

Akümülatör tankları içinde ısıl tabakalaşma

Mustafa W. K. JABER* , Utku ŞENTÜRK, Ali GÜNGÖR

Kirkuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, IRAK

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova / İZMİR

Özet

Yeterince ısı depolamak ve bu ısıyı yüksek kalitede kullanmak amacıyla yapılan ısıl tabakalaşma uygulamaları, özellikle güneş enerjili sistemlerde olmak üzere, sıcak su depolama tankını içeren her türlü enerji depolama alanında gereklidir. Güneşten gelen ışınımın özellikleri, zamana bağlı değişim göstermektedir. Dolayısıyla ısıl enerji depolama, ısıtma yükünün uzun süreli çalışmalarda kullanılmasına olanak sağlar. Aynı özelliğin, ısı depolama akümülatörlerinde de olması gerekir. Yeni uygulamalarda, özellikle ısı pompalı su ısıtma sistemi akümülatörleri ve sıcak su boylerlerinde bu tür tasarımlara gereksinim duyulur.

Isıl tabakalaşma, sıcak ve soğuk su arasındaki sıcaklık (dolayısıyla yoğunluk) farklarından doğan kuvvetlerin etkisiyle oluşarak, depo içerisindeki suyun karışma etkisinin en aza indirgenmesini sağlar. Bu tip bir enerji depolama sisteminin verimi, ısıl tabakalaşma konusuyla yakından ilişkilidir.

Isıl tabakalaşma konusunun ele alındığı, çok çeşitli tank tasarımlarının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Halen pratik uygulamalarda kullanılan birbirinden farklı tasarımlar söz konusudur. Bu çalışmada, çeşitli ısıl tabakalı sıcak su tanklarının (ısı akümülatörlerinin) tasarım ve yapısal özellikleri, ısı akümülatörlerinde sıcaklık tabakalaşmasının incelenmesi ve daha önce gerçekleştirilmiş bazı teorik ve deneysel çalışmalar derlenmiş ve irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Isıl tabakalaşma, Güneş enerjisi, Sıcak su deposu, Enerji depolama, Isı akümülatörleri.*

Thermal stratification in the accumulator tanks

Extended abstract

The applications of thermal stratification are used especially in solar energy systems to store heat in high quality, the accumulator using as a storage tank for hot water which is required in all kinds of energy storage. The amount of emitted thermal energy from the sun changes with time so heat storage must be applied which enables us to benefit from it for a long period. The accumulators, heat pumps and the water heating system must have the same specifications. If the supply and the exhaust of energy cannot be kept in balance, energy storage will become important for sustainable utilization. This mismatch phenomena generally occurs in the systems with unstable resource or requirement, such as solar energy system, hydraulic power generation, food preservation and so on .

The design of heat accumulators needs heat stratifications. Another reason for wide utilization of water tank is based on the critical effect on balance of energy supply and demand, especially in solar energy systems such as solar domestic hot water (SDHW), thermal energy storage, district solar heating systems, and other unsteady energy used occasionally. Therefore, accumulator plays two main important roles as energy reservoir and redistribution.

As far as solar energy system is concerned, from the lower temperature section of the water storage tank (accumulator), the cold water circulating through the collectors is heated by solar radiation, where it becomes the hot water and returns to the storage tank. If the hot water is allowed to mix with the cold water in the tank, the supplied temperature to the load is lowered and the useful quality of energy is degraded.

The temperature difference between hot and cold water produce density changes which leads to appearance of lift force. Here thermal stratification must be used to reduce the degree of mixing in side , this type of energy storage system with thermal stratification is closely related to the efficiency of system. Different designs are available and currently used for tanks that apply thermal stratifications. There are different designs currently used in practical applications.

To obtain optimum system performance it is necessary to promote thermal stratification in the storage tank (accumulator) and to minimize pumping power for the collector loop. The most effective way of promoting stratification is to avoid designs based on water jets entering the tank. A range of stratification promoters or diffuser manifolds mounted inside the storage tank

Thermal stratification requires a controlled charging and discharging procedure, and appropriate methods or devices to avoid mixing; design of storage system is complex.

Thermal stratification in the tank has a great impact on the thermal performance of SDHW systems. A high degree of thermal stratification increases the thermal performance of solar hot-water systems because the return temperature to the solar collector is lowered. A lower return temperature to the solar collector will increase the efficiency of the solar collector.

Many experimental and numerical investigations have been presented for analyzing the performance of vertical thermal storage tanks whilst horizontal cylindrical tanks have received limited attention. The geometry is more susceptible to degradation of thermal stratification due to its small vertical dimension relative to its horizontal performance analysis.

The thermal stratification is well preserved as the cold inflow mixes with the bottom layers. The temperature of the top portion of the tank is gradually reduced due to heat conduction down the wall, mixing induced by hot water extraction and heat loss to the ambient, although the latter is minimised by externally insulating the tank. A negligible increase in temperature of the bottom cold layers is due to the thermal diffusion (at a small scale), and the conduction in the walls see Fig(1).

In this study the structure and design of thermally stratified water tank (accumulator) are studied in addition to theoretical and practical studies which are used to develop heat stratifications in heat accumulators are carried out in this review

Keywords: Thermal stratification, Solar energy, Hot water tank, Energy storage, Heat accumulators

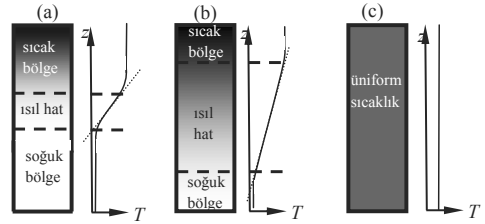
Giriş

Günümüzde enerji tüketimi, yaşam standartlarının düzeyi ve ülkelerin endüstrileşme derecesiyle doğrudan ilişkili olarak görülmektedir. Dünya nüfusunun yaşam düzeyini artırmak için, mevcut enerji tüketiminin önemli oranda artırılması gerekecektir. Bu nedenle, artan enerji gereksiniminin enerji korunum yöntemleri uygulanarak azaltılması gerekir. Enerji depolamanın anlamı, bir enerji formunun, daha sonra faydalı bir işlemde kullanılmak üzere saklanmasıdır. Enerji ve enerjinin depolanması, mühendisliğin en önemli konularından biridir. Enerji üretimi veya tüketimi, enerjinin temin edildiği kaynağa bağlı olarak süresiz olabilir. Enerjinin depolanmasında, hem enerji girişi hem de yük değişken ise, bu durumda tercih yapılabilecek iki seçenek vardır; 1) Enerji ihtiyacını enerji girişine uydurmak, 2) Enerjiyi daha sonra kullanmak üzere depolamak. Koray, ısı enerji depolamayla, ısı kaynağı miktarı ve enerji gereksinimi arasındaki uyumsuzluğun, zaman ve oran olarak azaltılabileceğini vurgulamıştır. Depolanacak ısı miktarı ve uygulanacak depolama yöntemi, mevcut ısı miktarı ve gereksinim duyulan miktarı arasındaki uyumsuzluk derecesine bağlıdır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları olarak adlandırılan ve varlığı doğa şartlarına bağlı olan, güneş, rüzgar, hidrolik ve dalga gibi enerji kaynaklarının mutlaka uygun yöntemlerle depolanması gereklidir. Bu enerji kaynaklarından enerji temin edilemediği durumlarda, depolanan enerjinin kullanıma alınması gereklidir. Günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları ile etkin ve ucuz ısı depolama (akümülatör) sistemlerinin geliştirilmesine yönelik yoğun araştırmalar sürdürülmektedir.

Isıl enerji depolama sistemlerinin (akümülatör) temel özellikleri; yüksek depolama kapasitesi, yüksek şarj/deşarj verimi, kayıp kapasitesi az olması, uzun ömürlü, ucuz, enerji yoğun olması (kWh/kg veya kWh/l; bir diğer deyişle enerjii en az hacimde ve ağırlıkta depolayabilmeli), depolama ünitesinde ısı tabakalaşma, ısı ilavesi

veya tahliyesi için güç gereksinimi, çalışma sıcaklık aralığı olarak sayılabilir.

Isıl tabakalaşma yapısının oluşma nedeni, akışkan içinde var olan sıcaklık farklarından dolayı ortaya çıkan doğal taşınım mekanizmasıdır. Akışkan içindeki sıcaklık dağılımı, yoğunluğun konuma göre değişkenlik göstermesine sebep olur. Yoğunluk farklarına bağlı olarak meydana gelen kaldırma kuvveti etkisi ile sıcak ve daha az yoğun akışkan yükselerek depoda bir sıcaklık gradyeni oluşturur. Böylece, tankın alt kısmı daha düşük sıcaklıkta olacak şekilde bir ısı tabakalaşma ortaya çıkar (Şekil 1). Ayrıca tabakalar arasında karışım tabakalaşması oluşur ve bu, ısı hat olarak adlandırılır.



Şekil 1. Aynı miktarda ısı depolanmasına rağmen, farklı derecelerde tabakalaşma oluşumu: (a) yüksek tabakalaşma (b) orta ölçekli tabakalaşma (c) hiç bir tabakalaşmanın olmadığı tam karışım durumu

Isıl tabakalaşma tankın tasarımına bağlıdır. Buna göre; tank hacmi, akışkanın giriş-çıkış tipi ve giriş-çıkış debisi gibi parametreler, tabakalaşma üzerinde etkindir. Van Koppen vd., ısı tabakalaşmanın, depolama sisteminin performansını büyük ölçüde etkilediğini, yüksek derecede tabakalaşmaya sahip bir tankın, sistemin performansını arttırdığını vurgulamıştır. Lavan vd., güneş toplayıcılı ısı enerji depolama sistemlerinde elde edilen ısı tabakalaşmanın, özellikle küçük debilerde sistemin verimini artırdığı ifade etmektedir. Hollands vd., ısı enerji depolamada, suyun ısı tabakalaşmasının farklı fiziksel işlemler tarafından bozulabileceğini ifade etmiştir. Buna göre; 1) Hüzme sürüklenme (Plume

entrainment) olarak adlandırılan, dış etkiler ve doğal taşınım mekanizmasının bir arada mevcut bir tabakalaşmayı bozduğu durum gerçekleşebilir. Bu dış etkilere örnek, tankın altından ısı girişi, tankın üstünden ısı kaybı ya da tank üstünden soğuk su girişinin sağlanması gibi durumlar olabilir, 2) Tankın girişindeki su jetinin kinetik enerjisi nedeniyle karışma gerçekleşebilir, 3) Isıl enerji depolama tankındaki su içinde ve diğer malzemeler (örn. tank duvarı) içinde ısı iletimi ve difüzyon nedeniyle tankın içindeki sıcaklık farkları azalabilir.

Sıcak su depolarında ısıl tabakalaşma üzerine yapılmış geniş kapsamlı derleme çalışmaları için Hollands vd., Han vd., Michel vd. ve Patrice vd. incelenebilir.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2’de, teorik incelemeler verilmiştir. Bölüm 3’te deneysel incelemeler aktarılmıştır. Bölüm 4’te ise sonuçlar açıklanmış olup, değerlendirmeler yapılmıştır.

Teorik incelemeler

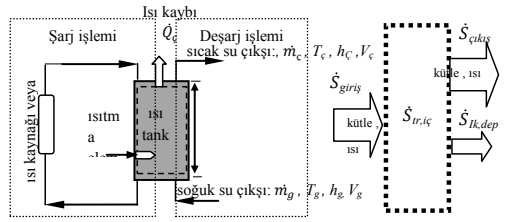
Termodinamiğin birinci yasası

Doğanın en temel yasalarından biri, enerjinin korunumunu ifade eden termodinamiğin birinci yasasıdır. Bu yasaya göre, kütlesi sabit olan bir sistem içinde enerji yaratılmaz ve yok edilemez. Enerji ancak eşdeğer miktarda bir halden başka bir hale dönüşebilir. Bir açık sistem için enerjinin korunumu termodinamikte Eş.(1) ile verilmektedir (Şekil 2a).

$$\left[\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right] - \left[\dot{Q}_c + \dot{W}_c + \sum_c \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right] = \frac{dE_{sistem}}{dt} \quad (1)$$

Burada \dot{Q}_g , \dot{W}_g , \dot{Q}_c , \dot{W}_c , \dot{m} , V , h , g , z , t sırasıyla, ısı girişi, iş girişi, ısı çıkışı, iş çıkışı, kütleleşme debisi, akışkan ortalama hızı, entalpi, yerçekimi ivmesi, yükseklik ve zamanı göstermektedir. Isıl depolama tankında çıkan iş (güç) $\dot{W}_c = 0$ olur.

Enerji şarj işlemi sırasında, sıcak akışkan tankın üst tarafından şarj edilir. Aynı zamanda soğuk akışkan, ısı alması için tankın alt tarafından ısı kaynağına veya güneş kolektörüne



Şekil 2. (a) Sürekli akışlı ısı depolama tankı, (b) Genel bir sistem için entropi geçişi mekanizma

pompaları, (Şekil 2a) . Enerji deşarj işlemi sırasında ise, tankın içindeki sıcak akışkan tankın üst tarafından dışarı pompalanır ve tankın alt kısmından geri dönmeye önce, ısıyı kullanılmak üzere düş, ısı değiştirici vb. sistemlere bırakır. Eğer suyun ısıyı düş gibi açık bir sistemde kullanıyorsa tankın alt kısmından şebeke suyu girişi olur. Isı değiştirici gibi bir sistemin kullanılması durumunda ise tanktan deşarj olan sıcak su, ısıyı ısı değiştiricide ikinci akışkana aktararak tankın alt kısmından geri döner.

Termodinamiğin birinci yasasına dayanarak, ısıl tabakalaşma verimi Haller vd. ve Abdoly vd. ya da Zurigat vd. tarafından ifade edilmektedir. Birinci yasa verimlilikleri, genellikle sabit giriş sıcaklığı ve debisinde, belirli bir şarj işlemi için, belirli bir deşarj işlemi için veya şarj-deşarj işlemlerinin aynı anda gerçekleştiği durumlar için hesaplanır. Isıl depolama sistemlerinde birinci yasa verimi (enerjetik, η_I) Eş.(2) ile ifade edilir.

$$\eta_I = \frac{\text{elde edilen enerji}}{\text{verilen enerji}} \quad (2)$$

Abdoly vd., silindirik bir su deposundaki ısıl tabakalaşmanın zamansal değişimlerini, yalnızca iletim ile ısı transferinin gerçekleştiği kabulü altında incelemişlerdir. Bu çalışmada, geri kazanabilir ısı oranı (kesiri) $F(t)$, tabakalaşmalı halde depolanan ısının bozunmasının bir ölçüsü olarak tanımlanmış olup, Eş.(3) ile verilmektedir.

$$F(t) = \frac{Q(t)}{Q_o} = \frac{Q(t)}{m_t C_p (T_2 - T_1)} \quad (3)$$

Burada Q_o , alt kısmı T_1 ve üst kısmı T_2 sıcaklığında ($T_2 > T_1$) çok ince bir ısı hatta sahip ideal bir depoda saklanan ısı olup, m_t ve C_p sırasıyla toplam kütle ve özgül ısı, $Q(t)$ ise, herhangi bir anda depolanan ısıdır. Genel bir tanımla, deponun herhangi bir j dilimindeki sıcaklık, T_1 'in %20'sinden daha düşük ise, bu dilimdeki ısı, kullanışsız olarak ifade edilir Eş.(4).

$$P_j = m_j C_p (T_j - T_1) \text{ eğer } \frac{T_j - T_1}{T_2 - T_1} \geq 0,8$$

$$P_j = 0 \quad \frac{T_j - T_1}{T_2 - T_1} < 0,8 \quad (4)$$

Burada P_j , j dilimde depolana ısıdır. Böylece, depo içindeki ısı, sıcaklık dağılımının T_2 'den ne kadar büyük olduğuna bağlı olarak yeniden değerlendirilmiş olup, değeri

$$Q = \sum_j P_j \quad (5)$$

ile bulunabilir. Böylece Eş.(3) ile verilen $F(t)$ hesaplanabilir. Benzer bir yaklaşım, deşarj ve şarj verimliliğinin ifade edilmesi amacıyla Nelson vd. tarafından kullanılmış, yöntem Dinçer vd. tarafından Eş.(6-9) ile özetlenmiştir. Buna göre, toplam deşarj ısı enerjisi,

$$Q_d = \int_0^{t_d} \dot{m} C_p |(T_c(t) - T_g)| dt \quad (6)$$

ile verilmektedir. Burada, T_c ve T_g çıkış ve giriş sıcaklığını, Q_d deşarj edilen ısı enerjisini, \dot{m} kütleli debiyi göstermektedir. Ayrıca, T_b başlangıç sıcaklığı olmak üzere,

$$|(T_c - T_g)| < 0,8 |(T_b - T_g)| \quad (7)$$

ile tanımlanan, sıcaklık farkının % 20'den fazla azalması için geçen süre t_d ile gösterilmektedir. Böylece ısı deşarj verimi,

$$\eta_d = \frac{Q_d}{Q_o} \quad (8)$$

ile ifade edilir. Benzer şekilde, şarj edilen ısı enerjisi ve ısı şarj verimi (depo verimi olarak da tanımlanır) Eş.(9 ve 10) ile ifade edilir.

Burada t_s şarj süresini göstermektedir. Böylece,

$$\eta_s = \frac{Q_s}{Q_o} = \frac{\int_0^{t_s} \dot{m} C_p |(T_c(t) - T_g)| dt}{Q_o} \quad (9)$$

$$\eta_l = \frac{\int_0^{t_d} \dot{m} C_p |(T_c(t) - T_g)| dt}{\int_0^{t_s} \dot{m} C_p |(T_c(t) - T_g)| dt} = \frac{Q_d}{Q_s} \quad (10)$$

olarak bulunur. Chan vd. tarafından verilen başka bir çalışmada, binalarda güneş ile ısıtma ve soğutma için kullanılan bir ısı enerji depolama tankının şarj ve deşarj işlemlerinde ısı depolama verimliliği analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmada, tankın dikey eksenli boyunca bir üniform sıcaklık dağılımı söz konusudur. Ayrıca şarj ve deşarj işlemi her zaman tanka göre farklı giriş sıcaklıkta yapılmaktadır. Buna göre, şarj ve deşarj verimliliği için iki denklem tanımlanmıştır. Birim zamanda gerçek enerji değişiminin maksimum enerji değişimine bölümü, birinci verim denklemi $\eta_{t,1}$ ile verilmiştir Eş.(11). Bu denklem çıkarılırken tüm depolama hacmi ideal tapa (ideal plug) akış ile değiştirilmiştir.

$$\eta_{t,1} = \frac{m_t \cdot C_p \cdot [(T_{ort}(t) - T_b)]}{m_t \cdot C_p \cdot [(T_g - T_b)]} = \frac{T_{ort}(t) - T_b}{T_g - T_b} \quad (11)$$

rada T_{ort} tankın herhangi bir anda ortalama sıcaklık göstermektedir. İkinci verim $\eta_{t,2}$ ise, maksimum enerji değişiminin hesaplanmasında bu kez kütleli debi ve zaman ölçümlerinden yararlanarak,

$$\eta_{t,2} = \frac{m_t \cdot C_p \cdot [(T_{ort}(t) - T_b)]}{t \cdot \dot{m} \cdot C_p \cdot [(T_g - T_b)]} = \frac{\eta_{t,1} \cdot m_t}{t \cdot \dot{m}} \quad (12)$$

ile tanımlanmıştır. Yoo vd. tarafından depolama tankında değişken giriş sıcaklıklarıyla oluşan ısı tabakalaşma üzerine analitik çözümler yapılmıştır. Bu çalışmada, süper pozisyon prensibi kullanılarak tapaakış bölgesindeki sıcaklık profilleri başarılı bir şekilde formüle edilmiştir.

Termodinamiğin ikinci yasası

Termodinamiğin ikinci yasasına göre, ısı soğuk bir cisimden sıcak bir cisme kendiliğinden geçemez. Bunun için dıştan bir enerji harcaması gerekir. Aynı şekilde yalnız bir ısı kaynağı kullanan bir çevrime göre çalışan bir ısı makinesi yapılamaz. Araştırmacılar bir sistemin değerlendirilmesinde, termodinamiğin birinci yasası ile ikinci yasasının birlikte düşünülerek analiz edilmesinin daha doğru olacağını söylemişlerdir. Termodinamiğin ikinci yasasının

ortaya çıkardığı en önemli kavramlar, tersinmezlik ve entropidir. Enerji sistemlerinin ikinci yasa kapsamında incelenmesine yönelik çalışmalar, analizde seçilen parametreye bağlı olarak iki ana grupta toplanabilir; 1) Entropi bazlı çalışmalar, 2) Ekserji bazlı çalışmalar.

Isı depolama (akümülatör) sistemlerinde ikinci yasa verimi (ekserjetik etkinlik, η_{II}) Eş.(13) ile ifade edilir (Çengel ve Boles, 2011).

$$\eta_{II} = \frac{\text{elde edilen ekserji}}{\text{sağlanan ekserji}} = 1 - \frac{\text{ekserji yok oluşu}}{\text{sağlanan ekserji}} \quad (13)$$

Entropi kapalı sistemlerde sabit değildir ve ısııl enerji depolama tankında üretilen entropinin nedenleri, karıştırma (kütle geçisi) ve ısı kaybı (iletim, difüzyon) gibi nedenler olup, bu istenilmeyen bir durumdur (Şekil 2b). Haller vd. tarafından yapılan bir çalışmada ısı enerji deposunun tabakalaşma verim hesabı için termodinamiğin ikinci yasasına dayanan yeni bir yöntem ifade edilmiştir. Isı kaybı etkisi deneysel ve teorik olarak ortaya konmuştur. Buna göre, teorik olarak, tabakalaşma verimin entropiye veya ekserjiye bağlı olarak hesaplanması, bir fark oluşturmamaktadır. Pratikte ekserji dengesi, hesap belirsizliklerinden daha az etkilenir. Ayrıca, entropi dengesi kullanımı da tavsiye edilmemektedir. Bu çalışmada şarj-deşarj ve bekleme işlemlerini içeren deney sonuçlarından elde edilmiş olan tabakalaşma verimlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu da direk olarak şarj vedeşarj edilen bir depolama tankının karışma davranışları hakkında anlamlı fikirler vermektedir. Yeni yöntem, ısı enerji depolarının ve depo bileşenlerinin tabakalaşma verimlerinin karşılaştırılması konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Entropi veya ekserji dengesinden başlayarak, Şekil 2b'de verilen tankın içinde birim zamanda meydana gelen entropi değişimi Eş.(14) ile gösterilmiştir.

$$\frac{dS_{depo}}{dt} = \dot{S}_g + \dot{S}_c + \dot{S}_{Ik,\zeta} + \dot{S}_{tr,iç} \quad (14)$$

$$\Delta S_{depo} = \Delta S_c + \Delta S_{Ik,depo} + \Delta S_{tr,iç} = (\Delta S_g + \Delta S_c) + \Delta S_{Ik,depo} + \Delta S_{tr,iç} \quad (15)$$

$$\Delta S_{tr,iç} = \Delta S_{depo} - \Delta S_{akış} - \Delta S_{Ik,depo} \geq 0 \quad (16)$$

$$\eta_{St,s} = 1 - \frac{\Delta S_{tr,iç}^{deneysel}}{\Delta S_{tr,iç}^{karışım,Ik}} \quad (17)$$

Burada \dot{S}_g , \dot{S}_c , $\dot{S}_{Ik,\zeta}$, $\dot{S}_{tr,iç}$ sırasıyla birim zamanda sisteme entropi girişini, sistemden entropi çıkışını, sistemden çevreye ısı kayıpları ile entropi çıkışını ve içten tersinmezlikler nedeniyle olan entropi kaybını göstermektedir. Böylece, iç ekserji kayıplarına bağlı olarak tabakalaşma verim hesaplaması Eş.(15-17) kullanılarak yapılmaktadır.

Burada $\Delta S_{Ik,depo}$, $\Delta S_{tr,iç}$, $\eta_{St,s}$ sırasıyla ısı kayıpları nedeniyle depoda meydana gelen entropi değişimini, iç tersinmezliklerle oluşan entropi değişimi, entropi değişimi kullanılarak hesaplanan tabakalaşma verimini göstermektedir. Eğer verimin değeri sıfır ise depo içinde sıcak ve soğuk su karışım halde olmakta, bir ise depo mükemmel tabakalaşmaya sahiptir. Eş.(17)de verilen tabakalaşma verimi, deneysel ekserji kaybı ile iç ekserji kaybı (karışım durumunda) kullanılarak da tanımlanabilir Eş.(18).

$$\eta_{St,\xi} = 1 - \frac{\Delta \xi_{tr,iç}^{deneysel}}{\Delta \xi_{tr,iç}^{karışım,Ik}} \quad (18)$$

Burada $\eta_{St,\xi}$ ekserji değişimi kullanılarak hesaplanan tabakalaşma verimini ifade etmektedir. Entalpi değişimi, ısı kaybindan kaynaklanan toplam ısı kayıp katsayısına bağlı olarak hesaplanır.

$$\Delta \xi_{tr,iç} = \Delta \xi_{depo} - \Delta \xi_{akış} - \Delta \xi_{Ik,depo} \leq 0 \quad (19)$$

Bu durumda ekserji değişimi $\Delta \xi$ hesaplaması entalpi değişimine ΔH bağlıdır. Böylece, T_o ölü hal sıcaklığını göstermek üzere,

$$\Delta \xi = \Delta H - T_o \cdot \Delta S \quad (20)$$

olur. Isıl enerji depolama tankı karışım

$$T_o \cdot \Delta S_{tr,iç} = -\Delta \xi_{tr,iç} \quad (21)$$

$$\eta_{St,\xi} = \eta_{St,s} \quad (22)$$

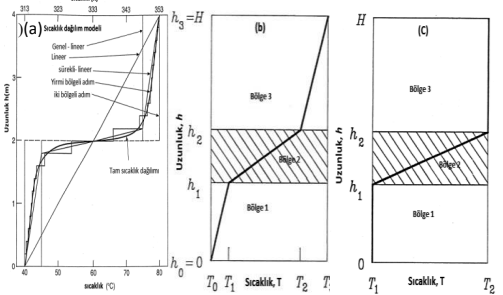
durumdaysa entalpi değişimi sıfırdır ($\Delta H = 0$).

Bu eşitlik daha önce Huhn, tarafından tespit edilmiştir. Isıl enerji depolama tankında entalpi ve entropi değişimi, şarj ve deşarj işlemlerinden kaynaklanır. Shah, bir güneş enerjisi depolama tankının içine giren su jetlerinin teorik ve deneysel analizini gerçekleştirmiştir. Farklı giriş debileri ile üç giriş tasarımı, HAD kullanılarak, güneş enerjisi depolama tankına ısı şartların davranışını göstermek için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, giriş tasarımının akış yapısı üzerine etkisini göstermiştir ve bir sıcak su tankı içindeki enerji kalitesinin düşük giriş tasarımı ile azaldığını göstermiştir. Sayısal incelemelerin ardından deneyler yapılmıştır. Üç giriş tasarımı ile farklı giriş debileri için, dokuz çekiş test yapılmıştır. Ayrıca deney işlemleri sırasında tankın deşarj sırasındaki sıcaklık tabakalaşması ölçülmüştür. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasası kullanılarak deney sonuçları analiz edilmiştir. Sonuçlar, deşarj sırasındaki Richardson sayısının Eş.(23), deşarj hacmi ve tankın başlangıç sıcaklığının, entropi ve ekserji değişimlerine nasıl etki ettiğini göstermiştir. Ghaddar, güneş enerjisini kullanan sistemlerin çoğunda kullanılan tam tabakalı su tankı ve tam karışık su tankı arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Tabakalaşma yöntemi kullanarak enerji depolama verimliliği ve tüm sistem verimliliğinin % 6 ila % 20 kadar artırılabilir olduğu bulunmuştur. Ortalama net enerji ve ekserji verimi mevsimsel ısı enerji depolamada %60 artırılabilir. Ayrıca diğer temel sebepler güneş enerjisini kullanan sıcak su sistemlerinde incelenmiştir. Marc, ısı tabakalaşma içeren ısı enerji depolama sistemlerinin enerji ve ekserji analizlerini, performansı ortaya koyan faktörleri ve faydaları ifade etmiştir. Enerji, ekserji içeriklerinin değerlendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla, ısı tabakalı ısı enerji depolama için altı sıcaklık dağılım modeli (lineer, adımlı, sürekli-lineer, genel-lineer, temel üç-bölge ve genel üç-bölge) dikkate almıştır (Şekil 3). Gerçekçi dikey sıcaklık tabakalaşma dağılımını söz edilen yaklaşım modellerine göre çizmiştir. Gösterilen sıcaklık dağılım modelleri kullanılarak ısı tabakalaşmanın ısı enerji depolama verimini nasıl iyileştirdiği ve ısı tabakalaşmanın tankın ekserji depolama kapasitesini nasıl artırdığı

gösterilmiştir. Sonuçta, tasarımları geliştirmek ve optimize etmekte yardımcı olabilecek ekserji analizleri gösterilmiştir. Ekserji analizleri ısı enerji depolama sistemleri üzerinde aydınlatıcı ve anlamlı değerlendirmelere ve bu sistemlerin karşılaştırmalarını yapmaya olanak sağlamaktadır.

Boyutsuz parametreler

Sıcak su depolarında ısı tabakalaşmanın tanımlanması ve analizi için yaygın olarak kullanılan boyutsuz sayılar, Castell vd. tarafından özetlenmiştir. Bu çalışmada farklı akış debilerinde yapılan deneyler için boyutsuz sayılar belirlenmiş, deneyler sonucunda, sıcak su depolamada tabakalaşmayı tanımlamak için Richardson sayısının (Ri) en uygun boyutsuz sayı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bir diğer boyutsuz sayı olan karışma sayısının (MIX), bir takım sorunlar ortaya koyduğu vurgulanmıştır. Tabakalaşma tanımlanmasında diğer boyutsuz sayılar, ancak Richardson sayısı ile birlikte kullanılırsa bir anlam ifade etmemektedirler. Han vd. tarafından yapılan bir diğer çalışmada, ısı tabakalaşma performansının belirlenmesinde faydalı bir boyutsuz sayı olan, tabakalaşma sayısı (Str) tanımlanmıştır. Söz konusu boyutsuz sayılar Eş.(23-28) ile verilmiştir.



Şekil 3. (a) Bazı yaklaşımlara göre sıcaklık dağılımı. (b) Genel üç bölge sıcaklık dağılımı modeli. (c) Temel üç bölge sıcaklık dağılımı modeli

Richardson sayısı (Ri): Richardson sayısı, doğal taşınımın zorlanmış taşınıma oranını ifade eder ve

$$Ri = \frac{g\beta H(T_2 - T_1)}{\nu^2} \quad (23)$$

ile tanımlanmaktadır. Burada g, β, H, T_1, T_2 sırayla yerçekimin ivmesi, ısı genleşme katsayısı, uzunluk, tankın alt ve üst kısmın sıcaklığı göstermektedir. Richardson sayısının küçük olmasının anlamı ısı depo içindeki suyun karışma durumunda olduğu, büyük olması ise depo içinde iyi bir ısı tabakalaşma olduğu anlamına gelir. Tabakalaşma başladığı zaman Richardson sayısı su tankının davranışını doğru bir şekilde yansıtır.

Karışma sayısı (MIX): Karışma sayısı, depolanan enerjinin ve sıcaklık dağılımının bir ölçüsü olup, deponun herhangi bir j dilimindeki enerjinin momentinin hesaplanması ile bulunur. Buna göre enerji momenti,

$$M_E = \sum_{j=1}^n y_j \cdot E_j = \sum_{j=1}^n y_j \cdot (\rho V_j C_p T_j) \quad (24)$$

kullanılarak, (burada y kontrol hacminin merkezinden tankın tabanına kadar olan mesafedir) karışma sayısı,

$$MIX = \frac{(M_{E,tabakalaşma} - M_{E,gerçek})}{(M_{E,tabakalaşma} - M_{E,tam\ karışım})} \quad (25)$$

ile verilir. Burada $M_{E,tabakalaşma}, M_{E,gerçek}, M_{E,tam\ karışım}$ sırayla tabakalaşmalı tankta enerji momenti, gerçek tankta enerji momenti, tam karışım tankta enerji momentini simgelemektedir. Karışma sayısı, sıfır ile bir arasında bir değer alır. Sıfır olması tankta karışmanın olmadığı ve ideal tabakalaşmanın mevcut olduğu bir olması ise tankta tabakalaşma olmadığı ve tamamen karışım durumunda olduğu anlamına gelir.

Tabakalaşma sayısı (Str): Tabakalaşma sayısı, şarj-deşarj işlemlerinde, herhangi bir zamandaki ortalama sıcaklık değişiminin maksimum ortalama sıcaklık değişimine oranı olarak tanımlanır.

$$Str = \frac{(\frac{\partial T}{\partial z})_t}{(\frac{\partial T}{\partial z})_{maks}} = \frac{\frac{1}{J-1} \left[\sum_{j=1}^{J-1} \left(\frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta z} \right) \right]}{\frac{T_{maks} - T_g}{(J-1)\Delta z}} \quad (26)$$

Deponun uzunluk/çap oranı (H/D):

Uzunluk/çap oranı, ısı tabakalaşmanın incelenmesinde bir parametre olarak alınmakta olup, uzun depolarda tabakalaşmanın, kısa depolara kıyasla daha uzun süreli olduğu ifade edilmektedir. Buna karşın, uzun tanklarda çevreye olan ısı kaybı daha fazla olmaktadır. Ayrıca, Lavan vd, iyi bir ısı tabakalaşma için uzunluk/çap oranının 3 ile 4 arasında olması gerektiğini ve en iyi oranın 3,3 olarak tespit edildiğini ifade etmiştir.

Isıldeşarj verimi: Eş.(8) ile verilen ısıldeşarj verimi, bir depodandeşarj edilen ısı enerjisinin, ideal bir tabakalaşmanın olduğu bir depodaki ısı enerjisine oranıdır. Dolayısıyla, en ideal durumda bu oranın değeri bire eşit olup; akışkanın giriş ve çıkışındaki ısı transferi ile karışma işlemlerinin bir arada gerçekleşmesinden dolayı, uygulamada daha düşük değerler alır.

Peclet sayısı (Pe) : Peclet sayısı depolama tankın içinde ısı tabakalaşma tanımlamak için Richardson sayısı ile birlikte kullanılır.

$$Pe = \frac{V \cdot H}{\alpha} \quad (27)$$

Reynolds sayısı (Re) : Reynolds sayısı atalet ve viskoz kuvvetlerin oranı olarak tanımlıdır. Pe ve Re sayıları yalnız başına kullanıldığında tabakalaşma olup olmadığını göstermez; Ri sayısı gibi diğer parametreler ile birlikte kullanılarak akış hakkında bilgi veren boyutsuz sayılardır

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (28)$$

HAD benzetimleri

HAD benzetimleri, akışkanlar dinamiği ve ısı transferini içeren mühendislik problemlerinin yaklaşık çözümünde kullanılmaktadır. Problemi tanımlayan ve analitik çözümü çoğu zaman mümkün olmayan diferansiyel denklemlerin, seçilen nümerik çözüm yöntemine (Sonlu Farklar, Sonlu Elemanlar, Sonlu Hacimler vb.) göre elde edilen yaklaşık çözümleri kullanarak, incelenen önemli parametrelerin değişimi elde edilmekte, çeşitli akış görselleştirme araçları ile detaylı sonuçlara

ulaşmak mümkün olmaktadır. Isıl tabakalaşmanın söz konusu olduğu depolama tanklarında, problemi temsil eden temel diferansiyel denklemler, Süreklilik, Navier Stokes ve Enerji denklemleridir. Doğal taşınım mekanizmasının Boussinesq yaklaşımı ile modellenmesi durumunda, bu denklemler,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (29)$$

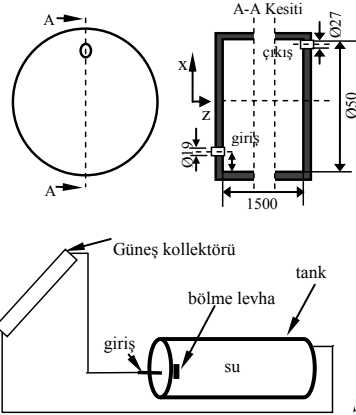
$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\rho \mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P + \nabla \tau - \rho \beta (T - T_c) \mathbf{g} \quad (30)$$

olmaktadır. Bu denklemlerde, hız alanı $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$, basınç alanı P , gerilme tensörü τ ve yerçekimi ivmesi vektörü $\mathbf{g} = g_x\mathbf{i} + g_y\mathbf{j} + g_z\mathbf{k}$ olmak üzere; dinamik viskozitesi μ , ısıl genleşme katsayısı β ve ısı iletkenlik katsayısı k ile temsil edilmektedir. Sözü edilen Boussinesq yaklaşımında, akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilmekte, ancak, yoğunluk farklarından doğan kaldırma kuvvetinin hesabında ise,

$$(\rho - \rho_{ref}) = -\rho_{ref} \cdot \beta (T_c - T_{ref}) \quad (31)$$

ifadesinden yararlanılmaktadır. Burada T_{ref} ve ρ_{ref} suyun referans sıcaklığı ve yoğunluğu olup, ρ sıcaklığa bağlı değişim göstermektedir. Rajagopal vd., sıcaklık tabakalaşmasını incelediği çalışmasında, HAD benzetimlerini, Boussinesq yaklaşımı altında gerçekleştirmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımları ile tabakalaşmayı detaylı incelemek mümkün olmuştur. Cònsul vd., yaptıkları çalışmada, üç boyutlu HAD benzetimlerini bu amaca yönelik özel bir tip bilgisayar ile gerçekleştirmiştir (Beowulf clusters). Burada, prototip ısıl depolama tanklarında üç boyutlu HAD benzetimi, basınç temelli SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması ile yapılmıştır. Böylece, termosifon etkili güneşli ısıtma sistemindeki depolama tankında oluşan zamana bağlı ısıl davranışlar, elde edilmiştir. Deşarj işlemi sırasında tanka giren kütleli debi miktarının tabakalaşma derecesi üzerine etkisi de gözlenmiştir. Yapılan

bu çalışmada, üzerinde çalışılan matematiksel model içerisindeki değişiklikler, çözümlerin sınıflandırılması ve tabakalaşma seviyesinin araştırılması açısından dikkatle ele alınmıştır. Gerçek çözüme yaklaşmak için, üzerinde çalışılan sayısal yöntem ve modellerin beraberinde getirdiği sınırlama ve kısıtlamalara da bu çalışmada değinilmiştir (Şekil 4a).

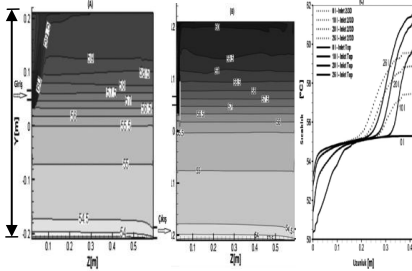


Şekil.4. a) Depolama tankın şematiği (Cònsul R. ve ark., 2004). b) Deneş şematiği bölme levhayla

Eames. vd., Sonlu Hacimler Yöntemi'ni kullanan nümerik bir model ile, tabakalaşmaya sahip sıcak su depolama tanklarının ısıl performansını araştırmış ve sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirildiği deneşel bir çalışma ile doğrulamıştır. Shah, tarafından yapılan çalışmada, dikey, mantolu, üstten giriş ve alttan çıkışlı ısı değıştiricileri için iki yeni ısı transferi korelasyonu geliştirmiştir. Bu korelasyonlar, dikey, mantolu tankların HAD ile modellenmesi bulgularına dayalıdır. Zachar vd., depolama tanklarının girişine yerleştirilen akış engelleyici plakaların boyutunun, ısıl tabakalaşmayı arttırmaya yönelik etkisini değerlendirmişlerdir. Üstten ve alttan giriş koşullarında, hız ve sıcaklık alanları, Fluent ticari yazılımı ile nümerik olarak bulunmuş ve deneşel bulgularla karşılaştırılmıştır. Tokgöz,

tarafından yapılan 2008 tarihli yüksek lisans tezi çalışmasında, mantolu sıcak su tankında farklı engellerin, sıcaklık tabakalaşması üzerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Esas amaç, tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasını iyileştirmektir.

Darci vd, bu çalışmada yatay bir silindirik depolama tankı içindeki üç boyutlu sıcaklık ve hız alanlarının sayısal analizi yapılmıştır (Şekil 4b). Laminer doğal taşınım fenomeni ve sıcaklığın dikey tabakalaşması dikkate alınmış olup üç boyutlu ve daimi olmayan akış kabulleri altında Sonlu Hacimler Yöntemi ile momentum ve enerji denklemleri çözülmüştür. Tankın içindeki akışkan soğutma işleminin benzetimi, tabakalaşmalı sıcaklık profillerinin deneysel olarak elde edilenlerle uyum içinde olduğunu göstermiştir. Çeşitli benzetimlere dayanarak, tankın içindeki sıcaklık dağılımını (ısı tabakalaşmanın derecesini) belirlemek için ısı ve geometrik parametrelere dayanan ve amacıyla bir ifade önerilmiştir (Şekil 5).



Şekil.5: 260 litrelik, 60°C ve 1560 s süre tanka şarj işlemi, simetri düzleminde sıcaklık dağılımı: (a) Engel levha olmadan (b) engelli levha ile c) Sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, 2/3D durumda olan jet girişi ve üst yanında

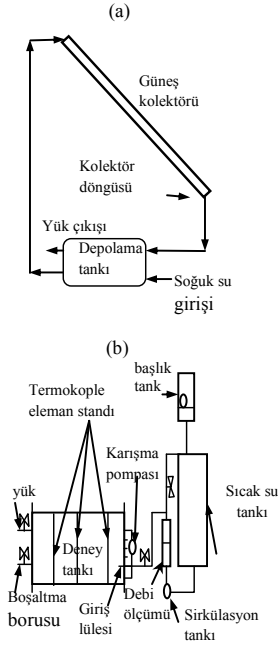
Deneysel incelemeler

Alizadeh, tarafından yapılan deneysel bir çalışmada silindirik bir depolama tankının ısı davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel düzeneğinin şeması Şekil 6'da verilmiştir. Dört aşamada yapılmış olan deneysel çalışmanın ilk aşaması, başlangıçta ısı tabakalaşmaya sahip bir tankın tabanındaki akışkan sıcaklığı ile tanka giren akışkan sıcaklığının eşit olduğu durumdur. İkinci aşamada, tankın tabanındaki akışkan sıcaklığının tanka giren akışkan sıcaklığından düşük olduğu durum, üçüncü aşamada ise yalıtılmış (izotermal) tankın ısıtılması ile oluşan ısı tabakalaşma incelenmiştir. Dördüncü aşamada birinci deney özellikleri kullanılmıştır. Sadece giriş borusu yerine tank tabanına doğru bükülmüş ırsaksak 30 derece eğimli bir lüle koyularak sıcaklık tabakalaşması incelenmiştir. En iyi tabakalaşmanın dördüncü durum olduğu vurgulanarak, iki farklı bir boyutlu nümerik model ile deneysel bulguların doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Şekil 7a ve Şekil 7b 'de elde edilen deney sonuçlarında, sıcaklığın farklı zamanlarda, tankın dikey eksenini boyunca dağılımı görülmektedir. Başlangıçtaki sıcaklık farkı 25°C'dir. Su girişinde boru kullanarak, soğuk su tankın içinde püskürtülmekte (giren suyun sıcaklığı tankın alt kısmının sıcaklığına eşittir), aynı ölçüm noktasında ilk birkaç dakika boyunca sıcaklık değişimi yaklaşık 1°C'dir. Ayrıca zaman geçtikçe tankın içindeki tabakalaşma azalmakta ve debi arttığı zaman tabakalaşma daha kısa sürede sona ermektedir. Şekil 7c'de sonuçları verilen deneyde ise, girişteki düz boru yerine ırsaksak 30° bir boru değiştirilmiş ve kullanılan bu ırsaksak nozul momentumun girişini azaltmıştır. Bu nedenle girişte karışım miktarı azalmış ve deşarj boyunca bir iyi tabakalaşma elde edilmiştir. Farrington, tarafından yapılan çalışmada, kullanılan evsel sıcak su sisteminde bir ısı tankının yük tarafı incelenmiştir. Burada, dalmış ısı değiştirici için deneysel ve HAD ile nümerik çözümlere ulaşılmıştır. Yük tarafında dört farklı boru ısı değiştirici verimi hesaplanmıştır.

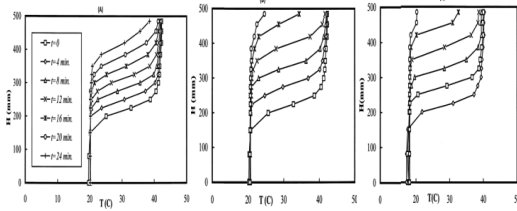
Birinci tip ısı değiştirici pürüzsüz serpantin (yüzey alanı 2,5 m²), ikincisi ise kanatlı ısı

değiştirici (yüzey alanı $2,5 \text{ m}^2$), üçüncüsü pürüzsüz % 32 daha fazla etkili (yüzey alanı $1,7 \text{ m}^2$), dördüncü ise kanatlı ısı değiştiricidir.

(yüzey alanı $1,7 \text{ m}^2$). Bu çalışmada amaç, kullanılan yan-yüklerde GEES (güneş enerjili evsel sıcak su) veriminin hesaplanması ve tasarımcılar için nasıl çalıştığının bulunmasıdır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır; 1) Kanatlı boru alanının %70'i kadar pürüzsüz boru kullanıldığında, pürüzsüz boru daha iyi performans vermelidir, 2) Kanatlı boruların kullanılmaması önerilmiştir, 3) İyi tabakalaşma sistemin performansını arttırmaktadır, 4) Dikey tipli serpantinli ısı değiştirici kullanımında daha iyi performans elde edilir, 5) Serpantin borusundaki debi ve alan artışı zaman ısı aktarması artar, ayrıca ısı tabakalaşma azalır. Morrison vd., güneş enerjili sıcak su hazırlama sistemlerinde kullanılan yatay, mantolu ısı değiştiricilerin özelliklerini incelemişlerdir. Bu ısı değiştiricinin deneysel incelenmesi, serpantin içindeki akım çizgilerini ve ısı transferini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, akış ve ısı transferi problemleri, ticari yazılım Fluent ile nümerik olarak modellenmiştir. Yatay, mantolu ısı değiştiricinin, giriş debisi, sıcaklığı ve konumu gibi parametrelerinin etkileri ele alınmıştır.



Şekil.6. a) Termosifon güneş şematiği
b) Deney şematiği



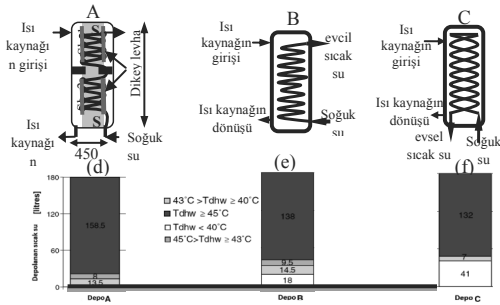
Şekil.7. Tankın iç dikey yönünde sıcaklık dağılımı, başlangıç tabakalaşma, (Düz boru giriş başlığı), a) 6 l/dak debi, b) 10 l/dak debi, c) Tankın iç dikey yönünde sıcaklık dağılımı, başlangıç tabakalaşma, 10 l/dak debi (iraksak boru giriş başlığı)

Roman vd. tarafından sunulan çalışmada, önerilen yeni bir depo için (Şekil 8a), tabakalaşmanın oluşumu, iki farklı serpantinli boru girişi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8b ve 8c). Önerilen yeni depo, S_1 ve S_2 olmak üzere iki kısımdan ibarettir. S_2 alt kısmı ifade etmekte ve ön ısıtma için kullanılmaktadır. Ön ısıtma için güneş kolektörü veya ısı pompası kullanılır. Ortada olan ayırma parçası plastikten yapılmıştır ve ortasında dairesel bir delik bulunmaktadır. Delik suyun doğal taşınım veya şarjına olanak sağlaması amacıyla kullanılmaktadır. S_1 kısmı ısıtma amacıyla kullanılır ve gereken ısı bir boylerden temin edilir. Depo ortasında bir serpantinli boru olup halkasal kesitli dikey levhalar ($Shx1$, $Shx2$) ile kaplanmıştır. Kaplama nedeniyle suyun hızı dikey eksenle artar ve dolayısıyla taşınım kazancı oranı artar. Matematiksel modelin sonuçları, gerçek güneş toplayıcısının günlük deneysel ölçüm verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Şekil 8'de görülen her bir tankın kullanıcıya bağlı verimi (URE, Eş.(32))

hesaplanmıştır. Sonunda elde edilen tabakalaşmalı depolamanın diğer ticari depolamalardan % 32 daha fazla etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca depolama tankı içinde serpantin boru uygulaması, depo içindeki ısı tabakalaşmaya büyük ölçüde etki etmektedir. Şekil 8d, 8e ve 8f'de, yararlı sıcak su ($T_{dhw} \geq 45^\circ\text{C}$) hacim oranları görülmektedir.

Kullanıcıya bağlı verim olarak tanımlanan URE (User Related Efficiency), tanımlıdır. Geczy vd. (P.Geczy-Vig, I. Farkas, 2010), tarafından yapılan bir çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan bir ısı enerji deposundaki, tabaka sıcaklıklarının modellenmesi için Yapay Sinir Ağları'na dayanan (YSA) bir model tanıtılmıştır. Bu modelleme yerel sıcak su sisteminin ölçülmüş içindeki dikey yöndeki sıcaklık dağılımı; değerlerine dayanarak yapılmıştır. Sekiz eşit parçaya bölünmüş tankın

$$URE = \frac{E_{DHW}/V_{hx,DHW}}{E_{DHW,ideal}/V_{hx,DHW,ideal}} = \frac{C_W \int_0^{t=24h} \dot{m}_{id} (T_{id,çıkış} - T_{ss}) dt / \int_0^{t=24h} \dot{m}_{id} dt}{C_W \int_0^{t=24h} \dot{m}_{id,ideal} (T_{id,çıkış,ideal} - T_{ss}) dt / \int_0^{t=24h} \dot{m}_{id,ideal} dt} \quad (32)$$



Şekil.8: A, B ve C deponun şematik tasarımı ve yararlı sıcak su hacmi

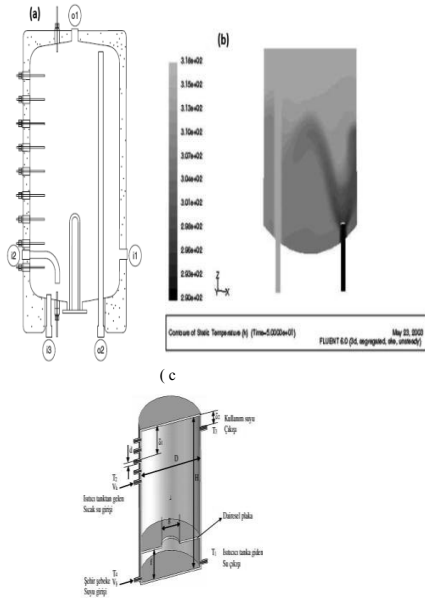
depolama tankı sıcaklığının beş dakikalık ortalaması, çevre sıcaklığı, güneş ışınımı, toplayıcının devre debisi, tabakaların sıcaklığı ve yük sıcaklığı verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Tanıtılan YSA modeli, yüklenme süreleri ve yükler arasındaki dönemlerini açıklayan iki bölümden oluşmaktadır.

Tanımlanan model çalışma süresi boyunca kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Ortalama sapma değeri çalışma boyunca 0,22 °C, doğrulama boyunca da 0,24 °C olarak bulunmuştur. Fernandez vd. tarafından sunulan çalışmada, 150 l kapasiteli, evsel, elektrikli sıcak su depolama tankının statik modu (şarj durumu) ile ilgili deneysel inceleme gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyin şematığı Şekil 9a'da verilmiştir. Analizin esas amacı, deponun statik ısıtma ve soğutma sürelerindeki ısı davranışını belirlemek ve performansını tanımlamaktır. Analiz, üretici tarafından sağlanan bir tanktan alınan ve uygun bir veri toplama sistemi ile donatılmış deneysel verilere dayanmaktadır. Depolama tankı, veri toplama sistemi ve deney yöntemi tarif edilmiştir. Enerji ve ekserji verimliliğini ve ısı tabakalaşmayı değerlendirmek için kullanılan performans parametreleri, deneysel verilerden elde edilmiştir. Farklı ısıtma güçleri ve tank basınçları için analiz sonuçları gösterilmiş ve tartışılmıştır. Fernandez v. d., tarafından verilen bir diğer çalışmada ise, aynı deponun dinamik modu (deşarj durumu) ile ilgili deneysel inceleme araştırılmıştır. Uygulamaya yönelik bir araştırma olması amacıyla tank, üç farklı giriş pozisyonu ve iki farklı çıkış pozisyonu ile donatılmıştır. Tankın dinamik modu deneysel işlemleri için, altı muhtemel giriş-çıkış portu düzenlenmiştir ve suyun debisi (5, 10 ve 15 l/dak) dikkate alınarak analiz edilmiştir. Tank içinde ısı tabakalaşma, dinamik mod süresince de gerçekleşmektedir.

Yapılan deneyler sonunda Şekil 9a'da görülen i2-o1 giriş-çıkış bağlantı düzenlemesinin, incelenen durumlar arasında en iyi performansı sağlayan ve pratik kullanım için tavsiye edilen düzenleme olduğu sonucuna varılmıştır.

Jordan vd., güneş enerjili evsel sıcak su sistemlerinde kullanılan iki farklı tip depolama tankının soğuk su girişinde, iki farklı tip akış engelleyici formunun etkisini incelemiştir. Bu araştırmanın amacı, piyasada yer alan iki depolama tankında ısı tabakalaşma üzerine soğuk su giriş cihazının etkisini ortaya çıkarmak, ayrıca küçük güneş enerjili ısıtma

sistemin yıllık olası performansının değerlendirilmesidir. İki farklı giriş tasarımından birincisi, giriş borusunun üzerine yerleştirilmiş küçük bir kavisli plaka, ikincisi ise giriş borusunun üzerine yerleştirilmiş büyük bir düz plakadır. Soğuk suyun girişi, tankın alt dikey yöndedir. Sıcaklık ölçümleri farklı çalışma koşulları için gerçekleştirilmiştir. Bu iki tankın içindeki ısıl tabakalaşmanın, akış hızına, su boşaltma (draw-off) ve depolama tankındaki başlangıç sıcaklığına da bağlı olduğu vurgulanmıştır.



Şekil.9 (a) Deneş şematığı (b) Depoya giren soğuk suyun sıcaklık dağılımına etkisi. Giriş sıcaklığı 17°C, debi 0,075 l/s, boşaltma hacim 18 l, tankın başlangıç sıcaklık 61°C (c) Sıcak su tankının kesit görünüşü ve fiziksel büyüklükleri

Sistem simülasyonlarının yapılması için, çok noktalı depolama modeli kullanılmış ve çalışma koşullarına göre karıştırma davranışını modellemek için değişken bir ek giriş geliştirilmiştir. Büyük düz plakalı giriş durumunun daha verimli bir model olduğu vurgulanmış, güneş ısıtma sisteminin yardımcı

enerji kaynağında yaklaşık % 3 ila 7'lik (58-155 MJ/yıl) bir azalma sağlayacağı ifade edilmiştir. Sistemin yıllık teorik inceleme detaylarında, sıcak su depolamasında iyi bir soğuk su giriş tasarımının ısıl tabakalaşmanın artmasına yol açtığı ve sistemin performans potansiyelinin arttığı görülmüştür. Deşarj işleminde karışma derecesi; akış hızının, giriş ve depolama sıcaklığının fonksiyonudur. Su girişi yüksekliği, debi ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmış ve su girişinden etkilenen tank seviyesi belirlenmiştir (Şekil 9b). Arslan, tarafından yapılan çalışmada, güneş enerjisi ile su ısıtma sistemlerinde ısıl enerji depolamak için kullanılan silindirik sıcak su depolama tankı içerisine dairesel engelleme plakasının f/H ve g/D oranlarında yerleştirilmesinin ısıl tabakalaşma üzerine etkisi sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 9c). Depolama tankının içerisine dairesel plaka yerleştirmek sureti ile tankın üst kısmındaki sıcak su ile alt kısmındaki soğuk suyun birbirleri ile karışması önlenerek, ısıl tabakalaşmanın korunması sağlanmıştır. Çalışmada, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri üç boyutlu ve daimi olmayan akış kabulleri altında sayısal yöntemler ile çözülmüştür. Sayısal çalışmanın geçerliliği deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tank içerisindeki sıcaklık dağılımı, tanktan sağlanan kullanım suyunun sıcaklığı, kolektöre giden suyun sıcaklığı ve tank giriş-çıkışları arasındaki su sıcaklığı farkları; çeşitli g/D ve f/H oranlarında şekiller ve grafikler üzerinde zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Sonuçlar, tank içerisine yerleştirilen dairesel plakanın ısıl tabakalaşmayı iyileştirdiğini ve engelsiz tank durumuna göre, tanktan sağlanan kullanım suyu sıcaklığını arttırdığını göstermektedir. En iyi ısıl tabakalaşma, dairesel plakanın tank içerisine $g/D=0,2$ ve $f/H=0,133$ oranlarında yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir. Simon vd. tarafından yapılan çalışmada bir akıllı GEES tankının incelemesi sunulmuştur. Akıllı güneş tankının içindeki su, güneş toplayıcıları tarafından veya yardımcı bir enerji kaynağı kullanarak ısıtılabilir. Bu çalışmada elektrik ısıtma elemanı tankın üst tarafına takılarak su ısıtılmaktadır. Sıcak su talebinin

fazla olduğu dönemlerde büyük hacimli tank, sıcak su talebinin az olduğu dönemlerde ise küçük hacimli tank kullanılır. Ticari ve akıllı bir güneş tankı, laboratuarda deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Elde edilen yıllık ısı performans sonucu, akıllı güneş tankının veriminin % 5 ila %35 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Performans/maliyet oranı bir yıl için hesaplandığında, akıllı güneş tankının ticari tanktan % 25 kadar daha iyi olduğunu görülmektedir. Ayrıca, akıllı güneş tankları, bilinmeyen, değişken, az veya çok sıcak su tüketimi ve büyük güneş enerjisi sistemleri ve büyük tank hacmi riski için uygundur. Bu riskler akıllı güneş tankları kullanılarak azaltılabilir. Andersen vd., ısı tabakalaşma olması durumunda, depolama tankında deşarj işleminden kaynaklı % 51'lik bir karışımın, güneşten kullanılan net enerjiden faydalanmada %23 azalmaya neden olabileceğini göstermektedir. Zurigat vd. tarafından yapılan çalışmada, yatay, silindirik bir ısı depoda farklı su giriş geometrilerinin ısı hat üzerine etkisi analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır. ısı hatlı depolama tankında Richardson sayısı 3,6'dan küçük ise ısı tabakalaşma değerlendirilmesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur.

Sonuç

ısı enerji depolama sistemleri, enerji talebinin ve üretiminin aynı zamanda meydana gelmemesinden dolayı ısıtma ve soğutmada kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde, gelecekteki çalışmalarda depolama tankının içindeki ısı tabakalaşmasının geliştirilmesi gerektiği ön görülmektedir. Tabakalaşma verimi, sadece ısı enerji depolamaya bağlı değildir; ayrıca tankın sıcaklık ve debisine bağlıdır. Çeşitli giriş tasarımları geliştirmek, ısı tabakalaşmaya olumlu katkıda bulunacaktır. Tabakalaşmanın bozulmasını engellemenin en etkili yolu, tanka giren su jetine engel olmaktır.

Tabakalaşma verim hesaplamasında ekserji ölü hal sıcaklığına (T_o) bağlı değildir. Güneş enerji kolektörlerinde, karışım işlemlerinden kaynaklanan tabakalaşma bozulmasına, kolektör devresinden su girişi veya şebekeden soğuk su

girişi sebep olur. Sıcak su hacmi ne kadar fazla olursa ısı hat kalınlığı o kadar az olur (sıcak ve soğuk su arasındaki karışım o kadar az olur). Akümülatörün verim hesaplamasında ekserji veya entropi kullanarak aynı sonuç elde edilir. ısı tabakalaşmanın artması ile sistemin kullanımında, ısı performansın arttığı tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- Abdoly M.A., Rapp, D., (1982). Theoretical and Experimental Studies of Stratified Thermocline Storage of Hot Water, *Energy Conversion and Management*, **22**,275–285.
- Alizadeh S., (1999). An Experimental And Numerical Study of Thermal Stratification In a Horizontal Cylindrical Solar Storage Tank, *Solar Energy*, **66**, No.6, 409-421.
- Andersen E, Furbo S.,(1999). Thermal De-Stratification In Small Standard Solar Tanks Due to Mixing During Tapping, In Proceedings of the ISES solar world congress, 1197–206.
- Bahy Abdel Mesih, Janne Dragsted, (2007). Thermal Stratification Inlet Stratifiers, 10–17 October.
- Castell A, Medrano M, Solé M, Cabeza LF, (2010). Dimensionless numbers used to characterize stratification in water tanks for discharging at low flow rates. *Renewable Energy*, **35**, 2192–2199.
- Chan A.M.C., Smereka, P.S., Giusti D. A, (1983). Numerical Study of Transient Mixed Convection Flows in a Thermal Storage Tank, Transactions of the ASME. *Journal of Solar Energy Engineering*, **105**, 246–253.
- Cónsul R., Rodríguez, I., Pérez-Segarra, CD, Soria, M., (2004). Virtual prototyping of storage tanks by means of three-dimensional CFD and heat transfer numerical simulations, *Solar Energy*, **77**, 179-191.
- Çengel A.,Y. ,Boles M.,A., (2011), An Engineering Approach Thermodynamic, Mc. Graw Hill, 985, USA.
- Darci L. Savicki, Horácio A. Vielmo, Arno Krenzinger, (2011). Three-Dimensional Analysis and Investigation of the Thermal and Hydrodynamic Behaviors of Cylindrical

- Storage Tanks, *Renewable Energy*, **36**, 1364-1373.
- Duffie JA, Beckman WA., (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3rd ed, Madison,US,John Wiley&Son.
- Eames P. C. , Norton B., (1998). The effect of tank geometry on thermally stratified sensible heat storage subject to low Reynolds number flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **41**, No.14, 2131-2142.
- Farrington R. B., Bingham, C. E., (1987). Testing and Analysis of Load –Side Immersed Heat Exchanger For Solar Domestic Hot Water Systems, Technical report, Solar Energy Research Institute, USA.
- Fernandez-Seara, Uhiia FJ, Sieres J., (2007), Experimental Analysis of a Domestic Electric Hot Water Storage Tank. Part I. Static Mode of Operation, *Applied Thermal Engineering*, **27**, 129–136.
- Fernandez-Seara J, Uhiia FJ, Sieres J. (2007). Experimental Analysis of a Domestic Electric Hot Water Storage Tank Part II: Dynamic Mode Of Operation, *Applied Thermal Engineering*, **27**,137–144.
- Ghaddar NK., (1994). Stratified Storage Tank Influence on Performance of Solar Water Heating System Tested in Beirut, *Renewable Energy*, **4(8)**, 911–25.
- Han YM, Wang RZ, Dai YJ, (2009). Thermal Stratification Within the Water Tank Reviews, *Renewable and Sustainable Energy* **13(5)**,1014–26.
- Heat Exchangers in Solar Water Heating Systems, 64 (19-31).
- Hollands K.G.T., (1989). A Review Of Low-Flow,Stratified-Tank Solar Water Heating Systems, *Solar Energy*, **43**, 97–105.
- Huhn R.,Beitrag zur, (2007). Thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energium wandlungsketten. Ph.D. Thesis, Technische Universitat Dresden, Germany, p. 21 (German).
- Ibrahim Dinçer, Marc A. R., (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, 1sted., John wiley&sons.
- Koray A., (2006). Güneş Enerjisinin Depolanması ve Isıl Analizi, yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü.
- K.R. Rajagopal, M. Ruzicka, A.R. Srinivasa, (1996). On the Oberbeck-Boussinesq approximation Math. *Models Methods Appl. Sci.*, **6**, 1157-1167.
- Lavan Z.,Thompson J., (1977). Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks,*Solar Energy*,**19**, 519–524.
- Louise J.Shah, (2005). Smart Solar Tanks for Small Solar Domestic hot water Systems, *Solar Energy*, **78**, 269–279.
- Marc a. Rosen, The Exergy of Stratified Thermal Energy Storages, *Solar Energy*, **71**, No. 3, 173–185, 2001.
- Mevlüt Arslan, (2006). Su İle Isıl Enerji Depolanmasında Sıcaklık Tabakalaşmasının Sayısal Ve Deneysel Olarak Araştırılması, doktora tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Mart.
- Michel Y. Haller, Cynthia A. Cruickshank, Wolfgang Streicher, Simon Furbo, (2009). Methods to Determine Stratification Efficiency of Thermal Energy Storage Processes and Theoretical Comparison, *Solar Energy Review*,**83** ,pp1847–1860.
- Michel Y. Haller, Eshagh Yazdandshenas, Elsa Andersen, Simon Furbo, (2010). A Method To Determine Stratification Efficiency of Thermal Energy Storage Processes Independently From Storage Heat Losses, *Solar Energy*, **84**, pp 997–1007.
- Morrison G., Nasr A., Behnia M., Rosengarten G., (1998). Analysis of Horizontal Mantle
- Nehir Tokgöz, (2008). İçerisine Engel Yerleştirilmiş Mantolu Sıcak Su Tanklarında Sıcaklık Tabakalaşmasının Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ocak
- Nelson J.E.B., Balakrishnan, A.R., Murthy, S.S, (1999). Experiments on Stratified Chilled Water Tanks, *International Journal of Refrigeration*, **22**, 216–234.
- Patrice Pinel, Cynthia A. Cruickshank, A. Wills, A, (2011). Review of Available Methods for Seasonal Storage of Solar Thermal Energy in Residential Applications, *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, **15**, 3341–3359.
- Peiwen Li, Jon Van Lew, Wafaa Karaki, Cholik Chan, Jake Stephens, Qiuwang Wang, (2011). Generalized Charts of Energy Storage Effectiveness for Thermocline Heat Storage Tank Design And Calibration, *Solar Energy*, **85**, pp2130–2143.
- P.Geczy-Vig, I. Farkas, (2010). Neural Network Modelling of Thermal Stratification in a Solar DHW Storage, *Solar Energy*, **84**.
- Roman Spura, Dusan Fiala, Dusan Nevrala , Doug Probert, (2006). Performances of Modern Domestic Hot-Water Stores, *Applied Energy*, **83**, 893–910.
- Shah L. J., (2000). Heat Transfer Correlations for Vertical Mantle Heat Exchangers, *Solar Energy*, **69**, 157-171.
- Simon Furbo, Elsa Andersen, Soren Knudsen, Niels Kristian Vejen, (2005). Smart Solar Tanks For Small Solar Domestic Hot Water Systems, *Solar Energy*, **78**, 269–279.
- Ulrike Jordan, Furbo S., (2005). Thermal Stratification in Small Solar Domestic Storage Tanks Caused by Draw-Offs, *Solar Energy*, **78** , 291–300.
- Van Koppen CWJ, Thomas JPX, Veltkamp WB, (1979). The Actual Benefits of Thermally Stratified Storage in a Small and Medium Size Solar System, In Proceedings of ISES solar World congress, 579–580, Atlanta, USA.
- Yoo H., Kim C.J. and Kim C., (1998). Approximate Analytical Solutions for Stratified Thermal Storage Under Variable Inlet Temperature, *Solar Energy*, **66**, 47–56.
- Zachar A., Farkas, I. and Szlivka, F., (2003). Numerical Analyses of The Impact Plates for Thermal Stratification Inside a Storage Tank With Upper and Lower Inlet Flows, *Solar Energy*, **74**, 287-302.
- Zurigat Y.H., Liche, P.R., Ghajar, A.J., (1990). Influence Of The Inlet Geometry On Mixing In Thermocline Thermal Energy Storage, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **34**,115–125.
- Zurigat Y.H., Ghajar, A.J. Chapter 6, (2002). Heat Transfer and Stratification in Sensible Heat Storage. Dincer I., Rosen, M. , *Thermal Energy Storage –Systems and Applications*. John Wiley & Sons, New York, pp. 264–270.