

GELENEKSEL KEMALİYE EVLERİNİN DÜZ TOPRAK DAMLARININ DRENAJ DAVRANIŞI VE KAPİLER BARIYER ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF DRAINAGE BEHAVIOUR AND CAPILLARY BARRIER EFFECT OF EARTHEN FLAT ROOFS OF TRADITIONAL KEMALİYE HOUSES

Ayşenur ASLAN FİDAN¹, Mehmet Muhit BERİLGİN²

ÖZET

Kapiler bariyer, iri ve ince daneli tabakaların üst üste gelmesiyle oluşan bir örtü sistemidir. Son yıllarda özellikle katı atık depolama sahalarında kullanımı veya yağış nedeniyle sızmanın engellenerek çevre dayanıklılığının artırılması amacıyla kullanımı oldukça dikkat çekmektedir. Kapiler bariyeri oluşturan görece ince ve iri daneli tabakaların dane boyutlarındaki farklılık, bu tabakaların zemin-su karakteristik eğrisi, hidrolik iletkenlik eğrisi ve permeabilite katsayısı gibi hidrolik özelliklerinin farklı olmasını sağlar. Bu nedenle suyun ince daneli zeminden iri daneli zemine düşey hareketi sınırlanır ve yüzeyden sızan su, tabakaların ara yüzünde yön değiştirir. Kapiler bariyer, eski ve geleneksel bir teknik olmamakla birlikte, Erzincan ilinin Kemalîye ilçesindeki koruma altında olan tarihi Kemalîye evlerinin yüzyıllardır varlığını sürdüren toprak damlarında kapiler bariyer etkisinin gözlemlenebileceği bir tasarım ilgi çekmektedir. Bu çalışmada geleneksel Kemalîye evlerinin toprak damlarının yağışın etkisi altındaki drenaj davranışı ve kapiler bariyer etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, geleneksel Kemalîye evlerinin toprak damlarının inşasında kullanılan iki yerel zemin temin edilerek, damın yapım tekniği göz önünde bulundurularak bir boyutlu sızma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları geri analizlerde kullanılarak toprak dam sayısal olarak modellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Doğgun olmayan koşullarda kararsız akım, Düz toprak dam, Kapiler bariyer, Kemalîye evleri, Yağış*

ABSTRACT

The capillary barrier is a cover system formed by the overlapping of coarse and fine-grained layers. In recent years, its utilization, particularly in solid waste landfills or to enhance slope stability by preventing infiltration due to precipitation, has gained significant attention. The difference in grain size between the relatively finer and coarser layers that constitute the capillary barrier leads to distinct hydraulic characteristics, including the soil-water characteristic curve, hydraulic conductivity curve, and permeability coefficient of these layers. As a result, the vertical movement of water from the finer layer to the coarser one is restricted, and water infiltrated into the surface diverted at the interface of the layers. Although not an old or traditional technique, the design that may exhibit the capillary barrier effect on the earthen roofs of historically preserved Kemalîye houses, which have existed for centuries in the Kemalîye district of Erzincan Province, is drawing attention. In this study, the drainage behavior under the influence of rainfall and the capillary barrier effect of the earthen roofs of traditional Kemalîye houses were investigated. Two local soil used in the construction of the earth roofs of traditional Kemalîye houses were obtained, and one-dimensional infiltration experiments were conducted considering the roof construction technique. The results of the experiments were utilized in back analysis, and the earthen roof was numerically modeled.

¹ Arş Gör., YTÜ, aslana@yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., YTÜ, berilgen@yildiz.edu.tr

Keywords: *Capillary barrier, Earthen flat roof, Kemaliye houses, Unsaturated transient seepage analysis, Precipitation*

1. KAPİLER BARIYER

Doğun olmayan koşullarda, nispeten daha ince daneli bir zemin tabakası, daha iri daneli bir tabakanın üstünde yer aldığı kapiler bariyer etkisi ortaya çıkmaktadır (Abdolahzadeh vd. 2011, , Aubertin vd. 2006). Dane boyutları arasındaki fark, zemin-su karakteristik eğrisi, hidrolik iletkenlik eğrisi ve permeabilite katsayısı gibi zeminin hidrolik özelliklerinin farklılaşmasına yol açar. İri daneli zeminler, yüksek matrik emme aralığında, ince daneli zeminlere göre daha düşük hidrolik iletkenliğe sahiptir (Yang ve diğ. 2004). Bu nedenle, kapiler bariyer, suyun ince daneli tabakadan iri daneli tabakaya dikey yönde hareketini kısıtlar ve/veya suyu tabakaların ara yüzeyinde kapiler kuvvetlerle yönlendirir (Ho ve Webb 1998, Khire ve diğ. 2000, Aubertin ve diğ. 2006). Bu nedenle, iri daneli bir zemin tabakasıyla çevrili olan zemin tabakası, serbest drenajlı aynı zemin tabakasına göre daha fazla su depolama kapasitesine sahiptir (Stormont 1996).

Ancak kapiler bariyer etkisi geçicidir; sızma başladığında üst tabaka doymuşlaşmaya başlar ve ara yüzeydeki matrik emme giderek azalır. İki zemin tabakasının ara yüzeyindeki emme, 'kırılma yükü'ne (breakthrough head) ulaştığında yenilme meydana gelir. Bu yenilme, sızma hızı ve ince tabakalı zeminin matrik emme profilinden bağımsız olarak, her koşulda, kırılma yüküne ulaştığında meydana gelmektedir. Kapiler bariyer etkisi, dane boyutu ve homojenlik arttıkça artar (Stormont ve Anderson 1999). Khire ve diğ. (2000), iri daneli tabaka kalınlığının ihmal edilebilir olduğunu belirtse de, Qian ve diğ. (2010), kapiler bariyer etkisinin iri daneli tabakanın kalınlığı ile doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamıştır. İri daneli tabaka olarak düşük su matrik emmesine sahip zeminler kullanıldığında, kapiler bariyer etkisi artar (Yang ve diğ. 2004). İri daneli tabakanın özellikleri, ince daneli tabakanın su depolama kapasitesini, sızma hızını ve sistemin sızıntısını kontrol eder (Stormont ve Anderson 1999).

Kapiler bariyer eski ve geleneksel bir teknik olmamakla birlikte Erzincan ilinin Kemaliye ilçesindeki koruma altında olan tarihi Kemaliye evlerinin yüzyıllardır varlığını sürdüren toprak damlarında kapiler bariyer etkisi gösterebilecek bir tasarım dikkat çekmektedir. Bu toprak damların işlevini gerçekleştirebilmesi için yağış sırasında ve/veya sonrasında sıkıştırılmasını gerektirmektedir. Sıkıştırma işlevi oldukça zahmetli olduğundan, bu durum toprak damların terkedilmesine ve mevcutların çatı ile kapatılmasına yol açmıştır. Geleneksel Kemaliye evlerinin toprak damlı olarak varlığını sürdürebilmesi için bu damların drenaj davranışının ve mevcutsa kapiler bariyer özelliğinin iyileştirilmesine ihtiyaç olduğu düşünülerek deneysel ve nümerik modeller ile dam üzerinde aletsel gözlemlere dayalı bir araştırma projesi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında geleneksel Kemaliye evlerinin toprak damının yağışta drenaj davranışı ve kapiler bariyer özelliği incelenmiştir. Bu kapsamda geleneksel bir Kemaliye evlerinin inşasında kullanılan yerel zeminler temin edilerek, elek analizi, kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlık, kompaksiyon ve permeabilite deneyleri yapılmış ve bu deneylerden elde olunan bilgilere dayalı olarak yöreden sağlanan zemin numuneleri ile 1D model sızma deneyleri yapılmış ve bunların sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden ve gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen bulgular ışığında, geleneksel Kemaliye evlerinin toprak damlarının, tabakaların başlangıç koşullarına bağlı olarak kapiler bariyer davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

2. TARİHİ KEMALİYE EVLERİ VE DÜZ TOPRAK DAMLARI

Kemaliye evleri, taş, ahşap ve kerpicingin bir arada kullanıldığı özgün karma yapı sistemiyle Anadolu mimarisinin istisnai örnekleri arasında yer almaktadır. Bu evlerde kullanılan inşaat tekniği, ana kat seviyesine kadar yığma moloz taş tekniği, ahşap kirişler ve çamur harcı kullanımını içermektedir. Ayrıca, ana kat ve çatı katlarında "hımış" yapım tekniği kullanılarak kerpiçle doldurulmuş ahşap bir iskelet kullanılmıştır. Ana kattaki kerpiç duvarların dış yüzeyi ince ahşap kalaslarla kaplanmıştır (Şekil 1.) (Korkmaz ve Akdemir 2015, Alper 1990, Torbaoğlu 2010). Bu tarihi evlerin düz toprak damları, yerel topraklar, rıhtım (nehir) taşları, ahşaplar ve özgün yapım tekniği kullanılarak inşa edilmiştir.

Geleneksel yapım yöntemi, yerel bir usta ile küçük bir dam prototipi hazırlanarak elde edilmiştir. Bu yapım yönteminde, yaşkuru adı verilen daha iri ve kohezif olmayan zemin, bulamaç halinde ilk katman olarak 10-15

cm kalınlığında yerleştirilir ve 1-2 gün kuruması beklenir. 'Gavcin' adı verilen daha ince kohezyonlu bir zemin, aynı kalınlıkta kuru durumda 'Yaşkuru' üzerine yerleştirilir. Daha sonra zemin tabakaları 30 cm çapında, 60 cm uzunluğunda ve 80-100 kg ağırlığında silindirik taşlarla sıkıştırılır. Silindirik taş üst katman üzerinde birkaç kez yuvarlanır ve toprak dam sert ve sıkı hale gelir. Bu işlemden sonra gavcin tabakası ıslatılır ve 3-4 cm çapında rıhtım taşları yerleştirilir. Son olarak, toprak dam silindirik taş ile tekrar sıkıştırılır (Şekil 1).



Şekil 1. Tarihi Kemaliye evi ve toprak damının prototipi

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada killi kum ve siltli kum olmak üzere iki tür yerel zemin kullanılmıştır. Üst (ince) katman olarak kullanılan killi kum mavi-gri renkte ve kohezyonlu iken, alt (kaba) katman olarak kullanılan siltli kum kahverengi renkte ve kohezyonsuzdur. Geleneksel toprak damın zemin tabakalarının özelliklerini belirlemek amacıyla Kemaliye Bölgesi'nden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yerel malzemelerin zemin özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Killi ve siltli kum zeminlerin kuruma zemin-su karakteristik eğrileri (SWCC) Basınç plakası deneyi ile elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen hacimsel su içeriği ve matrik emme verileri van Genuchten (1980) denklemi kullanılarak zemin su karakteristik eğrileri elde edilmiştir (Şekil 6). Elde edilen eğri parametreleri (Tablo 2)'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Özgün zeminlerin özellikler

	Gavcin	Yaşkuru
Çakıl (%)	4	2
Kum (%)	70	89
İnce dane (%)	26	9
LikitLimit	28	-
Plastik Limit	20	-
Plastisite İndeksi	8	-
Özgül Ağırlık	2.73	2.7
Zemin sınıfı (USCS)	SC	SM
Permeabilite katsayısı (m/sec)	4.14×10^{-8} - 1.85×10^{-7}	4.01×10^{-5}

Tablo 2. Özgün zeminlerin zemin-su karakteristik eğrilerinin parametreleri

Zemin	θ_s	θ_r	α (kPa ⁻¹)	n
SC (e=0.48)	0.32	0.1	0.6941	1.1341
SC (e=0.40)	0.29	0.1	0.4273	1.1482
SC (e=0.30)	0.23	0.1	0.2873	1.1523
SM	0.44	0.08	0.9140	1.3229

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SAYISAL MODEL

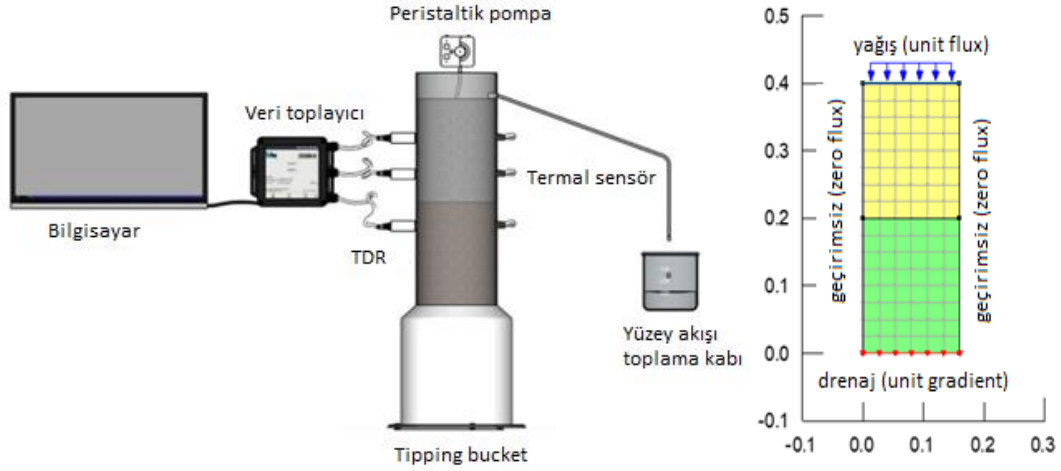
Geleneksel Kemaliye evlerinin toprak damının kapiler bariyer etkisine sahip olup olmadığını belirlemek için bir boyutlu laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu model deneylerde, özgün yapım yöntemi dikkate alınarak, yerel zeminler pleksiglas tüpler içinde tabakalar halinde sıkıştırılmış ve ardından yağış

uygulanmıştır (Tablo 3). Deney düzeneği üç ana bileşenden oluşmaktadır: a. zemin kolonu: 16 cm çapında silindirik şeffaf pleksiglas tüp içinde sıkıştırılmış, b. yağış simülatörü: sabit debi elde etmek için peristaltik pompa. c. ölçüm cihazları: TDR, termal sensörler, tipping bucket, veri kaydedici ve bilgisayar. İki tabakalı deney düzeneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Deneyler sırasında hacimsel su muhtevasının zamana ve derinliğe bağlı değişimi incelenmiştir. Ayrıca yüzey akışı, tabakalarda depolanan su miktarı ve sızıntı miktarı zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler dikkate alınarak belirlenen sızma hızı sayısal modelde kullanılmıştır.

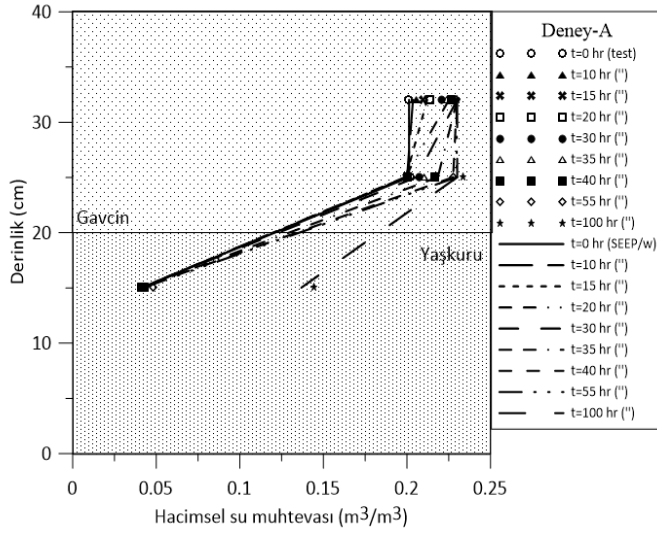
Tablo 3. 1B deneylerin başlangıç koşulları

Deney Adı	Kuru yoğunluk (Mg/m ³)		Başlangıç su muhtevası (%)		Sızma hızı (mm/hr)
	Gavcin	Yaskuru	Gavcin	Yaskuru	
A	2.09	1.5	9	1	3
B	1.95	1.5	12	1	3
C	2.00	1.5	7.5	1	3

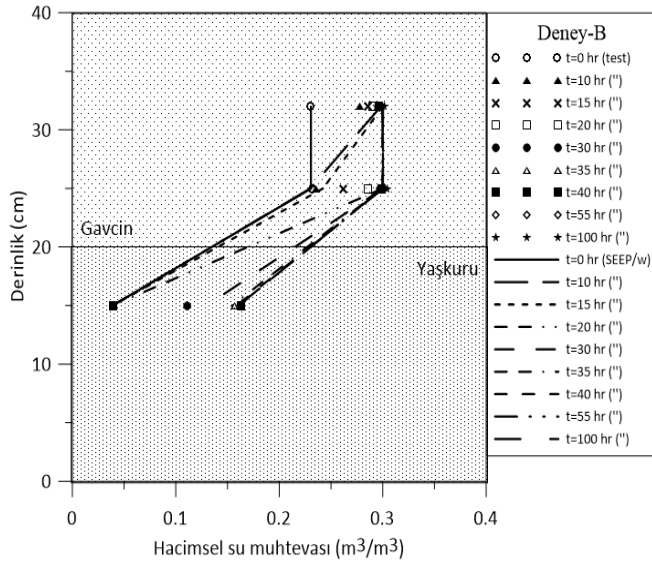
Geleneksel Kemaliye evlerinin toprak damlarının drenaj davranışını modellemek için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bu sayısal analizlerde SEEP/w (GEO-SLOPE International, Ltd.) yazılımı kullanılmıştır. Sayısal analizler, 1B sızma deneyleri kullanılarak geri analizlerle kalibre edilerek gerçekleştirilmiştir. Model geometrisi ve sınır koşulları, laboratuvar deney modeli ve ölçümler dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil 3).



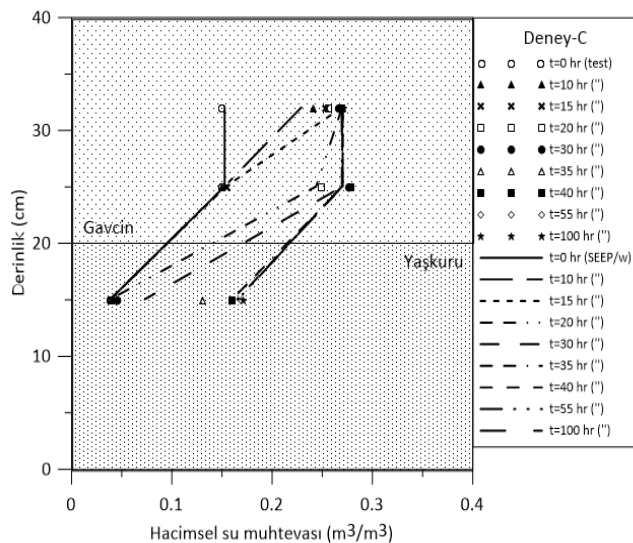
Şekil 2. 1B zemin kolonu deneylerinin laboratuvar modeli ve sonlu elemanlar modeli



Şekil 3. Hacimsel su muhtevasının zamanla ve derinlikle değişimi (Deney A)



Şekil 4. Hacimsel su muhtevasının zamanla ve derinlikle değişimi (Deney B)



Deney A'da gavcin içerisinde yüzeyden 8 ve 15. cm derinliklere yerleştirilen TDR-1 ve TDR-2 sensörlerinde yaklaşık 10 saatin sonunda homojen bir şekilde hacimsel su muhtevasında artış gözlemlenmiştir. Yaşkuru içerisinde ve arayüzeyden 5 cm derinlikte bulunan TDR-3 sensöründe bu artış 55 saat sonunda ve ani bir şekilde meydana gelmiştir. Deney 100 saatin sonunda sızıntı gözlemlenmeden sonlandırılmıştır. Yapılan sayısal model, deney ölçümleriyle oldukça uyumlu sonuçlar göstermektedir (Şekil 3).

B deneyinde, TDR1 ve TDR2 ölçümleri yaklaşık 3. ve 10. saatlerde artmıştır. Ayrıca arayüzeyin üzerinde bulunan TDR-2 sensörünün hacimsel su muhtevası ölçümleri arayüzeyde daha fazla su muhtevası depolandığını göstermektedir. Yaşkuru içerisinde arayüzeye 5 cm mesafede bulunan TDR-3'te hacimsel su muhtevası 27. saat sonunda artmaya başlamıştır. Buna göre suyun alt tabakaya sızmasının daha fazla zaman aldığı görülmektedir. Zemin kolonunun tabanından 52. saatte sızıntı başlamıştır. Sayısal model sonuçlarının da ölçüm noktalarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

C deneyinde Gavcin optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış ve TDR-1 sensöründe yaklaşık 5 saatin sonunda su muhtevası artışı gözlemlenmiştir. Arayüzey üzerinde Gavcin içerisinde bulunan TDR-2'de su muhtevası 16. Saatte artarken arayüzeyin hemen altında su muhtevası artışı 30 saat sonunda gözlemlenmiştir. Ayrıca arayüzeyin üzerinde daha fazla su depolandığı hacimsel su muhtevası ölçümlerinden görülmektedir. Yapılan sayısal analizde sensör okumalarıyla oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5. Hacimsel su muhtevasının zamanla ve derinlikle
değişimi (Deney C)

5. SONUÇLAR

Araştırma, tarihi toprak dam üzerinde kapiler bariyer etkisinin varlığını ortaya koymuştur. Hacimsel su içeriği ölçümleri testler sırasında suyun başlangıç koşullarına bağlı olarak değişen sürelerde arayüzeyde tutulduğunu göstermektedir. Ayrıca hacimsel su muhtelarındaki değişim üst katmanda arayüze yakın bölgede daha fazla su tutulduğunu doğrulamıştır.

Üst tabakadaki zeminin permeabilitesi, sızma hızını permeabilitesine indirgeyerek bariyerin içine sızmayı kısıtlamaktadır. Sonuç olarak, sızma hızı azalmakta ve buna bağlı olarak kapiler bariyer etkisi artmaktadır. Yüksek sıkıştırılmış üst tabaka homojen bir şekilde doymun hale gelirken sıkıştırma enerjisi veya su içeriği azaldıkça üst tabakada bir ıslanma cephesi gözlenmiştir. Öte yandan, üst tabakanın kuru tarafta sıkıştırılması bariyerin kırılma süresini arttırmakta ve gävcinde daha fazla su depolanmaktadır.

Zeminler, hidrolik iletkenlik eğrisini tahmin etmek ve doymun olmayan koşullarda akımı modellemek için temel parametre olan zemin su karakteristik eğrisi ile ilgili histeretik bir davranışa sahiptir. Bu nedenle, 1B deney sonuçları kullanılarak yapılan geri analizlerle eğriler kalibre edilmiştir. Sayısal sonuçlara göre, hacimsel su içeriğinin zamanla değişimi laboratuvar testleriyle benzerlik göstermekte ve bariyerde kırılma aynı zamanda gerçekleşmektedir. Bu durum sayısal olarak kapiler bariyer etkisini gözlemlemek için kuruma eğrilerinin kalibrasyonunun gerekliliğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 217M561 numaralı "Kemaliye Evlerinin Geleneksel Düz Toprak Damlarının Korunması ve Rehabilitasyonu İçin Çözüm Önerileri" araştırma projesi ile desteklenmektedir. Yazarlar, bu çalışmada sunulan laboratuvar deneyleri sırasında verdiği destek için yüksek lisans öğrencisi Fırat SARGIN'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Abdolahzadeh, A. M., Vachon B. L., and Cabral A. R. (2011). "Assessment of the Design of an Experimental Cover with Capillary Barrier Effect Using 4 Years of Field Data", Geotechnical and Geological Engineering, Vol 29 (5): 783–802. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9417-x>.
- Alper, B. (1990), "Kemaliye(Eğın) yerleşme dokusu ve evleri üzerine bir araştırma." Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Martin, V., Apithy, S., Bussière, B., Molson, J., Chapuis, R.P. ve Maqsoud, A. (2006), "An Investigation of Factors That Influence the Water Diversion Capacity of Inclined Covers with Capillary Barrier Effects", Unsaturated Soils 2006. [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)47](https://doi.org/10.1061/40802(189)47).
- Ho, C. K., ve. Webb S. W. (1998), "Capillary Barrier Performance in Heterogeneous Porous Media", Water Resources Research, Vol 34 (4): 603–9. <https://doi.org/10.1029/98wr00217>.
- Khire, Milind V., Craig H. Benson, and Peter J. Bosscher. 2000. "Capillary Barriers: Design Variables and Water Balance." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126 (8): 695–708.
- Korkmaz, E. ve Akdemir, M. Z. (2015), "Evaluation of Conservation Interventions that Use Local Knowledge and Experience at Traditional Houses Located in Kemaliye and Surrounding Settlements", MEGARON, Vol 10(4):494-502 [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2000\)126:8\(695\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:8(695)).

- Qian, T., Huo L., ve Zhao D. (2009), "Laboratory Investigation into Factors Affecting Performance of Capillary Barrier System in Unsaturated Soil", Water, Air, and Soil Pollution, Vol 206 (1–4): 295–306. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0106-9>.
- Stormont, J. C. (1996), "The Effectiveness of Two Capillary Barriers on a 10% Slope", Geotechnical and Geological Engineering, Vol 14 (4): 243–67. <https://doi.org/10.1007/bf00421943>.
- Stormont, J. C. ve Anderson, C. E. (1999), "Capillary Barrier Effect from Underlying Coarser Soil Layer", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 125 (8): 641–48. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:8\(641\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:8(641)).
- Yang, H., Rahardjo H., Leong E. C, ve Fredlund D. G. (2004), "A Study of Infiltration on Three Sand Capillary Barriers.", Canadian Geotechnical Journal, Vol 41 (4): 629–43. <https://doi.org/10.1139/t04-021>.
- Torbaoğlu, E. (2010), "Özgün Yerleşimlerin Sürekliliği Üzerine Bir Araştırma: Kemaliye Örneği". Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- van Genuchten M.T.(1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Science Society of America Journal, Vol 44:892–898. [doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x](https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x)