

Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması

Mustafa Zeki YILMAZOĞLU

ÖZET

Binalarda enerji tüketiminin büyük bir kısmı iklimlendirme uygulamalarında tüketilmektedir. Binalarda enerji tüketiminin azaltılması, enerjinin verimli kullanılması ile mümkündür. Bina yalıtımı, verimi yüksek ev aletlerinin kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının binalarda uygulanması gibi bir çok verimlilik artırıcı önlemin yanısıra, ısı enerjisinin depolanarak kullanılması da bina enerji tüketimini azaltacaktır. Bu amaçla, bu çalışmada ısı enerjisi depolama yöntemlerinden; sıvılarda depolama, katılarda depolama, mevsimsel depolama, kimyasal depolama ve faz değişimli maddelerde depolama hakkında bilgi verilmiştir. Bu yöntemlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı depolama, güneş enerjisi, mevsimsel depolama, faz değişimli maddelerde depolama

Thermal Energy Storage Methods and Application in Buildings

ABSTRACT

In buildings most of energy consumption is consumed by climatization applications. It is possible to decrease energy consumption in buildings by using the energy efficiently. Building insulation, using energy efficient home appliances, renewable energy applications in buildings are some of the many efficiency increasing precautions as well as using heat energy by storage that also decreases building energy consumption. To this end, in this study, heat energy storage methods; storage in fluids, storage in solids, seasonal storage, chemical storage and energy storage in phase change materials and the points to receive attention in the choice of these methods are stated.

Keywords: Heat storage, solar energy, seasonal storage, storage in phase change materials

1. GİRİŞ

Enerji tüketimi yönünde yapılan projeksiyon çalışmaları, 2030 yılında, kurulu gücümüzün yaklaşık iki kat artacağını öngörmektedir. Enerji üretimi, genel olarak fosil yakıtlarla karşılanmaktadır ve fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO₂ küresel ısınmanın nedeni olarak gösterilmektedir. Atmosferdeki CO₂ oranı, Mart 2009 verilerine göre hacimsel olarak 387 ppm olarak belirlenmiştir. Nüfustaki hızlı artış ve enerji talebindeki buna bağlı artışın bu hızda seyretmesi sonucu atmosfere salınan CO₂ miktarı da aynı oranda artacaktır. Uluslararası kuruluşlar bu konuda birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ülkemizde dahil olduğu Kyoto Protokolü de bu çalışmalardan bir tanesi olup sera gazı emisyonlarının azaltılması en önemli hedef olarak ortaya konulmuştur. Bu emisyonların azaltılmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerji verimliliği çalışmaları yer almaktadır.

Binalarda enerji tüketim profili incelenecek olursa, iklimlendirme uygulamalarında harcanan enerji, genel tüketim içinde yaklaşık %80'lik bir paya sahiptir.

Makale 11.02.2010 tarihinde gelmiş 16.04.2010 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

M. Z. YILMAZOĞLU, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makina Müh. Böl. Maltepe Ankara

e-posta : zekiylmazoglu@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.1, 33-42.

Yalıtım uygulamaları, verimi yüksek ev aletlerinin ve aydınlatma sistemlerinin kullanımı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının binalara entegrasyonu ile bu pay azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu uygulamaların yanısıra ısı enerjisinin depolanması ve binalarda kullanılması da binalar için enerji tüketimini azaltacaktır.

Bu çalışmada, ısı enerjisinin depolama yöntemleri olan sıvılarda depolama, katılarda depolama, mevsimsel depolama, kimyasal depolama ve faz değişimli maddelerde depolama yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar belirtilmiştir.

2. ISI ENERJİSİ VE ISI ENERJİSİNİN DEPOLAMASI

Isı enerjisi bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin, kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır ve atomik veya moleküler titreşimler sonucu oluşur. Isı enerjisi, maddenin iç enerjisindeki değişimle duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısı ya da tüm bunların birleşimi olarak depolanır. Duyulur ısı depolama metodunda, depolama maddesinin sıcaklığındaki değişim sonucunda ortaya çıkan duyulur ısıdan yararlanır. Gizli ısı depolamasında, faz değişimi gösteren maddeler kullanılır. Depolamaya uygun sıcaklık aralığında depolama maddesinin faz değiştirmesiyle ortaya çıkan gizli ısı belirlenir. Bu amaçla belirli sıcaklıklarda ergime, buharlaşma veya

diğer faz değişimlerine uğrayan maddelerden yararlanılır. Termokimyasal depolama metodunda ise ısı enerjisi bir bileşimin bağ enerjisi olarak depolanabilir ve aynı enerji tersinir kimyasal tepkimelerle serbest bırakılabilir.

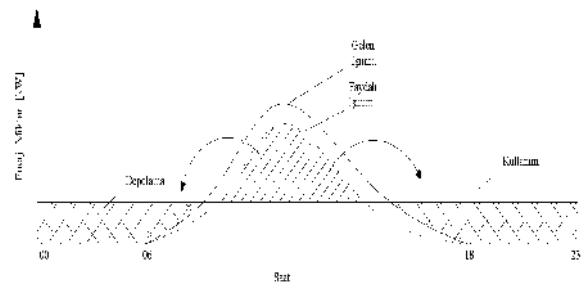
Isı enerjisi depolaması kullanım süresine göre ikiye ayrılır. Bunlar kısa süreli depolama (gece-gündüz) ve uzun süreli depolama mevsimlik (yaz-kış)'dır. Kullanım amacına ve sıcaklığına göre sıcak depolama, soğuk depolama veya her iki amaç için sıcak ve soğuk depolama yapılabilir. Uzun dönem depolama ile hedeflenen, yazın sıcaklığına depolayıp kışın kullanmak, veya kışın soğukunu depolayıp yazın kullanmaktır. Isı enerjisinin depolaması, enerjinin elde edilmesiyle kullanımı arasındaki yer ve zaman farkını kapatarak, hem ısıtma hem de soğutma için alternatif çözümler verir. Konut, sanayi, tarım ve ulaşım sektörlerinde uygulanan depolama, elektrik enerjisi ve kömür, doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtlardan tasarruf sağlayarak enerji verimliliğini artırmaktadır.

Isı depolama, enerji verimliliği ve enerjinin sürdürülebilirliği açısından çok önemlidir. Günümüzde bu konu ile ilgili çalışmalar hızla devam etmektedir ve uygulama açısından kullanılmakta olan başlıca depolama yöntemleri aşağıda belirtilmiştir.

- Katılarda depolama
- Sıvılarda depolama
- Mevsimsel depolama
- Kimyasal depolama
- Faz değişimli maddelerle depolama

Depolamanın yapılabilmesi için bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Bu ısı kaynağı bir santralin atık ısıya olabileceği gibi güneş enerjisi, jeotermal enerji vb. ısı kaynaklı sistemler olabilir. Güneş enerjisi zamana bağlı olarak değişim gösteren ve kesikli yapıya sahip bir enerji türüdür. Bu özelliği nedeni ile güneş enerjisine bağlı olarak çalışan sistemlerin yük faktörü kesiksiz yapıya sahip enerji türlerine göre daha düşüktür. Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisinin depolanması ile yük faktörü artmakta, bunun sonucunda da sistemlerin geri ödeme süreleri kısaltılmakta ve sistemler ekonomik hale gelmektedir.

Güneş enerjisinin depolanabilmesi için genel sistem yapısında güneş kolektörü, depolama ünitesi, iklimlendirme cihazları, ek enerji kaynakları ve kontrol sistemleri bulunmalıdır. Bu sistemler ile elde edilebilecek iş akışkan sıcaklığı ise güneş ışınımına bağlılık göstermektedir. Şekil 1'de günlük ortalama güneş ışınımının yüke bağlı değişimi gösterilmiştir. Gelen ışınım güneşten gelen enerjiyi, faydalı ışınım ise optik ve ısı kayıplar neticesinde faydalanılabilen enerji miktarını göstermektedir. Kullanım değişkenlik göstermekle birlikte Şekil 1'de gün boyunca sabit olarak gösterilmiştir. Kullanım doğrusunun üzerinde kalan faydalı ışınım bölgesinin depolanması ile güneş ışınımının olmadığı saat dilimlerinde de bu enerji kaynağından faydalanılabilir.



Şekil 1. Günlük ortalama güneş ışınımının yüke bağlı değişimi

Bu depolama işleminin gerçekleştirilmesinde birçok parametre etkin olmaktadır. Depolama işlemi için seçilecek ortam, yapılacak işlem türü ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, su ısıtma sisteminde duyulur ısı yolu ile depolama, hava ısıtma sisteminde ise çakıl taşı yatakları daha etkindir. Bir binanın pasif olarak ısıtılması işleminde ısı enerjisinin bina duvarlarında depolanması gerekir.

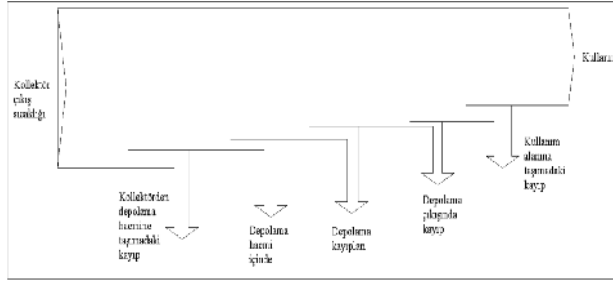
Bir depolama sisteminin seçiminde en önemli parametreler aşağıda belirtilmiştir.

- Birim hacimdeki depolama kapasitesi
- Çalışma sıcaklığı
- Depolama ünitesi içinde sıcaklık katmanlaşması
- Isının depolama ya da çekilmesi sırasındaki güç tüketimi
- Depolama hacminin dış malzemesinin seçimi
- Depolama hacminde ısı kayıplarının önlenmesi
- Maliyet

Buna göre, depolama ortamı seçiminde birim hacimde depolama kapasitesi yüksek olan malzemelerin seçimi ile aynı hacimde daha çok ısı depolanabilir. Depolama hacmine giren ve çıkan akışkan sıcaklığı, depolama hacmi malzemesinin yapısını bozmayacak sıcaklık aralığında olmalıdır. Isının depolama sistemine verilmesi sırasındaki güç tüketimi, minimum düzeyde olmalıdır. Depolama hacminin dış malzemesi, dış ortam şartlarına uygun olarak seçilmeli ve depolama hacmindeki malzemenin etkilenmemelidir. Depolama hacminden olabilecek ısı kayıpları sistemin performansını düşüreceği için uygun yalıtım malzemesi ile ısı kayıplarının azaltılması gerekmektedir. Sistem için yapılacak harcamalar, yatırımı en kısa sürede geri ödeyebilmelidir.

3. SIVILARDA ENERJİ DEPOLAMA

Isıl enerjinin en yaygın olarak depolandığı ortam sudur. Ülkemizde de sıcak iklim bölgelerinde kullanım sıcak suyu için güneş kolektörleri ve depolama tankları kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden elde edilen ısının depolanması sırasında, kolektör çıkış sıcaklığı ile kullanım öncesi sıcaklık arasında depolama hacminde ve taşınım sırasında ısı kaybına bağlı olarak sıcaklık düşümü gözlenir. Bu kayıplar Şekil 2'de belirtilmiştir.



Şekil 2. Bir depolama sisteminde ısı kaybı sonucunda meydana gelen sıcaklık düşümleri

Güneş enerjisi sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan iş akışkanı sudur. Sistemdeki su bir kontrol hacmi olarak göz önüne alınırsa suyun dolaşımı ile depolama hacmi de dolaşacağı için kollektörden depolama hacmine olan taşıma kayıpları ortadan kalkacaktır. Su dolaşımı, doğal ya da zorlanmış olarak sağlanabilir. Doğal dolaşımında yoğunluk farkı etken kuvvet iken zorlanmış taşınımında bir sirkülasyon pompası ile dolaşım sağlanır.

Herhangi bir sıvının, sabit sıcaklıkta ve sonlu bir sıcaklık farkında enerji depolama kapasitesi,

$$Q_d = (mC_p)_d \cdot \Delta T_d \quad (1)$$

olarak belirtilebilir. Q_d toplam ısı kapasitesini, m kütleyi, C_p sabit basınçta özgül ısıyı ve ΔT ise sıcaklık farkını belirtmektedir. Isı sığası, $m \cdot C_p$ olarak bilinir ve Eş. 1'de de belirtildiği gibi direkt olarak depolama hacmi malzemesi seçiminde en önemli etkindir.

Bir depolama hacmi için enerji denkliği ifadesi,

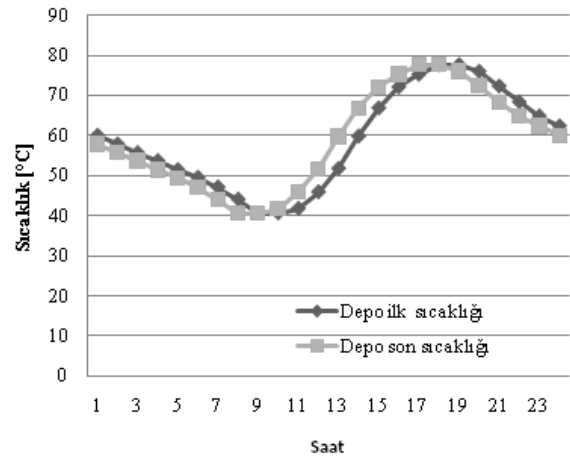
$$(mC_p)_d \frac{dT_d}{dt} = Q_g - Q_\zeta - (UA)_d(T_d - T_{\zeta ev}) \quad (2)$$

şeklinde belirtilebilir. Eş.2'nin sağ tarafındaki Q_g ve Q_ζ sırası ile kollektörden gelen enerjiyi ve yük nedeni ile depodan çekilen enerjiyi göstermektedir. Son

terim ise depodan çevreye olan ısı kaybını göstermektedir. Belirli bir zaman aralığı için Eş.2 integre edilirse,

$$T_d' = T_d + \frac{\Delta t}{(mC_p)_d} (Q_g - Q_\zeta - (UA)_d(T_d - T_{\zeta ev})) \quad (3)$$

olarak bulunur. Eş. 3'te T_d' deponun belli bir zaman sonundaki sıcaklığını, T_d ise deponun belirli zaman aralığındaki başlangıç sıcaklığını göstermektedir [1]. Tablo 1'de bir depo için günlük sıcaklık değişimleri belirtilmiştir. Deponun ilk sıcaklığı 60°C olup yükü karşılamak için ısı, 09:00'a kadar depodan çekilmektedir. 19:00'a kadar depoya ısı girişi olmaktadır ve gün sonunda depo sıcaklığı yine 60°C olarak bulunmuştur. Deponun en yüksek sıcaklığı 77.7°C olarak bulunmuştur. Şekil 3'te sıcaklık dağılımı grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Deponun günlük sıcaklık dağılımı

Şekil 3'te belirtildiği gibi ısı, 09:00'a kadar depodan çekilmektedir. Güneş enerjisinin tekrar devreye girmesi ile gün içinde depo sıcaklığı artmıştır ve gün

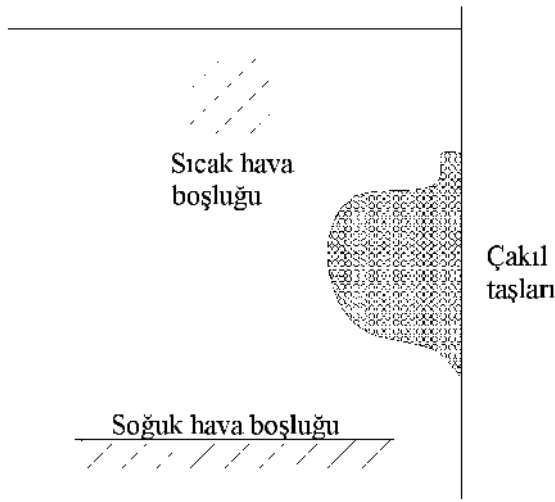
Tablo 1. Bir depo için günlük sıcaklık değişimi

Saat	Qg[MJ]	Qç [MJ]	Td1 [C]	Td2 [C]	Saat	Qg[MJ]	Qç [MJ]	Td1 [C]	Td2[C]
1	0	12	60.0	57.8	13	67	15	51.7	59.8
2	0	12	57.8	55.7	14	64	18	59.8	66.9
3	0	11	55.7	53.7	15	51	16	66.9	72.2
4	0	13	53.7	51.4	16	41	19	72.2	75.3
5	0	11	51.4	49.5	17	32	15	75.3	77.7
6	0	14	49.5	47.1	18	18.5	16	77.7	77.7
7	0	18	47.1	44.0	19	11	19	77.7	76.1
8	0	21	44.0	40.5	20	0	21	76.1	72.4
9	21	20	40.5	40.6	21	0	23	72.4	68.4
10	26	18	40.6	41.7	22	0	20	68.4	64.9
11	41	14	41.7	45.9	23	0	14	64.9	62.4
12	51	13	45.9	51.7	24	0	13	62.4	60.0

batımından sonra depo sıcaklığı tekrar azalmaya başlamıştır.

4. KATILARDA ENERJİ DEPOLAMA

Katı ortamlarda enerji depolama sistemlerinde genellikle çakıl taşları kullanılır ve hava bu sistemler için en ideal iş akışkanıdır. Enerji taşıyıcısı olan hava, depolama hacminin içinden geçerken enerjisini taşlara verir ya da alır. Katılarda enerji depolanmasında depolama ortamı; zehirli olma, alev alma ya da patlama riski taşımamalıdır. Katılarda enerji depolama diğer sistemlere göre daha ekonomiktir. Büyük ısı transferi yüzey alanı nedeni ile hava ile taşlar arasındaki ısı transferi yüksektir. Taşların birbirine temas eden yüzey alanlarının küçük olması, iletim ile ısı kaybını da azaltmaktadır. Şekil 4'te katılarda enerji depolama sisteminin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4. Katılarda enerji depolama ortamı

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi depolama hacmi içinde çakıl taşları bulunmaktadır. Hava bu taşlar arasından geçirilerek ısı transferi gerçekleştirilir. Sıvı depolama sistemlerinin tersine katı depolama sistemlerinde eş zamanlı ısı girişi ve çekişi yapılamaz. Bu tip sistemlerin en büyük avantajı ısı katmanlaşmanın büyük olmasıdır. Sabit sıcaklıkta hava girişi ile girişe yakın bölgelerdeki taşlar giriş sıcaklığına ulaşırken çıkıştaki sıcaklık, yatak ilk sıcaklığı dolaylarında kalır. Yataklarda kullanılan taş çapı 1-5 mm arasında değişmektedir.

Bu tür sistemlerin tasarımında en önemli faktörlerden birisi yatağın gözenekliliğidir. Gözenekliliğe bağlı hacim ifadesi Eş. 4'te verilmiştir.

$$V = \frac{Q}{\rho c(1-\varepsilon)\Delta T} \quad (4)$$

Çakıl taşı yataklarındaki ısı transferi özellikleri için bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Schumann modeline göre yatak ve akışkan için diferansiyel denklemler aşağıda verilmiştir [1].

$$(\rho C_p)_f \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\frac{(\dot{m} C_p)_f}{A} \frac{\partial T_f}{\partial x} + h_v(T_b - T_f) \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_b(1 - \varepsilon) \frac{\partial T_b}{\partial t} = h_v(T_f - T_b) \quad (6)$$

Eş. 5 ve 6'da belirtilen h_v , yatakla akışkan arasında hacimsel ısı transferi katsayısını göstermektedir. Bu iki denklemin eş zamanlı çözümü oldukça zordur ve Hughes boyutsuz zaman ifadesine bağlı olarak bu iki denklemin tek bir diferansiyel denklem olarak belirtmiştir.

$$\frac{dT}{d\theta} = -L \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{(UA)_b}{(\dot{m} C_p)_f} (T_a - T) \quad (7)$$

Eş. 7'de θ boyutsuz zamanı, T_a ise çevre sıcaklığını göstermektedir. Depo hacminden çevreye olan ısı kaybı da bu denkleminde hesaba katılmış olmaktadır. NTU modeli olarak ta bilinen Eş. 7, hesaplanacak NTU değerine bağlı olarak kullanılabilir. Bu sistemler için NTU formülü Eş. 8'de verilmiştir.

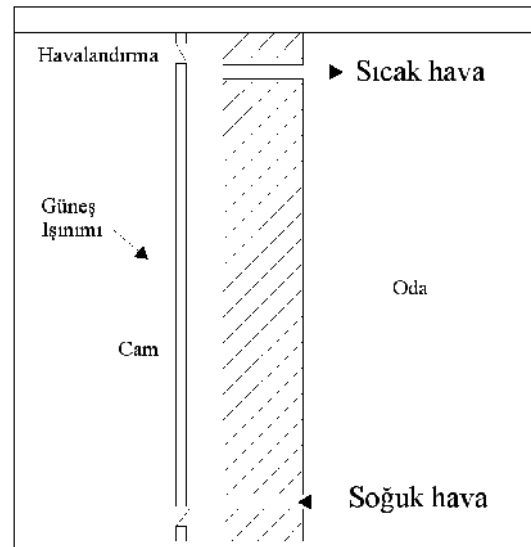
$$NTU = \frac{h_v AL}{(\dot{m} C_p)_f} \quad (8)$$

Hesaplanacak NTU değeri 10'dan büyükse NTU modeli kullanılabilir. Buna karşın NTU 10'dan küçükse Schumann modeli kullanılmalıdır [1].

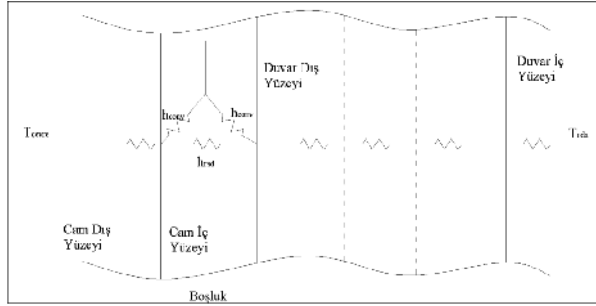
4.1. Duvarlarda Enerji Depolama

Binalarda enerji verimliliği kapsamında yapılması gereken uygulamaların başında mimari pasif ısıtma ve soğutma tasarımları gelmektedir. Binanın aydınlatma, ısıtma ve soğutma yükünün en düşük düzeyde olacak biçimde tasarlanması enerjinin verimli kullanılması adına yapılması gereken ilk adımdır. Enerji tüketimini minimum düzeyde tutacak tasarımlarla binaların enerji yoğunluğu azaltılmalıdır.

Pasif ısıtma sistemlerinde kullanılan en yaygın uygulamalarda birisi Trombe duvardır. Trombe duvar uygulamasının şematik gösterimi Şekil 5'te ve elektrik analojisi ile direnç ve kapasitör gösterimi ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 5'ten de görüleceği gibi soğuk oda havası alt açıklıktan cam ile duvar arasındaki boşluğa girer. Güneş ışınımı ise camdan geçerek boşluğa giren havayı sera etkisi ile ısıtır. Isıtılmış hava duvarın üst kısmından tekrar odaya döner. Aynı zamanda duvarda meydana gelen ısınma nedeni ile odaya ışınlım ve taşınım yolları ile ısı transferi gerçekleşir.



Şekil 5. Trombe duvar uygulamasının şematik gösterimi



Şekil 6. Trombe duvar uygulamasının elektrik analogisi ile gösterimi

Şekil 6'da her bir nokta için enerji dengesi ifadesi yazılırsa,

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{k}{\rho C} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}) \quad (9)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 9'un her bir nokta için eş zamanlı olarak çözülmesi ile oda sıcaklığına bağlı olarak duvarda depolanan enerji bulunur. Hava doğal ya da zorlanmış taşınım ile boşluktan geçerken ısı transferi özellikleri havanın hızına bağlıdır. Boşluktan geçen havanın hızı için Bernoulli denkleminin uygulanması ile

$$V_{ort} = \left[\frac{2gh}{\left(C_1 \left(\frac{A_g}{A_v} \right)^2 + C_2 \right) \frac{T_m - T_r}{T_m}} \right]^{1/2} \quad (10)$$

ortalama hava hızı bulunur. Burada $\left(C_1 \left(\frac{A_g}{A_v} \right)^2 + C_2 \right)$ terimi boşluktaki basınç düşümünü ifade eder. C_1 ve C_2 sabitler olup Utzinger tarafından değerleri sırasıyla 8 ve 2 olarak belirtilmiştir. Duvar yüksekliği h ve boşluktaki ortalama hava sıcaklığı T_m ile gösterilmiştir [1].

Camın altında ve üstünde bulunan havalandırma deliklerinin açık olması durumunda;

türbülanslı akış için,

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8}$$

laminer akış için,

$$Nu = 4.9 + \frac{0.0606 \left(\frac{Re Pr D_h}{L} \right)^{1.2}}{1 + 0.0909 \left(\frac{Re Pr D_h}{L} \right)^{0.7} Pr^{0.17}} \quad (12)$$

eşitlikleri ile Nusselt sayıları bulunabilir.

PV (fotovoltaik) sistemlerle ısı depolamalı bir Trombe duvarın kombinasyonu sonucunda Jie ve arkadaşları [2], %10.4 lük bir elektrik verimi ve oda sıcaklığında 7.7°C'lik bir artış elde etmişlerdir. Matematiksel model ve deneysel çalışma sonuçları Tibet bölgesinde bu tip bir uygulamanın iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

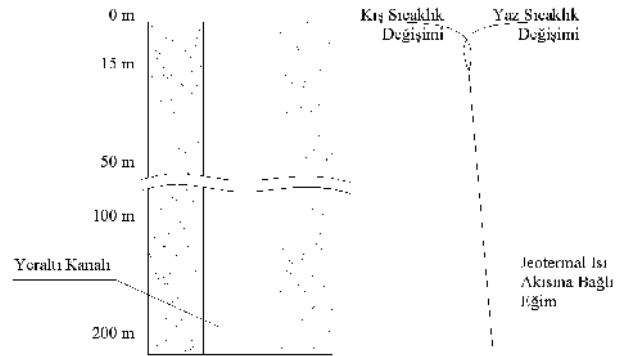
Athienitis ve arkadaşları [3] çalışmalarında, gizli ısı depolamalı bir duvarın, pasif güneş enerjisi destekli bir test odasına uygulanmasının ısı testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel kısımda alçı levhaya faz değişimli bir ısı depolama maddesi emdirilmiş ve test odasının duvarına yerleştirilmiştir. Sonuçlara göre güneşlenme zamanında oda sıcaklığında 4°C'lik azalma meydana gelmiştir. Gece ise faz değişimli madde çektiği

ısıyı tekrar vererek oda sıcaklığını konfor şartlarında tutmuştur.

5. MEVSİMSEL DEPOLAMA

5.1. Yeraltında Termal Enerji Depolaması

Isı enerjisi yer altında jeolojik yapılarda depolanabilir. Yer altında 10-20 m derinlikten sonra sıcaklık, mevsimler boyunca iklimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyip, zamanla değişmeyen kararlı bir hal almaktadır [4]. Şekil 7'de yeraltının derinlikle değişen sıcaklık profili verilmiştir. Yeraltında 10-20 m'den aşağı kısım "Nötr-Kararlı Bölge" olarak tanımlanır. Daha derinlerde jeotermal ısı akısına göre sıcaklık her 100 m de ortalama 3°C artar. Jeotermal ısı akısı bölgesel olarak farklı özellikler içerir. Depolama ortamı toprak veya kaya olduğunda; toprak veya kaya içinde düşey yeraltı kanalında ısı enerji depolaması yapılır. Yeraltına sondajla açılan düşey yer altı kanalına, yerleştirilen uygun boru sisteminde ısı taşıyıcı akışkan dolaştırılarak depolama yapılır. Yeraltı depolama teknikleri uygulanabilirliğinde yeraltı jeolojik yapısı önemlidir. Düşey kanallarda depolama, doğrudan veya ısı pompasına entegre edilerek kullanımı sağlanabilir.

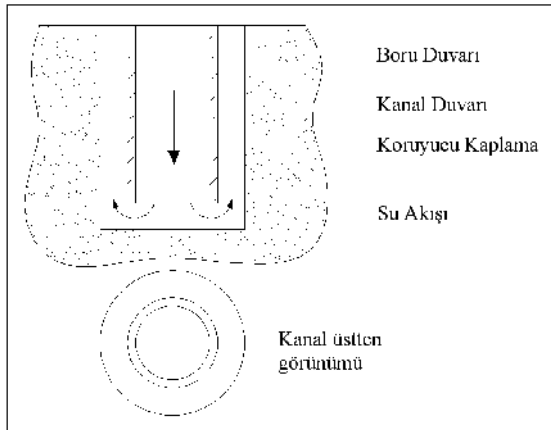


Şekil 7. Yeraltının derinlikle sıcaklık değişimi profili [4]

Düşey kanallarda depolamada ısı transferi akışkanı ile depolama ortamı (toprak, su) arasında ısı değiştiricisi kabulleri geçerlidir. Bu sistemin matematiksel modeli, düşey borudan gözenekli ortama doğal konveksiyonla ısı transferi olarak belirlenebilir [5]. Isı transferi ısı taşıyıcı akışkandan depolama ortamına (toprak, su) veya depolama ortamından akışkana gerçekleştirilir. Düşey yeraltı kanalında ısı depolama ısıtma, soğutma veya her iki amaçlı uygulanabilir. Hem ısıtma hem soğutma amaçlı kullanılan sistemlerde ısıtma ve soğutma yüklerinin eşit olması istenir. Aksi takdirde birkaç yıl sonra yer altı sıcaklığı artacak veya azalacaktır. Bu durumu dengelemek için dışarıdan yeterli miktarda tekrar ısı enerjisi depolaması yapılması gerekecektir [4-5]. Isıtma veya soğutma amacına göre yeraltındaki jeolojik yapı ısıtılıp/soğutulmuş, düşey yeraltı kanalının etrafını çevreleyen jeolojik yapıda sıcak veya soğuk depo hacmi oluşturulur. Yeraltı jeolojik yapısında, ısıtma soğutma yüküne göre farklı sayıda düşey kanallar açılır. Kanalların çapları genelde 0,09m-0,20 m derinlikleri ise

50-200 m arasında değişir. Kanal çapı yapılan sondaj tipi ve ekipmanı ile ilgilidir. Kanallar arasındaki uzaklık genellikle sabit ve yaklaşık 4 m'dir [4].

Yeraltı kanallarında ısı depolama açık veya kapalı döngülü sistem olarak uygulanabilir. Açık döngülü sistemlerde, ısı taşıyıcı akışkan kanalla doğrudan temas halindedir. Akışkan ve kayacın doğrudan temasından dolayı su kimyası önemlidir. Isı değiştiricilerinde, çökelmelerden kaynaklı kabuklaşma veya korozyon problemleri olabilir. Açık sistemin avantajı ise, yeraltı jeolojik yapısı ve ısı taşıyıcı akışkan arasında iyi bir ısı transferi gerçekleşmesidir. Açık döngülü sistemde yeraltı suyu seviyesi yer yüzeyine yakın mesafede olmalıdır. Kanalın aktif kısmı ise yeraltı su seviyesinin altındadır. Kanalın içine eş merkezli olacak şekilde, silindirik bir boru kanal tabanına yakın bir mesafede yerleştirilir (Şekil 8). Uygulamada kanal içindeki borudan tabana doğru gönderilen ısı taşıyıcı akışkan kayacınla temas ederek basınçla borunun etrafından yukarı doğru hareket eder. Birden fazla kanal olması durumunda, akışkanın kanaldan çıktığı noktada diğer kanalla hidrolik bağlantısı vardır. U şeklinde bir kanal açılabilirse boru sistemine hiç gerek olmadan depolama yapılabilir. Bu durumda akışkan/su kanalın bir ucundan pompalanır tabanına gönderilir ve diğer ucundan alınır. Fakat bu tipte kanal açmak çok zordur. Kanal açılırken kayaç yapısında kırılmalar olabilir. Şekil 8'de açık döngülü depolama sistemini kanalının üstten görünümü verilmiştir.

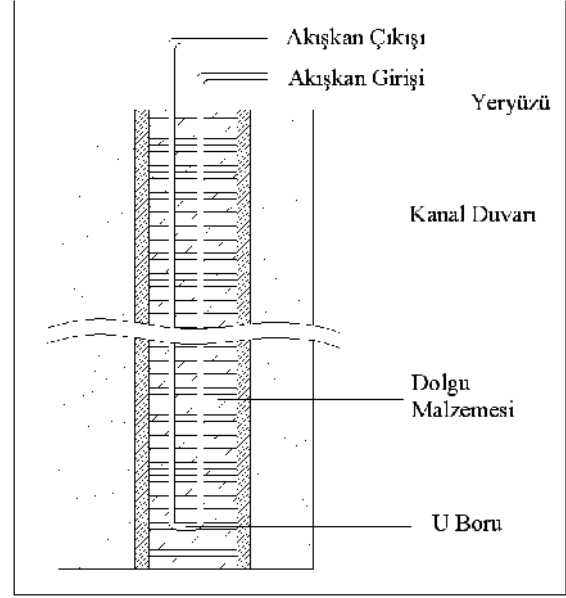


Şekil 8. Açık döngülü düşey yeraltı kanalında depolama uygulaması ve silindirik kanalın üstten görünümü

Kapalı döngü sistemlerin, uygulamaları açık sistemlere göre daha yaygındır. Genellikle kanala bir veya birden fazla U boru yerleştirilir (Şekil 9).

Uygulama amacına yönelik sıcaklık aralığındaki ısı taşıyıcı akışkan, boru sisteminde pompa vasıtasıyla kapalı döngüde dolaştırılır. Böylece akışkan yeraltını ısıtırken (soğuturken) kendisi soğuyarak (ısınarak) kanaldan dışarı çıkar. Tekrar ısıtılmak (soğutulmak) üzere bir ısı değiştiricisinden geçirilir. Isınan ya da soğuyan akışkan tekrar yeraltına yollar. Bu çevrime kullanılan enerji kaynağının sıcaklığı uygun olduğu sürece devam edilir. Isı taşıyıcı akışkan seçimi, çalışma sıcaklık aralığına bağlı olarak yapılır. Genellikle su, veya farklı yüzdelerde alkol-su karışımları kullanılabilir.

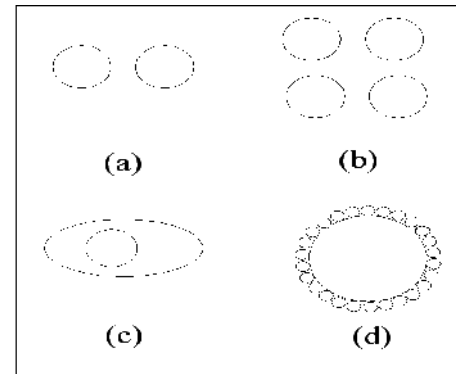
Akışkan kanalın duvarlarıyla doğrudan temas halinde değildir. Böylece kimyasal problemler olmaz; fakat açık sisteme göre daha az ısı transferi gerçekleşir. Yer altı jeolojik yapısına göre kanal duvarı ve U boru arasın-



Şekil 9. Kapalı döngü düşey yeraltı kanalında depolama sistemi

daki boşluğa dolgu malzemesi yerleştirilebilir. U boru içerisindeki türbülansla ısı sırasıyla, akışkandan boruya, dolgu malzemesine ve kanal duvarına aktarılır.

Düşey yer altı kanallarında farklı geometrilerde borular kullanılabilir. Kullanılan borular genellikle yüksek yoğunluklu ve basınca dayanıklılığı iyi olan polietilen borulardır. En yaygın uygulaması tek U boru tipidir. Çift U boru veya koaksiyel borular da kullanılabilir. Şekil 10'da farklı geometrilerdeki boru kesitleri verilmiştir [4].



Şekil 10. Farklı geometrilerdeki boru kesitleri (a) Tek U Boru (b) Çift U Boru (c) Basit Koaksiyel (d) Kompleks Koaksiyel [4]

Depolama sisteminde dolgu malzemesi kullanımı depolama ortamının özelliklerine bağlıdır. Depolama için seçilen bölgede kanal sisteminin ısıl performansının artırılması ve depolama ortamına destek olması amacı ile dolgu malzemesi kullanılabilir. Bununla birlikte, dolgu malzemesi kullanımıyla yer altı suyundan kaynaklanabilecek fiziksel ve ekolojik kirlilik engellenir. Dolgu malzemesinin cinsi, ısıl özellikleri,

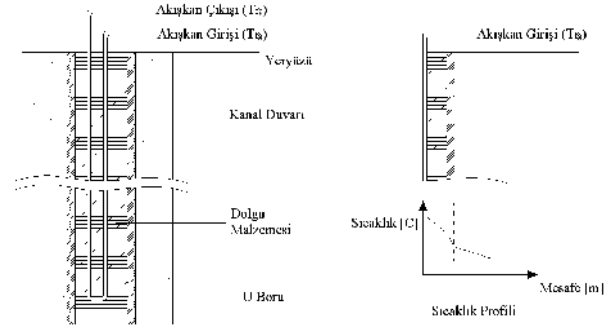
partikül büyüklükleri, jeolojik yapı ve kullanılan malzemelerle kimyasal reaksiyon vermemesi, düşük geçirirliliğe sahip olması, kolay karıştırılabilirliği ve pompalanabilir viskozitede olması depolama sisteminde kullanımında ve kanal boyutunun belirlenebilmesinde önemlidir [4]. Kanal dolgu malzemesi olarak kullanılan materyallere örnek olarak bentonit, kum, inceltirilmiş kum, su ile farklı yüzdelerde hazırlanmış bentonit karışımları, bentonitle kireç taşı, baryumsülfat ve kil sayılabilir. Bentonitin yüksek derecede koloidal (10^{-9} ila 10^{-6} m çapları arasında değişen) özellikler göstermesi, suya karşı ilgili olup şişme yapması, fakat büzülmemesi, çok küçük taneciklerinin orijinal hacminin 10 – 20 katına çıkabilmesi dolgu malzemesi olarak seçilmesindeki başlıca nedenlerdir [6-7].

Depolama sistemi tasarımında performans ve maliyet kriterlerinin optimum olduğu sistem tasarımı seçilmelidir. Burada ilk yapılması gereken bina ısıtma/soğutma yükünün belirlenmesidir. Kanal ısıl iletkenliği, ısıl direnci ve kanallar arası mesafenin belirlenmesi kanal sayısı ve kanal derinliğine bağlıdır. Isı transferi akışkanın taşıyacak olan boru özellikleri de kanal performansını etkiler. Bu nedenle aşağıda belirtilen tasarım parametreleri dikkate alınarak yer altı depolama sisteminin optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir.

- Isıl enerji depolama için kullanılacak enerji kaynağının soğutma/ısıtma potansiyeli
- Depolama alanı yer altı jeolojisi
- Depolama alanı yer altı hidrojeolojisi (Yer altı suyu seviyesi akış koşulları vb.)
- Uygulama yapılacak yer ve binanın büyüklüğü
- Toplam yıllık enerji ihtiyacı
- Isıtma ve soğutma yükleri
- Maksimum ısıtma ve soğutma yükleri
- Maksimum ve minimum soğutma-ısıtma sıcaklıkları
- Antifriz gerekliliği
- Dolgu malzemesi seçimi ve ısıl özellikleri
- Kullanılan tüm malzemelerin ısıl özellikleri
- Kanal geometrisi
- Boruların yerleşimi
- Yer altı ısıl iletkenliği, k ve kanalın ısıl direnci R [6-7-8].

Kanal iletkenliği ve ısıl direncinin belirlenmesi optimum kanal sayısı tasarımı için önemlidir. Bu nedenle depolama ortamının ısıl duyarlılığının belirlenmesi gereklidir. Depolama ortamının ısıl iletkenliği, k [W/mK] ve kanal sisteminin ısıl direnci R [K/(W/m)] birimleri ile ifade edilir. Depolama ortamının özellikleri Isıl Duyarlılık Testi ile belirlenir [9-10]. Şekil 11’de depolama sistemi ve yer altı kanalının ısıl direnci oluşumu gösterilmiştir. Boru merkezinden dışarı doğru sıcaklık profilinin değişimi

Şekil 11’de gösterilmiştir. Şekil 11’deki sıcaklık profili sıcak depolama için geçerlidir.



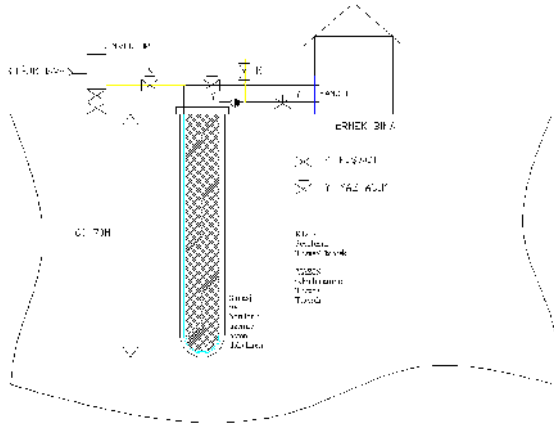
Şekil 11. Depolama sistemi ve yer altı kanalının ısıl direnci oluşumu ($R_b(K/(W/m))$).

Depolama sistemlerinde enerji kaybı olmaması gerekir. Bununla birlikte komşu kanallarla ısıl etkileşim olması sistemin verimini artırır [9-10]. Kullanılan tüm ısı transfer modellerinde, bazı ortak kabuller yapılır. IDT hesaplamalarında yeraltındaki ısı transferinin genel olarak sadece iletim ile olduğu kabul edilir. Isı transferinde kanal etrafında radyal simetri olduğu varsayılır. Kanal eksenine boyunca, yani düşey yönde olan ısı transferi ihmal edilir. Isı transfer hızı ise sabit kabul edilir [11].

Şekil 12’de kapalı döngü sistemli düşey yer altı depolama sisteminin bir binaya uygulanmasında akış şemasını gösterilmiştir. Şekil 12’den de görüleceği üzere ısı depolama işlemi bir sondaj kuyusu içinde gerçekleştirilmektedir. Öngörülen değer olarak 60-70 metrelik bir derinlikte bir sondaj işlemi ile depolamaya uygun hacim yaratılması söz konusudur. Sondaj işlemi sonrasında polietilen bir U boru, sondaj kuyusuna yerleştirilecek ve etrafı termal iletkenliği artırılmış beton ile kapatılacaktır.

Kış aylarında soğuk hava bir konvektörden geçirilerek U boru içinde sirküle edilen akışkanın sıcaklığı düşürülecektir. Şekil 12’de K harfi ile işaretlenmiş olan vanalar kışın açık, Y harfi ile işaretlenmiş olan vanalar ise yazın açık konumda olacaktır. Kış ayları içinde (depolama ayları) aracı akışkan konvektör ve U boru arasında sirküle edilecektir. Sıcaklığı düşürülmüş olan akışkan, sondaj kuyusuna gönderilerek ısısını bırakması sağlanacaktır. Yaz aylarında ise Y vanaları açık konumda olacağı için aracı akışkan topraktan soğuğu çekerek, bina içinde bulunan fancoile iletilecektir.

Mevsimsel depolamanın önemi, her geçen gün artmakla birlikte, uygulanabilirliğinin araştırılması gerekmektedir. Özellikle ısı enerjisinin, depolanması ve binalarda kullanılması, sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Soğutma için elektrik enerjisinin yaygın olarak kullanıldığı günümüzde, alternatif bir soğutma yöntemi oluşturabilecektir. Yaz aylarında artan elektrik tüketiminin nedeni soğutma sistemleridir. Soğutma sistemlerinin binalarda bu şekilde sürdürülebilir hale getirilmesi ile yeni bir bakış açısı kazandırılması gerekmektedir.



Şekil 12. Düşey yeraltı kanalında ısı depolama ile bir örnek binanın kısmı depolanan enerji ile yazın soğutulmasına ait akım ve bağlantı şeması

6. FAZ DEĞİŞİMLİ ENERJİ DEPOLAMA

Uygun sıcaklık aralığında faz değiştiren maddeler enerji depolama için uygundur. Bununla birlikte faz değiştiren maddelerin yüksek gizli ısı depolama yeteneği olması gerekmektedir ve ısı depolandıktan sonra tersinir bir işleme bozunmaya uğramadan geri alınabilmelidir. Faz değişimli bir enerji depolama sisteminin maliyeti de çok önem taşımaktadır. Yüksek maliyetli ve zor bulunan bir madde bu sistemin uygulanabilirliğini ortadan kaldıracaktır. Bu özellikleri karşılayan uygun faz değişimli depolama malzemeleri ile daha düşük sıcaklık aralıklarında çalışılabilir, daha düşük hacimde depolama yapılabilir ve yüksek ısı kapasitesi nedeni ile daha çok ısının depolanmasına imkan verir. Genel olarak özetlemek gerekirse,

- yanıcı olmayan, zehirli olmayan korozif olmayan ve karalı bir kimyasal yapısı olan
- gizli ısı depolama özelliği yüksek olan, yüksek ısı iletkenliğe sahip olan, faz değişimi sırasında hacimsel genişlemesi düşük olan
- maliyeti düşük olan

maddeler faz değişimli enerji depolama yöntemi için uygundur. Bu özelliklere sahip bir çok organik ve inorganik madde vardır.

İnorganik maddeler,

- Yüksek gizli ısı depolama özelliğine sahip
- Yüksek ısı iletkenliğe sahip
- Yanıcı olmayan
- Ucuz

maddelerdir. Buna karşın inorganik maddelerin dezavantajları,

- Birçok metale karşı korozif
- Faz bozunması ve hidratların kaybı

olarak belirtilebilir. İnorganik faz değişimli enerji depolama maddelerine örnek olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (kalsiyumklorit heksahidrat), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (sodyumsülfat dekahidrat), $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (sodyumkarbonat dekahidrat) verilebilir.

Organik maddeler,

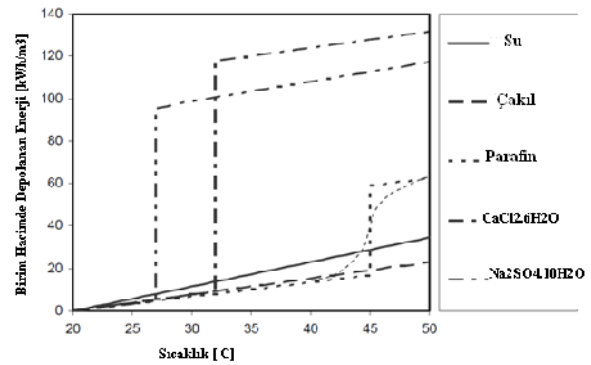
- Yüksek gizli ısı depolama kapasitesine
- Kimyasal olarak kararlı bir yapıya
- Korozif ve zehirli olmayan

bir yapıya sahiptir. Buna karşın organik maddelerin dezavantajları,

- Düşük ısı iletkenlik
- Faz değişimi sırasında büyük hacim değişikliği
- Yanıcılık

olarak belirtilebilir. Organik faz değişimli enerji depolama maddelerine örnek olarak parafin mumu, polietilen glikol, yüksek yoğunluklu polietilen, stearik asit ($\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$) ve palmitik asit ($\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$) verilebilir [12].

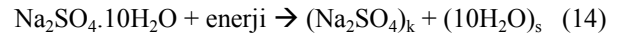
Faz değiştiren maddelerin birim hacimdeki enerji depolama özellikleri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Faz değiştiren maddelerin birim hacimdeki enerji depolama özellikleri [12]

Şekil 13'ten de görüleceği gibi düşük sıcaklıklarda inorganik maddelerin birim hacimde enerji depolama özellikleri diğer maddelere göre daha yüksektir. Bu özellikleri nedeni ile bina uygulamalarında yalıtım malzemesi olarak kullanılması uygundur.

Glauber tuzu olarak bilinen $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ yaklaşık olarak 32°C 'de bozunmaya başlar [12].



Faz değiştiren bir madde ile enerji depolanmasında T_1 sıcaklığından T_2 sıcaklığına ısıtılan madde T^* sıcaklığında faz değiştiriyorsa ($T_1 < T^* < T_2$) depolanan enerji miktarı,

$$Q_d = m[C_k(T^* - T_1) + \varphi + C_s(T_2 - T^*)] \quad (15)$$

olarak belirtilebilir [12]. Bu eşitlikte m maddenin kütlelerini, C_k katı fazın ısı kapasitesini, C_s sıvı fazın ısı kapasitesini ve φ ise faz değişimi sırasında depolanan gizli ısıyı ifade etmektedir. Isı kaynağının yapısına ve depolama maddesinin termofiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak güneş enerjisi uygulamalarında faz değiştiren maddelerle depolama kullanım alanları bulmaya başlamıştır. Nano ya da makro ölçekli bu uygulama alanlarının artması ve depolama maddelerindeki fiziksel ve kimyasal özelliklerin iyileştirilmesi ile faz değişimli depolama elemanlarının uygulama alanları da artacaktır.

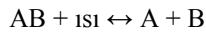
Zhang ve arkadaşları [13], çalışmalarında faz değiştiren maddelerle gizli ısı depolama yöntemlerinin binalarda uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Faz değişimli maddelerin binanın değişik kısımlarında kullanılması ile elde edilebilecek ısı analizleri yapmışlardır. Faz değişimli maddelerin kullanılmasında bir diğer önemli parametrede yangın anında tutuşabilirlik olduğunu ve bu konunun da ısı performans yanında geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Güneş enerjisi destekli bir ısıtma sisteminde ısı depolama işleminin su ve Glauber tuzu ile yapılması durumunu inceleyelim. Isı Glauber tuzunda depolanırsa, tuz 32°C'de faz değiştirecektir. Glauber tuzu için katı, sıvı özgül ısıları ve gizli ısı değerleri sırasıyla, 1,95 kJ/kgK, 3,55 kJ/kgK ve 250 kJ/kgK olarak alınır [12]. Isı depolama işlemi 25 °C ve 50 °C arasında yapılacaksa depolanan enerji miktarı 328 kJ/kg olarak bulunur. 1000 kg tuz için depolanan toplam enerji miktarı ise, 328,000 kJ'dür. Aynı miktar su ile 25 °C ve 50 °C arasında yapılacak duyu ısı depolama işleminde ise 104,500 kJ ısı depolanabilir. Depo hacmi ise, Glauber tuzu için 0.685 m³ ($\rho = 1460 \text{ kg/m}^3$) ve su için 1 m³ ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) olacaktır. (Özgül ısıların ve yoğunluğun sıcaklıkla değişimi ihmal edilmiştir.)

Sonuç olarak yaklaşık %30 daha küçük depo hacmi kullanılarak yaklaşık 3 kat daha fazla enerji depolanabilmektedir. Başka bir deyişle aynı miktar ısıyı depolamak için 3 m³'lük bir hacim gereklidir. Bu ise yerleşim sorunu olan ya da m² fiyatının çok değerli olduğu alışveriş merkezleri gibi binalarda büyük miktarda yer tasarrufu sağlayacaktır.

7. KİMYASAL ENERJİ DEPOLAMA

Termokimyasal bir reaksiyon ile enerji depolanması isteniyorsa bu reaksiyon ürünleri kolayca ayrılabilir ve başka zincir reaksiyonlara girmemelidir. Genel bir ifade ile reaksiyon,



şeklinde olmalıdır. Buna karşın düşük sıcaklık uygulamalarında bu tip enerji depolama örnekleri çok azdır. Kato ve arkadaşları [14], güneş enerjisi ve içten yanmalı motorların atık ısısından faydalanmak üzere orta sıcaklık uygulamalarında (200-300°C) metal hidrit karışımlarının ısı depolama performans testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan karışımın, Mg_{0.5}Ni_{0.5}(OH)₂, ısı depolama kapasitesini 165 kJ/kg olarak belirtmişlerdir.

Weber ve Dorer [15], çalışmalarında, NaOH'in sulu çözeltilerinin mevsimsel ısı depolama yeteneğini incelemişlerdir. Isı kaybının diğerlerine göre çok az olduğu bu sistemlerde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar sonucunda, Zürih iklim şartlarında 120 m²'lik bir evin iklimlendirmesini gerçekleştirmişlerdir.

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, ısı enerjisi depolama yöntemleri ele alınmıştır. Isı enerjisi sıvılarda ortamlarda, katı ortamlarda, mevsimsel, kimyasal ve faz değişimli

ortamlarda depolanabilmektedir. Binalarda enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturan ısı enerjisinin, depolama yöntemleri ile azaltılması zorunlu hale gelmiştir. Isı enerjisinin sıvılarda depolanması ile düşük sıcaklıklı radyant ısıtma sistemlerinin kombinasyonu, enerji ekonomisi bakımından olumlu sonuçlar verecektir. İş akışkanı olarak havanın kullanılması durumunda katılarda enerji depolama yöntemi kullanılmalıdır. Katılarda enerji depolama sistemlerinde depo sıcaklığı yaklaşık 5 saat sabit kalmaktadır. Kesikli çalışan bu sistemler bina uygulamalarının dışında daha özel kullanım alanları için uygundur. Isı enerji mevsimsel olarak depolandığında toprak özellikleri ya da yer altı su rejimi önem kazanmaktadır. Detaylı bir ön etüt yapılarak mevsimsel depolamanın yapılacağı bölgede toprak özellikleri (ısı iletkenlik) belirlenmelidir. Yeraltı deposunun bina ısı pompası sistemine kombine edilmesi ile daha verimli kullanılabilir. Faz değişimli maddelerde ısı enerji depolanmasında organik ve inorganik maddeler kullanılır. Kullanım amacı göre seçilecek olan depolama maddesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Kristalizasyon, aşırı soğuma v.b. istenmeyen etkilerin sistem tasarımında ve işletmesinde etkisi büyüktür ve ömür analizi yapılarak karar verilmelidir. Ayrıca yangın anında bu maddelerin alevlenme özelliği de araştırılarak binalara uygulanmalıdır.

Yukarıda belirtilen yöntemler ile binalarda ısı enerjisinin depolanmasıyla binalarda enerji tüketimi azalacaktır. Özellikle hastane, alışveriş merkezi gibi büyük binalarda ısı enerjisinin depolanması ile enerji verimliliği sağlanmış olacaktır. Ortak kullanım sahası olan bu tip büyük binalarda enerjinin verimli kullanılması büyük miktarda ekonomik ve çevresel faydalar oluşturacaktır.

9. KAYNAKLAR

1. Duffie J., Beckman W., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley Interscience Publication 1991.
2. Jie J., Hua Y., Gang P., Jianping L., Study of PV Trombe Wall Installed in a Fenestrated Room with Heat Storage, Applied Thermal Engineering, 27, 1507-1515, 2007.
3. Athienitis A.K., Liu C., Hawes D., Banu D., Feldman D., Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test Room with Wall Latent Heat Storage, Building and Environment, 32, 405-410, 1997.
4. Dikici D., Doğal Soğuk Kaynaklardan Yararlanan Yer Altı Kanallarında Termal Enerji Depolanması, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2004.
5. El Sharqawy M.H., Modelling of Heat Transfer in a Vertical Ground Heat Exchanger, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Doktora Tezi, 2008.
6. Cruickshanks F.B., Anderson O., Bardsley J., Borehole sealing in a coaxial heat exchanger by bentonite treatment, Report Prepared for Environment Canada, Climate Change Division (Atlantic Region), Halifax, 2007.
7. Andersson O., Coaxial BHE Experiment in Halifax Canada (Borehole Sealing by Bentonite Treatment), Report Prepared for Environment Canada, Climate

- Change Division (Atlantic Region), Halifax, October 2004.
8. Dikici D., Paksoy H., Kandirmaz S. and Konuklu S., Availability of Cold for Injection with Borehole Thermal Energy Storage in Turkey, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, Poland, September 1-4, Vol.1 367-373,2003.
 9. Gehlin S.E.A., Hellstrom G., Influence on Thermal Responce Test by Ground Water Flow in Veritcal Fractures in Hard Rock, Renewable Energy (28), 2221-2238, 2003.
 10. Hellström, G, and Kjellsson, E. (2000). Laboratory measurements of heat transfer properties of different types of borehole heat exchangers. Proc. of Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000.
 11. Sanner B, Reuss M, Mands E. Thermal response test—experiences in Germany. Proceedings Terrastock 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28–1 September 2000. Vol. I, pp. 177–182.
 12. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13,318-345,(2009).
 13. Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Di H., Application of Latent Thermal Energy Storage in Buildings State of the art and Outlook, Building and Environment, 42, 2197-2209, 2007.
 14. Kato Y., Takanashi R., Sekiguchi T., Ryu J., Study on Medium Temperature Chemical Heat Storage Using Mixed Hyroxides, International Journal of Refrigeration, 32,661-666,2009.
 15. Weber R., Dorer V., Long-term Heat Storage with NaOH, Vacuum, 82, 708-716, 2008.