

## ÇEŞİTLİ KATKILAR VARLIĞINDA BENTONİTİN ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

### AN INVESTIGATION OF THE SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVES OF BENTONITE WITH DIFFERENT ADDITIVES

Yusuf BATUGE<sup>1</sup>, Şükran Gizem ALPAYDIN<sup>2</sup>, Yeliz YÜKSELEN-AKSOY<sup>3</sup>

#### ÖZET

Zeminlerin su-zemin karakteristiği mühendislik özelliklerini etkileyen en önemli özelliklerden birisidir. Bu çalışmada yüksek oranda sıkıştırılmış bentonit kilinin çeşitli katkı varlığında su emme basıncı (suction) buhar denge yöntemi (VET) ile belirlenmiştir. VET yöntemi uygulanırken deney süresini kısaltmak amacıyla deney sisteminde bir modifikasyon yapılmıştır. Ayrıca bentonitin su emme kapasitesi altı farklı katkı malzemesiyle hazırlanan numuneler ile belirlenmiştir. Kullanılan katkı malzemeleri sırasıyla bakır cürufu, cam elyaf, Etibor-48, ferrokrom, kolemanit ve üleksit'tir. Tüm katkılar bentonitin emme basıncı değerini azaltarak negatif bir etki göstermiştir. Fakat Etibor-48, ferrokrom ve kolemanit katkıları katkısız bentonitin emme basıncı değerine yakın bir değer vermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bentonit, Buhar Denge Yöntemi (VET), Su Tutma Kapasitesi.

#### ABSTRACT

In the present study, the water retention capacity (suction) of highly compacted bentonite clay was determined by the vapor equilibrium method (VET). While applying the VET method, a modification was made to the experimental system in order to shorten the experimental period. In addition, in order to improve the water retention capacity of bentonite, the samples were prepared with six different additives. The additives used are copper slag, glass fiber, Etibor-48, ferro chromium, colemanite and ulexite, respectively. All additives showed a negative effect by reducing the suction pressure of bentonite. However, additives of Etibor-48, ferrochrome and colemanite gave a value close to the suction pressure value of additive-free bentonite.

**Keywords:** Bentonite, Vapor Equilibrium Technique (VET), Water Retention Capacity.

#### 1. GİRİŞ

Zeminlerin su emme kapasitesinin (suction) çeşitli koşullar altında belirlenmesi gün geçtikçe daha çok önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle doymun olmayan zeminlerin davranışını anlamak için su emme kapasitesi geoteknik mühendisliği açısından oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Zeminlerde su emme kapasitesi zemindeki negatif boşluk suyu basıncını ölçmek için zeminin yer çekimi kuvvetine karşı su tutma potansiyelini ifade eden bir kavramdır. Genellikle " $\psi$ ", "u" veya "s" ile gösterilir ve birimi gerilme cinsinden verilmektedir. Zeminlerde emme basıncı kavramı suya doymun olmayan zeminler için geçerlidir. Suya doymun bir zeminde

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, [batugee.yusuf@gmail.com](mailto:batugee.yusuf@gmail.com)  
(Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Doktora Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, [gizem.alpaydin@gmail.com](mailto:gizem.alpaydin@gmail.com)

<sup>3</sup> Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [yeliz.yukselen@deu.edu.tr](mailto:yeliz.yukselen@deu.edu.tr)

bütün boşluklar su ile dolduğu için herhangi bir negatif boşluk suyu basıncından bahsedilemez. Emme basıncı için üç bileşen bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla kapilarite (matrik suction), mineral yüzeyindeki su adsorpsiyonu ve ozmotik basınçlardır (Richards, 1974). Zeminlerin emme basıncını belirlerken sadece matrik ve ozmotik bileşenler dikkate alınmaktadır. Matrik emme basıncı non-plastik zeminlerde önemli iken, ozmotik emme basıncı yüksek plastisiteli killerde önemlidir (Blatz vd., 2009). Bir zeminin toplam emme basıncı değeri ( $\psi$ ) bağıl neme bağlıdır ve değeri aşağıdaki Denklem 1 ile belirlenmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$\psi = \frac{-RT}{M_w \left(\frac{1}{\rho_w}\right)} * \ln (RH) \quad (1)$$

Denklemde R evrensel gaz sabitini (8.31432 J/molK), T kelvin cinsinden mutlak ölçülen sıcaklığı,  $M_w$  suyun moleküler ağırlığını (18.016 kg/kmol),  $\rho_w$  suyun yoğunluğunu ve RH ise ölçülen bağıl nemi ifade etmektedir (Blatz vd., 2009). Bağıl nemi ve bu sayede zemin numunelerinin emme basıncı değerlerini ölçmek için literatürde yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla buhar denge yöntemi (VET) ve sıvı faz denge yöntemleridir. VET tekniği basitçe sabit kütleli kapalı bir sistemdeki bağıl nem buhar dengesi ile sağlanır. Sistemde bağıl nemi ölçülebilen doymun veya kısmen doymun tuz veya asit çözeltileri zemin numunesiyle birlikte kapalı sistem içindedir. Sıvı ve gaz fazındaki net su değişimi sistemin üst boşluğunda bağıl nem dengeye gelene kadar devam eder. Zeminin su tutma özelliği sayesinde bu su değişimi sırasında numune hidrate olur ve su içeriği artar ve bir süre sonra zemin ile çözelti arasındaki su değişimi sonlanır. Bahsedilen olaylar doymun durumda farklı tuz veya asit çözeltileriyle (veya aynı tuzun farklı konsantrasyonda hazırlanmış çözeltileriyle) tekrarlanarak su içeriği ve emme basıncı arasındaki ilişki bulunmuş olmaktadır. Fakat bu yöntem oldukça yavaştır ve sistemin bir çözeltide dengeye gelmesi killi bir zemin için üç haftadan uzun sürebilmektedir (Romero, 2001).

Bentonit kili düşük hidrolik iletkenliği ve yüksek şişme kapasitesiyle atık depolama alanlarında kontaminasyonu önlemek için tampon malzeme olarak kullanılmaktadır (Komine ve Ogata, 1999). Atık depolama alanlarından biri olan nükleer atık depolama alanları nükleer atıkların zeminin 500-1000 metre altında uzun yıllar boyunca saklanmasını amaçlamaktadır. Tampon bölgede yüksek kuru yoğunlukta sıkıştırılmış şekilde kullanılan bentonit bariyerleri hem nükleer atıkların yaydığı sıcaklıktan etkilenmektedir hem de yer altı suyu ile kendi bünyesine su çekme eğilimindedir. Bentonitin emme basıncı değeri genel olarak kullanılan bentonitin montmorillonit oranı, dane boyutu, iyon kapasitesi gibi özelliklerine göre farklılık gösterir. Ayrıca deneylerde kullanılan kuru yoğunluk değeri, boşluk oranı, başlangıç su içeriği ve deneysel farklılıklar nedeniyle literatürde yapılan çalışmalarda bentonitin maksimum emme basıncı değerleri çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Sıkıştırılmış bentonitin hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda emme basıncı özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Delage vd., 1998; Villar ve Lloret, 2004; Tang ve Cui, 2005; Ye vd., 2010; Lee vd., 2011). Literatürde genel olarak sıcaklık arttıkça bentonitin emme basıncı değerlerinde azalma ve kuru yoğunluk arttıkça emme basıncı değerinde bir artış gözlemlenmiştir. Literatürde bentonitin su tutma davranışı hakkında birçok araştırma bulunmasına rağmen bentonitin katkı malzemeleriyle su tutma kapasitesinin ve böylece hidrolik iletkenliğinin iyileştirilmesi hakkında daha çok çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bakır cürufu bakır üretimi sırasında meydana gelen bir atık malzemedir. İçerdiği yüksek silis, alumina ve demir oksit mineralleri sayesinde yüksek puzolanik özellik gösterir. Mineralojik ve fiziksel özelliklerinden dolayı inşaat uygulamalarında zemin iyileştirme ve çimento üretimi gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Cam elyaf, camın ince lifler veya iplikçikler halindeki formuna verilen bir isimdir. Yüksek mukavemetiyle, hafif oluşuyla ve ayrıca yüksek korozyon direnci sayesinde güçlendirme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ferrokrom malzemesi, krom ve demir elementlerini içeren yüksek fırınlarda ve elektrik ark ocaklarında üretilen bir alaşımdır. Yüksek korozyon direnci ve mukavemeti, ayrıca düşük termal genleşme katsayısı endüstride yaygın olarak kullanımını sağlamaktadır. Bor doğal bir bileşiktir ve farklı oranlarda bor oksit içerir (Özkan vd., 1997). Kolemanit, üleksit, tinkal ve Etibor-48 endüstride yaygın olarak kullanılan bor mineralleridir. Bor mineralleri, sıcaklığa karşı direnci ve düşük termal genleşme özellikleri nedeniyle katkı malzemesi olarak kullanılabilirler. Bu çalışma kapsamında, sıkıştırılmış bentonitin VET yöntemiyle su tutma

davranışı araştırılmıştır. Ayrıca bentonitin emme basıncı değerinin iyileştirilmesi amacıyla bakır cürufu, cam elyaf, Etibor-48, ferrokrom, kolemanit ve üleksit gibi farklı katkı malzemeleri kullanılmıştır.

## 2. Materyaller ve Yöntem

### 2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan malzemeler kalsiyum bentonit, bakır cürufu, ferrokrom, cam elyaf, kolemanit, Etibor-48 ve üleksittir. Cam elyaf hariç diğer malzemeler bentonitin kuru ağırlığınca %20 oranında, cam elyaf ise %1 oranında eklenmiştir. Cam elyaf hariç kullanılan diğer katkı malzemeleri toz formunda kullanılmıştır. Cam elyafın uzunluğu 3 mm çapı ise 13 µm'dur. Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

	Ca-Bentonit	Bakır Cürufu	Cam Elyaf	Etibor-48	Ferrokrom	Kolemanit	Üleksit
Özgül Ağırlık	2.6	3.4	2.6	1.82	7.5	2.44	1.98
Likit Limit (%)	270	-	-	-	-	37	33
Plastik Limit (%)	63	-	-	-	-	26	25
pH	9.13	-	6.8	9.25	7.3	9.26	9.13
-No.200 (%)	100	100	-	39.6	-	100	100
Doğal Su içeriği (%)	7.5	1.0	-	10.0	-	1.0	7.0

### 2.2. Yöntem

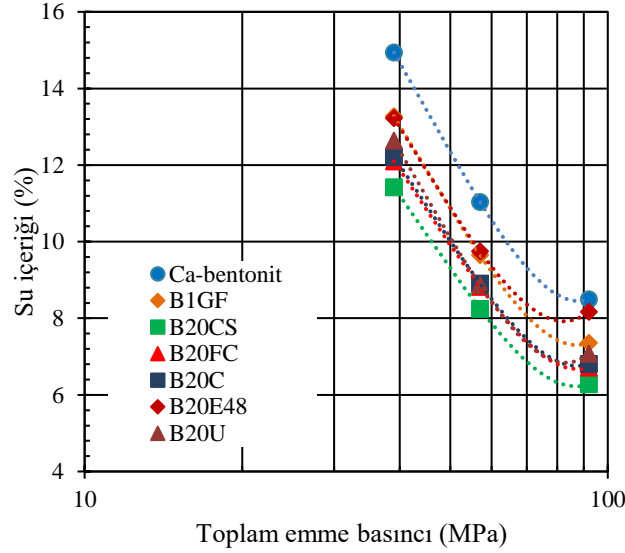
Karışımlar İngilizce isimlerinin baş harfleri ve kullanıldıkları oranlarla isimlendirilmiştir. Örneğin %20 üleksit katkılı bentonitin isimlendirmesi B20U olmaktadır. Numune hazırlama işlemi toz halindeki bentonitin diğer katkılarla belirlenen oranlarda homojen olarak karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler yaklaşık 1.4 Mg/m<sup>3</sup> kuru yoğunlukta olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi 3 cm çapında 1 cm yüksekliğindeki krom bir halka ve halkanın üstünde aynı çapta ve 3 cm yüksekliğinde bir krom yakanın içinde yapılmıştır. Numune daha sonra halkanın içerisinden çıkartılmıştır.

Zemin-su karakteristik eğrilerinin belirlenebilmesi için VET yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde gerekli bağıl nemi sağlamak amacıyla doymun tuz çözeltileri tercih edilmiştir. Deneylede yaygın olarak kullanılmakta olan desikatörün hacminin büyük olması ve bir desikatör içine birden fazla numune koyulması nedeniyle numune ve doymun tuz çözeltisi arasındaki denge süresi uzamaktadır. Bu süreyi kısaltmak için deney yönteminde bir modifikasyon yapılarak desikatör olarak 7.8 cm yüksekliğinde ve 5.2 cm çapında küçük cam kavanozlar kullanılmıştır. Kavanozdan herhangi bir hava girişi veya çıkışına izin verilmeyerek sabit nem değerinde kapalı bir sistem oluşturulmuştur. Böylece deney süresi önemli ölçüde azaltılmıştır. Doymun tuz çözeltilerinin bağıl nem ve buna bağlı emme basıncı değerleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir (Romero, 2001; Tang ve Cui, 2005). Bu düzensizliği ortadan kaldırmak için kavanozlar sabit sıcaklık (25 °C) ve bağıl nemde (%70) çalışan inkübatöre yerleştirilmiştir. Çalışmada numunenin hidrate olmasını (nemlenmesini) sağlamak amacıyla kullanılacak tuz çözeltileri düşükten yüksek bağıl nem değerine göre sırasıyla CaNO<sub>3</sub>, NaNO<sub>2</sub> ve NaCl olarak belirlenmiştir. Kapalı sistemdeki tuz çözeltisi ve numune arasında bağıl nem farkından kaynaklı buhar transferi gerçekleşmektedir. Bu transfer neticesinde numune hidrate olmakta, numunenin ve doymun tuz çözeltisinin bağıl nemleri eşitlenene kadar devam etmektedir. Ardından emme basıncı değeri daha düşük, bağıl nemi daha yüksek tuz çözeltisine geçilerek deney prosedürü devam ettirilmiştir. Bir çözeltideki dengenin sağlandığı periyodik olarak numunenin tartılarak 0.01 g'lık bir ağırlık değişiminden küçük bir değişim gözlemlenirken anlaşılmaktadır (Gao, 2017).

## 3. Bulgular ve Tartışma

Sıkıştırılmış bentonitin ve çeşitli katkılar (%1 cam elyaf, %20 bakır cürufu, %20 ferrokrom, %20 kolemanit, %20 Etibor-48 ve %20 üleksit) ilave edilerek oluşturulmuş bentonit karışımlarının zemin-su karakteristik eğrileri buhar denge tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Farklı emme basıncı değerlerinde dengeye gelen bentonit karışımlarının zemin-su karakteristik eğrileri Şekil 1' de sunulmaktadır. Ayrıca, numunelerin başlangıç kuru yoğunluk değerleri, başlangıç su içerikleri ve tuzlu çözeltiler içerisinde dengeye ulaştıkları su içerikleri Tablo

2'de verilmiştir. Buna göre ilk olarak %51 bağlı nem değeri ile 92 MPa emme basıncına karşılık gelen  $\text{CaNO}_3$  tuz çözeltisinde dengede olan numuneler incelendiğinde katkısız bentonit numunesinin su içeriği değeri %8.5 olarak belirlenmiştir. Bu değer, aynı tuz çözeltisi içerisindeki diğer karışımların denge su içeriklerine göre daha fazla olarak belirlenmiştir. Bu durum, en çok hidrate olan bentonit numunesinin başlangıçta en yüksek emme basıncı değerinin olduğunu göstermektedir. Çünkü bir numune için su içeriği değeri düştükçe emme basıncı değeri artar ve bunun tersi de geçerlidir. Bentonitteki su içeriğindeki değişiklik, esas olarak daneler arası ve dane içi gözeneklerdeki su hacminin değişimi ile ilgilidir.



Şekil 1. Bentonitin çeşitli katkı varlığında zemin-su karakteristik eğrileri

Aynı su içeriği değerinde karışımların emme basıncı değerleri incelendiğinde, tüm katkıların bentonitin emme basıncı değerini düşürdüğü görülmüştür (Şekil 1). Bentonitin su tutma kapasitesini en çok azaltan katkı malzemesi bakır cürufu olarak belirlenmiştir. Örneğin %10 su içeriğinde bentonit numunesinin emme basıncı değeri 67 MPa iken, B20CS karışımının 46 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı su içeriğindeki emme basıncı değerleri dikkate alındığında emme basıncı parametresini en az etkileyen katkı malzemesi ise Etibor-48 olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Ayrıca,  $\text{CaNO}_3$  tuzundaki başlangıç su içeriğindeki hafif bir azalma, numunelerin ilk emme basıncı değerinin 92 MPa'dan daha küçük bir değer olduğunu gösterir. İlk tuz çözeltisi içerisinde B1GF, B20CS ve B20U karışımlarının başlangıç su içeriği değerleri azalmış, yani numuneler kurumuştur (Tablo 2). Bu durum, kuruyan karışımların başlangıçtaki suction değerlerinin 92 MPa değerinden daha küçük olduğunu gösterir.

Tablo 2. Karışımların başlangıç koşulları ve tuz çözeltisi içerisindeki denge su içeriği değerleri

Numune	Kuru yoğunluk, $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	Başlangıç su içeriği, $w_i$ (%)	$w_{\text{CaNO}_3}$ (%)	$w_{\text{NaNO}_2}$ (%)	$w_{\text{NaCl}}$ (%)
Ca-Bentonit	1.41	7.5	8.5	11.0	14.9
B1GF	1.41	7.5	7.4	9.7	13.3
B20CS	1.39	6.4	6.3	8.3	11.4
B20FC	1.40	6.4	6.7	8.8	12.1
B20C	1.40	6.4	6.8	8.9	12.2
B20E-48	1.41	8.0	8.2	9.8	13.2
B20U	1.41	7.4	7.1	8.9	12.6

NaNO<sub>2</sub> tuz çözeltisi ise %66 bağıl nem ve 57 MPa suction değerine sahiptir. Bentonit numunesinin NaNO<sub>2</sub> tuz çözeltisi içerisinde denge su içeriği %11'e artmıştır. Katkılı karışımların su içeriği değerleri birbirine yakın olmasına rağmen, su içeriğindeki çok küçük bir değişiklik emme basıncı değerini MPa mertebesinde değiştirebilmektedir ve bu nedenle çok önemlidir. NaCl tuz çözeltisi, %75 bağıl nem ile 39 MPa değerinde bir emme basıncına karşılık gelir. Genel olarak, NaCl tuz çözeltisi içindeki karışımların su içeriği değerleri %3-4 aralığında artmıştır. Şekil 1'den de görülebileceği gibi, tüm karışımlar aynı emme basıncı değerlerinde neredeyse paralel eğriler halinde ilerlemektedir. Katkılı karışımların eğrileri her zaman katkısız karışımın altında kalmıştır.

Zeminlerin su emme kapasitesini etkileyen en önemli özellik yüzey gerilimidir. Bentonit mineralleri yüzeylerinde elektrik yüklerine sahiptir. Karışımdaki bentonit içeriği arttıkça, bentonitin özgül yüzey alanının yüksek olması nedeniyle parçacıkların yüzey elektrik yükü de artmaktadır. Daha yüksek bentonit içeriği içeren bir karışımın, aynı su içeriğinde daha büyük ozmotik ve emme kuvvetlerine sahip olması beklenir (Durukan vd, 2014). Katkı malzemelerinin ilave edilmesiyle birlikte aynı hacimde bentonit miktarı azaldığı için su tutma kapasitesi azalmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, sıklıkla bariyer malzemesi olarak tercih edilen bentonitin doygun olmayan durumda davranışını anlamak amacıyla bentonitin zemin-su karakteristik eğrisi incelenmiştir. Ayrıca bentonite katkı malzemeleri ilave edilerek, katkı malzemelerinin emme basıncı davranışına etkisi araştırılmıştır. Buhar denge yöntemi ile gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre, bentonitin doğal su içeriğinde emme basıncı değeri 92 MPa'dan fazla olarak belirlenmiştir. Ayrıca katkı malzemelerinin hepsi emme basıncı değerini azaltıcı yönde etki etmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda bu katkılar varlığında kurutmanın da uygulanması ve deneylerin yüksek sıcaklıklarda da gerçekleştirilmeleri nükleer atık depo sahalarında kullanılan bentonit tampon malzemesinin davranışı açısından büyük önem arz etmektedir.

#### TEŞEKKÜR

*Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 120M470). Yazarlar bu destek için minnettardır.*

#### KAYNAKLAR

- Blatz, J. A., Cui, Y. J., Oldecop, L. (2009). "Vapour equilibrium and osmotic technique for suction control", Laboratory and field testing of unsaturated soils, 49-61.
- Delage, P., Howat, M. D., Cui, Y. J. (1998). "The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay", Engineering Geology, 50(1-2), 31-48.
- Durukan, S., Pulat, H.F., Yukselen-Aksoy, Y. (2014). "Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand bentonite mixtures", Waste Management and Research, 32, 149-56.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993). "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons, New York.
- Gao, Y. (2017). "Soil-water retention behavior of compacted soil with different densities over a wide suction range and its prediction", Computers and Geotechnics, 91, 17-26.
- Komine, H., Ogata, N. (1999). "Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal", Soils and Foundations, 39(2), 83-97.
- Lee, J. O., Cho, W. J., Kwon, S. (2011). "Suction and water uptake in unsaturated compacted bentonite", Annals of Nuclear Energy, 38(2-3), 520-526.
- Özkan Ş.G., Çebi, H., Delice, M.D. (1997) Bor minerallerinin özellikleri ve madenciliği. 2 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 224-228.

- Richards, B.G. (1974). "Behaviour of unsaturated soils" , In: Lee IK (ed), Soil mechanics—new horizons. American Elsevier, New York, 112–157.
- Romero, E. (2001). "Controlled suction techniques" , 4<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. WYY Gehling & F. Schnaid (eds.), 535-542.
- Tang, A. M., Cui, Y. J. (2005). "Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay", Canadian Geotechnical Journal, 42(1), 287-296.
- Villar, M. V., Lloret, A. J. A. C. S. (2004). "Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite", Applied Clay Science, 26(1-4), 337-350.
- Ye, W. M., Chen, Y. G., Chen, B., Wang, Q., Wang, J. (2010). "Advances on the knowledge of the buffer/backfill properties of heavily-compacted GMZ bentonite", Engineering Geology, 116(1-2), 12-20.