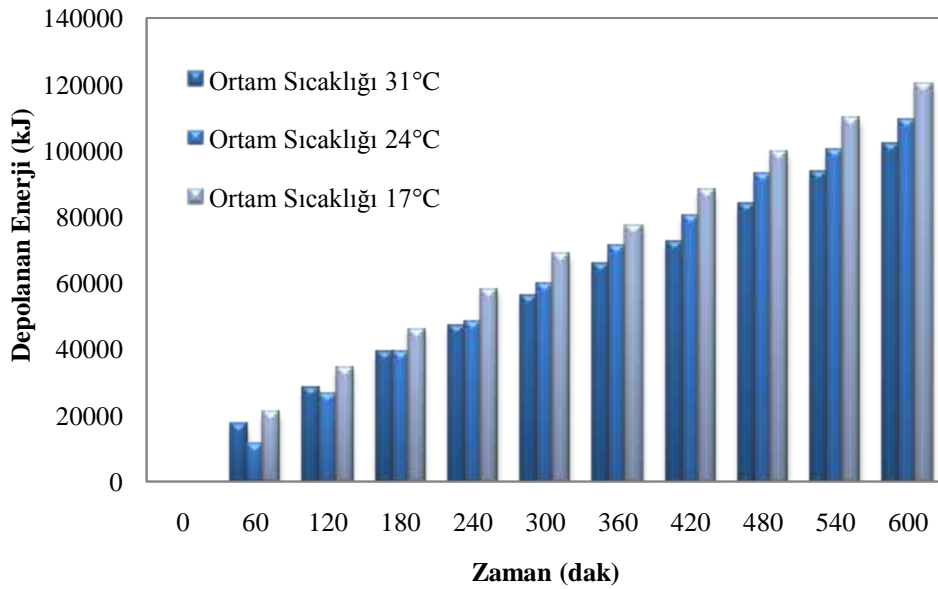
Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4’e bakıldığında, depolama süresi boyunca ortam sıcaklığı sabit tutulduğunda soğutkan debisi arttıkça depolanan enerji miktarında da artış görülmektedir. Deney süresi boyunca her saat diliminde bu artış debi değişimine göre düzenli bir eğilim göstermese de deneylerin tümüne genel olarak bakıldığında depolanan enerji artışının debi artışından kaynaklandığı açıktır.

Ayrıca, depolama tankına giren aynı soğutkan debisi için farklı ortam sıcaklıklarında yapılan deneyler karşılaştırılmıştır. 20 lt/dak soğutkan debisinde yapılan deneyler üç farklı ortam sıcaklığı için karşılaştırılmış ve depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



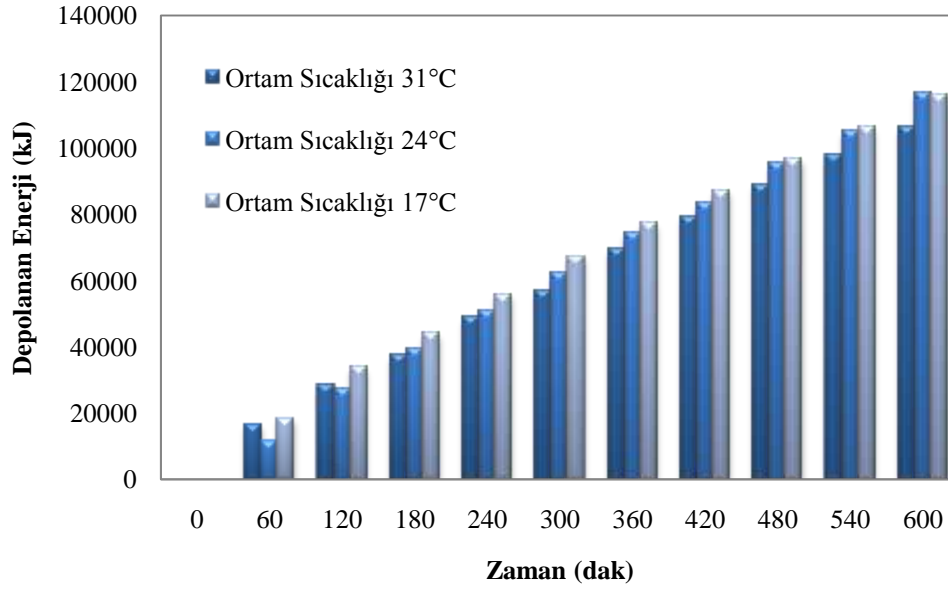
Şekil 4.5 20 lt/dak hacimsel debi için üç farklı ortam sıcaklığında depolanan enerjinin zamana göre değişimi

30 lt/dak soğutkan debisinde yapılan deneyler üç farklı ortam sıcaklığı için karşılaştırılmış ve depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



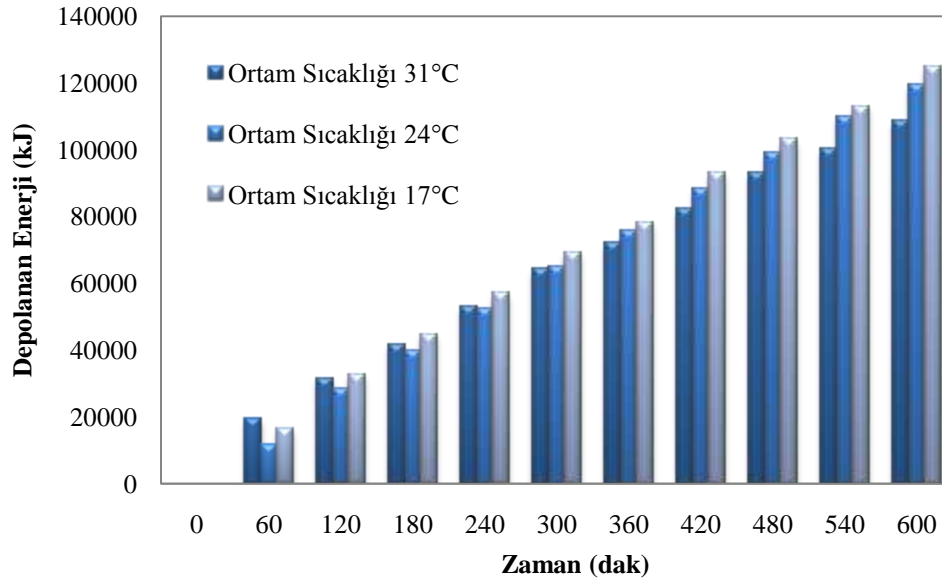
Şekil 4.6 30 lt/dak hacimsel debi için üç farklı ortam sıcaklığında depolanan enerjinin zamana göre değişimi

40 lt/dak soğutkan debisinde yapılan deneyler üç farklı ortam sıcaklığı için karşılaştırılmış ve depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



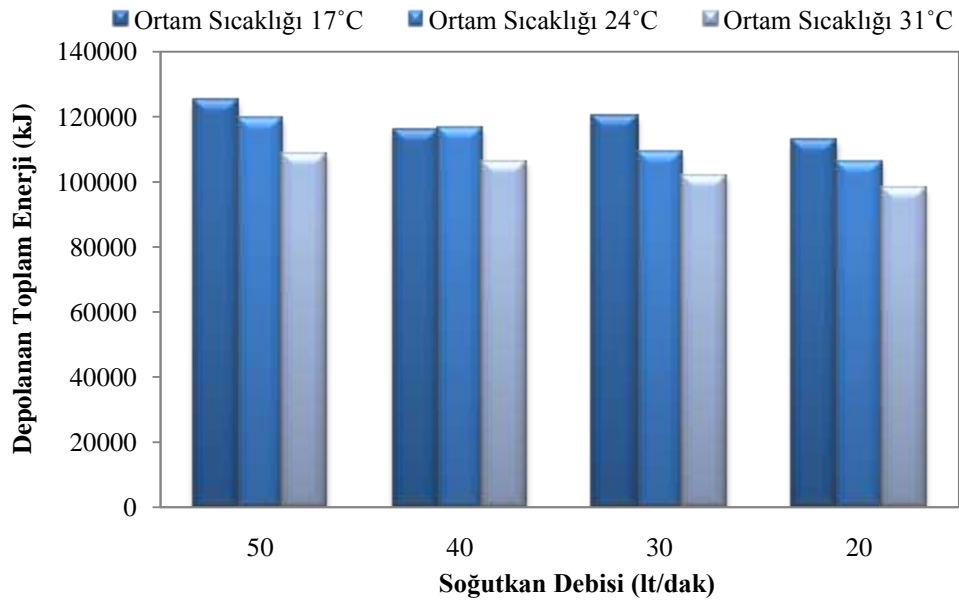
Şekil 4.7 40 lt/dak hacimsel debi için üç farklı ortam sıcaklığında depolanan enerjinin zamana göre değişimi

50 lt/dak soğutkan debisinde yapılan deneyler üç farklı ortam sıcaklığı için karşılaştırılmış ve depolanan enerji miktarının zamana göre değişimi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 50 lt/dak hacimsel debi için üç farklı ortam sıcaklığında depolanan enerjinin zamana göre değişimi

Aynı soğutkan debisi için Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, buz tankının bulunduğu ortam sıcaklığı arttıkça depolanan enerji miktarı azalmaktadır. Dört farklı hacimsel debide gerçekleşen deneysel çalışmaların hepsinde sıcaklık artışının depolamaya negatif yönde etkisi olduğu görülmektedir. Fakat ilk saatlerde depolanan enerji miktarının ortam sıcaklığı ve soğutkan debisi ile orantılı bir şekilde değişmediği görülmektedir. Bunun sebebi olarak deneyin ilk saatlerinde buz tankı içerisinde ısıl dengenin oluşmadığı düşünülmektedir.



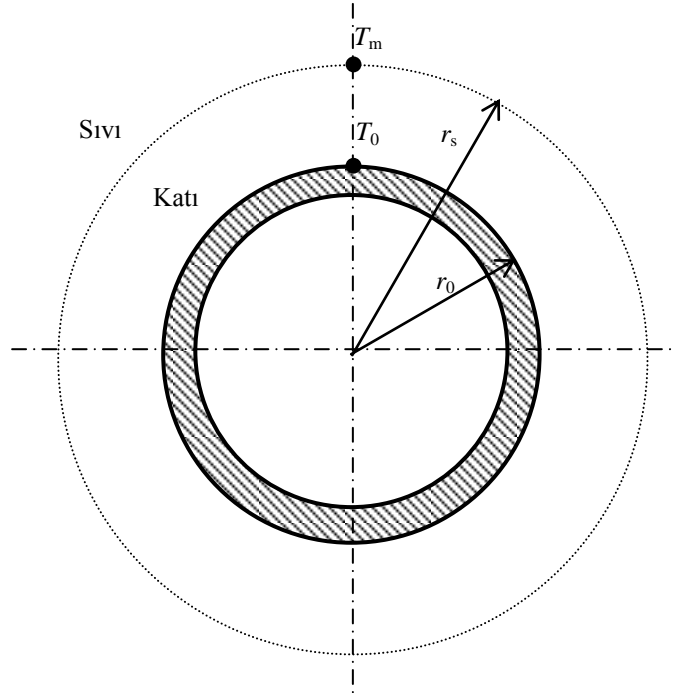
Şekil 4.9 Farklı ortam sıcaklığı ve farklı debi değerlerinde depolanan toplam enerjinin karşılaştırılması

Şekil 4.9'da on iki farklı koşulda gerçekleştirilen depolama deneylerinde depolanan toplam enerji miktarları karşılaştırılmıştır. Burada da görüldüğü gibi, depolanan enerji miktarı debi artışıyla doğru orantılı, ortam sıcaklığının artışıyla ise ters orantılıdır.

BÖLÜM BEŞ

SAYISAL ANALİZ

Silindirik koordinatlarda, dışa doğru katılaşma faz değişim probleminin, sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulu altında (Şekil 5.1) integral yöntemle bir boyutlu çözümü gerçekleştirilmiş (Toksoy, İlken, 1988) ve aşağıda çözüm yöntemi verilmiştir. Bu analitik yaklaşımın özellikle standart laboratuvar ortamında hassas deneysel çalışmalarla uyum içerisinde olduğu vurgulanmış, fakat matematiksel yaklaşımın hata tahmininin ve fiziksel geçerliliğin kontrol edilmesinin benzer problemlerin diğer metotlarla karşılaştırılmasıyla açığa çıkacağı belirtilmiştir (Alexiades, Solomon, 1993).



Şekil 5.1 Boru çevresinde katılaşma

Silindirik koordinatlarda enerji denklemi ve sınır koşulları aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad r_0 < r < s \quad t > 0 \quad (5.1)$$

Katı faz için sınır koşulları;

$$r = r_0 \text{ 'da}; \quad T_s = T_0, \quad t > 0$$

$$r = s \quad t \text{ 'da}; \quad T_s = T_m, \quad t > 0$$

Sıvı faz için sınır koşulu;

$$T_l = T_m; \quad r \geq s \quad t \text{ 'da}, \quad t \geq 0$$

Ara yüzey için aşağıdaki enerji denklemi yazılabilir:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = \rho \Delta H \frac{d_s}{dt} \quad r = s \quad t > 0 \quad (5.2)$$

$$t = 0 \text{ 'da} \quad s \quad t = r_0$$

Verilen enerji denklemleri Tablo 5.1'de verilen boyutsuz parametreler kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

Tablo 5.1 Boyutsuz Değerler

Parametreler	Boyutsuz formu
Radyal koordinatlar (r, s)	$r^* = r/r_0, \quad s^* = s/r_0$
Zaman (t)	$\tau = \alpha_s t / r_0^2$
Sıcaklık (T)	$\theta = (T_s - T_0) / (T_m - T_0)$
Stefan sayısı	$Ste = c_{p_s} (T_m - T_0) / \Delta H$

Buna göre boyutsuz parametreler kullanılarak denklem (5.1) ve (5.2) tekrar düzenlenirse,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial \theta}{\partial r^*} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad 1 < r^* < s^* \quad \tau > 0 \quad (5.3)$$

$$\theta = 0; \quad r^* = 1, \quad \tau > 0$$

$$\theta = 1; \quad r^* = s^*, \quad \tau > 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r^*} = \frac{1}{Ste} \frac{ds^*}{dt} \quad r^* = s^* \quad \tau > 0 \quad (5.4)$$

$$s^* = 1; \quad \tau = 0$$

denklem (5.3) ve (5.4) elde edilir. Problemin çözümü için katı faz içerisinde bir sıcaklık dağılımı kabulü yapılmalıdır. Buna göre silindirik koordinatlarda katı faz içerisindeki sıcaklık için boyutsuz olarak,

$$\theta = \frac{\ln r^*}{\ln s^*} \quad (5.5)$$

dağılımı kabul edilmiştir (Toksoy, İlken, 1988). Böylece, (5.3) denkleminin integral yöntemle çözümü aşağıda verilmiştir:

$$\int_1^{s^*} \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{*2}} dr^* + \int_1^{s^*} \frac{1}{r^*} \frac{\partial \theta}{\partial r^*} dr^* = \int_1^{s^*} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} dr^*$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial r^*} \right|_{r^*=s^*} - \left. \frac{\partial \theta}{\partial r^*} \right|_{r^*=1} + \int_1^{s^*} \frac{1}{r^*} \frac{1}{r^* \ln s^*} dr^* = \int_1^{s^*} \frac{\partial \theta}{\partial s^*} \frac{ds^*}{d\tau} dr^*$$

$$\left. \frac{1}{Ste} \frac{ds^*}{d\tau} - \frac{1}{\ln s^*} - \frac{1}{r^* \ln s^*} \right|_1^{s^*} = - \frac{ds^*}{d\tau} \int_1^{s^*} \frac{\ln r^*}{s^* \ln^2 s^*} dr^*$$

$$\left. \frac{1}{Ste} \frac{ds^*}{d\tau} - \frac{1}{\ln s^*} - \frac{1}{s^* \ln s^*} + \frac{1}{\ln s^*} \right|_1^{s^*} = - \frac{ds^*}{d\tau} \frac{1}{s^* \ln^2 s^*} r^* \ln r^* - r^* \Big|_1^{s^*}$$

$$\left. \frac{1}{Ste} \frac{ds^*}{d\tau} - \frac{1}{s^* \ln s^*} \right|_1^{s^*} = - \frac{ds^*}{d\tau} \frac{1}{s^* \ln^2 s^*} (s^* \ln s^* - s^* - 1)$$

$$\frac{ds^*}{dt} = \frac{\ln\left(\frac{1}{s^*}\right)}{\left[s^* \left(1 - \ln s^* - \frac{\ln^2 s^*}{Ste}\right) - 1\right]} \quad (5.6)$$

İntegral yöntemle elde edilen (5.6) denkleminin çözümü sayısal bir yöntemle gerçekleştirilebilir. Fakat $\tau = 0$ 'da $s^* = 1$ başlangıç koşulu için, denklem tekildir. Bundan dolayı $\tau = \tau_1$ gibi küçük bir zaman adımından sonra çözüm başlamalıdır. τ_1 'e karşılık gelen s^* değeri, doğrusal sıcaklık profili kabulü ile seri yaklaşımla çözülebilir:

$$s^* \Big|_{\tau=\tau_1} = 1 + e_0 \tau_1^{1/2} + e_1 \tau_1 + e_2 \tau_1^{3/2} + \dots \quad (5.7a)$$

$$e_0 \cong \sqrt{\frac{2}{\left(\frac{1}{Ste} + 0,5\right)}} \quad (5.7b)$$

$$e_1 \cong \frac{e_0}{\sqrt{3}} \quad (5.7c)$$

$$e_2 \cong \frac{e_1 + \frac{1}{2} e_0^2 - \left(\frac{1}{Ste} + 0,5\right) e_1^2}{2 \left(\frac{1}{Ste} + 0,5\right) e_0} \quad (5.7d)$$

şeklinde tanımlanmıştır (Toksoy, İlken, 1988). $\tau > 0$ için, (5.6) nolu denklem, Runge–Kutta yöntemi kullanılarak çözümü aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar programı Ek D.1'de verilmiştir.

$$f s^* = \frac{\ln\left(\frac{1}{s^*}\right)}{\left[s^* \left(1 - \ln s^* - \frac{\ln^2 s^*}{Ste}\right) - 1\right]} \quad (5.8)$$

$$s^{*k+1} = s^{*k} + \frac{1}{6} a_1 + 2a_2 + 2a_3 + a_4 \quad (5.9a)$$

$$a_1 = t.f s^{*k} \quad (5.9b)$$

$$a_2 = t.f \left(s^{*k} + \frac{a_1}{2} \right) \quad (5.9c)$$

$$a_3 = t.f \left(s^{*k} + \frac{a_2}{2} \right) \quad (5.9d)$$

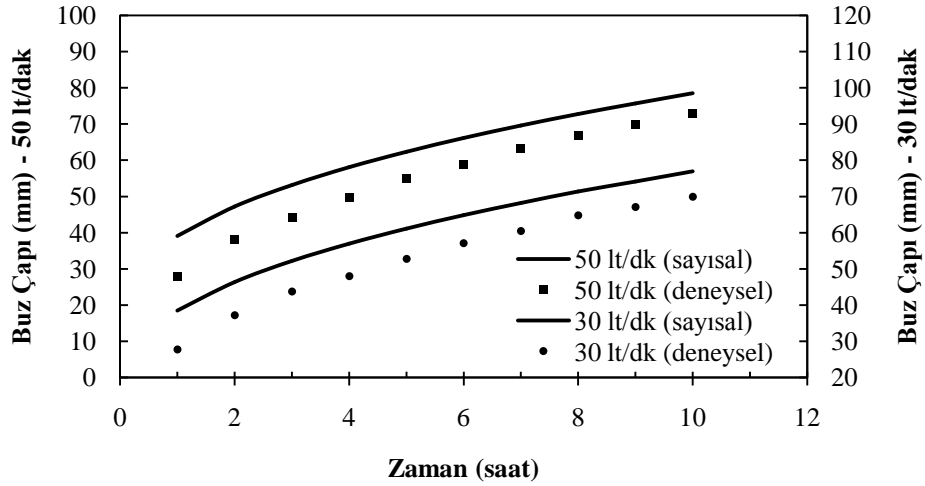
$$a_4 = t.f s^{*k} + a_3 \quad (5.9e)$$

Runge – Kutta sayısal yöntemiyle (5.6) denklemi toplamda on saat depolama için her 60 dakika arayla çözülmüş ve oluşan buz çapı hesaplanmıştır. Sayısal çözümler elde edilen buz çapı değerleri, deneysel ölçümle elde edilen buz çapı değerleri ile Tablo 5.2’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.2 24°C ortam sıcaklığında 50 lt/dak soğutkan debisi için elde edilen buz çapı değerleri

Zaman (saat)	Deneysel Sonuç Buz Çapı (mm)	Nümerik Sonuç Buz Çapı (mm)
0	17,00	17,00
1	27,90	39,07
2	38,26	47,19
3	44,12	53,17
4	49,84	58,08
5	54,87	62,33
6	58,89	66,12
7	63,22	69,52
8	66,73	72,74
9	70,03	75,64
10	72,91	78,45

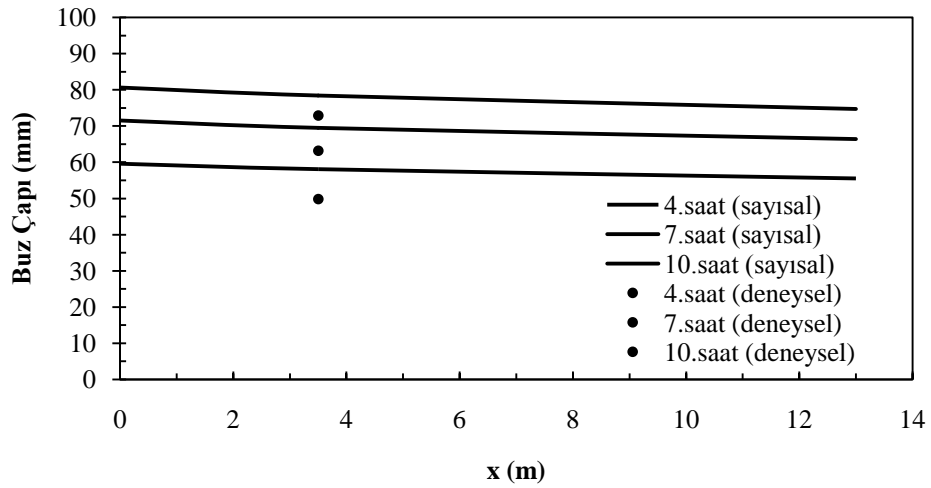
Şekil 5.2’deki grafikte, deney süresi boyunca ortam sıcaklığı ortalama 24°C değerinde iken 30 lt/dak ve 50 lt/dak debide gerçekleştirilen deneysel buz çapları ile aynı parametreler için hesaplanan sayısal buz çapları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.2 30 lt/dak ve 50 lt/dak soğutkan debileri için deneysel ve nümerik çapların karşılaştırılması

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, ilk saatlerde sayısal model deneysel modelle uyuşmamaktadır. 30 lt/dak debide 5.saatte hata %15 iken daha sonraki saatlerde %10'a kadar düşmektedir. 50 lt/dak debide ise 5.saatte hata %10 iken daha sonraki saatlerde %5'e kadar düşmektedir.

İç kısmından soğutkan geçişi ile dış yüzeyinde buz kütlesi oluşturulan sarmal borular boyunca katılaşma profili Şekil 5.3'de verilmektedir. Ayrıca deneysel buz çapı değerleri 4., 7. ve 10.saat için ölçüm noktası hizasına işaretlenmiştir. Bir boru sarmalı uzunluğu 13 m olup, ölçüm noktası etilen glikol su karışımının boruya giriş noktasından 3,5 m ilerisine denk gelmektedir.



Şekil 5.3 50 lt/dak debi ve ortalama 24°C ortam sıcaklığı için boru boyunca nümerik buz profili ve ölçüm noktasındaki deneysel buz çapı

Şekil 5.3 üzerinde işaretlenen 4., 7., ve 10. saat için ölçüm noktasından alınan deneysel buz çapları aynı noktadaki sayısal değerlerle uyuşmamaktadır. Burada hata %6 – %16 arasındadır.

BÖLÜM ALTI

SOĞUTMA SİSTEMİNİN ENERJİ ANALİZİ

Bu bölümde soğutma sisteminin enerji analizi, termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu prensibine göre gerçekleştirilmiştir. Enerjinin korunumu denklemi, sistem ile çevre arasında gerçekleşen iş ve ısı etkileşimlerinin net etkisinden türetilir. Birinci yasa, birden çok giriş ve çıkışı olan sürekli akışlı bir kontrol hacmi için şu şekilde yazılır:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (6.1)$$

Denklem 6.1’de, potansiyel ve kinetik enerji farkları entalpi değişimine göre çok küçük değerlerde olduğu için ihmal edilirse denklem,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta - \sum \dot{m}_g h_g \quad (6.2)$$

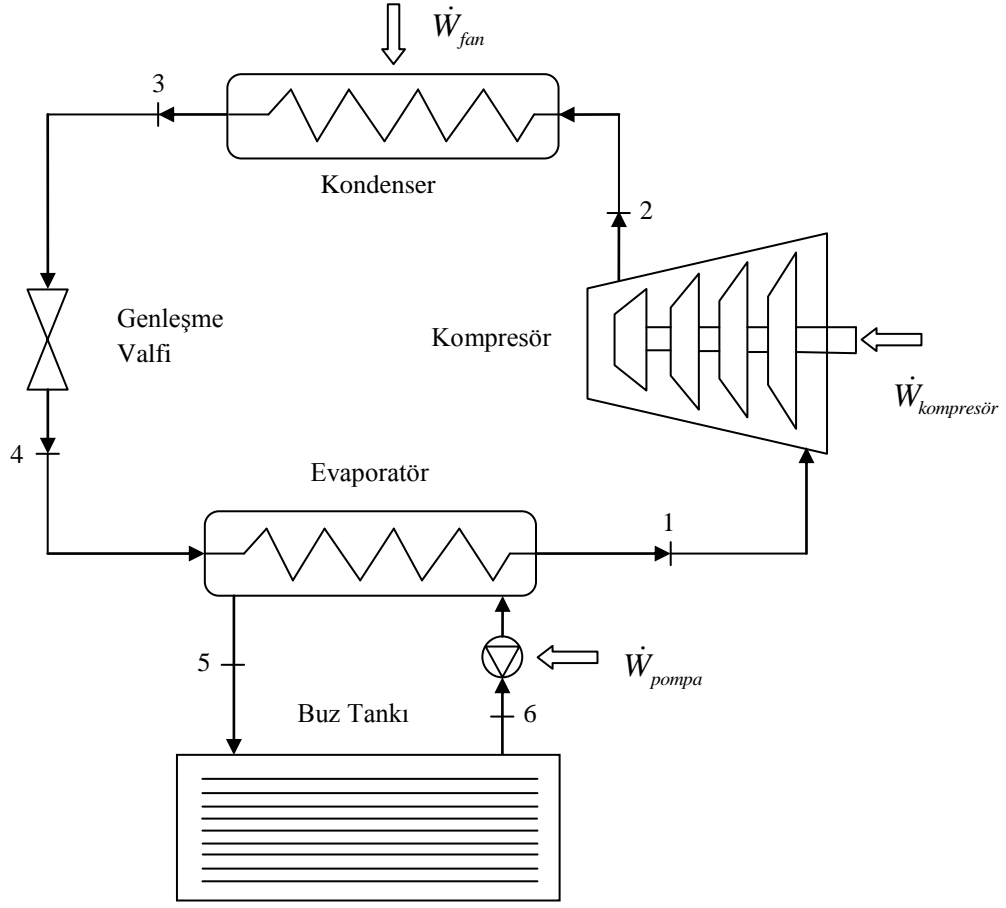
şeklinde ifade edilebilir. Buna göre, aşağıda verilen Şekil 6.1’de mevcut soğutma sistemi göz önüne alınırsa, her bir eleman için enerjinin korunumu denklemi, kompresör başta olmak üzere sırayla aşağıda ifade edilmiştir. Adyabatik kompresör için giriş – çıkış kütleli debilerinin eşit olmasından dolayı enerjinin korunumu denklemi,

$$-\dot{W}_{\text{kompresör}} = \dot{m} h_\zeta - h_g \quad (6.3)$$

şeklindedir. Burada Şekil 6.1’deki rotasyon kullanılarak (6.3) bağıntısı,

$$\dot{W}_{\text{kompresör}} = \dot{m}_{R22} h_1 - h_2 \quad (6.4)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 6.1 Soğutma sisteminin şematik gösterimi

Boru – kovan tipi evaporatöre giren ısı miktarı, Şekil 6.1’de (1) ve (4) numara ile gösterilen noktalarda soğutucu akışkanın termodinamik özellikleri yardımıyla;

$$\dot{Q}_{L_{R22}} = \dot{m}_{R22} h_1 - h_4 \quad (6.5)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Hava soğutmalı kondenserden atılan ısı ise, Şekil 6.1’de (2) ve (3) numara ile gösterilen noktalarda soğutucu akışkanın termodinamik özellikleri yardımıyla;

$$\dot{Q}_{H_{R22}} = \dot{m}_{R22} h_2 - h_3 \quad (6.6)$$

bağıntısından elde edilebilir. Aynı zamanda, buz tankına etilen glikol – su karışımından giren ısı ise,

$$\dot{Q}_{L_{e.glikol-su}} = \dot{m}_{e.glikol-su} C_{e.glikol-su} (T_6 - T_5) \quad (6.7)$$

bağıntısından elde edilebilir. Sisteme giren net iş ise;

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{kompresör} + \dot{W}_{fan} + \dot{W}_{pompa} \quad (6.8)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Hesaplamalarda \dot{W}_{net} değeri deneysel çalışma sırasında sistemin bağlı olduğu elektrik sayacından okunmuştur. Böylece sistemin performans katsayısı;

$$COP = \frac{\dot{Q}_{depolanan} + \dot{Q}_K}{\dot{W}_{net}} \quad (6.9)$$

denkleminde hesaplanabilir. Burada \dot{Q}_K , deneysel ölçüm esnasında tank kapağının açık kalmasından dolayı su yüzeyinden olan ısı kazancıdır.

Tablo 6.1’de 50 lt/dak hacimsel debi için üç farklı ortam sıcaklığında yapılan deneylerde, elde edilen verilerden hareketle, soğutucu akışkanın (freon 22), Şekil 6.1’de gösterilen numaralandırılmış noktalardaki termodinamik özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.1 50 lt/dak soğutkan debisi için farklı ortam sıcaklıklarında akışkanların termodinamik özellikleri

Ortam Sıcaklığı (°C)	No	Eleman Adı	Akışkan	Faz	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Entalpi (kJ/kg)	Kütleli Debi (kg/s)
31	1	Kompresör giriş	R22	Kızgın buhar	-5,25	351,65	249,5	0,0258
	2	Kompresör çıkış	R22	Kızgın buhar	123,18	1560	332,4	0,0258
	3	Kondenser çıkış	R22	Sıkıştırılmış sıvı	34,04	1404	86,45	0,0258
	4	Evaporatör giriş	R22	Sıvı-Buhar	-8,10	378,7	86,45	0,0258
	5	Buz tankı giriş	Etilen glikol – su karışımı	Sıkıştırılmış sıvı	-7,86		-24,26	0,8905
	6	Buz tankı çıkış	Etilen glikol – su karışımı	Sıkıştırılmış sıvı	-6,05		-20,15	0,8905
24	1	Kompresör giriş	R22	Kızgın buhar	-6,60	327,6	249,1	0,0268
	2	Kompresör çıkış	R22	Kızgın buhar	112,04	1310	325,4	0,0268
	3	Kondenser çıkış	R22	Sıkıştırılmış sıvı	28,24	1179	79,01	0,0268
	4	Evaporatör giriş	R22	Sıvı-Buhar	-10,12	352,8	79,01	0,0268
	5	Buz tankı giriş	Etilen glikol – su karışımı	Sıkıştırılmış sıvı	-7,19		-26,54	0,8907
	6	Buz tankı çıkış	Etilen glikol – su karışımı	Sıkıştırılmış sıvı	-5,57		-22,31	0,8907
17	1	Kompresör giriş	R22	Kızgın buhar	-7,79	309,52	248,7	0,0270
	2	Kompresör çıkış	R22	Kızgın buhar	109,35	1260	323,6	0,0270
	3	Kondenser çıkış	R22	Sıkıştırılmış sıvı	25,53	1134	75,58	0,0270
	4	Evaporatör giriş	R22	Sıvı-Buhar	-11,71	333,33	75,58	0,0270
	5	Buz tankı giriş	Etilen glikol – su karışımı	Sıkıştırılmış sıvı	-7,92		-26,75	0,8907
	6	Buz tankı çıkış	Etilen glikol – su karışımı	Sıkıştırılmış sıvı	-6,17		-22,31	0,8907

50 lt/dak hacimsel debi için farklı ortam sıcaklıklarında elde edilen deneysel verilerden hareketle depolanan toplam enerji miktarı ($\dot{Q}_{depolanan}$); Bölüm 3.3'de hesaplanan deneysel ölçüm sırasında tank kapağının açık konumda olmasından dolayı olan ısı kazancı (\dot{Q}_K), depolama tankı yüzeyinden olan ısı kazancı (\dot{Q}_L), evaporatör – buz tankı bağlantı borusundan olan ısı kazancı (\dot{Q}_B), etilen glikol – su

karışımının buz tankına giriş borusu üzerindeki debimetreden olan ısı kazancı (\dot{Q}_C), etilen glikol – su karışımının buz tankından çıkış borusu üzerindeki sirkülasyon pompasından olan ısı kazancı (\dot{Q}_{pompa}), ve (6.5 – 6.9) denklemlerinden belirlenen $\dot{Q}_{L_{R22}}$, $\dot{Q}_{H_{R22}}$, $\dot{Q}_{L_{e, glikol-su}}$, \dot{W}_{net} ve COP değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 Farklı ortam sıcaklıklarında buz depolu soğutma sisteminin COP değerleri

Ortam Sıcaklığı (°C)	$\dot{Q}_{depolanan}$ (W)	Isı Kazançları			$\dot{Q}_{L_{e, glikol-su}}$ (W)	$\dot{Q}_{L_{R22}}$ (W)	$\dot{Q}_{H_{R22}}$ (W)	\dot{W}_{net} (W)	COP
		\dot{Q}_K (W)	\dot{Q}_T (W)	$\dot{Q}_B + \dot{Q}_C + \dot{Q}_{pompa}$ (W)					
31	3019	60,12	173,00	206,19	5215	4199	6334	2460	1,252
24	3321	39,95	158,25	194,51	5824	4559	6604	2370	1,418
17	3469	23,08	143,56	182,24	5631	4680	6705	2350	1,486

Buz tankına etilen glikol – su karışımı ile giren enerji miktarı ile depolanan enerji miktarının yaklaşık eşit olması beklenir. Fakat deneysel ölçüm sırasında tank kapağının açık kalması nedeniyle bir miktar ısıl kazanç meydana geldiğinden daha az soğu enerjisi depolanacaktır. Buna göre,

$$\dot{Q}_{L_{e, glikol-su}} \cong \dot{Q}_{depolanan} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_T \quad (6.10)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada $\dot{Q}_{L_{e, glikol-su}}$ değeri, etilen glikol – su karışımının buz tankına giriş – çıkış sıcaklık farkından hesaplanmıştır. Fakat Tablo 6.2’de (6.10) eşitliğinin sağlanmadığı görülmektedir. Etilen glikol – su karışımından çekilen ısı miktarı etilen glikol – su karışımının buz tankına giriş – çıkış sıcaklık farkına oldukça bağlıdır. Sıcaklık değerleri birer saat aralıklarla tek bir noktadan ölçülmektedir. Ayrıca ölçüm noktası, borunun dirsek kısmından hemen sonradır. Dirsekteki akışın değişiminden ve sıcaklık gradyanından dolayı etilen glikol – su karışımının depolama tankına giriş – çıkış sıcaklık değerlerinde ölçüm hatalarının

meydana gelmesi olasıdır. Tablo 6.2’de $\dot{Q}_{L_{e, \text{glikol-su}}}$ değerleri ortam sıcaklığı artışı ile azalması beklenirken 24°C sıcaklığına karşılık gelen değer kuralı bozmaktadır. Bunun nedeni etilen glikol – su karışımının buz tankına giriş ve çıkış sıcaklıklarının ısı transferi üzerindeki son derece belirleyici etkisindedir. Sistemin performans katsayısının ortam sıcaklığı artışıyla azaldığı Tablo 6.2’de açıkça görülmektedir. Sistem performansını arttırmak için sisteme olan ısı kazançlarını en aza indirmek gerekir. Bölüm 3.3’de hesaplanan ısı kazanç değerlerinin yanı sıra sisteme olan ısı kazancının daha fazla olduğu düşünülmektedir. Yalıtım malzemelerindeki eskime ve yırtılmalar dolayısıyla hesaplanan ısı kazanç değerlerinin daha yüksek olması olasıdır. Ayrıca depolama tankı saç malzemedен yapılmış ve üzeri cam yünü ile kaplanmıştır. Tank iç ve dış sıcaklık farkından dolayı ve ortam nemine bağlı olarak saç malzeme ile cam yünü arasında yoğuşma meydana gelmektedir. Bu nedenle, buz tankından olan ısı kaybı hesaplanandan daha fazla olacaktır.

BÖLÜM YEDİ

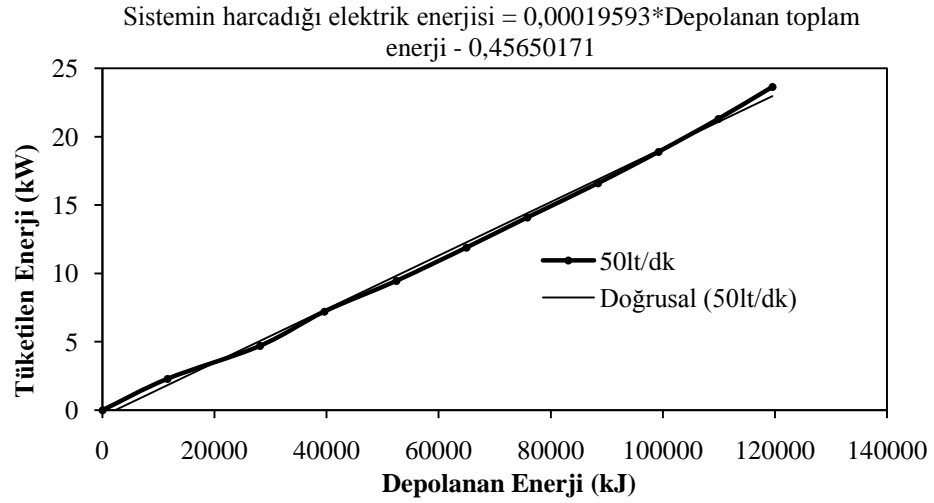
MEVCUT BUZ DEPOSUNUN EKONOMİK ANALİZİ

İncelenen soğutma sistemi yaklaşık 10000 kJ/h'lik depolama sağlamak üzere tasarlanmıştır. Sistem, 8 saat boyunca (saat 22:00 – 06:00 arası) çalıştırılarak yaklaşık 80000 kJ'lük enerji depolamaktadır. Bu enerji, soğutma grubunun devre dışı bırakıldığı, ihtiyacın olduğu saatlerde soğutma yükünü karşılamaktadır.

Bu çalışmada, sadece gün içi farklı elektrik fiyatlandırmasının getirdiği avantajdan yararlanılarak, farklı ortam sıcaklıklarında yapılan üç farklı deney verisinden hareketle sistemin ekonomik analizi yapılmıştır. Burada, 10000 kJ/h'lik soğutma kapasiteli soğutma grubu ve entegre buz deposundan oluşan sistem, 10 saat boyunca çalıştırılarak depoladığı soğu enerjisi ve harcadığı toplam elektrik enerjisi kaydedilmiştir. Deneyler sırasında depolanan enerji miktarının ve bu enerjiye karşılık gelen sistemin tükettiği elektrik enerjisi değerlerinin zamanla değişimi grafik ve tablo olarak dördüncü bölümde verilmiştir. Şekil 7.1'de 50 lt/dak soğutkan debisinde ve ortam sıcaklığı ortalama 24°C iken yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar yardımıyla tüketilen elektrik enerjisi – depolanan enerji grafiği örnek olarak verilmiştir. Oluşturulan eğriler üzerinden 80000 kJ değerini karşılayan elektrik enerji miktarı seçilmiştir. Tüm deneyler için 80000 kJ'lük yükü karşılamak için tükettiği elektrik enerjisi Tablo 7.1'de belirtilmiştir.

Tablo 7.1 Farklı koşullarda 80000 kJ soğu enerjisini depolamak için harcanan elektrik enerjisinin karşılaştırılması

Soğutkan Debisi (lt/dak)	Ortam Sıcaklığı (17°C)	Ortam Sıcaklığı (24°C)	Ortam Sıcaklığı (31°C)
20	15,71 kW	16,76 kW	17,97 kW
30	14,48 kW	16,68 kW	18,01 kW
40	15,19 kW	15,66 kW	17,35 kW
50	14,31 kW	15,34 kW	16,88 kW



Şekil 7.1 50 lt/dak etilen glikol – su karışım debisi ve ortalama 24°C ortam sıcaklığında tüketilen enerji – depolanan soğuk enerjisi eğrisi ve bu eğrinin denklemi

Yapılan çalışmada, deneyler dört farklı debide yapılmış olmasına karşın soğutkan debisinin 50 lt/dak'da tutulduğu deneylerde daha az elektrik enerjisi tüketildiği gözlenmiştir. Bu sebeple, sistemin ekonomik analizinde, 50 lt/dak soğutkan debisinde yapılan deney verileri kullanılmıştır.

Ekonomik analiz yapılırken günlük soğutma ihtiyacı 80000 kJ olan iki mahal ele alınmıştır. Mahallerden biri bir ticarethane, diğeri ise konut olarak düşünülmüştür. Ek E.1'de örnek bir ofisin soğutma ihtiyacı, pik yük göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Buna göre tanımlanan 50 m²'lik ofisin ısı kazancı saatte 10443 kJ olarak belirlenmiş ve mevcut sistemle bu ihtiyacın karşılanabileceği gösterilmiştir.

Ekonomik analizde kullanılacak, Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi tarafından uygulanan tarifeler Tablo 7.2'de belirtilmiştir.

Tablo 7.2 TEDAŞ'ın 2008 yılı elektrik ücretlendirme tarifesi (Temmuz ayı ve sonrası için)

Ticarethane			Mesken		
Gündüz (06:00-17:00)	Puant (17:00-22:00)	Gece (22:00-06:00)	Gündüz (06:00-17:00)	Puant (17:00-22:00)	Gece (22:00-06:00)
kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh
19,760	29,739	12,584	16,856	26,886	9,640

Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi gün içinde üç farklı tarife uygulamaktadır. Burada, seçilen iki farklı mahalde kullanılacak sistemin soğu depolu veya soğu deposuz olmasının ekonomik yönden uygunluğu kontrol edilecektir. Ticarethane olarak kullanılan mahalde, soğutma ihtiyacının 09:00 – 17:00 saatleri arası, mesken olarak kullanılan mahalde ise soğutma ihtiyacının 18:00 – 22:00 saatleri arası olduğu kabul edilmiştir. Tablo 7.3'de TEDAŞ'ın uyguladığı tarifeye göre 50 lt/dak'lık soğutkan debisinde yapılan deneylerden hareketle; soğu depolu ve soğu deposuz bir sistemin kullanımı durumunda günlük ödenmesi gerekli elektrik tutarı hesaplanmıştır.

Tablo 7.3 Soğu depolu ve soğu deposuz sistemlerin kullanımı sonucunda günlük ödenecek elektrik ücreti karşılaştırması

Soğutma İhtiyacı Karşılancak Mekân	Ortam Koşulları	Günlük Ödenecek Tutar (TL)	
		Soğu Deposuz Sistem	Soğu Depolu Sistem
Mesken	17°C	3,85	1,38
	24°C	4,12	1,48
	31°C	4,54	1,63
Ticarethane	17°C	2,83	1,80
	24°C	3,03	1,93
	31°C	3,34	2,12

Tablo 7.3'de görüldüğü gibi soğu depolu bir sistem kullanmak, gün içinde uygulanan tarife farklılığından dolayı elektrik maliyetini düşürmektedir. Tabii ki soğu depolu sistemlerin avantajlarının yanı sıra soğutma grubuna eklenen deponun kurulum maliyeti bir dezavantajdır. Depo kurulum maliyeti Ek A'da sunulmuştur. Temmuz 2008 tarihi itibariyle depo kurulum ücreti 3674,76 TL'dir fakat ek soğu

deposunun getirdiği enerji tasarrufunun kurulum maliyetini karşılaması beklenmektedir.

Bir projenin ekonomik olarak uygulanabilir olup olmadığına karar vermeye yardımcı bazı yöntemler bulunmaktadır. En sık kullanılan maliyet analiz yöntemlerinden biri basit geri dönüşüm (SPP) analizidir:

$$SPP = \text{ilk maliyet} / \text{yıllık tasarruf} \quad (7.1)$$

Üzerinde çalışılan sistemin yılda 180 gün çalıştığı düşünülürse her yıl ticarethane örneğinde 242,84 TL, mesken örneğinde ise 583,71 TL tasarruf sağlanmış olur. Böylece basit geri dönüşüm yöntemine göre soğu deposu, sırasıyla ticarethane ve meskende kullanılması durumunda 15 ve 6 yıl sonra kendini amorti eder. Fakat basit geri dönüşüm yönteminde paranın zamana göre değişimi düşünülmediğinden, zamana göre değişimi hesaba katan başka bir yöntem ile birlikte kullanılmalıdır. Bu şekilde 5 farklı ekonomik karar verme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar, şimdiki değer, gelecekteki değer, yıllık değer, fayda/maliyet oranı ve geri dönüşüm oranıdır. Bu çalışmada, şimdiki değer yöntemi ele alınmaktadır.

Şimdiki değer metodu tüm nakit akışını bugünkü değerine dönüştürür. Bunun için projenin kurulum maliyeti, her yıl sağlayacağı tasarruf, yıllık bakım maliyeti ve hurda bedeli gibi değerlerin ayrıca projenin ömrünün ve yıllık faiz oranının ne kadar olacağı, tahmini de olsa biliniyor olması gerekmektedir. Bir projenin nakit akışının şimdiki değeri (PW) şu şekilde hesaplanabilir:

$$PW = -P + A \left[\frac{1 + i^n - 1}{i} \right] / (1 + i)^n \quad (7.2)$$

(7.2) denkleminde P , projenin ilk maliyeti, A , projenin her yıl sağladığı tasarruf, n , yıllık faiz periyodu sayısı (yıl sayısı) ve i , yıllık faiz oranı olarak verilmiştir. Projenin bugünkü değerinin pozitif işaretli olması o projenin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Onaygil, 2008).

Yapılan çalışmada, Temmuz 2008 itibariyle hesaplanan ek soğu deposu kurulum maliyeti 3674,76 TL ve yıllık sağladığı enerji tasarrufu, ticarethane örneğinde 242,84 TL, mesken örneğinde 583,71 TL değerindeydi. Projenin bakım ücreti ve hurda getirisi gibi değerlerin önemsenmeyecek kadar düşük olması halinde, projenin bugünkü değeri, ticarethanelere uygulanması durumunda -1607,35 TL, meskenlere uygulanması durumunda 1294,68 TL olacaktır. Bu değerlerin pozitif olması durumu yaptığımız projenin uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Buradan da, Türkiye’de uygulanan elektrik tarifelerine göre bir ticarethanede kullanılan soğutma grubuna, ek soğu depolama sistemi kurulumu ve gündüz saatlerinde kullanmak amacıyla enerji depo edilmesi durumunda, projenin uygulanabilir bir proje olmadığı görülmektedir. Fakat aynı projeyi bir meskende sadece akşam (puant) saatlerinde kullanılan bir soğutma grubuna uygulamak bize getiri sağlamaktadır.

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, bir soğutma sistemine entegre soğu depolama tankında yer alan içerisinde etilen glikol – su karışımının dolaştığı polietilen sarmal boruların dış yüzeyinde buz kütlesi oluşmasıyla meydana gelen depolamanın farklı etilen glikol-su karışım debileri ve ortam sıcaklıklarına göre değişimi, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ülkemizde uygulanan gün içinde farklı zaman dilimlerinde farklı elektrik tariflendirilmesi sonucu enerji depolama sistemlerinin kullanımı enerji maliyetlerinde düşüş sağlamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmada, mevcut buz depolamalı soğutma sistemi, depoladığı enerji miktarı ve tükettiği elektrik enerjisi miktarı yönünden incelenmiştir. Buz tankına giren etilen glikol – su karışımı debisinin (20 lt/dak, 30 lt/dak, 40 lt/dak, 50lt/dak) ve sistemin bulunduğu ortam sıcaklığının farklı değerlerde (ortalama olarak 17°C, 24°C, 31°C) alınmasıyla sistemin ürettiği buz miktarının maksimum olduğu debi saptanmış ve ortam sıcaklığındaki düşmenin soğutma grubundan ısı atımını kolaylaştırması bağlamında sistemin performansının artımında getirdiği avantaj deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Dört farklı etilen glikol – su karışım hacimsel debisinde tekrarlanan deneyler sonucunda, depolanan enerjinin en fazla olduğu debi değeri 50 lt dak⁻¹'dir. Ayrıca, debi değerindeki artışa paralel depolanan enerji miktarındaki artış da deneysel olarak gösterilmiştir. Fakat sistemin soğutma kapasitesi sınırlı olduğundan etilen glikol-su karışım debisi arttıkça, karışımın depolama sistemine giriş sıcaklığı da artmaktadır. Bundan dolayı, deneysel çalışmada karışımın sıcaklığını kontrol etme şansı olmadığı için depolanan enerji miktarındaki artış sadece debi artışıyla ilişkilendirilemez.

Bir diğer deney parametresi olarak buz depolamalı soğutma sisteminin bulunduğu ortam sıcaklığı ele alınmış ve üç farklı ortam sıcaklığında tekrarlanan deneylerin depolanan enerjiye etkileri incelenmiştir. Ortam sıcaklığı olarak 17°C, 24°C ve 31°C değerleri belirtilmiştir. Bu değerler, ortam sıcaklığı bağlamında her bir grup deney

süresi boyunca ölçülen ortam sıcaklığı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Sistemin bulunduğu ortam sıcaklığının düşmesiyle depolanan enerji miktarında artma olduğu gözlenmiştir. Bunun öncelikle sebebi soğutma grubunun performansındaki artıştır; ayrıca ortam sıcaklığının azalmasıyla depolama sisteminin ısı kazançları da azalmıştır.

Soğutma sistemine bağlı buz tankı içinde bulunan faz değişim malzemesi (su), sistem çalışmadığı sürece yaklaşık ortam sıcaklığındadır. Bu sebeple, deneylere başlamadan önce buz tankı içinde bulunan su sıcaklığı donma noktasına gelene kadar soğutulur. Donma başladığı andan itibaren deney süresi başlatılmış ve on saat depolama sonunda elde edilen buz kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Tablo 4.13 ve Şekil 4.9'a bakıldığında, depolanan enerji miktarının soğutkan debisi arttıkça arttığı, ortam sıcaklığı arttıkça azaldığı açıktır. Fakat ortam sıcaklığı ortalama 17°C ve 40 lt/dak soğutkan debisinde yapılan deneyde elde edilen enerji miktarı bu kuralı bozmaktadır. Bunun sebebi; deneye, depolama tankı içindeki su sıcaklığının donma noktasına gelmeden başlanması olabilir. Dolayısıyla, diğer deneysel çalışmalara göre aynı sürede daha az enerji depolanacaktır.

Deney sonuçlarını etkileyen bir diğer konu ise deney sırasında buz kalınlıkları ölçümü için depolama tankının mevcut üst kapağının deney süresi boyunca yaklaşık 100 dak (10 saatlik deneysel çalışmadaki toplam ölçüm süresi) açık konumda olmasıdır. Bu süre zarfındaki ısı kaybından dolayı depolanan buz miktarı, böylesi bir ölçüm yapılmayıp kapağın kapalı olma durumuna oranla daha azdır.

Ayrıca, bu çalışmada, günlük soğutma ihtiyacı 80000 kJ olan iki farklı mahalin soğutulmasında soğu depolu veya soğu deposuz sistem kullanılması koşulunda mevcut sistemin ekonomikliği incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, en fazla depolamanın 50 lt/dak soğutkan debisinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu sebeple, 50lt/dak soğutkan debisinde yapılan deneyler, incelenen iki mahallin soğutulması ve ekonomik analizi için baz alınmıştır.

İki mahal için soğu depolu ve soğu deposuz sistemlerin 20 yıl süreyle kullanılması halinde ekonomik yönden uygunluğu Şimdiki değer yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Konutlarda puant saatlerinde soğutma ihtiyacının olduğu kabulüyle, soğu depolu bir sistem deposuz sistemlere göre daha ekonomik bulunurken; ticarethanelerde, soğutma ihtiyacının gündüz saatlerinde olduğu kabulüyle, soğu deposuz bir sistemin kullanımı, sisteme soğu deposu ekletmekten daha ekonomik bulunmuştur.

Demir ve saç malzemedan üretilen depolama tankı, plastik malzeme kullanımıyla işçilik ve malzeme maliyetini yarı yarıya düşüreceği gibi ısı kazancını da daha düşük seviyede tutabilir. Ayrıca seri üretimle depolama tankı kurulumu çok daha ucuza mal edilebilir. Böylece ekonomik analizle belirlenen ilk yatırım maliyetinin karşılanma süresi de yaklaşık olarak yarıya inecektir.

KAYNAKLAR

- Alexiades, V. ve Solomon, A. D. (1993). *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, A member of the Taylor & Francis Group.
- Asan, H. ve Namlı, L. (1997). Deneysel Isı Transferi ve Basınç Kaybı Çalışmalarında Belirsizlik Analizi. *11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı, 1* (1), 369-378.
- ASHRAE, (1999). *Thermal Storage, HVAC Applications*. Chapter 33.
- Başaran, T. ve Erek, A. (2003). Bir Soğu Deposunun Ekonomik Analizi, *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir.
- Baughman, M. L., Jones, J.W ve Jacob, A. (1993). A Model For Evaluating The Economics of Cool Storage Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8 (2), 716-722.
- Comnes, G. A., Kahn, E., Pignone, C. ve Warren, M. (1988). An Integrated Economic Analysis of Commercial Thermal Energy Storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3 (4), 1717-1722.
- Doğan, V. (2007). Klima Sistemlerinde Buz Depolama Yönteminin Üçlü Elektrik Tarifesine Göre Ekonomik Analizi. *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir.
- Çiftçi, B. (2008). *A Parametric Study About Minimizing of Air Conditioning and Lighting Energy Loads For A Building In İzmir*, Dokuz Eylül University, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

- Genceli, O. F. (Ed.). (1998). ASHRAE Temel El Kitabı. İstanbul: Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınları.
- Habeebullah, B.A. (2006). Economic Feasibility of Thermal Energy Storage Systems. *Energy and Buildings*, 39 (2007), 355-369.
- Hilligweg, A. ve Hoffmann, P. (2003). Soğutma Tesisinin Büyüklüğünü Minimize Etmek. (K. Küçümen, Çev.). *Tesisat Dergisi*, 98, 78-84.
- Incropera, F. P. ve DeWitt, D. P. (2001). (T. Derbentli, O. Genceli, A. Güngör, A. Hepbaşlı, Z. İlken, N. Özbalta, F. Özgüç, C. Parmaksızoğlu, Y. Uralcan, Çev.). İstanbul: Literatür Yayıncılık. (Orijinal çalışma basım tarihi 2001)
- İlken, Z. (1998). Soğu Depolama. III. *Uluslar Arası Yapıda Tesisat Bilimi ve Teknolojisi Sempozyumu*, İstanbul.
- Isısan Çalışmaları No:305, (1997). *Klima Tesisatı*. Isısan Yayınları.
- Onaygil, S., *Ekonomik Analiz ve Geri Dönüşüm Maliyeti*, (b.t.). (28 Kasım 2008), http://atlas.cc.itu.edu.tr/~onaygil/ebt535_maliyet_analizi.pdf
- Öztürk, H.H. (2005). Güneş Enerjisinin Gizli Isı Tekniği ile Depolanması, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin.
- Sponsel, C. ve Hilligweg, A. (2003). Buz Depolamanın Ekonomik Yönü. (K. Küçümen, Çev.). *Tesisat Dergisi*, 9, 82-87.
- (2 Temmuz 2008). *TEDAŞ Temmuz 2008 Yılı Tüketici Tarifeleri*. (11 Ağustos 2008), http://www.tedas.gov.tr/tarifeler_xls/2008_trf/temmuz%202008%20tarifeler%20Bid.xls.

Toksoy, M. ve İlken, Z. (1988). *Phase Change Heat Transfer in Cylindrical Domain: Modeling and Its Importance in The Thermal Energy Storage.*

EKLER

A.1 Buz Deposunun Ayrıntılı Maliyeti

Tablo A.1 Buz deposunu oluşturan elemanlar ve Temmuz 2008 fiyatları

Malzeme	Açıklama	Birim	Birim Fiyatı	Tutar (TL)
Pompa	6m ³ /h, 2.5mSS	1 adet	505,04 TL/adet	505,04
Sac	1m*2m*5mm	4 adet (315,2kg)	1,45 TL/kg	457,04
	1m*2m*2mm	1 adet (31,52kg)	1,46 TL/kg	46,02
	1m*2m*0.8mm	1 adet (9,82kg)	1,55 TL/kg	15,22
İzolasyon	4cm'lik folyolu cam yünü	9m ²	5,64 TL/m ²	50,76
Boru	½"	12m	2,47 TL/m	29,64
	¾"	1m	3,20 TL/m	3,20
	1"	9m	4,86 TL/m	43,74
	1 ½"	4m	7,18 TL/m	28,72
Polietilen boru	½"	104m	1,46 TL/m	151,84
Klips	½"	320 adet	0,15 TL/adet	48,00
Rekor	½"	16 adet	3,80 TL/adet	60,80
Cıvata/Somun	M8	48 adet	0,232 TL/adet	11,14
	M10	38 adet	0,40 TL/adet	15,20
Flanş	1 ¼"	2 adet	11,90 TL/adet	23,80
	2"	4 adet	14,50 TL/adet	58,00
Lama	5mm*8mm	46m	1,50 TL/m	69,00
Cam çıtası		54m (41,43kg)	0,76 TL/kg	31,49
Kepenik oluğu		30m (42,49kg)	1,65 TL/kg	70,11
NPU demir	40*20*5	1m (3,16kg)	1,70 TL/kg	5,37
	80*45*6	5m (40,14kg)	1,50 TL/kg	60,21
Etilen glikol		40 l	3,5105 TL/l	140,42
Galvanizleme		500kg	2,00 TL/kg	1000,00
İşçilik				750,00
Toplam				3674,76

B.1 Deney Sırasında Ölçülen Sıcaklık Değerleri

Tablo B.1 Ortam sıcaklığı 31°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

25 Eylül 2007 Tarihinde 20 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																				
Sıcaklık Değer Tablosu																				
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift
0	-9,07	-4,54	1,48	1,72	-3,12	-0,60	-3,44	-1,31	-0,34	0,46	29,00	32,34	31,19	5,13	100,40	-6,96	30,68	-10,23	31,87	28,95
1	-8,71	-4,44	0,63	0,95	-3,32	-0,80	-3,59	-0,98	-0,69	-0,12	29,63	32,54	31,84	5,96	118,85	-6,41	30,41	-10,44	32,44	29,49
2	-9,08	-4,67	0,34	0,58	-3,68	-1,05	-3,91	-1,33	-0,88	0,10	29,80	32,97	32,04	5,93	121,77	-6,79	31,62	-10,11	32,75	29,47
3	-9,20	-4,86	0,23	0,32	-3,88	-1,28	-4,15	-1,56	-1,00	-0,05	29,85	32,85	31,91	5,81	121,22	-6,87	31,51	-10,51	32,62	29,38
4	-9,45	-5,09	0,14	0,13	-4,15	-1,45	-4,35	-1,74	-1,09	-0,10	30,54	33,24	32,55	5,64	121,14	-7,06	31,92	-10,50	33,14	29,82
5	-9,52	-5,19	0,06	0,08	-4,24	-1,58	-4,49	-1,87	-1,20	-0,13	30,24	33,33	32,44	5,91	120,76	-6,92	31,97	-10,70	33,05	29,82
6	-9,62	-5,35	0,04	0,04	-4,44	-1,73	-4,61	-1,94	-1,29	-0,17	30,19	33,19	32,26	6,01	121,49	-7,06	31,89	-10,68	32,97	29,54
7	-9,40	-5,28	0,07	0,06	-4,37	-1,80	-4,62	-2,03	-1,38	-0,15	30,26	32,23	32,29	6,07	123,14	-7,12	31,12	-11,39	32,97	29,95
8	-9,65	-5,42	0,09	0,07	-4,57	-1,88	-4,68	-2,17	-1,42	-0,15	30,26	33,48	32,59	5,85	123,78	-8,33	31,89	-10,51	33,17	29,97
9	-9,42	-5,41	0,11	0,11	-4,48	-1,93	-4,84	-2,19	-1,48	-0,24	30,03	31,72	31,94	5,78	122,40	-7,41	31,27	-11,78	32,77	29,76
10	-9,67	-5,52	0,07	0,08	-4,70	-2,01	-4,98	-2,24	-1,55	-0,19	30,13	33,19	32,30	5,83	121,84	-7,02	31,94	-11,07	32,89	29,77

Tablo B.2 Ortam sıcaklığı 31°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

21 Eylül 2007 Tarihinde 30 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																				
Sıcaklık Değer Tablosu																				
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift
0	-7,62	-4,67	1,52	1,75	-2,11	0,16	-1,88	-1,18	-1,56	-0,56	32,45	34,70	33,98	6,26	100,37	-5,57	33,42	-8,21	34,44	30,85
1	-7,54	-4,75	0,62	0,88	-3,02	0,81	-2,99	-1,56	-2,52	-0,90	32,58	35,14	34,55	6,91	121,64	-5,62	33,40	-7,91	35,00	31,03
2	-7,72	-4,93	0,35	0,61	-3,25	-1,48	-3,35	-1,85	-2,76	-1,10	32,09	35,03	34,20	6,97	121,26	-6,20	33,82	-8,38	34,88	31,14
3	-7,97	-5,20	0,20	0,27	-3,51	-1,78	-3,66	-2,18	-2,99	-1,31	31,77	34,46	33,73	6,56	120,61	-5,73	33,33	-8,61	34,30	30,24
4	-8,00	-5,32	0,19	0,20	-3,60	-1,95	-3,84	-2,29	-3,12	-1,48	31,86	34,40	33,77	6,62	121,34	-5,64	33,29	-8,90	34,43	30,61
5	-8,21	-5,49	0,16	0,17	-3,80	-2,09	-4,03	-2,37	-3,32	-1,58	31,50	34,31	33,48	5,93	121,38	-6,15	33,13	-9,05	34,25	30,71
6	-8,24	-5,61	0,04	0,08	-3,90	-2,23	-4,11	-2,55	-3,34	-1,67	31,04	33,66	33,38	6,08	121,41	-5,92	32,10	-9,88	34,09	30,84
7	-8,33	-5,70	0,09	0,09	-4,00	-2,35	-4,25	-2,67	-3,43	-1,76	31,20	34,45	33,55	5,90	121,38	-6,10	32,12	-9,32	34,32	31,05
8	-8,50	-5,84	0,07	0,08	-4,12	-2,48	-4,38	-2,77	-3,56	-1,85	31,18	34,57	33,58	6,23	121,42	-5,98	33,19	-9,49	34,33	31,13
9	-8,58	-5,94	0,06	0,07	-4,26	-2,55	-4,42	-2,87	-3,68	-1,93	31,12	34,67	33,52	5,92	121,71	-6,25	33,23	-9,51	34,33	31,13
10	-8,64	-5,98	0,11	0,09	-4,29	-2,61	-4,55	-2,92	-3,75	-1,98	31,07	34,62	33,69	5,75	121,91	-6,29	33,18	-9,54	34,25	31,08

Tablo B.3 Ortam sıcaklığı 31°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

19 Eylül 2007 Tarihinde 40 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																				
Sıcaklık Değer Tablosu																				
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift
0	-6,64	-4,53	1,25	1,57	-2,75	-1,72	-2,83	-2,10	-2,21	-1,26	32,30	35,08	34,33	5,77	119,69	-4,34	32,87	-7,25	35,02	31,29
1	-6,99	-4,93	0,81	1,00	-3,11	-2,04	-3,18	-2,42	-2,50	-1,52	32,03	35,69	34,49	6,21	118,95	-6,61	33,69	-7,27	35,24	31,61
2	-7,28	-5,28	0,45	0,66	-3,41	-2,31	-3,45	-2,72	-2,70	-1,75	32,27	35,68	34,48	6,45	119,60	-4,85	34,35	-7,74	35,25	31,82
3	-7,45	-5,49	0,30	0,48	-3,60	-2,45	-3,69	-2,85	-2,89	-1,90	32,68	35,50	34,70	2,71	119,59	-7,26	33,83	-7,77	35,44	31,69
4	-7,62	-5,64	0,21	0,22	-3,79	-2,67	-3,88	-3,00	-3,09	-2,09	32,28	34,36	34,48	2,61	119,20	-6,47	33,61	-8,63	35,17	31,69
5	-7,88	-5,79	0,14	0,13	-3,97	-2,80	-4,02	-3,17	-3,27	-2,15	32,31	33,88	34,65	3,65	120,06	-5,76	33,53	-8,80	35,38	31,80
6	-7,88	-5,91	0,14	0,15	-4,05	-2,91	-4,20	-3,27	-3,39	-2,29	32,67	35,00	34,63	5,03	121,38	-6,76	33,99	-8,29	35,25	31,24
7	-8,03	-6,07	0,08	0,12	-4,24	-3,09	-4,35	-3,47	-3,57	-2,52	31,80	34,98	33,95	5,20	119,94	-5,57	33,67	-8,72	34,86	31,14
8	-8,13	-6,17	0,10	0,13	-4,34	-3,19	-4,48	-3,57	-3,69	-2,57	31,63	34,92	33,90	4,50	118,48	-7,60	33,70	-8,59	34,76	31,22
9	-8,27	-6,26	0,09	0,12	-4,47	-3,30	-4,55	-3,66	-3,81	-2,63	31,44	34,57	33,58	4,75	118,58	-5,74	33,32	-8,94	34,47	31,02
10	-8,31	-6,31	0,09	0,09	-4,53	-3,35	-4,63	-3,71	-3,85	-2,67	31,19	34,69	33,59	4,68	119,10	-5,71	32,95	-8,99	34,48	31,07

Tablo B.4 Ortam sıcaklığı 31°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

14 Eylül 2007 Tarihinde 50 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																				
Sıcaklık Değer Tablosu																				
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift
0	-6,17	-4,52	1,45	2,10	-2,26	-1,45	-2,39	-1,86	-1,83	-2,16	31,84	33,67	33,99	6,18	124,20	-4,78	32,26	-8,34	34,34	30,32
1	-6,43	-4,81	0,45	0,97	-2,79	-1,98	-2,91	-2,38	-2,28	-2,42	31,93	35,09	34,39	6,12	124,67	-4,75	33,38	-8,10	34,97	31,43
2	-6,53	-4,91	0,33	0,61	-2,97	-2,22	-3,12	-2,54	-2,44	-2,55	32,50	35,36	34,69	6,19	124,82	-4,50	33,89	-7,87	35,36	31,48
3	-6,80	-5,24	0,25	0,26	-3,31	-2,51	-3,45	-2,81	-2,78	-2,74	32,72	35,88	34,82	5,69	123,54	-5,46	34,46	-7,65	35,60	31,89
4	-7,21	-5,57	0,08	0,10	-3,60	-2,77	-3,67	-3,08	-2,97	-3,04	33,24	35,74	35,03	5,70	122,57	-4,93	34,38	-8,00	35,76	31,91
5	-7,41	-5,75	0,08	0,09	-3,79	-2,95	-3,89	-3,29	-3,32	-3,19	33,29	35,75	35,08	5,55	122,74	-5,38	34,55	-7,98	35,72	31,69
6	-7,36	-5,88	0,13	0,10	-3,88	-3,05	-4,05	-3,42	-3,43	-3,38	33,05	35,77	35,01	5,27	122,78	-5,57	34,49	-7,90	35,64	31,66
7	-7,72	-6,05	0,08	0,08	-4,12	-3,25	-4,21	-3,61	-3,57	-3,51	32,69	35,73	34,78	5,20	122,31	-5,69	34,41	-8,13	35,50	31,62
8	-7,80	-6,15	0,09	0,09	-4,22	-3,37	-4,32	-3,67	-3,77	-3,66	32,73	35,80	34,90	5,58	122,24	-5,74	34,40	-8,14	35,60	31,80
9	-7,77	-6,14	0,10	0,10	-4,27	-3,41	-4,36	-3,75	-3,73	-3,67	32,82	35,39	34,74	6,02	122,59	-5,38	34,10	-8,46	35,45	31,71
10	-7,84	-6,25	0,07	0,07	-4,37	-3,53	-4,51	-3,89	-3,93	-3,83	32,63	35,47	34,62	5,62	122,50	-5,57	34,10	-8,54	35,41	31,66

Tablo B.5 Ortam sıcaklığı 24°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

17 Nisan 2008 Tarihinde 20 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																							
Sıcaklık Değer Tablosu																							
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift	21. Isıl çift	22. Isıl çift	23. Isıl çift
0	-9,05	-4,75	1,22	1,73	-2,22	-0,50	-2,42	-1,01	-0,50	-0,40	22,96	23,98	26,00	3,35	101,93	-7,30	27,40	-11,55	26,50	23,35	-1,41	-1,72	-1,21
1	-9,28	-4,64	0,35	0,93	-3,14	-0,93	-3,39	-1,34	-0,63	0,02	23,91	24,89	26,51	4,06	115,60	-7,40	28,25	-10,92	27,32	23,94	-1,52	-2,14	-1,68
2	-9,46	-4,94	0,32	0,61	-3,58	-1,24	-3,85	-1,60	-0,83	0,35	24,69	25,49	26,99	4,00	118,37	-7,75	28,31	-11,00	27,81	24,13	-1,83	-2,49	-2,04
3	-9,64	-4,95	0,55	0,72	-3,36	-0,91	-3,56	-1,22	-0,40	0,43	25,56	26,20	27,90	4,36	120,26	-7,15	28,59	-11,06	28,04	23,13	-2,92	-3,72	-2,86
4	-9,79	-5,33	0,22	0,22	-4,16	-1,58	-4,42	-1,99	-1,12	-0,17	25,12	25,85	27,46	3,49	119,53	-7,94	28,16	-11,39	27,99	24,27	-2,23	-2,97	-2,50
5	-9,85	-5,49	0,21	0,19	-4,34	-1,75	-4,55	-2,11	-1,23	-1,82	25,30	26,00	27,55	3,18	119,04	-8,20	28,12	-11,42	28,15	24,41	-2,32	-3,08	-2,64
6	-10,21	-5,50	0,44	0,56	-3,82	-1,29	-4,07	-1,58	-0,73	0,39	25,94	26,84	28,68	3,77	120,60	-9,48	28,25	-11,22	28,60	23,70	-3,25	-4,14	-3,24
7	-10,28	-5,60	0,46	0,59	-4,06	-1,27	-4,24	-1,70	-0,86	0,33	26,25	26,90	28,71	4,10	120,90	-7,60	28,22	-11,40	28,40	23,33	-3,54	-4,42	-3,50
8	-10,32	-5,69	0,45	0,59	-4,13	-1,43	-4,29	-1,72	-0,88	0,33	26,11	26,89	28,98	3,79	121,96	-7,75	28,33	-11,52	28,44	23,37	-3,62	-4,54	-3,59
9	-10,13	-5,70	0,44	0,63	-4,07	-1,43	-4,08	-1,67	-0,91	0,36	26,05	26,72	28,62	3,65	123,54	-7,31	28,26	-12,01	28,18	23,10	-3,58	-4,48	-3,58
10	-9,55	-5,79	0,49	0,58	-4,20	-1,53	-4,39	-1,74	-1,01	0,27	25,84	26,60	28,43	3,35	122,81	-7,44	28,30	-11,95	28,19	23,30	-3,67	-4,60	-3,67

Tablo B.6 Ortam sıcaklığı 24°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

22 Nisan 2008 Tarihinde 30 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																							
Sıcaklık Değer Tablosu																							
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift	21. Isıl çift	22. Isıl çift	23. Isıl çift
0	-6,26	-4,77	2,31	3,07	-2,17	-1,24	-2,11	-1,82	-0,85	-0,92	26,81	28,74	28,61	5,23	111,36	-5,73	27,39	-9,53	29,63	25,93	-1,61	-1,10	-1,13
1	-8,29	-5,36	1,00	1,79	-2,78	-1,45	-3,04	-1,96	-2,21	-0,88	27,18	29,69	29,12	4,72	115,41	-6,67	28,53	-9,69	29,71	25,73	-1,90	-1,94	-1,33
2	-7,52	-4,52	0,68	1,24	-2,15	-0,92	-2,41	-1,15	-1,71	-0,30	28,14	30,46	30,25	6,23	121,56	-5,61	28,82	-9,91	30,30	24,82	-2,83	-3,05	-2,16
3	-8,05	-4,99	0,66	0,91	-2,50	-1,18	-2,74	-1,58	-2,03	-0,48	28,54	30,50	30,66	5,77	121,73	-5,86	29,06	-10,02	30,32	24,86	-3,29	-3,57	-2,64
4	-8,47	-5,39	0,55	0,65	-2,87	-1,48	-3,16	-1,80	-2,36	-0,71	29,88	30,17	31,08	4,93	120,17	-6,16	29,38	-10,05	30,65	24,87	-3,57	-3,89	-2,95
5	-8,44	-5,62	0,33	0,34	-3,44	-2,01	-3,77	-2,46	-2,96	-1,29	28,47	30,58	30,45	4,56	120,38	-6,62	29,10	-10,58	30,39	26,37	-2,82	-3,10	-2,54
6	-8,64	-5,86	0,19	0,14	-3,85	-2,31	-4,05	-2,81	-3,36	-1,60	27,56	30,60	30,13	4,03	119,29	-6,86	29,07	-10,58	30,36	26,66	-2,88	-3,16	-2,68
7	-8,58	-5,96	0,18	0,13	-3,95	-2,44	-4,27	-2,91	-3,46	-1,71	28,34	29,99	30,29	4,20	120,28	-6,90	28,92	-11,08	30,44	26,17	-3,02	-3,33	-2,83
8	-8,80	-6,14	0,16	0,12	-4,14	-2,57	-4,40	-3,02	-3,56	-1,81	29,09	29,73	30,12	3,91	119,98	-7,07	28,95	-10,91	30,45	26,13	-3,14	-3,47	-2,97
9	-8,82	-6,19	0,29	0,15	-4,24	-2,55	-4,56	-2,95	-3,75	-1,90	28,32	29,91	30,27	3,59	119,78	-7,08	28,87	-10,92	30,34	26,22	-3,23	-3,54	-3,03
10	-8,91	-6,25	0,23	0,17	-4,32	-2,69	-4,62	-3,07	-3,84	-1,95	27,76	30,10	29,88	3,75	119,13	-7,21	28,88	-10,94	30,23	26,16	-3,31	-3,60	-3,11

Tablo B.7 Ortam sıcaklığı 24°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

25 Nisan 2008 Tarihinde 40 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																							
Sıcaklık Değer Tablosu																							
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift	21. Isıl çift	22. Isıl çift	23. Isıl çift
0	-6,99	-4,88	2,55	3,05	-1,84	0,25	-1,58	-1,38	-1,28	0,10	25,17	27,27	27,91	3,54	93,75	-6,61	26,51	-10,36	28,37	24,90	-1,63	-1,12	-1,02
1	-7,46	-5,43	1,13	1,91	-2,70	-1,63	-2,69	-2,26	-2,11	-1,32	25,91	29,53	28,59	4,32	110,68	-6,30	28,13	-9,94	29,18	25,33	-2,35	-1,99	-1,67
2	-6,99	-5,01	0,42	1,08	-2,88	-1,91	-2,94	-2,36	-2,31	-1,52	26,18	29,71	28,75	4,56	114,23	-6,07	28,41	-9,55	29,42	25,39	-2,56	-2,29	-2,00
3	-7,60	-5,34	0,57	0,94	-2,79	-1,75	-2,81	-2,23	-2,12	-1,28	27,46	30,15	30,01	5,13	117,07	-5,96	28,72	-9,80	29,84	25,17	-3,32	-3,12	-2,53
4	-7,83	-5,61	0,54	0,81	-3,02	-1,96	-3,04	-2,39	-2,32	-1,47	27,52	30,65	30,35	5,23	117,18	-6,08	28,95	-9,80	30,12	25,10	-3,93	-3,74	-3,03
5	-7,90	-5,63	0,53	0,72	-3,08	-2,05	-3,07	-2,46	-2,43	-1,57	27,16	30,32	30,17	4,75	117,38	-6,16	28,67	-10,67	29,71	24,68	-4,08	-3,93	-3,18
6	-7,92	-5,98	0,25	0,19	-3,90	-2,73	-3,98	-3,29	-3,26	-2,37	26,57	29,92	29,44	4,15	118,37	-6,71	28,46	-10,75	29,69	25,75	-3,43	-3,21	-2,88
7	-8,29	-6,05	0,50	0,54	-3,50	-2,41	-3,53	-2,80	-2,76	-1,84	27,07	30,27	29,97	4,38	117,92	-6,57	28,70	-10,54	29,67	24,52	-4,42	-4,31	-3,55
8	-8,22	-6,17	0,37	0,33	-4,00	-2,92	-4,11	-3,38	-3,42	-2,48	25,96	29,33	29,19	3,67	117,61	-6,93	27,90	-11,18	28,88	25,13	-3,79	-3,60	-3,17
9	-8,32	-6,21	0,47	0,51	-3,82	-2,73	-3,89	-3,12	-3,21	-2,24	26,71	30,03	30,06	3,97	119,21	-6,92	28,30	-10,94	29,43	25,17	-4,14	-3,98	-3,42
10	-8,60	-6,36	0,45	0,59	-3,84	-2,66	-3,87	-3,03	-3,13	-2,09	26,69	30,38	29,92	4,13	117,79	-6,69	28,56	-10,74	29,60	26,44	-4,70	-4,62	-3,85

Tablo B.8 Ortam sıcaklığı 24°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

29 Nisan 2008 Tarihinde 50 lt dak lt/dak ⁻¹ Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																							
Sıcaklık Değer Tablosu																							
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift	21. Isıl çift	22. Isıl çift	23. Isıl çift
0	-6,96	-5,13	2,81	2,59	-2,12	0,23	-1,92	-1,55	-1,37	-0,82	22,45	23,53	24,76	3,76	99,00	-6,39	27,86	-9,66	26,56	23,37	-1,44	-0,72	-0,70
1	-7,28	-5,49	1,29	1,31	-2,73	-1,70	-2,72	-2,31	-1,97	-1,30	23,17	24,21	25,96	3,85	110,90	-6,04	28,14	-9,76	26,90	23,56	-2,25	-1,79	-1,33
2	-6,97	-5,17	0,52	0,95	-2,88	-1,99	-2,95	-2,48	-2,23	-1,54	23,18	24,11	26,36	4,07	113,99	-5,89	28,06	-9,90	26,85	23,31	-2,60	-2,17	-1,84
3	-7,55	-5,57	0,55	0,89	-2,94	-1,96	-2,97	-2,50	-2,26	-1,55	23,60	24,53	26,55	4,06	115,32	-6,09	28,22	-9,87	26,97	22,76	-3,33	-2,96	-2,42
4	-7,71	-5,93	0,45	0,49	-3,57	-2,56	-3,51	-3,05	-2,79	-2,10	23,42	24,36	26,48	3,09	112,87	-6,80	28,14	-10,08	26,86	22,85	-3,51	-3,13	-2,70
5	-7,89	-6,16	0,31	0,22	-3,88	-2,92	-3,98	-3,42	-3,16	-2,41	23,44	24,48	26,28	3,04	113,53	-6,57	28,09	-10,35	27,16	23,41	-3,51	-3,14	-2,80
6	-8,14	-6,25	0,47	0,42	-3,79	-2,79	-3,88	-3,23	-3,03	-2,30	23,99	24,82	26,76	3,28	114,44	-6,62	28,22	-10,15	27,37	22,89	-3,92	-3,62	-3,12
7	-8,23	-6,45	0,37	0,25	-4,14	-3,12	-4,24	-3,55	-3,46	-2,67	24,03	24,83	26,46	2,51	113,32	-7,31	28,43	-10,40	27,11	23,37	-3,91	-3,61	-3,22
8	-8,40	-6,74	0,22	0,11	-4,49	-3,30	-4,53	-3,83	-3,72	-2,91	23,75	24,59	26,27	2,17	113,31	-7,06	28,41	-10,44	27,14	23,25	-3,99	-3,70	-3,34
9	-8,57	-6,80	0,20	0,17	-4,54	-3,52	-4,59	-3,94	-3,77	-2,94	23,94	24,67	26,31	1,84	113,78	-7,06	28,49	-10,43	27,07	23,39	-4,02	-3,74	-3,37
10	-8,80	-6,82	0,42	0,52	-4,20	-3,05	-4,22	-3,51	-3,38	-2,59	24,17	25,13	27,18	2,07	111,96	-6,72	28,57	-10,23	27,38	22,58	-4,93	-4,76	-4,03

Tablo B.9 Ortam sıcaklığı 17°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

15 Şubat 2008 Tarihinde 20 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																							
Sıcaklık Değer Tablosu																							
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift	21. Isıl çift	22. Isıl çift	23. Isıl çift
0	-7,96	-4,45	1,33	1,44	-1,61	-0,17	-0,56	-0,26	-0,98	0,03	13,98	14,77	15,02	-4,04	65,52	-11,54	25,50	-11,86	18,23	16,27	-0,71	0,28	-0,80
1	-9,87	-4,95	0,62	0,94	-3,05	-0,88	-3,14	-1,08	-2,05	-0,35	15,16	15,87	15,68	0,18	102,40	-8,08	25,53	-11,88	18,93	16,61	-1,20	-1,85	-1,84
2	-9,63	-5,05	0,40	0,63	-3,45	-1,17	-3,67	-1,44	-2,51	-0,52	15,29	16,58	16,68	1,12	110,94	-8,42	25,50	-13,39	19,46	16,92	-1,79	-2,37	-2,25
3	-10,18	-5,48	0,26	0,26	-4,04	-1,47	-4,20	-1,74	-2,91	-0,75	16,89	17,38	17,62	1,44	116,11	-8,41	26,00	-12,03	20,48	16,95	-2,24	-2,81	-2,60
4	-10,42	-5,70	0,22	0,20	-4,25	-1,62	-4,40	-1,87	-3,12	-0,85	16,24	17,41	17,47	1,37	114,26	-8,85	25,83	-12,25	20,25	17,28	-2,49	-3,04	-2,81
5	-10,55	-5,80	0,15	0,13	-4,48	-1,73	-4,64	-2,01	-3,29	-0,94	16,32	17,42	17,37	1,92	116,20	-8,30	25,85	-12,41	20,05	16,84	-2,71	-3,26	-2,98
6	-10,62	-5,96	0,19	0,14	-4,70	-1,89	-4,85	-2,17	-3,51	-1,04	16,11	17,25	17,05	1,31	115,72	-8,71	25,85	-12,59	19,93	16,76	-2,84	-3,39	-3,12
7	-10,91	-6,01	0,14	0,12	-4,95	-1,95	-5,09	-2,24	-3,67	-1,03	15,84	16,36	16,70	0,70	115,19	-8,85	25,49	-12,90	19,46	16,47	-3,04	-3,60	-3,30
8	-10,92	-5,99	0,16	0,14	-5,07	-2,03	-5,18	-2,30	-3,79	-1,07	15,92	16,78	16,74	1,53	115,01	-8,83	25,66	-12,94	19,28	16,37	-3,14	-3,71	-3,40
9	-10,85	-5,93	0,13	0,15	-5,05	-2,07	-5,13	-2,32	-3,81	-1,11	15,78	16,74	16,63	1,63	115,00	-8,63	25,65	-13,23	19,26	16,36	-3,17	-3,71	-3,41
10	-10,95	-6,06	0,22	0,17	-5,20	-2,13	-5,14	-2,31	-3,94	-1,14	15,95	16,93	17,04	1,25	116,74	-9,24	25,78	-12,99	19,40	16,41	-3,23	-3,75	-3,47

Tablo B.10 Ortam sıcaklığı 17°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

11 Şubat 2008 Tarihinde 30 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																							
Sıcaklık Değer Tablosu																							
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift	21. Isıl çift	22. Isıl çift	23. Isıl çift
0	-7,45	-5,90	1,34	1,95	-2,89	-2,02	-2,90	-2,44	-1,26	-1,34	16,90	17,43	18,01	1,52	103,88	-6,44	26,26	-9,99	20,62	17,30	-1,51	-1,92	-1,87
1	-8,27	-5,16	0,55	1,19	-2,93	-1,55	-3,23	-1,91	-2,42	-0,92	16,57	17,54	17,93	1,34	110,69	-6,75	26,02	-11,06	20,59	17,48	-2,02	-2,45	-2,25
2	-8,81	-5,77	0,40	0,64	-3,41	-1,88	-3,75	-2,27	-2,87	-1,19	16,43	17,21	17,70	0,72	110,93	-7,23	25,91	-11,19	20,38	17,14	-2,47	-2,92	-2,61
3	-9,29	-6,17	0,26	0,27	-3,86	-2,21	-4,19	-2,64	-3,27	-1,47	15,85	16,74	17,04	0,14	109,11	-7,83	25,73	-11,53	19,73	16,34	-2,76	-3,22	-2,87
4	-9,53	-6,45	0,20	0,18	-4,03	-2,40	-4,43	-2,79	-3,50	-1,59	16,68	17,41	17,75	0,52	110,68	-8,40	26,01	-11,34	20,39	16,69	-2,87	-3,35	-2,98
5	-9,09	-6,27	0,22	0,17	-4,05	-2,41	-4,36	-2,73	-3,46	-1,60	16,28	17,23	17,30	1,15	113,70	-7,68	25,94	-12,10	20,02	16,78	-3,00	-3,46	-3,04
6	-9,32	-6,49	0,19	0,14	-4,29	-2,55	-4,58	-2,90	-3,69	-1,76	16,21	17,33	17,30	0,94	113,35	-7,81	25,89	-12,17	20,07	16,86	-3,08	-3,53	-3,13
7	-9,54	-6,62	0,16	0,13	-4,40	-2,69	-4,68	-2,98	-3,79	-1,84	16,08	17,16	17,25	1,02	114,72	-7,89	25,84	-12,23	19,79	16,82	-3,10	-3,54	-3,18
8	-9,68	-6,74	0,18	0,16	-4,57	-2,78	-4,85	-3,15	-3,96	-1,95	16,06	17,18	17,17	0,74	115,11	-8,04	25,90	-12,05	20,07	16,68	-3,35	-3,81	-3,41
9	-9,66	-6,84	0,15	0,10	-4,64	-2,85	-4,84	-3,19	-4,06	-2,02	16,08	17,05	17,04	0,79	115,15	-8,07	25,83	-12,46	19,81	16,61	-3,40	-3,85	-3,48
10	-9,72	-6,91	0,20	0,14	-4,75	-2,94	-5,06	-3,29	-4,19	-2,12	15,99	17,10	17,07	0,52	113,29	-8,24	25,78	-12,47	19,77	16,69	-3,51	-3,96	-3,60

Tablo B.11 Ortam sıcaklığı 17°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

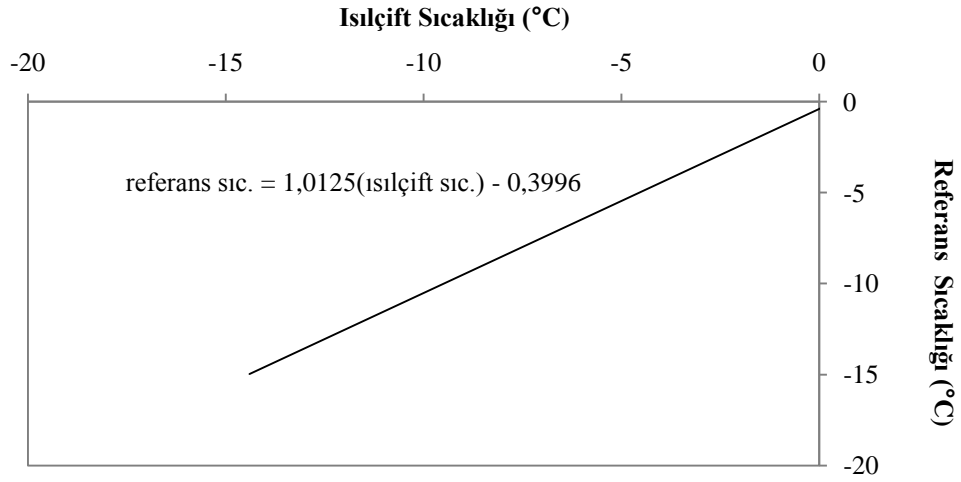
04 Şubat 2008 Tarihinde 40 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																				
Sıcaklık Değer Tablosu																				
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift
0	-7,25	-5,77	0,89	1,20	-2,66	-1,87	-2,61	-2,38	-1,04	-1,24	16,26	17,25	17,73	1,57	99,74	-6,86	26,22	-10,48	20,54	17,69
1	-7,79	-5,24	0,80	1,21	-2,36	-1,33	-2,37	-1,64	-1,54	-0,70	18,06	18,59	19,30	2,69	110,16	-6,07	26,59	-9,90	21,59	16,61
2	-8,20	-5,92	0,38	0,48	-3,46	-2,31	-3,53	-2,78	-2,69	-1,76	17,83	18,69	19,42	1,89	110,82	-6,83	26,20	-10,35	21,76	18,03
3	-8,58	-6,27	0,33	0,32	-3,87	-2,55	-3,93	-3,09	-3,06	-2,03	18,42	19,08	20,05	1,45	110,11	-7,36	26,22	-10,26	22,39	18,48
4	-8,59	-6,39	0,20	0,16	-4,05	-2,85	-4,11	-3,30	-3,23	-2,19	18,49	19,16	19,96	1,78	111,69	-7,13	26,02	-11,16	22,18	18,66
5	-8,72	-6,57	0,20	0,15	-4,26	-2,99	-4,32	-3,43	-3,45	-2,34	18,33	19,19	19,72	1,63	112,50	-7,24	26,03	-11,22	22,06	18,79
6	-9,03	-6,82	0,14	0,09	-4,50	-3,16	-4,50	-3,55	-3,62	-2,49	18,07	18,88	19,35	1,19	112,52	-7,42	26,08	-11,28	21,80	18,43
7	-9,07	-6,92	0,15	0,10	-4,62	-3,30	-4,72	-3,74	-3,81	-2,62	17,90	18,81	19,26	0,92	112,29	-7,56	26,07	-11,33	21,81	18,40
8	-8,96	-6,80	0,19	0,17	-4,62	-3,32	-4,73	-3,75	-3,84	-2,59	16,91	17,81	18,30	0,43	111,31	-7,72	25,66	-11,74	20,80	17,83
9	-9,08	-6,94	0,21	0,16	-4,78	-3,47	-4,85	-3,84	-3,99	-2,73	16,34	17,21	17,50	-0,02	111,26	-7,96	25,55	-11,94	20,27	17,22
10	-9,35	-7,14	0,16	0,14	-4,88	-3,56	-5,00	-3,88	-4,05	-2,73	16,10	17,03	17,47	-0,28	110,95	-8,12	25,50	-12,07	19,95	17,28

Tablo B.12 Ortam sıcaklığı 17°C iken yapılan deney sıcaklık ölçüm verileri

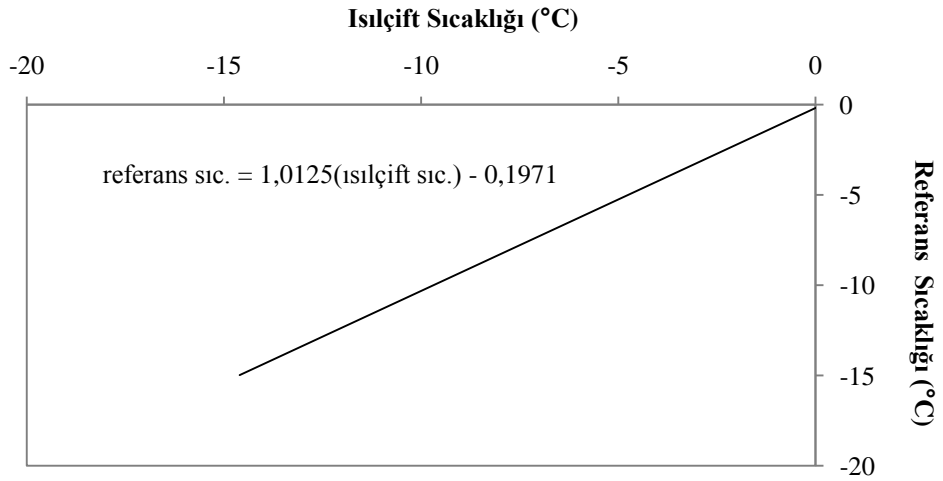
30 Ocak 2008 Tarihinde 50 lt/dak Debi İçin Yapılan Deney Sonuçları																				
Sıcaklık Değer Tablosu																				
Saat	1. Isıl çift	2. Isıl çift	3. Isıl çift	4. Isıl çift	5. Isıl çift	6. Isıl çift	7. Isıl çift	8. Isıl çift	9. Isıl çift	10. Isıl çift	11. Isıl çift	12. Isıl çift	13. Isıl çift	14. Isıl çift	15. Isıl çift	16. Isıl çift	17. Isıl çift	18. Isıl çift	19. Isıl çift	20. Isıl çift
0	-7,19	-5,38	1,12	1,87	-1,24	0,20	-0,72	-0,71	-1,07	0,15	14,81	15,77	16,06	-1,76	64,04	-9,03	25,68	-11,44	18,89	15,31
1	-6,94	-5,03	0,62	1,18	-2,70	-1,63	-3,02	-2,15	-1,94	-1,26	12,63	13,73	14,04	-0,06	98,81	-7,06	25,52	-11,00	17,32	14,16
2	-7,44	-5,67	0,52	0,76	-3,25	-2,29	-3,59	-2,81	-2,53	-1,87	13,02	14,05	14,14	-0,16	103,81	-7,50	25,12	-12,02	17,24	14,89
3	-7,76	-5,97	0,48	0,50	-3,59	-2,60	-3,88	-3,15	-2,91	-2,16	13,61	14,76	14,75	0,45	108,80	-7,35	25,54	-11,14	17,92	14,76
4	-8,07	-6,29	0,45	0,42	-3,92	-2,97	-4,22	-3,44	-3,26	-2,49	13,75	14,87	15,05	0,29	108,80	-7,67	25,56	-11,26	18,16	15,14
5	-8,35	-6,56	0,41	0,37	-4,19	-3,21	-4,43	-3,72	-3,49	-2,71	14,06	15,31	15,17	0,40	108,74	-7,85	25,56	-11,25	18,38	15,26
6	-8,11	-6,39	0,39	0,34	-4,16	-3,24	-4,40	-3,68	-3,52	-2,72	13,69	14,62	14,67	0,69	110,02	-7,80	25,29	-12,46	17,70	14,74
7	-8,14	-6,50	0,35	0,31	-4,26	-3,34	-4,49	-3,76	-3,58	-2,84	14,46	15,60	15,21	1,35	112,82	-7,62	25,61	-12,01	18,22	15,03
8	-8,33	-6,62	0,34	0,34	-4,42	-3,49	-4,64	-3,92	-3,76	-2,93	14,84	15,82	15,96	1,43	113,75	-7,77	25,63	-12,07	18,58	15,13
9	-8,32	-6,71	0,41	0,30	-4,51	-3,57	-4,73	-4,06	-3,86	-3,11	14,62	15,75	15,60	1,37	114,18	-7,93	25,66	-12,00	18,37	15,07
10	-8,46	-6,77	0,44	0,35	-4,61	-3,67	-4,86	-4,14	-4,01	-3,15	14,98	16,13	16,00	1,35	113,73	-8,06	25,66	-12,16	18,79	15,39

C.1 Isıl Çiftlerin Kalibrasyon Eğrileri

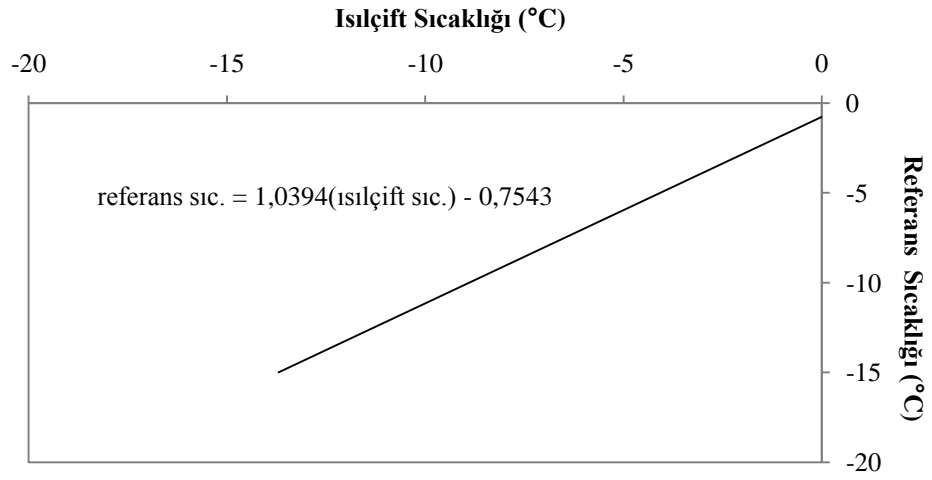
Yapılan çalışmada kullanılan üç farklı ısıl çift için kalibrasyon eğrileri ve eğri denklemleri verilmiştir. Eğriler, ısıl çiftlerin bağlı olduğu noktanın sıcaklık değerlerine uygun olarak seçilen referans sıcaklıkları aralığında çizilmiştir.



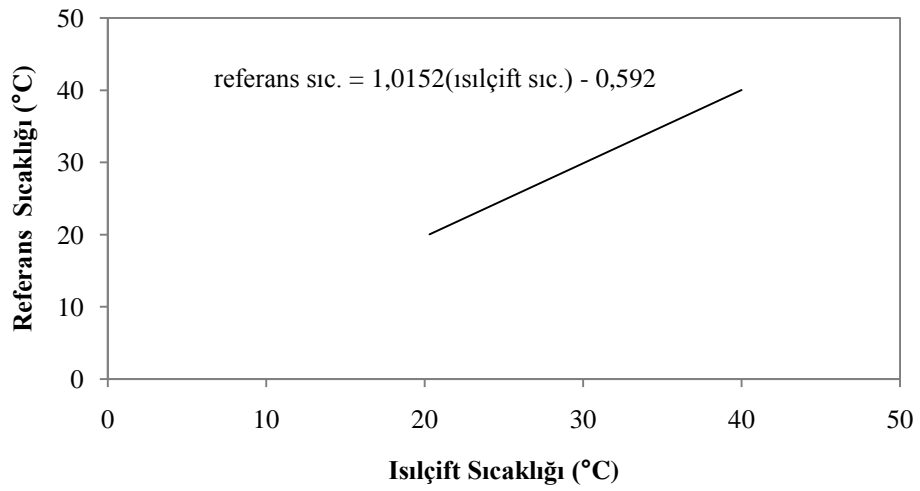
Şekil C.1 -15°C - 0°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ısıl çift #2)



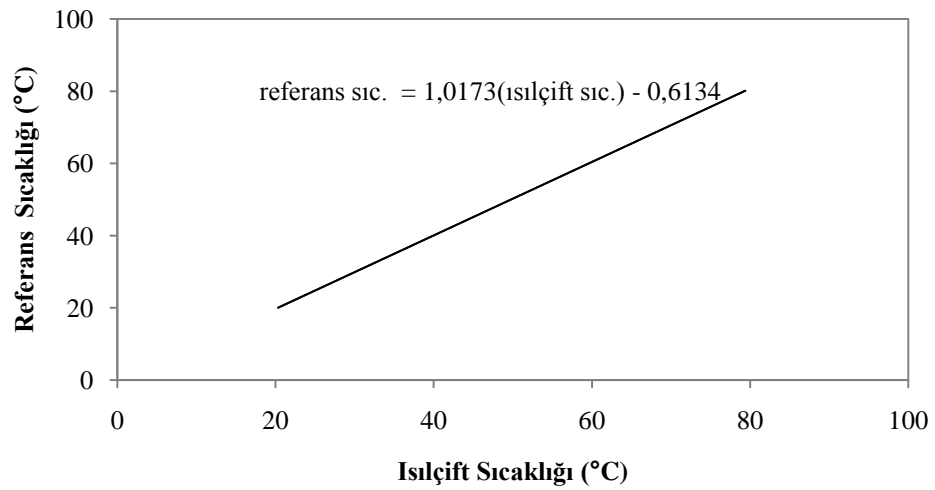
Şekil C.2 -15°C - 0°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ısıl çift #3)



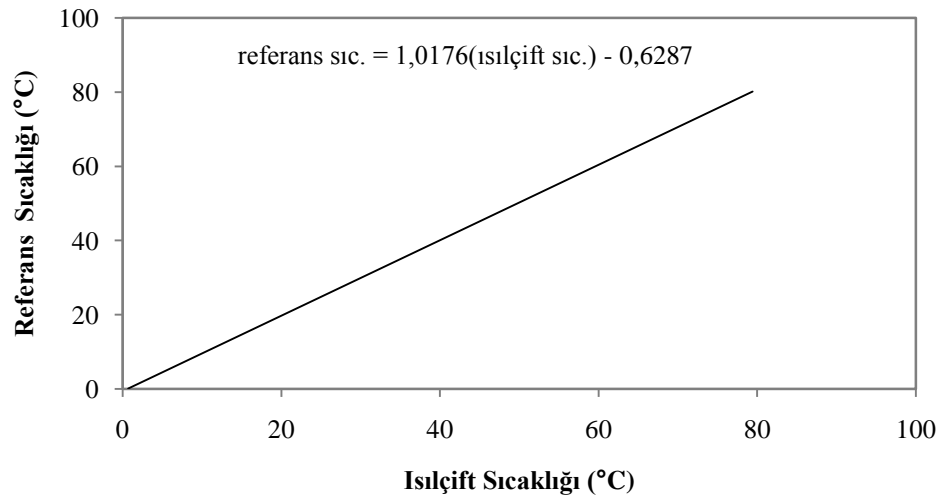
Şekil C.3 -15°C - 0°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ıslı çift #1)



Şekil C.4 20°C - 40°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ıslı çift #1)



Şekil C.5 20°C - 80°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ısı çifti #1)



Şekil C.6 0°C - 80°C arasındaki sıcaklık değerleri için kalibrasyon eğrisi (T tip ısı çifti #1)

D.1 Quick Basic Programında Sayısal Algoritma

```

CLS
K = 0
N = 0
T = 0.001
  STE = 0.021439
  E0 = (2/(1/STE+0.5))^0.5
  E1 = E0/3^0.5
  E2 = (E1+E0^2/2-(1/STE+0.5)*E1^2)/(2*(1/STE+0.5)*E0)
  S1 = 1+E0*T^0.5+E1*T+E2*T^1.5
500 K = K+0.001
  N = N+0.001
  A1 = T*LOG(1/S1)/(S1*(1-LOG(S1)-(LOG(S1))^2/STE)-1)
  A2=T*LOG(1/(S1+A1/2))/((S1+A1/2)*(1-LOG(S1+A1/2)-
(LOG(S1+A1/2))^2/STE)-1)
  A3=T*LOG(1/(S1+A2/2))/((S1+A2/2)*(1-LOG(S1+A2/2)-
(LOG(S1+A2/2))^2/STE)-1)
  A4 = T*LOG(1/(S1+A3))/((S1+A3)*(1-LOG(S1+A3)-(LOG(S1+A3))^2/STE)-1)
  S2 = S1+(A1+2*A2+2*A3+A4)/6
  IF N > 499.1308 THEN GOTO 1000
900 S1 = S2
  GOTO 500
1000 PRINT K, S2
  N = 0
  IF K > 500 THEN END
  GOTO 900

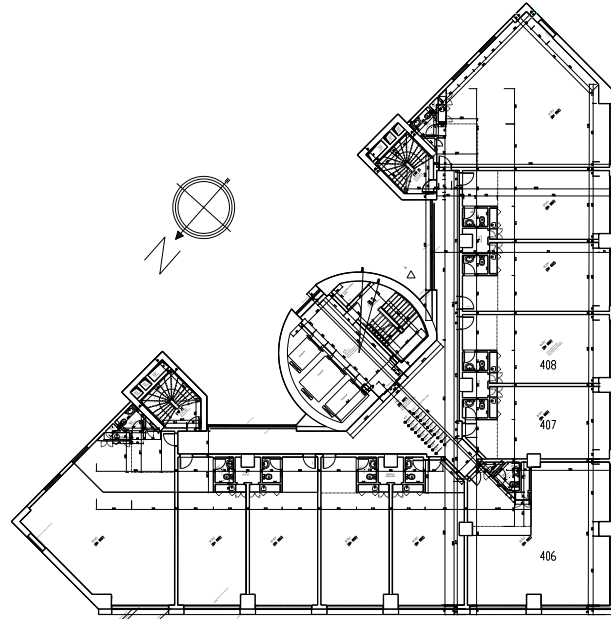
```

E.1 Bir Ofisin Isı Kazancı Hesabı

İzmir’de Tepekule adlı ofis olarak kullanılan 20 katlı binanın (Şekil E.1) 10. katında bulunan 50 m²’lik bir ofisin ısı kazancı hesaplanmış ve ihtiyaç duyulan soğutma yükünün mevcut buz depolama sistemi ile karşılanabileceği gösterilmiştir.

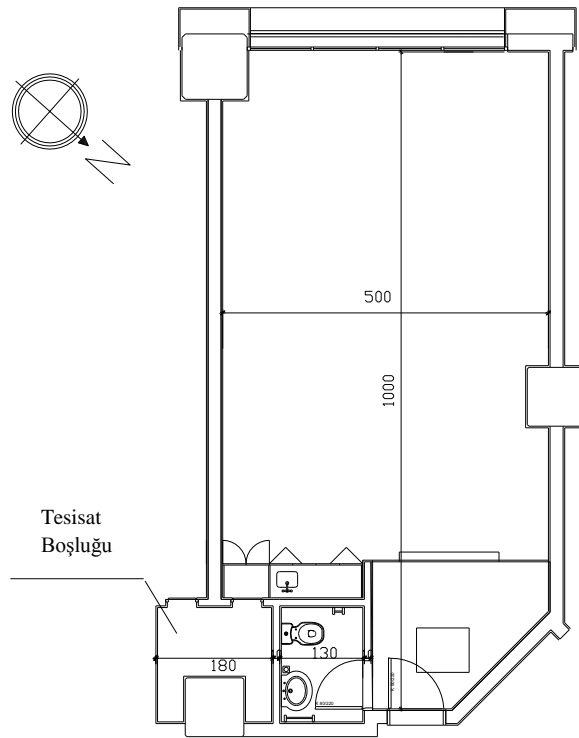


Şekil E.1 Tepekule binasının dış görünüşü (Çiftçi, 2008)



Şekil E.2 Tepekule binasının mimari planı (Çiftçi, 2008)

Baz alınan ofisin eni 5 m, boyu 10 m, yüksekliği ise 3,15 m'dir. Toplam pencere alanı ise 6 m²'dir. Pencerelelerde 1mx1,5m boyutlarında 4 parça güneş ve ısı kontrol kaplamalı ısıcam yalıtım camı kullanılmıştır. Pencere binanın güneybatı yönünde bulunmaktadır. Ofiste 2 kişinin çalıştığı ve 2 bilgisayar ile 2 yazıcının bulunduğu düşünülmekte ayrıca ofiste 6 adet 100 W'lık ampul bulunmaktadır. Burada yapılan hesaplar Şekil E.2'de gösterilen 407 – 410 numaralı ofisler için geçerlidir ve bu ofislerden birinin planı Şekil E.3'de verilmiştir.



Şekil E.3 407 numaralı ofis planı (Çiftçi, 2008)

İncelenen ofisin ısı kazancı hesabı aşağıda gerçekleştirilmiştir. Bir mahallin ısı kazancı hesaplanırken mekânın iç ve dış ısı kazançları ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Buna göre dış ısı kazancı;

$$Q_{dış} = Q_{rad.} + Q_{kon.} + Q_{hav.} + Q_{çatı} \quad (E.1)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada $Q_{rad.}$, güneşten radyasyonla olan ısı kazancı; $Q_{kon.}$, duvar ve pencerelerden konveksiyonla olan ısı kazancı; $Q_{hav.}$, havalandırmadan

dolayı gelen soğutma yükü; $Q_{\text{çatı}}$ ise çatıdan gelen ısı kazançlarıdır. İncelenen örnek ara kat olduğu için $Q_{\text{çatı}}$ değeri sıfır alınmıştır.

Güneşten radyasyonla olan ısı kazancı ($Q_{\text{rad.}}$);

$$Q_{\text{rad.}} = F \times Q_G \quad (\text{E.2})$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada F , pencere alanı; Q_G ise radyasyonla gelen ısı akısıdır. Q_G değeri belirlenirken pencerelerin yoğun olduğu yöne göre pik yük saati belirlenir. Pencere yoğunluğu doğu, kuzeydoğu ve güneydoğu cephelerinde fazla ise pik yük saat 08.00 de oluşur. Pencere yoğunluğu batı, kuzeybatı, güneybatı cephelerinde fazla ise pik yük saat 16.00 da oluşur. Pik yük saatine göre Q_G değeri 350 W/m^2 alınmıştır (Isısan, 1997).

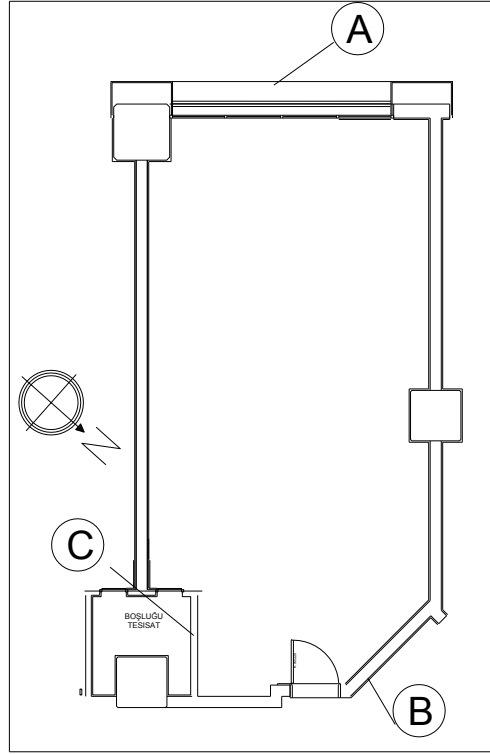
Duvarlardan konveksiyonla olan ısı kazancı ($Q_{\text{dvw.}}$);

$$Q_{\text{dvw.}} = K \times F \times \Delta t_{eş} \quad (\text{E.3})$$

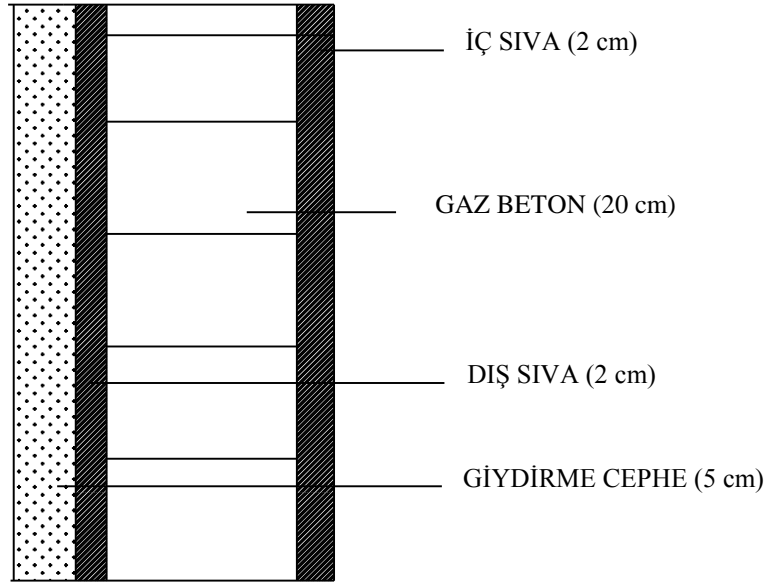
denkleminde bulunabilir. Burada, K , ısı geçirgenlik katsayısı; F , duvar alanı ve $\Delta t_{eş}$, eşdeğer sıcaklıktır ve gün içinde zamana bağlı olarak değişir. Hesaplamalarda pik yükün olduğu saatteki $\Delta t_{eş}$ değeri ($8,9^\circ\text{C}$) kullanılmıştır (Isısan, 1997). Isı geçirgenlik katsayısı ise aşağıdaki formülden bulunabilir:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_{dış}} \quad (\text{E.4})$$

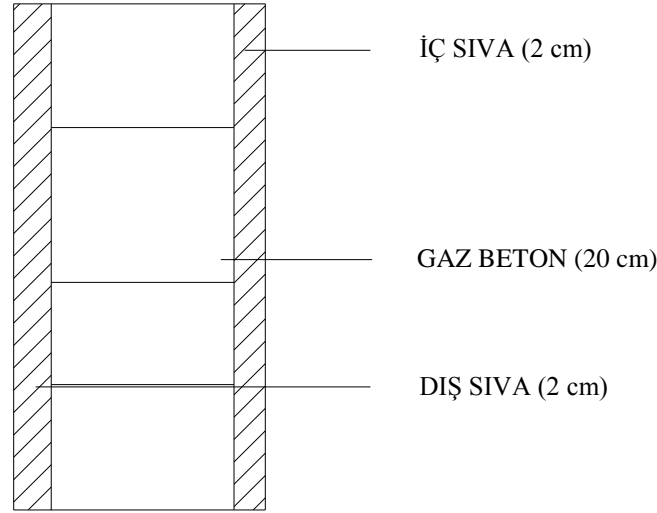
Burada α , ısı taşınım katsayısı; d , duvar kalınlığı ve λ , ısı iletkenlik katsayısıdır. İncelenen Şekil E.4'de A, B ve C ile gösterilen duvar boyunca konveksiyonla ısı kazancı meydana gelmektedir.



Şekil E.4 Ofisin ısı kazancı olan bölümleri



Şekil E.5 Dış duvar elemanları



Şekil E.6 İç duvar elemanları

Şekil E.5 ve Şekil E.6'da gösterilen dış ve iç duvarın ısı geçirgenlik katsayıları sırasıyla 0,488 W/m²K ve 0,806 W/m²K olarak hesaplanmıştır (Çiftçi, 2008).

Pencerelerden konveksiyonla olan ısı kazancı;

$$Q_{pen.} = K \times F \times \Delta t \quad (E.5)$$

denkleminde hesaplanabilir. Burada, K , pencere ısı iletim katsayısı; F , toplam pencere alanı; Δt ise iç – dış sıcaklık farkıdır. Pratikte bu değer 8°C olarak alınabilir (Isısan, 1997). Örnek ofisin pencere ısı iletim katsayısı 2,52 W/m²K olarak hesaplanmıştır (Çiftçi, 2008).

Havalandırmadan dolayı gelen soğutma yükü ($Q_{hav.}$);

$$Q_{hav.} = V \rho c T_{iç} - T_{dış} \quad (E.6)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada, V , havalandırılan mahal hacmi; ρ , havanın yoğunluğu; c , sabit basınçta havanın özgül ısısıdır.

İç ısı kazancı;

$$Q_{iç} = Q_{ins.} + Q_{ayd.} + Q_{cih.} \quad (E.7)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada, $Q_{ins.}$, insanlardan gelen ısı kazancı; $Q_{ayd.}$, aydınlatmadan oluşan ısı kazancı; $Q_{cih.}$, cihazlardan gelen ısı kazancıdır.

İnsanlardan gelen ısı kazancı ($Q_{ins.}$), duyulur ve gizli ısı olarak iki kısma ayrılır. Ofisler ve konutlar için duyulur ısı 70 W/kişi, gizli ısı 60 W/kişi değerinde alınabilir (Isısan, 1997). Burada, insanlardan gelen ısı kazancı 220,2 W değerinde alınmıştır (Çiftçi, 2008).

Aydınlatmadan oluşan ısı kazancı ($Q_{ayd.}$);

$$Q_{ayd.} = Q_{T_{ayd.}} \times k \quad (E.8)$$

denklemini ile hesaplanabilir. Burada, $Q_{T_{ayd.}}$, mahaldeki toplam aydınlatma gücü; k, kullanma faktörüdür. Hesaplarda kullanma faktörü 0,93 alınmıştır (Çiftçi, 2008).

Cihazlardan gelen ısı Kazancı ($Q_{cih.}$);

$$Q_{cih.} = Q_{T_{cih.}} \times k \quad (E.9)$$

Burada, $Q_{T_{cih.}}$, mahaldeki toplam cihaz gücü; k, kullanma faktörüdür. Hesaplarda kullanma faktörü 0,93 alınmıştır (Çiftçi, 2008).

İncelenen örnek ofisin ısı kazanç değerleri, pik yükler göz önüne alınıp, yukarıda verilen formüller kullanılarak hesaplanmış ve Tablo E.1'de verilmiştir.

Tablo E.1 Ofisin ısı kazanç değerleri

Dış Kazançlar (W)		İç Kazançlar (W)	
$Q_{rad.}$	888,3	$Q_{ins.}$	220,2
$Q_{kon.}$	190,2	$Q_{ayd.}$	588
$Q_{hav.}$	84	$Q_{cih.}$	930
$\Sigma Q_{dış}$	1162,5	$\Sigma Q_{iç}$	1738,2

Buna göre ofisin pik soğutma yükü 2900,7 W olarak belirlenmiştir. Böylece bir saatlik süre için ofise olan enerji girdisi ise 10443 kJ olarak hesaplanabilir. İncelenen soğu depolama sistemi saatte 10000 kJ enerji depolayarak örnekteki ofis olarak kullanılan mahallin soğutma yükünü yaklaşık olarak karşılayabilecek kapasitededir.

F.1 Semboller

a	: Runge – Kutta yönteminde kullanılan bir katsayı
A	: alan (m^2)
c	: özgül ısı ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
d	: duvar kalınlığı (m)
D	: boru çapı (m)
e	: seri çözümünde kullanılan bir katsayı
f	: sürtünme faktörü
F	: alan (m^2)
g	: yer çekimi ivmesi
h	: taşınım katsayısı ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$) – entalpi ($kJ\ kg^{-1}$)
k	: ısı iletim katsayısı ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$); kullanma faktörü
K	: ısı geçirgenlik katsayısı ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
L	: borunun boyu (m)
\dot{m}	: kütleli debi ($kg\ s^{-1}$)
m	: kütle (kg)
Nu	: Nusselt sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
Q	: enerji (kJ)
\dot{Q}	: birim zamanda enerji geçişi (W)
r	: radyal koordinat (m)
r^*	: boyutsuz radyal koordinat
Ra	: Rayleigh sayısı
Re	: Reynolds sayısı
s	: kaynak terimi
s^*	: boyutsuz kaynak terimi
Ste	: Stefan sayısı
t	: zaman (s)
\bar{T}	: ortalama sıcaklık (K)
T	: sıcaklık (K)
V	: hacim (m^3) – hız ($m\ s^{-1}$)

- \dot{W} : birim zamanda yapılan iş (W)
 z : yükseklik (m)

Yunan Harfleri

- α : ısı yayılım katsayısı ($m^2 s^{-1}$); ısı taşınım katsayısı ($W m^{-2} K^{-1}$)
 β : hacimsel ısı genleşme katsayısı (K^{-1})
 ΔH : faz değişim malzemesinin gizli ısısı ($J kg^{-1}$)
 θ : boyutsuz sıcaklık
 ν : kinematik viskozite ($m^2 s^{-1}$)
 λ : Isı iletkenlik katsayısı ($W m^{-1} K^{-1}$)
 μ : dinamik viskozite ($N s m^{-2}$)
 ρ : yoğunluk ($kg m^{-3}$)
 τ : boyutsuz zaman

Alt İndisler

- b : yüzey sıcaklığı
 B : etilen glikol – su karışımı geçen buz tankı ile evaporatör bağlantı borusu
 C : debimetre
 ζ : çıkış
 g : giriş
 H : yüksek sıcaklık
 i : başlangıç koşulu
 o : polietilen borunun dış çapı
 s : katı faz
 T : depolama tankı