

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLGU BARAJLARIN FARKLI GEÇİRİMSİZ MALZEMELER KULLANILARAK
SIZMA ANALİZİ

Ömer POLATER

OCAK 2021

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLGU BARAJLARIN FARKLI GEÇİRİMSİZ MALZEMELER KULLANILARAK
SIZMA ANALİZİ

Hazırlayan
Ömer POLATER

Danışman
Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN
Doç. Dr. Nizamettin HAMİDİ
Doç. Dr. Ercan IŞIK

OCAK 2021

ONAY

Ömer POLATER tarafından hazırlanan “**Dolgu Barajların Farklı Geçirimsiz Malzemeler Kullanılarak Sızma Analizi**” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Başkan)

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Danışman)

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Üye)

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Üye) (varsa)

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Üye) (varsa)

İmza

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zeki ARGUNHAN

Enstitü Müdürü

BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Dolgu Barajların Farklı Geçirimsiz Malzemeler Kullanılarak Sızma Analizi**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 22/01/2021

Ömer POLATER

İmza

ÖZET

DOLGU BARAJLARIN FARKLI GEÇİRİMSİZ MALZEMELER KULLANILARAK SIZMA ANALİZİ

Ömer POLATER

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Ocak 2021, 53 sayfa

Barajlar, yapımında kullanılan malzemeye göre sınıflara ayrılırlar. Bunlardan biri olan dolgu barajlar, ekonomiklik, uygulanabilirlik ve esnek proje kriterleri sayesinde dünyada ve ülkemizde çoğunlukla tercih edilmektedir. Tüm barajlarda olduğu gibi dolgu barajlarda da etüt, fizibilite, planlama ve inşa safhaları hassasiyet ve titizlikle yürütülmeli en küçük ayrıntısına kadar araştırma yapılarak inşa edilmeleri gerekir. Dolgu barajlardaki en önemli sorunlarından biri sızma sonucu iç aşınma ve borulanma olayının oluşturacağı kusurlardır. Bu gibi kusurlar zamanla gelişerek baraj gövdesinin zayıflamasına ve hatta yıkılmalarına sebep olabilmektedir. Rezervuardaki suyun, mambadan mansaba doğru baraj gövdesi içerisindeki boşluklardan sürekli hareketi sızma olarak adlandırılmaktadır. Dolgu baraj gövdelerindeki sızmaların veya zemin kütlesi içerisinde oluşan iç erozyonun oluşturduğu gediklenme olayı ise borulanma olarak ifade edilmektedir. Bu nedenlerle dolgu barajlarda sızma olayına özen gösterilmeli, proje aşamasında analitik ve sayısal teknikler uygulanarak sızma durumları kontrol edilmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır. Aksi takdirde, inşaat sırasında ve sonrasında oluşabilecek sorunların giderilmesi daha güç olmaktadır.

Bu çalışmada, rezervuardaki hidrostatik basınç yükü altındaki dolgu barajlardaki sızma durumu sayısal modellerle incelenmiştir. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılım olan SLIDE yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modelde baraj gövdesi temel zemini ile birlikte iki boyutlu olarak modellenmekte ve verilen sınır koşulları, malzeme özellikleriyle tüm çözüm alanı için temel denklemler sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenerek sızma olayı analiz

edilmektedir. Model olarak seçilen Van ilinin Erciş ilçesinde bulunan Morgedik Barajında, hâlihazır kullanılmış olan gövde malzemelerine alternatif olarak kullanılacak bazı malzeme türlerine göre gövde ve temeldeki sızma durumları, hız, akım çizgi ve potansiyelleri gibi hidrolik özellikleri analiz edilmiştir. Farklı durumlar için elde edilen sonuçlar tartışılarak en iyi çözüm elde edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dolgu Barajlar, Morgedik Barajı, Sızma Analizi, Permeabilite.



ABSTRACT

Infiltration Analysis of Embankment Dams Using Different Impermeable Materials

Ömer POLATER

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate Education Institute

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

January 2021, 53 pages

Dams are classified according to the material used in their construction. Embankment dams, one of them, are preferred in the world and in our country thanks to their economy, applicability and flexible project criteria. As in all dams, the survey, feasibility, planning and construction phases should be carried out with precision and meticulousness and should be investigated to the smallest detail. One of the most important problems in embankment dams is the defects caused by internal evaluation and piping as a result of leakage. Such defects may develop over time, causing the dam body to weaken or even collapse. In the gaps within the dam body to constant movement of water in reservoir from upstream to downstream of water is called seepage. Of seepages in the embankment dam bodies or the situation caused by internal erosion in the soil is expressed as piping. For these reasons, attention should be paid to infiltration in embankment dams, analytical and numerical techniques applied to the project should be checked and necessary investigations should be taken. Otherwise, it will be more difficult to eliminate the problems that may occur during and after construction.

In this thesis, the seepage situation in the embankment dams under the hydrostatic pressure load in the reservoir was investigated by numerical models. For this purpose, SLIDE software, which is a software using finite element method, was used. In the numerical model, the dam body is modeled in two dimensions with the foundation base and the infiltration event is analyzed by solving the basic equations for the whole solution area with the given boundary conditions and

material properties. The infiltration properties of Moredik Dam body selected as the model were analyzed according to some material types that can be used as an alternative to the already used body materials. The best solution was tried to be determined by discussing the result obtained for different situations.

Keywords: Fill Dams, Moredik Dam, Infiltration Analysis, Permeability.



TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden baőlayarak son aőamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN'a Őukranlarımı sunarım.

Tez çalıőmamın t¼m aşamasında bana rehberlik eden çalıőtığım kuruma DSİ 17. Bölge Müdürlüğü'ne ve kullandığım yazılım programlar kapsamında, verdikleri desteklerden dolayı Hidro Dizayn Mühendislik Müőavirlik İnşaat ve Ticaret A.Ő ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anne ve babama, yoğun çalışma temposunda benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen diğer aile fertlerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖNSÖZ

Barajlar genel olarak enerji, su ihtiyacı ve taşkın kontrolü gibi amaçlarla inşa edilirler. Her ne amaçla inşa edilirse edilsin seçilen baraj tipi ve malzeme çeşidi barajların maliyeti üzerinde en önemli faktördür. Ülkemizde son yıllarda yapımı artan birçok baraj tipi bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı ekonomik olmaları nedeniyle dolgu barajlardır. Buna rağmen büyük maliyetlerle yapılan bu barajların uzun yıllar işletmede kalacağı düşünülerek inşası büyük önem arz etmektedir. Dolgu barajların işletim sırasında en çok karşılaşılan hususlardan biri sızma problemidir. Dolgu barajların rezervuarındaki su, gövde ve temel zemini içinden sızarak mansap tarafına doğru akış yönü bulmaya çalışır. Oluşan sızmalar, yapının güvenliğini veya barajın emniyetini riske atmayacak kadar kabul edilebilir seviyedeysse herhangi bir tehlike ön görülmemektedir. Ancak gövde hattı boyunca oluşan akımlar gövde malzemelerini sürükleyecek limite ulaşırsa, gövdede borulanma oluşturarak barajın yıkılmasına kadar gidebilecek zararlara yol açacaktır. Haznelerinde büyük su kütlesi biriktiren baraj gövdesinin tahribatıyla milyonlarca metreküp suyun serbest kalıp sel rejimiyle akışa geçmesi büyük hasarlara hatta can kayıplarının meydana gelmesine yol açacaktır.

Sızma için en kritik yer baraj gövdesinin çekirdeğidir. Baraj uygulamaları sırasında çekirdek bölgesi, yaygın olanı kil olmak üzere, geçirimsizliği çok az olan çeşitli malzemelerle dizayn edilmektedir. Bu çalışmada çekirdek bölgesinde farklı malzemelerle yapımı tamamlanan örnek bir barajın sonlu elemanlar yöntemiyle sızma analizleri yapılmış. Böylece yukarıda baraj güvenliği için öneminden bahsetmiş olduğumuz sızma problemi birçok yönden ele alınmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	4
1.2. Önceki Çalışmalar	5
2. MATERYAL VE YÖNTEM	11
2.1. Morgedik Barajı ve Genel Özellikleri	11
2.2. Yöntem	15
2.2.1. Sızma Analizinin Temel Denklemlerle Genel İfadesi	15
2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve SLIDE v6.0 Yazılımı	18
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	23
3.1. Analizler İçin Kullanılacak Ana Modeller ve Parametreleri	25
3.2. Analizler	28
3.2.1. Birinci Model İçin Yapılan Analizler ..	28
3.2.2. İkinci Model İçin Yapılan Analizler	30
3.2.3. Üçüncü Model İçin Yapılan Analizler	32
3.2.4. Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler	34
4. SONUÇ	43
5. KAYNAKLAR	45
6. EKLER	48
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Morgedik Barajı'na ait karakteristik bilgiler	12
3.1. Malzeme parametreleri.....	25
3.2. Malzeme parametreleri.....	26
3.3. Malzeme parametreleri.....	27
3.4. Morgedik Barajı sızma analizi sonuç tablosu	34
3.5. Düşük değerli kilin farklı kotlara göre elde edilmiş analiz verileri	41



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>SEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kil çekirdekli kaya dolgu baraj tip en kesiti	1
1.2. Teton Barajı gövdesinde oluşan borulanma sonucu barajın yıkılması.....	2
1.3. Viskoz ve viskoz olmayan akış bölgeleri	7
2.1. Morgedik Barajı Türkiye'deki yeri	11
2.2. Morgedik Barajı mansaptan görünüm	12
2.3. Morgedik Barajı cut-off ta GCL tahkimi	13
2.4. Morgedik Barajı GCL in yapısı ve cut-off ta GCL ruloları serimi	14
2.5. Darcy'nin zemin içerisindeki akım kuralı	15
2.6. Doygun zeminde suyun hareketi x ve z doğrultularındaki akım hızı.....	16
2.7. Slide v6.0 programının arayüz görüntüleri.....	20
2.8. Slide v6.0 da hidrolik parametrelerin tanımlanması	21
2.9. Gövdenin ağ(meş) yapısı ve düğüm noktalarının teşkili.....	21
2.10. Slide v6.0 analiz sonuç gösterimi	22
3.1. Slide v6.0 da model üzerinde gövde ve temel gösterimi.....	24
3.2. Birinci alternatifin modellenmesi.....	25
3.3. İkinci alternatifin modellenmesi	26
3.4. Üçüncü alternatifin modellenmesi	27
3.5. Birinci Model analiz sonuçları	29
3.6. İkinci Model analiz sonuçları	31
3.7. Üçüncü Model analiz sonuçları	33
3.8. Bir ve ikinci modelin yatay geçirgenliğe göre analiz sonuçları.....	36
3.9. Enjeksiyon perdesinin etkisi ve akım çizgilerinin gösterimi	38
3.10. Üçüncü Model analizlerinde akış vektörlerinin yönü	39

SİMGELER DİZİNİ

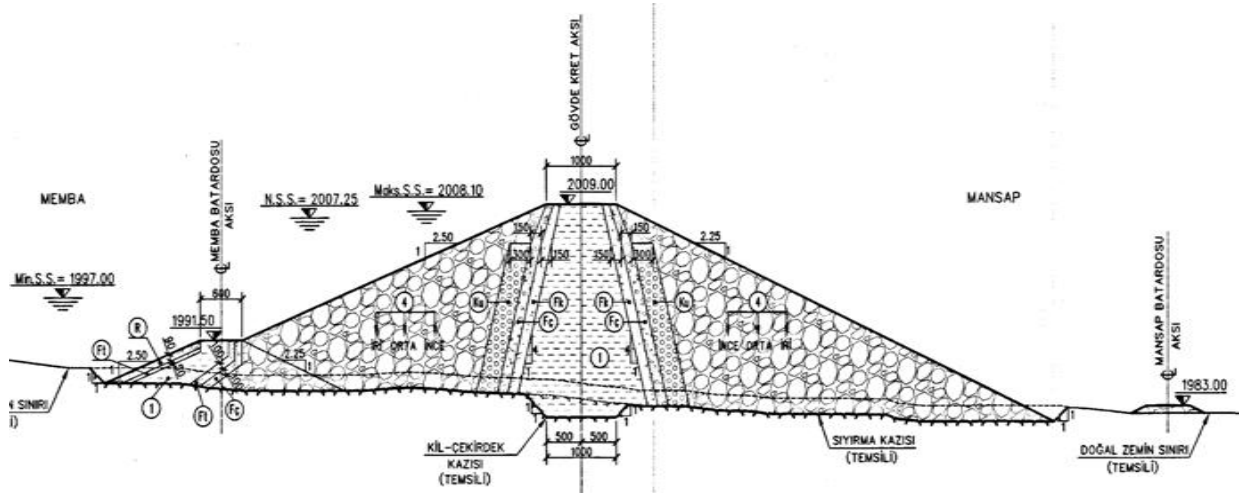
V	Akım hızı
K, k	Permeabilite katsayısı
Q, q	Debi
A	Enkesit alanı
İ	Hidrolik eğim
Kh	Hız potansiyeli
M	Metre
m ³	Metreküp
Hm ³	Hektometreküp
Km ²	Kilometrekare
NSS	Normal su seviyesi

KISALTMALAR DİZİNİ

DSİ	Devlet Su İşleri
ICOLD	Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu
GCL	Geosentetik kil
EP	ExtendPressure
PI	Plastisite İndisi
Fk	Filtre kum
Fç	Filtre çakıl
Ku	Kaya ufağı
Ft	Filtre tuenan
R	Riprap

1. GİRİŞ

Su mühendisliğinin en önemli imalatlarından biri olan barajlar, bir akarsuyun önünü keserek suyu biriktirip, biriken bu suların içme, sulama, enerji gibi çeşitli amaçlarla kullanılmasını sağlayan büyük su yapılarıdır. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD: *International Commission on Large Dam*)'a göre baraj tanımı şöyledir: “Kreti ile temeli arasındaki yükseklik 15 metreden fazla olan yapılar, ya da yüksekliği 10-15 m arasında olup da kret uzunluğu 500 metreden büyük olan ve depolama hacmi 1 milyon m³ den daha büyük olan yapılar baraj olarak adlandırılmaktadır” (Sağlıca, 2013). Barajlar, yapımında kullanılan malzemeye göre türlere ayrılırlar. Bu türlerden biri de dolgu barajlardır. Dolgu Barajların gövdeleri çekirdekten dışa doğru; kil, filtre kum, filtre çakıl ve kaya gibi doğal malzemelerden meydana gelir. Dolgu barajların diğer baraj türlerine göre gerek ekonomiklik gerekse de uygulanabilirlik alanı geniş ve proje kriterleri esnek olduğundan, dünyada ve ülkemizde çoğunlukla tercih edilmektedir. Kil çekirdekli kaya dolgu olan Atatürk Barajı ile ön yüzü beton kaplı Ilisu Barajı ülkemizde yer alan dolgu barajların en güzel ve büyük örneklerindedir. Sızdırmazlığın, baraj gövde yapısının çekirdeğinde yer alan geçirimsiz kil dolgu zonuyla sağlandığı dolgu barajlar, kil çekirdekli dolgu barajlar olarak ifade edilirler. Dolgu Baraj tiplerinde en yaygın olan merkezi kil çekirdekli kaya dolgu barajların tip kesiti Şekil 1.1’de gösterilmiştir (DSİ, 2016).



Şekil 1.1. Kil çekirdekli kaya dolgu baraj tip en kesiti (DSİ, 2016)

Kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda geçirimsizlik gövde yapısında kil çekirdekle, baraj tabanında ise geçirimsiz bir perdeyle sağlanır. Baraj temelinin yapısına göre bu perde farklı yöntemlerle yapılabilmektedir (enjeksiyon, slurrytrench, thinwall vb.). Gövde kil çekirdeğin

memba ve mansap Şev yzeylerinde dış dolgularının belirlediği ozelliğe gze filtreler seğilir. Kil ekirdekli kaya dolgu baraj tipi için, merkezdeki kilin mansap kısmında yer alan filtre kum ve filtre akıldan sonra, bu filtrelerin mansap kabuğu olan kaya dolgu zonunun içerisinde yıkanmasına sebebiyet vermemek için bir geçiŐ zonuna ihtiyaç duyulur. GeçiŐ tabakası olan bu zon kaya ufağından dizayn edilir (DSİ, 2014). Dolgu baraj tiplerinde filtre zonları baraj gzevdesinde oluşan sızmanın kontrollü yapılması ve gzevde çekirdeğindeki ince metaryallerin akımla birlikte taŐınmasına engel olmak amacıyla gzevdede yer alırlar (alamak ve Yanmaz, 2014). Tm barajlarda olduğu gibi dolgu barajlarda da planlama, dizayn ve inşaat aŐamaları ciddi dikkat ve hassasiyeti gerektirmektedir. Çünkü rezervuarlarında ciddi bir su yuku biriktiren barajlar yıkılmaları durumunda bueyuk can ve mal kayıplarına neden olacaklardır. Dolgu barajlarda da zayıflama ve hatta yıkılmalarına sebep olabilecek durumlar sız konusu olup bunlardan sızma sonucu i aşınma ve borulanma, dolgu barajlarda gzeziken en yaygın hasarlardır. Baraj gzevdesinin memba kısmından mansap kısmına ynelik suyun sreklili hareketi sızma olarak bilinir. Gzevde iç kısmında aşınma veya toprak setlerin içerisindeki akım sızıntıları borulanma olarak adlandırılmaktadır. Gzevde içerisindeki en zayıf yani permeabilitenin en fazla gzezildiğu bglelerde oluşan borulanma, baraj inŐaatının bitmesinden yıllar sonra bile ortaya çıkabilir. Baraj gzevdesinde oluşan i erozyon genelde gzevdenin mansap Şevi topuk kısmından rezervuara ynelik hareket eder. Gzevdede oluşan borulanma veya akım kanalları barajın yıkılmasına kadar gidecek tahribata neden olabilir. Barajların yıkılmaları çoğunlukla borulanma sonucu meydana gelen boşluk galerilerinin okmesi veya kret uzerinden suyun aŐıp tm dolgunun yıkanması ile oluşur (ilingir, 2007). 1976 yılında ABD’de uygun olmayan geçirimsiz malzeme kullanımı sonucunda gzevdede borulanma oluŐarak yıkılan Teton Barajı, sızma olayına çarpıcı bir ornektir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Teton Barajı gzevdesinde oluşan borulanma sonucu barajın yıkılması (Peker, 2015)

Foster vd. (2000) yaptığı çalışmaya göre, yıkılan dolgu barajların yaklaşık %43'ü oluşan borulanma nedeniyle meydana geldiği ve baraj gövdesinde gözüken bu borulanmanın %66'sı oluşan sızma probleminden kaynaklandığı belirtilmektedir (Çalamak ve Yanmaz, 2014).

Bir dolgu baraj gövdesinin stabilitesi ve geçirimsizliği, zeminin plastisitesine, dolgu malzemesinin ve özellikle kil çekirdeğin sıkışma özelliklerine bağlıdır. Çekirdekte yer alan kil malzemenin Plastisite İndisinin (PI) % 14 değerinden düşük çıkmasına dikkat edilmeli ve bu malzemenin çekirdekte (*cut-off*'ta) sızdırmazlık bakımından en hassas bölgede yer almasından kesafet oranları önemlidir. Malzemenin kuru arazi sıkılığının laboratuvar ortamında yapılan normal proktor deneyi ile elde edilen maksimum kuru sıkılığa oranı %98 den az bir değer olmamalıdır. Bazı durumlarda ise kil malzemenin dış dolguda kullanılması görülebilmektedir. Bu durumlarda malzemenin arazideki kuru kesafet değeri laboratuvar ortamında normal proktor deneyi ile ulaşılan maksimum kuru kesafete oranı en az %85 değerinde olmalıdır. Yukarıdaki oranlar bazı durumlarda yüksek çıkmasına rağmen malzemenin yine istenilen performans alınmayabilir. Buda, değeri yüksek çıkan malzemenin serimi ve sıkıştırmasından kaynaklıdır. Bilinmelidir ki zemin içerisinde oluşan borulanmaya minimum direnci gösteren zeminler, sıkıştırması istenilen şekilde yapılmayan veya yapılamayan malzemeli zeminlerdir. Her ne kadar gövdeyi meydana getiren bu malzemeler (kil çekirdek) geçirimsiz ve standartlara uygun yapılsa bile, bir miktar suyun gövde kısmından sızarak mansaptan tahliye edilmesi gerekecektir. Sızan bu suya, kabul edilebilir güvenlik değerleri ölçüsüne kadar herhangi bir müdahale edilmez, fakat emniyet değerlerin aşılması halinde gerekli önlemler alınmalıdır. Sızmayla ıslanan baraj gövdesi içerisinde hava ve suyun dışarıya tahliyesi yapılamayarak dolgu gövde bu yükleri üzerinde taşıyacağından malzeme tanelerinde elastik deformasyon yapılamayacak veya malzemeler plastik olmayan biçimde şekil değiştirmek zorunda kalacaklardır. Bu durum gövde yapısını oluşturan dolgularda düzensizliklere sebep olacaktır. Ancak katı hacimlerinde ciddi bir deformasyon gözükmeyip, oluşan yükün bir miktarı zemin tanelerince üstlenilirken yükün kalan diğer miktarı ise boşluklarda bulunan hava ve sudaki basınçla taşınır. Böylece boşluk suyu basıncı meydana gelir. Freatik hattın aşağısında oluşan boşluk suyu basınçları zemin kütlesinin kayma mukavemetini düşürür. Dolgunun memba tarafından sızan suyun gövdeyi terk edene kadar izlediği yola *freatik hat* adı verilir. Freatik hat mansap şevini ne denli üst kotta bitirirse vereceği zarar o kadar büyük olur. Çünkü freatik hattın altındaki zemin, suya doygun olacak ve göçme ihtimali artacaktır (DSİ 2014).

Bir zemin içerisindeki sızma olayının incelenip ve sızma değerlerinin hesaplanmasında grafiksel ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Su yapılarının sızma analiz hesaplarında, grafiksel metot mühendislik çalışmalarında genelde uygulanan bir yöntem değildir. İçinden çıkılmayacak

karmaşık denklem ve türemeler ile uygulama aşamasında görülen zorluklar, bunun başlıca sebepleridir (Mesci 2006). Su biriktiren yani belli hazne hacmi olan yapıların gerek gövde kısmında ve gerekse temelde görülen sızıntılardan dolayı oluşan sızma ve boşluk suyu basınç değerlerinin incelenmesinde genelde sayısal yöntemler kullanılır. Çünkü bu yöntem diğer uygulanan metotlara göre daha hassas olup, olayın birçok yönden ele alınmasına fırsat doğurur. Bu amaçla kullanılan sonlu elemanlar ve sonlu farklar metodu pratikte uygulanan metotların en yaygın olanlarıdır. Bunlardan sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizler, mühendislerin uygulamada sıkça karşılaştıkları, çözülmesi güç ve karışık olan fiziksel problemleri kabul edilebilir bir doğrulukla çözüme kavuşturabilmektedir. Sonlu elemanlar metodu sadece sızma problemleri çözümünde kullanılmaz. Fizik ve mühendislik uygulamalarında ortaya çıkan birçok problemin çözüm ve analizinde kullanılan sayısal yöntemler içinde en çok başvurulanıdır.

Mühendisliğin farklı alanlarında karşımıza çıkan sızma problemlerinin analizi için günümüzde analitik, grafiksel ve sayısal birçok yöntem kullanılmaktadır. Karmaşık problemlerin sızma analizlerinde uygulanan akım ağı çözümleri özenli ve hassas bir çalışma gerektirmektedir. Zor ve karmaşık olan sızma problemlerinin analizleri için uygulanabilen akım ağları modeli, sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi birçok yöntem ile kullanılabilir. Problemler için yaklaşık değerler elde edilmesinde bu metotlar yol gösterici olurlar. Bilgisayar programları aracılığıyla günümüzde yapılan çalışmalarda problemler detaylı incelenip çözüm için gerçek değerlere yakın sonuçlar elde edilmektedir. Pavlovsky (1956) tarafından ortaya atılan ve daha sonra Harry (1962) tarafından geliştirilen yöntemlere dayalı olarak hazırlanan bilgisayar programları bu amaçla kullanılmıştır (Çilingir, 2007). Günümüz teknolojisiyle yüksek kapasiteli bilgisayarlar ve gelişmiş yazılımlar sayesinde sızma analizleri hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Bu sayede karmaşık yöntemler için harcanan zaman ve enerji yeni sonuçların alınmasına ve yorumlanmasına ayrılabilir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada Van ili sınırları içerisinde yer alan dolgu baraj tipindeki Morgedik Barajı örnek model alınarak, farklı özelliklerde geçirimsiz kil malzemenin kullanılması durumunda gövde ve temel zeminindeki sızma olayı incelenecektir. Sızma analizleri, temelinde sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılım (SLIDE v6.0) ile gerçekleştirilecektir. Yazılımın gerçekleştirdiği analizler neticesinde üzerinde çalışılan barajın gövdesi ve temelindeki sızmanın birçok yönden gözlemlenmesi mevcut kılınacak ve oluşan akımın hız ve potansiyel dağılımlarına ulaşılabilecektir. Elde edilen sonuçlar dolgu barajlardaki sızma miktarının belirlenmesi ve proje aşamasında önlem alınmasına katkı sağlayacağı beklenmektedir.

1.2. Önceki Çalışmalar

Polubarinova ve Kochina (1962), araştırmalarında pek çok kararlı hal akım şartları altında elde edilmiş sonuçları sunmuşlardır. Nümerik suya doygun yer altı suyu modelleri ile sızma yüzeyi yüksekliği sonuçları arasındaki ilişkiler de yine pek çok çalışmada sunulmuştur.

Basak (1976), çalışmasında Forchheimer'in hareket denklemini göz önüne alarak dolgu barajlardaki sızma problemini kararlı hal akım şartlarında analitik olarak çözmüş ve Darcian denklemli çözümle kıyas yapmıştır. İki boyutlu bir ortamda, özellikle mansaba doğru olan akımda, Forchheimer denkleminin kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Shamsai ve Narasimhan (1991), izotropik iki boyutlu bir gözenekli ortamda kararlı hal akımları araştırarak, sızma yüzeyi yüksekliği ve çıkış akımı için sayısal sonuçlar elde etmişlerdir.

Güngör (1995), çalışmasında rezervuarlarından sızan su sebebiyle toprak dolgu barajların gövde kısmında ve temelinde meydana gelen sızma olayını sayısal olarak ele almıştır. Bu çalışmada mevcuttaki durumun sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Hazır bilgisayar yazılımı aracılığıyla bütün alan için matematiksel denklemler çözülmüş ve hesaplamalar yapılmıştır. Sonraki adımda baraj gövde ve temelindeki akımın, hız ve potansiyel dağılımları elde edilmiştir. Grafik metot yöntemi ve elle çizilen akım ağı aracılığıyla elde edilebilecek boşluk suyu ve sızma basınç değerleriyle kıyaslandığında, sonlu elemanlar metoduyla elde edilen sonuçların çok daha gerçekeçi olduğu ortaya konmuştur.

Lee ve Leap (1997), sınıra uydurulmuş koordinat (*Boundary-fittedcoordinate*) sistem metodunu kullanarak sızma yüzeyli kararlı hal yer altı suyu sızmasını ve sonlu fark metodunu kullanarak sızma yüzeyini simüle etmişlerdir. Modelden elde edilen sonuçların analitik sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Boufadel vd. (1998), hipotetik serbest yüzeyli izotropik olmayan dikdörtgen kesitli bölgelerden sızma yüzeyi yüksekliği ve çıkış akımı için suya doygun olmayan bölgenin etkilerini veren bir sonlu elemanlar modeli sunmuştur. Bu modeller çeşitli çözümler yaparak literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Leontiev ve Huacasi (2001), gözenekli ortam içinden geçen serbest yüzeyli akımın nümerik simülasyonu için bir matematiksel programlama tekniği sunmuşlardır. Araştırmacılar, şekil optimizasyon problemi olarak orijinal serbest sınır problemini göz önüne almışlar ve sınır eleman ayırımı yöntemini uygulamışlardır. Bu programlamanın iki yada üç boyutlu problemlere kolay bir şekilde uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Samani vd. (2003), kaya dolgu barajlar içerisinde geçen akım için 2 boyutlu bir sonlu farklar modeli geliştirmiştir. Elde ettikleri sonuçları literatürdeki verilerle test etmişler ve geliştirilen modelin kullanılabilir olduğunu ifade etmiştir.

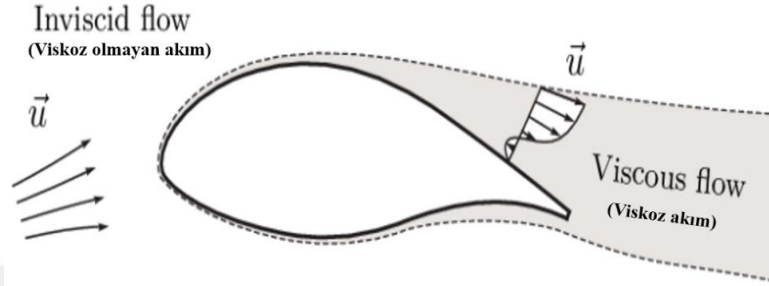
Mohamed ve Ağralıoğlu (2005), çalışmalarında, baraj altındaki sızmalarla ilgili çıkış yük eğimi ve kaldırma kuvveti gibi önemli parametrelerin belirlenmesini bir matematik modelle ele almışlardır. Bunlardan başka temel zemini özelliklerinin de borulanma veya alttan kaldırmaya dolayısıyla yapının sağlamlık riskine etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Yapının altına yerleştirilen palplanşlar bu tehlikelerin azaltılmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu maksatla, sonlu farklar metoduna dayanan bir nümerik çözüm geliştirilerek homojen olmayan ve anizotrop bir temel için baraj altındaki basınç yükleri özellikle eğimli palplanş durumu için hesaplanmıştır. Modelin geçerliliği analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Analitik çözümler sadece izotrop ve homojen zeminler ile sonsuz derinlikli geçirimli zeminler için mevcuttur. Sonuçların iyi bir uyum içinde oldukları belirlenmiştir. Çalışmalarının hedefi, palplanş eğim açısının, zeminin k_x/k_z sızma katsayısı oranlarının ve palplanş derinliğinin çıkış yük eğimine ve kaldırma basıncına etkilerini incelemektir.

Akdil (2005), çalışmasında bir dolgu baraj gövdesi içerisindeki sızma problemini, bir boyutlu olarak ele almıştır. Baraj rezervuarında, taşkın sonucu meydana geldiği düşünülen iki farklı su seviyesi hidrografi göz önüne alınmış olup, dolgu baraj içindeki sızma problemi sonlu farklar metodu yardımıyla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve olaya etki eden parametreler incelenmiş ve dolgu baraj içerisindeki sızma problemi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Dolgu barajın homojen ve izotropik olduğu ve sızma yüzeyi mesafesinin, Schaffernak ve Van Iterson (1917) tarafından verilen denklem ile ifade edildiği kabul edilmiştir. Bu dolgu barajda bir taşkın sonucu oluşan iki farklı göl seviye yükselmesi ile dolgu baraj boyunca zamanla meydana gelen su tablası profillerinin değişimleri incelenmiştir.

Mesci (2006), tarafından yapılan çalışmada sonlu farklar metodu kullanılarak toprak barajlarda gövdede meydana gelen sızmalar araştırılmıştır. Matematiksel model Seferihisar Barajı'na uygulanmıştır. Öncelikle farklı metotlar kullanılarak serbest yüzey çizgisi belirlenmiş ve metotların sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Daha sonra Laplace denklemi sızmalar için kullanılarak basınç yükseklikleri hesaplanmıştır. Ayrıca akım çizgileri ve eş potansiyel çizgiler hesap edilerek grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Hız bileşenleri ve toplam sızma miktarları farklı permeabilite değerleri için hesaplanmış ve birbirleri ile kıyaslamalar yapılmıştır.

Leblebicioğlu (2019), baraj gövde ve temeli zemininde sızan suyun oluşturduğu akımın, zeminin geçirimli ve komplike yapısı içinde oluşan bir viskoz sıvı akım örneği olduğunu belirterek, bir parçacık etrafında oluşan akım alanı içerisinde viskoz ve viskoz olmayan akış

bölgelerini Şekil 1.3'teki gibi göstermiştir. Zemin kütlesi içindeki bu suyun hareketi sıkışmaz akışkan kabulüyle Navier-Stokes denklemleri ve sınır şartları kriterleriyle incelenir. Bu denklemlerle suyun zemin içindeki durumunu çok küçük detaylarla açıklanmaya çalışılır. Söz konusu bağıntıların yapı içerisindeki suya uygulanmasında önümüze çıkan ilk zorluk sınır şartlarının belirlenmesidir.



Şekil 1.3. Viskoz ve viskoz olmayan akış bölgeleri (Leblebicioğlu, 2019)

Çilingir (2007), yaptığı çalışmada, suyun zemin içerisindeki üstteki paragrafta anlatılan analitiği için, kronolojik bir sırayla, yapılan önceki çalışmalarını örnek göstererek açıklamaya çalışmıştır. Çalışmasında öncelikle zemin boşluklarında hareket eden yeraltı suyunun matematik denklemlerle açıklamanın mümkün olmadığını, Jacob (1950) ve Slichter (1898) çalışmalarını öne sürerek savunmuştur. Ayrıca sızma problemine ilk genel bakışın yani ilk araştırmaların örneklerine değinmiş, bu problemi çeşitli yöntemlerle ele almış ve sonunda sonlu elemanlar yöntemine kadar dayanan çalışmalara atıfta bulunmuştur. Değindiği bu bilgileri kendi çalışmasında aşağıda anlatılan gibi özetlemiştir.

İlk olarak, sızma probleminde Brezis (1978) tarafından geliştirilen *ExtendPressure* (EP) yöntemi kullanılmıştır. Mevcuttaki eşitsizlikleri basit eşitsizliklere dönüştürerek çözen bu yöntem Darcy kanununu kullanır. EP metodu farklı özellikteki serbest sızma yüzeyi problemlerinde ayrıca çözümü nümerik yöntemle yapılan çalışmalarda kullanılmıştır. *Hele-Shaw* yönteminde suyun akışının bir simülasyonunu analog modelinde cebirsel bağıntılarda benzer diferansiyel denklemleri kullanarak uygulanmıştır. *Hele-Shaw* analog modeli çoğunlukla iki boyutlu laminar akımlardaki gözenekli zeminlerde kullanılmıştır. Bu modelin yatayda veya düşeyde uygulanabileceği söylenmiştir. Ayrıca yukarıdaki ilkelere benzer durumlar prototip-model içinde kullanılabilirdiği söylenmiştir. Bu ilkelere geometrik, dinamik ve kinematik benzerlikler en başta gelenleridir. Fiziksel ve Prototip model ile karakteristik denklemlerin temeli laplace açılımına dayandığı vurgulanmıştır. Sızmanın toprak barajlarda önemli bir problem olduğu söylenmiş ve bu problem için farklı modeller üretilmesine rağmen deneysel dataların noksanlığı çözülememiştir. Monte

Carlo simülasyonunu sonlu elemanlar yöntemiyle çalıştırılarak uygulayan Griffin ve Fenton (1993), barajın gövde altında yer alan sınırlı tabakalar için stokastik permeabilite ve suyun toprak içerisindeki oluşumunu araştırmışlardır. Bu çalışmalara dayalı olarak sızmanın genel teorisini açıklayan Çilingir (2007), model olarak Büyükçekmece Barajını kullanmıştır. Yöntem olarak sonlu elemanlar yöntemine dayanan Geo-Studio yazılımını kullanarak, söz konusu baraja ait sızma analizlerini yapmıştır. Analizlerden elde ettiği verileri, DSİ tarafından yapılmış olan sızma ölçümleriyle karşılaştırmıştır. Yaptığı çalışmada öncelikle serbest su yüzeyi hattını (*freatik hat*) farklı yöntemlerle belirleyip toplam sızma miktarını, oluşan sızıntının barajın gövde mansap seviyeden çıkış bölgesi ve birim genişlik debisini elde etmiştir. Yapılan uygulama neticesinde teorik hesaplamalar ve incelemeler doğrultusunda elde ettiği dataların tutarlılığı ile baraj içerisindeki sızmaların riskli ölçütlerde olup olmadığı gözlemlenmiştir.

Hacısüleyman (2007), çalışmasında öncelikle zemindeki su ve bu suyun gözenekli ortamda düşey yöndeki hareketine ilişkin kuramlar ve temel ilkeleri özetlemiştir. Hidrolojik uygulamalarda sıkça kullanılan *Green-Ampt*, *Philip*, *Horton* ve SCS Eğri Numarası modeli gibi sızma modellerini tanıtmıştır. Bu modellerin, doğrusal ve doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemleriyle parametre tahminlerini bulan bilgisayar programları geliştirmiştir. Parametre tahmini ile ilgili bir dizi örnekler sunmuştur. Çalışmasının son bölümünde, değişken yağış şiddeti koşullarında göllenme zamanının ve fiili sızma kayıplarının hesabı için uygulanan yöntemleri özetlemiş ve sızma modelleriyle artık yağış hesabına ilişkin örnekler vermiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, *Green-Ampt* ve *Philip* modelleri dışında, modellerin parametrelerinin karşılaştırılmasının mümkün olmadığı belirlenmiştir. Ancak, belli bir yağış ve parametre seti için, diğer üç modelin her birine bir eşdeğer eğri numarası (CN) verilebileceğini savunmuştur.

Ziaie vd. (2012), yaptıkları çalışmada, farklı drenaj sistemli homojen toprak barajlarında serbest su hatlarını incelemiştir. Çalışmalarında bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS simülasyon programı kullanarak, farklı drenaj sistemleri ile bir toprak barajı içindeki freatik hattın değişimi araştırılmıştır.

Sağlıca (2013), en önemli mühendislik yapılarından biri olan dolgu barajlarda, güvenliği tehdit eden gövdede sızma olayını sonlu farklar yöntemi kullanarak analiz etmiş ve diğer hesap yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Çalışmasında önemli bir yere sahip olan sonlu farklar hesap yöntemi ile sızma analizi yapan bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Bu geliştirilen programla yapılan analiz sonuçları, diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, sonlu farklar yönteminin dolgu baraj gövdelerinin sızma analizi hesaplamalarında kullanılabileceği ve elde edilen sonuçların, sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama yapan paket programlarla bulunan sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Sachpazis (2014), çalışmasında bir drenaj ve sızıntı haznesi vasıtasıyla, *Leighton Buzzard Silica* kumundan oluşturulan homojen bir toprak dolgu baraj modelinin gövdesi içinde deneysel bir akış ağı sistemi geliştirmiştir. Bir akış ağının düzgün ve doğru şekilde yapılandırılmasıyla başarılı sızma analizi elde edilebileceğini savunmuştur. Daha sonra oluşturduğu bu deneysel bir akış ağı modelini, sonlu elemanlar analizi yöntemiyle test etmiştir.

Çalamak ve Yanmaz (2014), çalışmalarında, dolgu barajlardaki filtre tabakaların, baraj gövde kısmındaki sızmanın kontrol edilmesinde ve çekirdek bölgesindeki ince taneli malzemenin akımla birlikte taşınmasını önlemek amacıyla kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu sebebiyetle filtre tasarımlarının büyük önem taşımakta olduğunu savunmuşlardır. Çalışmalarında, dolgu barajlardaki filtre tabakalarının tane dağılımı belirsizliğinin baraj gövdesindeki sızmaya olan etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, literatürde tanımlanan filtre tasarım kriterleri kullanılarak olası filtre tane dağılımı aralığı belirlenmiştir. Aralıkta olan temsili ortalama tane dağılımı eğrisinin hidrolik iletkenliğinin istatistiği önceki çalışmalardan araştırılmıştır. Elde edilen veriler, 30 m yüksekliğindeki merkezi kil çekirdekli kum-çakıl dolgu bir barajın filtre malzemesi için kullanılmış ve bu baraj için stokastik sızma analizleri yapılmıştır. Analizlerde, filtrenin hidrolik iletkenliğinin rasgele alanı üretilmiş ve baraj gövdesindeki sızma Monte Carlo benzeşimiyle modeliyle oluşturulmuştur. Bu çalışmayla filtre malzemesinin belirsizliğinin baraj gövdesindeki sızmaya olan etkileri ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar deterministik sızma analizi sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre, filtre belirsizliğinin merkezi kil çekirdekli barajlardaki zamandan bağımsız sızmaya olan etkilerinin çok az olduğu ve ihmal edilebileceği öne sürülmüştür.

Çelik (2014), yaptığı çalışmada, DSİ Genel Müdürlüğü Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığı tarafından yaptırılan İkizdere Barajının inşaat sonunda baraj gövdesinde ölçülmüş piyezometrik su seviyesi değerleri ile sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan sızma değerlerini karşılaştırmıştır. Baraj inşaatı aşamasında kil çekirdek gövdesine üç farklı kesitte yerleştirilen toplam 44 adet piyezometre uçlarından alınan ölçümler değerlendirilmiştir. Değerlendirmede; her bir kesitten 4 farklı piyezometre ucu seçilerek rezervuardaki su seviyelerine göre ölçülen basınç verileri kullanılmıştır. Malzeme parametreleri DSİ den elde edilen "Geçirimsiz Gereç Alanı Laboratuvar Deney Sonuçları" tablosundan alınmıştır. Analizin sonunda geçirimsiz malzemeye ait alternatif permeabilite katsayıları da dikkate alınarak sızma hesapları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada barajın sızma analizi sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuştur.

Arshad ve Babar (2014), yaptıkları çalışmalarında, baraj gövdesinden sızan suya ilişkin temel diferansiyel denklemleri çözmek için sonlu elemanlar yaklaşımını kullanmışlardır. Bu amaçla en önemli bölgelere, hayali düğüm noktalarının yerleştirilmesi ve sızma denklemlerinin

bir denklemler sistemine dönüştürülerek, alanın sonlu elemanlara ayrıştırılması gerçekleştirmiştir. Her düğüm noktası ve eleman için bir denklem ve bilinmeyen her değişken için çözüm yapılır. Araştırmalarında Pakistan'ın Karaçi kentinin yaklaşık 35 km kuzey doğusunda yer alan küçük bir toprak baraj olan Hub Barajı'nın sızma durumunu sonlu elemanlar yöntemiyle ele almışlardır. *Geo-Slope* yazılımının bir alt programı olan SEEP/W yazılım programı, ile sızma analizleri yapılmıştır.

Aydın ve Gelberi (2018), yaptıkları çalışmalarında, dolgu barajlarda geçirimsizlik genelde dolgu içerisine yerleştirilen kil çekirdekle sağlandığını ancak tam geçirimsizliği sağlayacak uygun nitelikteki kil bulmak veya ekonomik şekilde yakından temin etmenin her zaman mümkün olmayacağını ifade etmişlerdir.

DSİ 17. Bölge (Van) Müdürlüğü sınırları içerisindeki kil çekirdekli kaya dolgu tipindeki Morgedik Barajı inşaatı sırasında uygun evsafa kil malzeme bulunmadığından mevcut kil çekirdeğin Geosentetik Kil (GCL) ile takviyesi yapılmıştır. Bu uygulama Türkiye'de ilk olup geçirimsizliği sağlamak adına ekonomik bir çözüm sunmuştur (DSİ, 2013).

Çakır ve Ünsever (2019), barajın temeli için kazı çalışmaları deniz seviyesi altında gerçekleştirilen ve ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipli Büyükkumla Barajı incelemiştir. Baraj gövde kazılarının kuru bir ortamda yapılabilmesi için geçirimsizlik perdesi uygulanarak deniz suyu etkisinin baraj rezervuarından uzaklaştırıldığı belirtilmiştir. Böylece baraj gövdesi altındaki sızıntılar kontrol altına alınmıştır. Bu metodun Türkiye'de ilk kez, yeraltı suyu etkisinden uzaklaşmak amacı ile Aslantaş Barajı'nda uygulanıp netice alındığı ifade edilmiştir. Geçirimsizlik perdesi yönteminde amaç sızmayı önlemek veya sızma boyunu uzatmaktır. Büyükkumla Barajı'nda memba ve mansap batardoları altında, batardo eksenleri boyunca geçirimsizlik perdesi uygulanmıştır.

Karabulut (2019), doymun olmayan zemin koşullarında inşa edilmiş yüksek bir dolgu şevinde yağışlar etkisi ile zemin içine su sızması durumunun stabilite üzerindeki etkilerini sayısal yöntemlerle incelemiştir. Kullanılan malzeme parametreleri dolgu inşa edildikten sonra araziden alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden ve zemin-su karakteristik eğrisinden belirlenmiştir. Çalışmada, farklı yeraltı su seviyesi, permeabilite, yağış miktarı ve matrik emme değerleri değişiminin şevin stabilitesine olan etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Yağışın şev içerisine sızması durumu için GEOSTUDIO programının SEEP/W modülü kullanılarak oluşan boşluk suyu basıncı değişimleri belirlenmiş ve bu durum dikkate alınıp SLOPE/W modülü ile şevin stabilitesi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Morgedik Barajı ve Genel Özellikleri

Baraj, Doğu Anadolu Bölgesinde, Van Kapalı Havzasında, Van Gölünün kuzeyinde yer almaktadır. Van iline bağlı Erciş ilçesinin 36 km kuzeydoğusunda Deliçay nehri üzerinde yapılmış olan Morgedik Barajı ve Tesisleri içme suyu, sulama ve enerji amaçlı olarak planlanmıştır. Kil Çekirdekli Kaya Dolgu tipinde planlanan barajın temelden yüksekliği 60 m' dir. 100 hm³ depolama hacmi olan projenin baraj dolgu hacmi 780 000 m³'tür. Morgedik Barajı ve 2 adet regülatör vasıtasıyla toplamda brüt 18 734 ha alan borulu şebeke sistemi ile sulanacaktır.



Şekil 2.1. Morgedik Barajı Türkiye'deki yeri (DSİ, 2010)

Çizelge 2.1. Morgedik Barajına ait karakteristik bilgiler (DSİ, 2010)

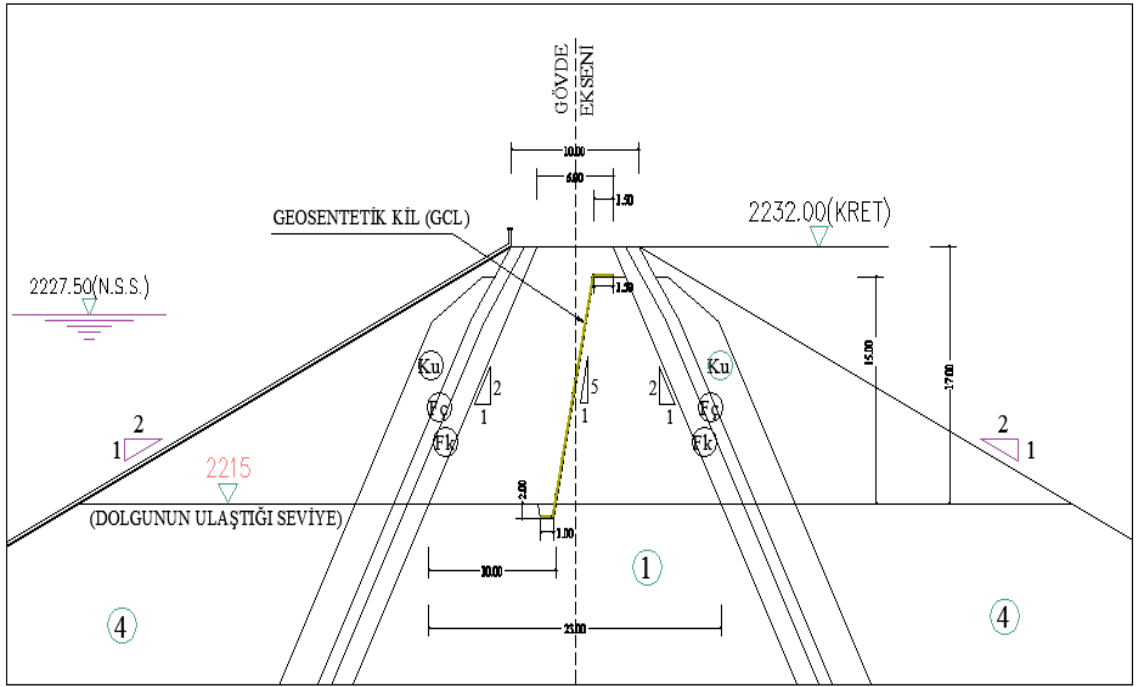
Drenaj Alanı	205,00 km ²
Yıllık ortalama akım	104,50 hm ³
Maksimum su kotu	2229,00 m
Normal su kotu	2227,50 m
Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu
Kret kotu	2232,00 m
Kret uzunluğu	240,00 m
Talvegden yüksekliği	55 m
Mansap ve memba şevi	1/2
Dolgu hacmi	0,78 hm ³
Dolusavak yeri	Sol sahil
Dolusavak tipi	Karşıdan alışı, kontrolsüz



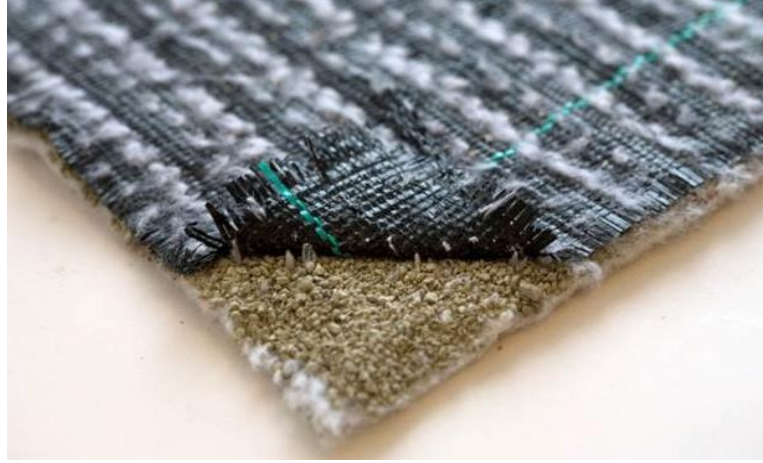
Şekil 2.2. Morgedik Barajı mansaptan görünüm (DSİ 2016)

Kil çekirdekli inşa edilmeye başlanan Morgedik Barajında 2215,00 m kotuna kadar mevcut ocaklarındaki çıkarılan kille imalat yapılmıştır. Ancak kret kotuna 17 m kala kil malzeme

ocaklarında uygun evsafa kil bulunmaması üzerine DSİ tarafından proje revize edilmiştir. Böylece Türkiye’de ilk kez kil çekirdeğin imalatı aşamasında mevcut düşük kalitedeki kil dolgusunun geosentetik kil (GCL) ile güçlendirilerek kil çekirdek imalatı tamamlanmıştır. Morgedik Barajında sızdırmazlık için kullanılan Geosentetik Kil (GCL) yüksek dayanımlı geotekstil katmanlar arasında doğal sodyum bentonit iğnelenerek tesbit edilmesiyle meydana getirilir. GCL ürünleri genellikle 5 m eninde ve 40 m uzunlukta büyük rulolar şeklinde üretilmektedir. Malzemenin uygulaması son derece hızlı ve basittir, ekleme yerleri sadece üst üste getirilerek herhangi bir kaynak işlemine gerek kalmadan imalat gerçekleştirilir. Kullanılan kil malzeme doğal sodyum bentonit volkanik kökenli bir kil türü olup, su ile temas ettiğinde jel haline gelerek 18-30 misli şişme özelliği gösterir. Jel haline gelen sodyum bentonitin basınç etkisiyle şişmesi önlediği zaman geçirimsiz ve yoğun bir jel tabakası haline dönüşen sodyum bentonit, suyun geçişini tamamen bloke eder. Ayrıca bu malzemenin permeabilitesi de oldukça düşüktür ($k=10^{-11}$ cm/s).



Şekil 2.3. Morgedik Barajı *cut-off* ta GCL tahkimi (GEOPLAS, 2014)



(a)



(b)

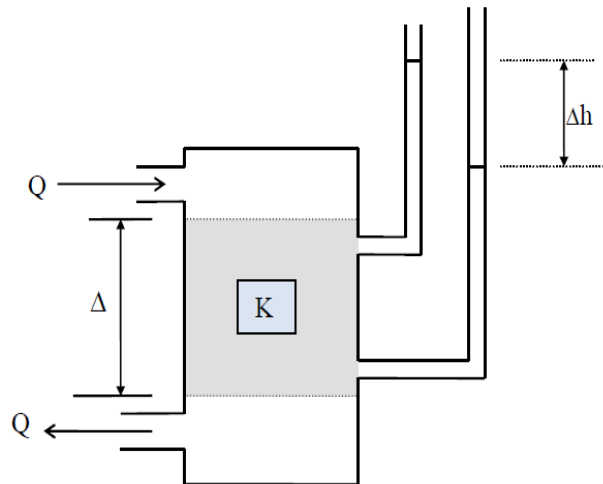
Şekil 2.4. Morgedik Barajı: a) GCL in yapısı, b) Cut-off ta GCL ruloları serimi (GEOPLAS, 2014)

2.2. Yöntem

Fransız fizikçi Henry Darcy 1856 yılında zemin içerisindeki akımı inceleyip ve kohezyonsuz granüler yani küçük taneli olan bağdaşık ortamlarda akımın hareketini gözlemlemiştir. Darcy'in yaptığı bu çalışmalar sızma analizlerinin temeli oluşturmuştur. Darcy çalışmalarının neticesinde ufak taneli geçirgen ince zeminlerde (toprak vb.) hidrolik eğimin ilk mertebeden önemli faktör olduğunu göstermiştir. Böylece zemindeki su sızmalarının eğimin etkisiyle gerçekleştiği üzerine araştırmalar yapmıştır. 1880'lerde ise Laplace diferansiyel denklemleriyle su basıncının yayılması ve suyun hız değerlerine ulaşılabilirdiğini Forchheimer yaptığı çalışmalarda göstermiştir. 1900'lü yılların başlarında Forchheimer (1901) Almanya'da, Richardson (1911) ise İngiltere'de birbirlerinden bağımsız olarak yaptığı çalışmalarında etkili bir grafik yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu metotla Laplace denkleminin çok az sapmalarla gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini ispatlamışlardır. Ancak Casagrande (1937)'nin bu durumla ilgili yayınlanan kapsamlı bir çalışmasına dek toprak barajlarda bu metot çok fazla tercih edilmemiştir. Casagrande (1937) yaptığı çalışma ve buna benzer araştırmalar yayımlandıkça Laplace denkleminin verileri sızma analizleri için standart işlem haline dönüşmüştür (Mesci 2006).

2.2.1. Sızma Analizinin Temel Denklemlerle Genel İfadesi

Darcy (1856) Şekil 2.5 ile temsil edilen deney setini kullanarak yaptığı laboratuvar çalışmaları sonucunda Darcy Kanunu bulmuştur.



Şekil 2.5. Darcy'nin zemin içerisindeki akım kuralı (Demir, 2011)

Burada zemin içerisindeki suyun akım hızı,

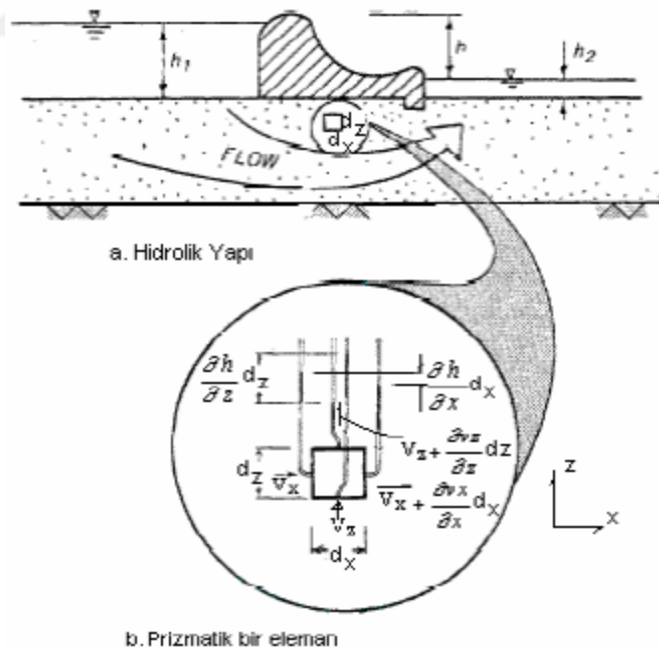
$$v = ki \quad (2.1)$$

olarak ifade etmiştir. Buradaki, k :permeabilite katsayısı, i : hidrolik eğimdir. Bu durumda akımın debi ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q = k.i.A \quad (\text{Darcy formülü}) \quad (2.2)$$

Denklemdaki A : zemin içindeki akıma dik kesit alanıdır.

Darcy yasasına uygunluğu kabul edilen yer altı suyunun iki boyutlu permanent akımlarında, birçok matematiksel metodun temeli olan Laplace denklemi sızma analizi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Zemin için iki boyutlu, geçirimli ve izotropik gibi şartlar sağlandığında zeminde oluşan sızma hesabında, doymuş zemindeki toplam su yükü dağılımı Şekil 2.6'de ki prizmatik bir eleman için incelenebilir (Çilingir 2007).



Şekil 2.6. Doymuş zeminde suyun hareketi x ve z doğrultularındaki akış hızı (Çilingir, 2007)

$$x \text{ doğrultusunda hidrolik eğim: } i_x = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$z \text{ doğrultusunda hidrolik eğim: } i_z = \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.4)$$

Buradaki, ∂h : basınç yüksekliği, ∂x ve ∂z : sızma boylarıdır.

Akımın sürekliliği şartları içerisinde Laplace denkleminde ait bazı kabullere bağlı olarak birim hacimde birim zamanda giren suyun debisi,

$$q_e = V_x dy dz + V_z dx dy \quad (2.5)$$

olarak elde edilir. Tekrar birim hacim değerinden birim zamanda deşarj olan suyun debisine (q_1) eşit olduğu kabul edilerek devam edilmiştir.

$$q_1 = V_x dy dz + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx dz dy + V_z dx dy + \frac{\partial V_z}{\partial z} dy dx dz \quad (2.6)$$

$q_e = q_1$ 'den denklem 2.5 denklem 2.6 eşitlenirse en özet haliyle;

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, V_x = k \tilde{i}_x V_z = k \tilde{i}_x \quad (2.7)$$

Elde edilir.

Darcy yasasını (2.1 bağıntısı) kullanılarak x ve y doğrultularındaki hidrolik iletkenlik katsayısı değerlerinin aynı olduğu varsayımıyla x ve y yönündeki hız bileşenleri,

$$V_x = k \tilde{i}_x = -k \frac{\partial h_x}{\partial x}, V_z = k \tilde{i}_z = -k \frac{\partial h_z}{\partial z} \text{ olarak hesaplanır.} \quad (2.8)$$

Darcy yasasına uygunluğu kabul edilen yeraltı suyunun iki boyutlu permanant akımlarında, devinim doğrultusuna paralel yüzeyler arasından sızan akıma yan kısımlardan suyun girmemesi veya yan cidarlara suyun gitmemesi ayrıca debi faktörünün sabit kabul edilmesi durumunda hız potansiyeli (2.9) denklemindeki gibi olur.

$$\phi = kh \quad (2.9)$$

Burada, kh: hız potansiyelini ifade eder ve genelde “ ϕ ” sembolüyle gösterilir.

Yukarıdaki bağıntılar (2.7) denkleminde yerine konulursa, en genel haldeki Laplace denklemi,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.10)$$

elde edilmiş olur.

Sızma analizlerinde kullanılan Laplace denklemi bazı kabullere dayanır. Bunlar; akan suyun sıkıştırılamayacağı, akımın laminar olduğu kabul edildiği ve Darcy kanunu uygulanabileceği gibi önemli kabullere dayanmaktadır (Mesci, 2006).

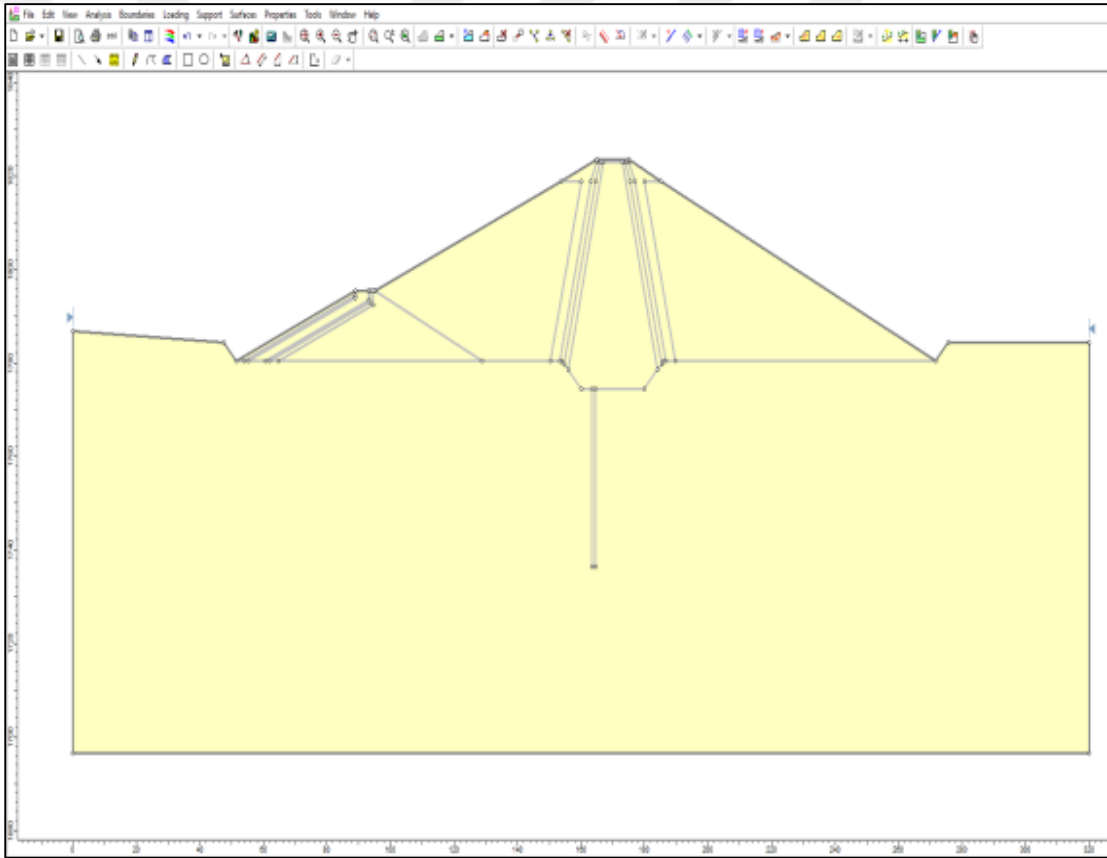
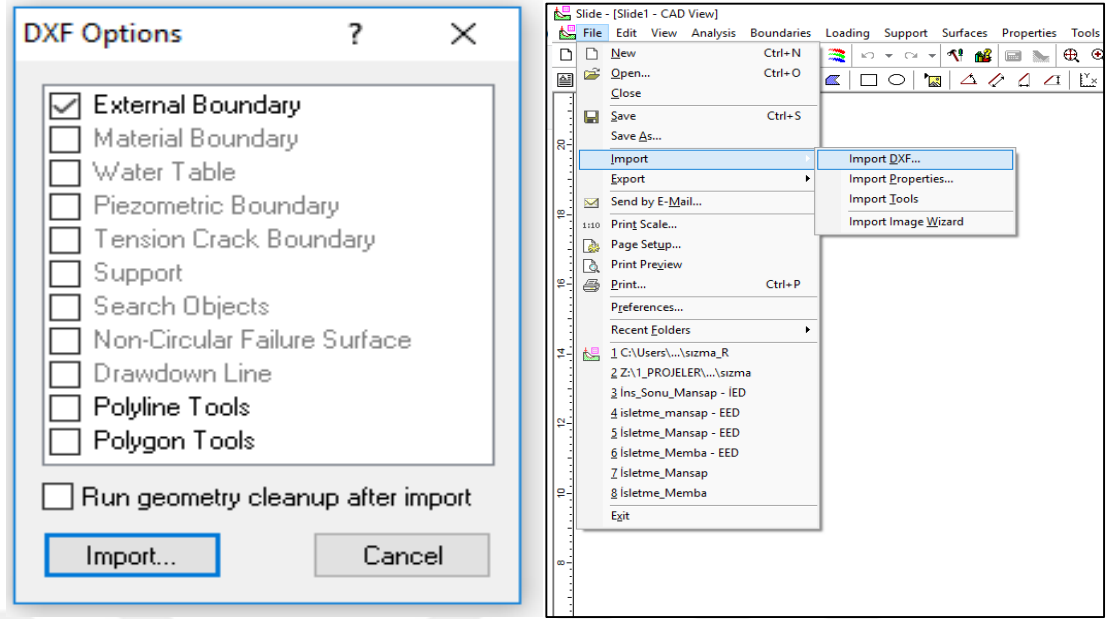
Birçok sızma problemi, temeli Laplace denkleminde dayanan çeşitli yöntemlerle çözülmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerden bir tanesi de sayısal yöntemlerdir. Günümüzde sayısal yöntem olarak kullanılan ve mühendislik çalışmalarının sızma problemlerinde en çok geçerliliği olan iki yöntem yer almaktadır. Bunlardan ilki sonlu elemanlar yöntemi diğeri ise sonlu farklar yöntemidir. Bu iki metot da iki ve üç boyutlu modellemelerde kullanılabilir. Her iki yöntemde sızma analizlerinde sonuç için çok fazla sayıda denklem üzerinde çalışılacağı için, geliştirilen bilgisayar programlarından yararlanılmaktadır.

2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve SLIDE v6.0 Yazılımı

Su tutup biriktiren yapıların gerek gövde bölümünde ve gerekse temel altında sızan su sebebiyle oluşan boşluk suyu ve sızma basınç miktarlarının bulunmasında, farklı çözüm metotlarına kıyasen çok daha hassas bir metot olan sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır. Bu metot için analiz edilecek alan boyut ve büyüklükleri belli olan sonlu sayıda elemanlara bölünür. Elde edilen elemanlar birbirlerine bağlı oldukları düğüm noktaları ile teşkil edilir. Gerçek durumlarda sürekli ortamlarda elemanlar arası düğüm noktalarının sayısı sonlu değil tam tersine sonsuzdur. Fakat sonsuz sayıdaki düğüm noktaları, sonlu elemanlar yöntemiyle sonlu sayıda elemana indirgenerek çözüm yapılır. Sonlu elemanlar metoduyla çözüm alanı küçük elemanlara bölünerek çok sayıda ayrık elemandan oluşur. Bu bölümün sayısına göre n sayıda denklem ve n sayıda bilinmeyen oluşur. Her bir elemanın malzeme türü, permeabilite, sınır şartları vb gibi özellikleri o elemana atanır. Denklem sistemi çözülür ve her bir düğüm noktasındaki su yükleri ve elemanlardaki akımlar bulunur. Elemanlardaki akımlar ve düğüm noktalarındaki yüklerin hesabı

için denklemler sistemi çözülmeye başlanır. Serbest yüzeyli veya geçirimsiz düzlemler arası sızma problemlerinin analitiği için iki ve üç boyutlu çalışabilen bilgisayar yazılımları geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde ağ sisteminin meydana getirilmesi için interaktif, etkileşimli bir grafik işlemcisi mevcuttur. Akım işlevlerini ve potansiyelleri analiz ederek akım ve potansiyel eğrilerini oluşturmak böylece akım ağını dizayn etmek mümkün olabilmektedir. Daha komplike sızma sorunları için özellikle çok katmanlı barajlarda ve kısa aralıklarda malzeme katmanı değişen yapılarda bu metot daha iyi sonuçlar vermektedir. Barajlar ve bağlamalar gibi su tutan, büyük su kütleleri ile ilişik içinde olan biriktirme ve kabartma imalatlarındaki sızma basınç hesaplarında, varsa memba ve mansap palplanşları civarı ile yapının temel ve gövde kısmında oluşabilecek her durum oldukça önem arz ettiğinden, bu bölümler daha hassas ve daha azami kabuller yapılarak analiz edilmelidir. Bunun içinde diğer metotlarla ulaşılan sonuçlara göre oldukça hassas denilebilecek sonlu elemanlar çözüm yaklaşımı kullanılmıştır (Güngör 1995).

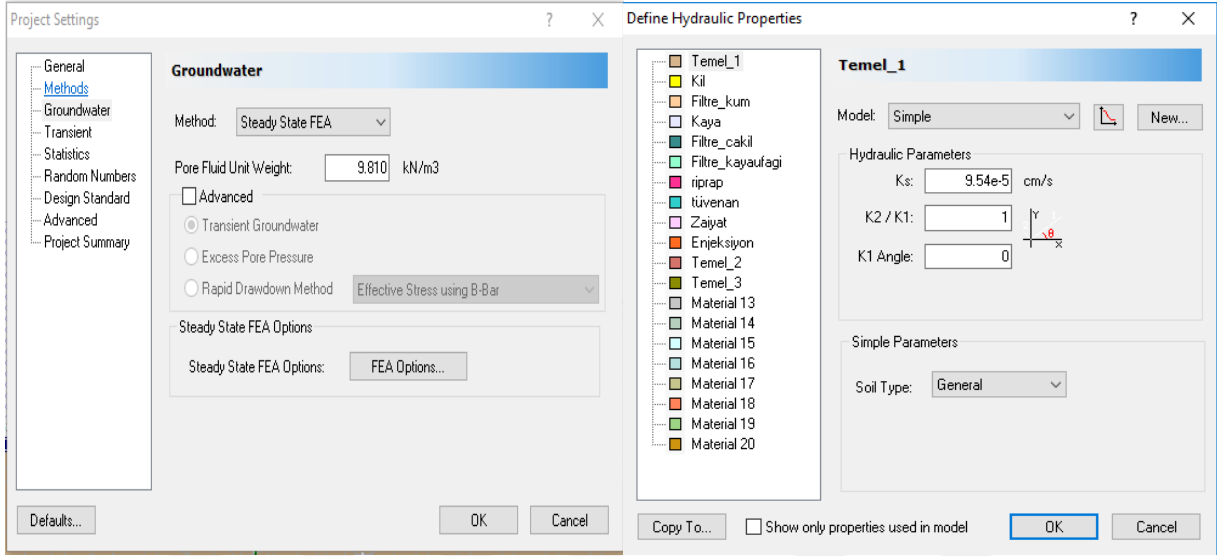
SLIDE v6.0 yazılımı sonlu elemanlar çözüm yöntemini kullanmaktadır. Yazılım iki boyutlu analiz yetisi olan, basit ve kullanışlı arayüze sahip bir yazılımdır. Ayrıca kullanımı kolay arayüzünün verdiği avantaj ile son derece karmaşık geometrilerin dahi modellenebilmesini sağlamaktadır. Geometrilerin modellenmesi program içeriğinde araçlarla yapılabilmektedir. Karmaşık geometrilere Autocad programında düzenlenen kesitler uygun katman isimleri düzenlenerek SLIDE programına aktarılabilir. Bu şekilde karmaşık geometriler hatasız ve hızlı bir şekilde tanımlanabilmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. SLIDE v6.0 programının arayüz görüntüleri

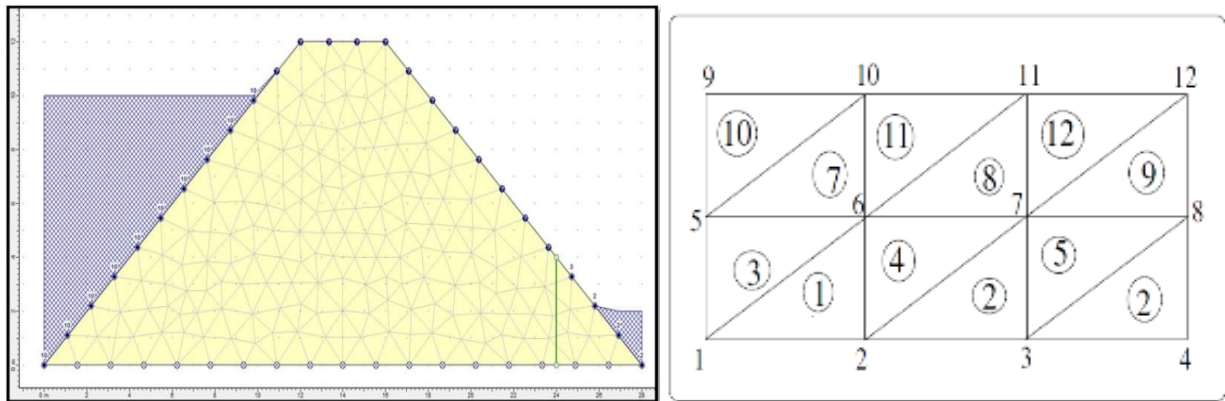
Dış sınırlar ve malzeme sınırlarının programda tanımlanması veya aktarılması neticesinde zemin ve malzeme parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Malzeme parametreleri *properties-definematerials* menüsünden açılan pencere içerisinde tanımlanmaktadır. Proje üzerindeki katmanlar ve zemin için buradan ilk parametrelerin(birim hacim ağırlıkları, kohezyon

ve içsel sürtünme vb) tanımlaması yapılır. Sonra sızma analizi için elde ettiğimiz veya araştırıp bulunan hidrolik parametrelerin malzemelere tanımlanabilmesi için öncelikler *Analysis - Projectsettings - groundwater* menüsünde metodun *SteadyState* FEA olarak seçilmesi gerekmektedir. Seçilen ayarlamalar sonucunda programda yeni bir alt sekme açılacaktır. Bu sekme içerisinde hidrolik parametreler yine *properties- define hydraulicproperties* menüsü ile tanımlanır.



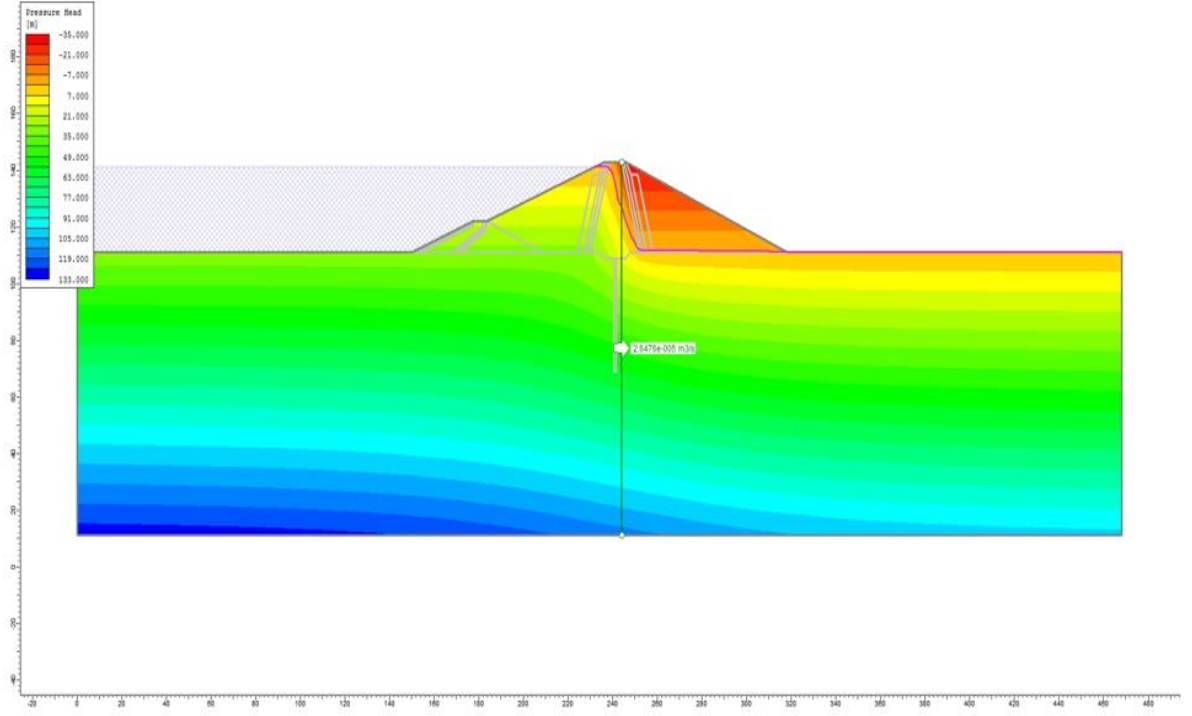
Şekil 2.8. SLIDE v6.0 da hidrolik parametrelerin tanımlanması

Parametrelerde tanımlandıktan sonra sonlu eleman ağı (*Mesh*) oluşturulup gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra sistem çözüm öncesinde hazır hale gelmektedir.



Şekil 2.9. Gövdenin ağ (meş) yapısı ve düğüm noktalarının teşkili

Meş yapısı oluşturulup sızma analizleri yapılan barajın örnek teşkil edecek analiz sonucu aşağıda gösterilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. SLIDE v6.0 da analiz sonuç gösterimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

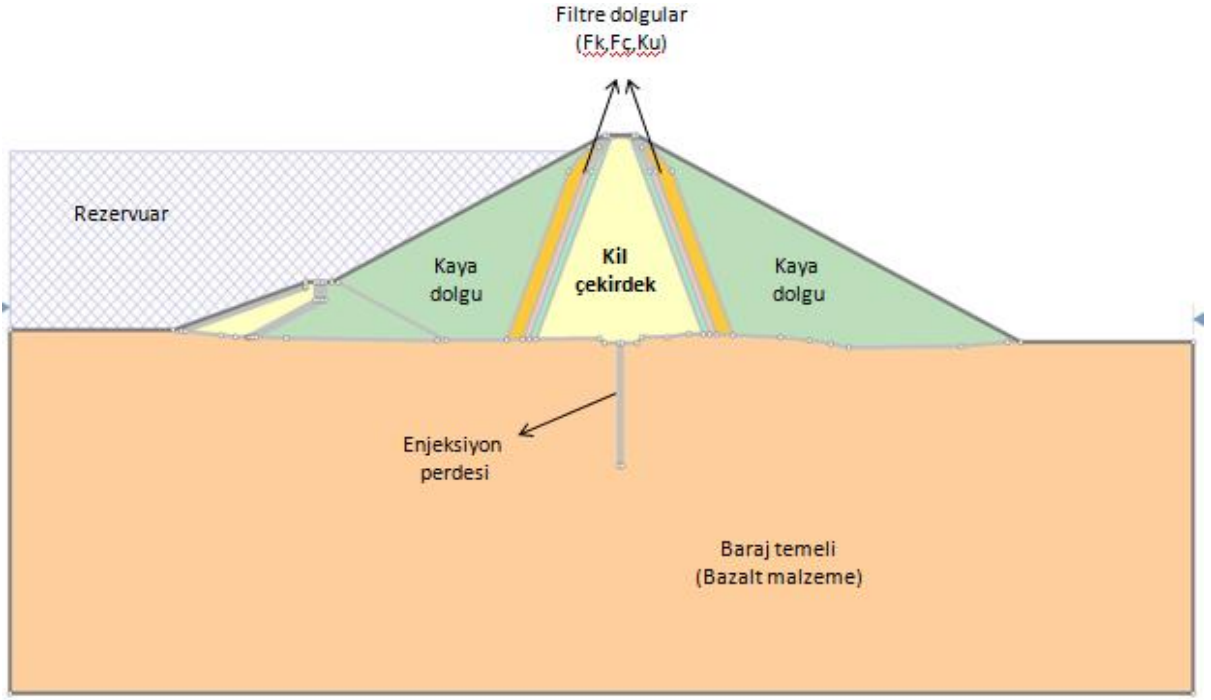
Bu çalışmada sayısal model olarak seçilen kil çekirdekli kaya dolgu tipinde dizayn edilen Morgedik Barajı üzerinde çalışılmıştır. Uygulama aşamasında çekirdek bölgesinde kullanılan farklı geçirimsiz malzemelerin sızma analizleri irdelenmiştir. Çekirdek bölgesinde kullanılan doğal kilin ve geosentetik kilin sızma analizleri ve bu malzemeler oluşabilecek alternatif çekirdek bölgesi için sızma olayı incelenmiştir. Sızma analizleri için sonlu elemanlar çözüm yöntemini kullanan SLIDE v6.0 programından yararlanılmıştır. Barajın çekirdek bölgesinde uygulanan mevcuttaki imalatın işleyişi ve alternatif olabilecek durumların kıyaslaması analizlerle yapılmıştır. Geosentetik kil yerine uygulamada kesafet oranı uygun görülmeyen kil malzemeyle oluşturulacak kil çekirdeğin performans analizleri araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda oluşturulan verilerin tutarlılığı incelenmiş olup, baraj gövde ve temelinde oluşan boşluk suyu ve sızma basınç değerleri gözlemlenmiştir. Boşluk suyu ve sızma basınç değerleri baraj emniyet faktörü dikkate alınarak kıyaslanmıştır.

Sayısal Model olarak seçilen Morgedik Barajında yukarıda da bahsedildiği gibi belli bir kota(2215,00 m) kadar mevcut doğal kille çekirdek bölgesi yükselmiştir. Ocaklarda uygun kilin bitmesi ve baraja en yakın yeni bir ocaktan getirilecek kilinde maliyeti yüksek çıkması nedeniyle çekirdek bölgesinin kalan kısmı için farklı alternatifler düşünülmüştür. Araştırmalar sonucunda kesafet oranı uygun olmayan kilin geosentetik kille birlikte uygulanması planlanmış ve nitekim imalat bu şekilde tamamlanmıştır.

Bu çalışmada, barajın 2215,00 m kotundan sonrası için farklı alternatifler düşünülerek bunlar üzerinde analizler yapılmıştır. Bu analizler;

- 1- Kil çekirdek bölgesi için 2215,00 m kotundan sonrası içinde uygun esaftaki kille imalatın tamamlanması durumu,
- 2- Barajın kil çekirdeğinin mevcuttaki durumuyla analizi; yani 2215,00 m kotuna kadar kil malzeme, bu kottan sonra geosentetik kil malzeme kullanımı durumu,
- 3- 2215,00 m kotundan sonra baraj mevkiinde bulunan ama uygun görülmeyen(kesafet oranı düşük olan) kille devam edilme durumu için yapılmıştır.

Bu üç alternatif analizler için üç ana modeli teşkil edilmiştir. Esas modeller üzerinden malzeme kesit ve parametreleri değiştirilerek elde edilen analizler kıyaslanarak tartışılmıştır. Morgedik Barajının SLIDE programındaki analizlerine esas teşkil edecek örnek modelin görünümü ve tanıtımı aşağıda yer almaktadır (Şekil 3.1).

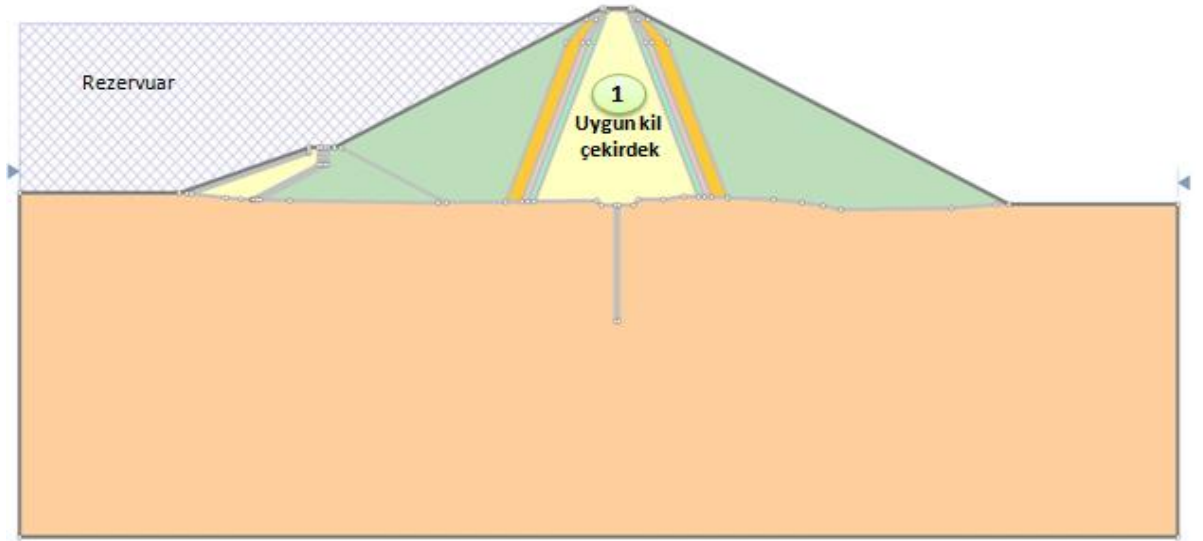


Şekil 3.1. SLIDE v6.0 da model üzerinde gövde ve temel kısımlarının gösterimi

3.1. Analizler İçin Kullanılacak Ana Modeller ve Parametreleri

Yukarıda verilen üç farklı duruma uygun olarak hazırlanmış sayısal modeller ve malzeme özellikleri aşağıdaki şekil (Şekil 3.2, 3.3 ve 3.4) ve tablolarda (Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3) verilmiştir.

1.Model: Uygun kil kullanımı

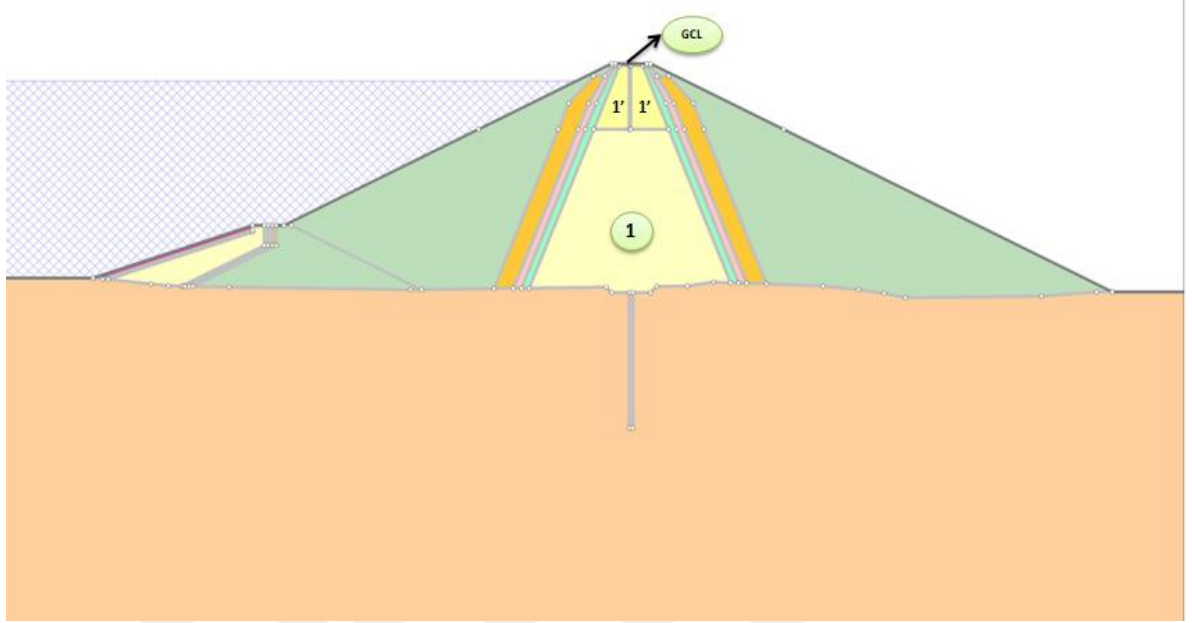


Şekil 3.2. Birinci alternatifin modellenmesi

Çizelge 3.1. Malzeme parametreleri (1. Model)

Birim	Sembol	Permeabilite
Temel	T	$k=1.5 \times 10^{-7}$ cm/s
Kil Dolgu	1	$k=1.5 \times 10^{-9}$ cm/s
Kaya	4	$k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s
Riprap	R	$k=1.0 \times 10^{-3}$ cm/s
Kaya Ufağı	Ku	$k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s
Filtre Çakıl	Fç	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Filtre Kum	Fk	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Filtre Tüvenan	Ft	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Enjeksiyon	E	$k=1.0 \times 10^{-10}$ cm/s

2. Model: Mevcut Uygulama (Kil + GCL)

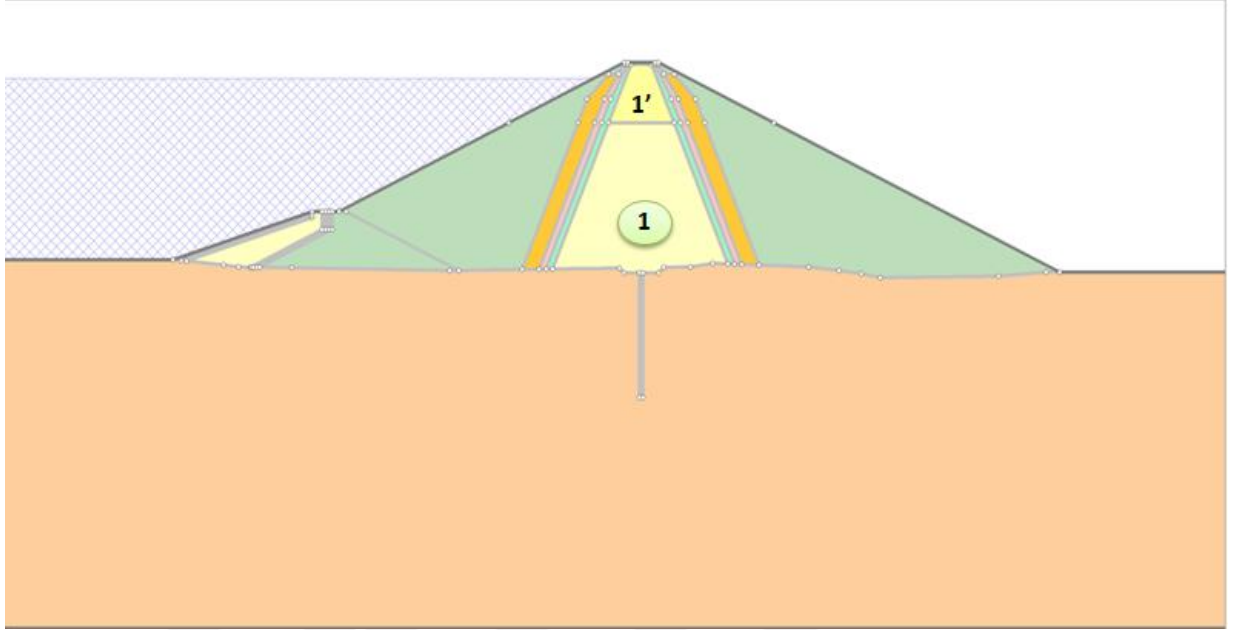


Şekil 3.3. İkinci alternatifin modellenmesi

Çizelge 3.2. Malzeme parametreleri (2. Model)

Birim	Sembol	Permeabilite
Temel	T	$k=1.5 \times 10^{-7}$ cm/s
Kil Dolgu	1	$k=1.5 \times 10^{-9}$ cm/s
Kaya	4	$k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s
Riprap	R	$k=1.0 \times 10^{-3}$ cm/s
Kaya Ufağı	Ku	$k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s
Filtre Çakıl	Fç	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Filtre Kum	Fk	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Filtre Tüvenan	Ft	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Enjeksiyon	E	$k=1.0 \times 10^{-10}$ cm/s
Değeri Düşük Kil	1	$k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s
Geosentetik Kil	GCL	$k=1.0 \times 10^{-11}$ cm/s

3. Model: Uygun olmayan kil



Şekil 3.4. Üçüncü alternatifin modellenmesi

Çizelge 3.3. Malzeme parametreleri (3. Model)

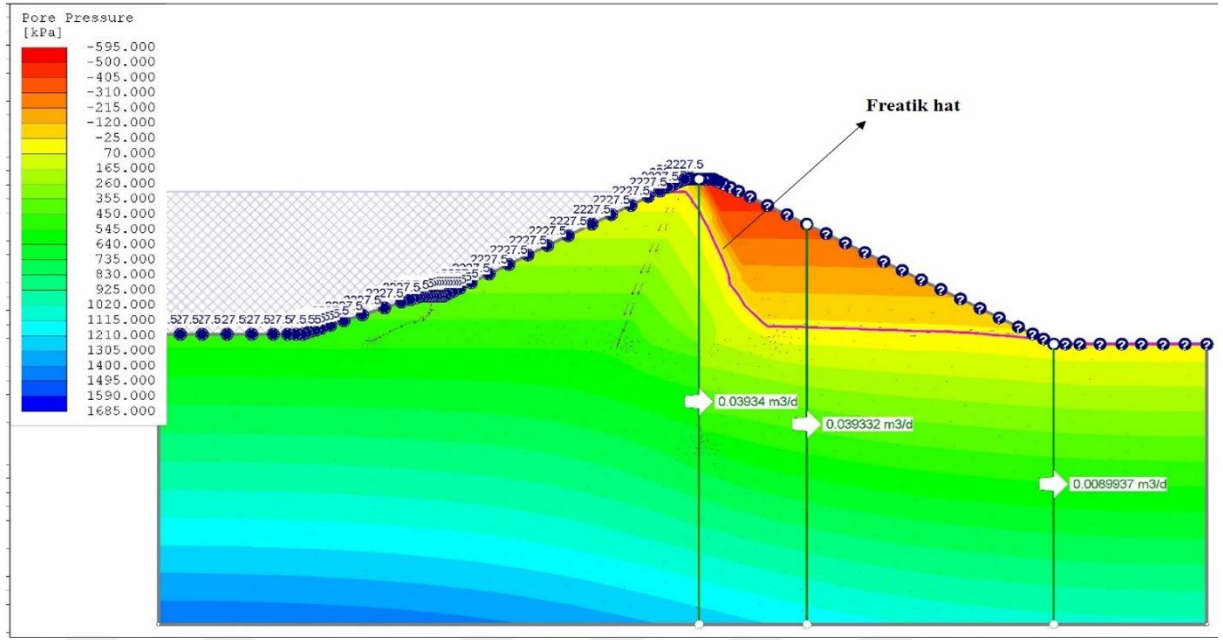
Birim	Sembol	Permeabilite
Temel	T	$k=1.5 \times 10^{-7}$ cm/s
Kil Dolgu	1	$k=1.5 \times 10^{-9}$ cm/s
Kaya	4	$k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s
Riprap	R	$k=1.0 \times 10^{-3}$ cm/s
Kaya Ufağı	Ku	$k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s
Filtre Çakıl	Fç	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Filtre Kum	Fk	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Filtre Tüvenan	Ft	$k=1.0 \times 10^{-4}$ cm/s
Enjeksiyon	E	$k=1.0 \times 10^{-10}$ cm/s
Değeri Düşük Kil	1'	$k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s

3.2. Analizler

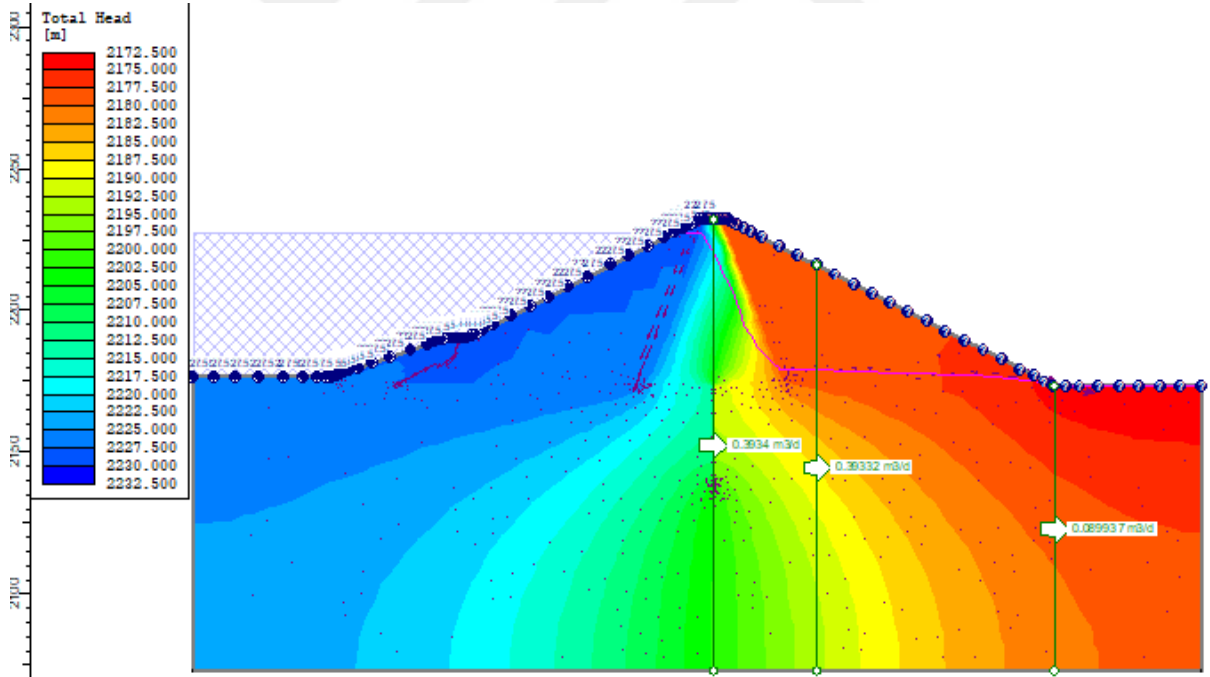
3.2.1. Birinci Model İçin Yapılan Analizler (Çekirdek Bölgesinde Uygun Kil Kullanımı)

SLIDE programında oluşturulan modeller için tüm değişkenler ve malzeme karakteristikleri tanımlandıktan sonra rezervuar su kotu ve girilen modelin meş yapısı oluşturulmuştur. Meşli model oluşturulduktan sonra bizim için önem teşkil eden bölgelere nokta atayarak(*addischargesection*), buralardan sızma ve boşluk suyu basınç değerlerine bakılmıştır. Program, yapmış olduğu analizleri birçok farklı başlık altında görmemizi sağlamaktadır. Analiz sonuçlarını değerlendirmek için tanımlanan kesit üzerinde *Pressurehead* (hidrolik basınç yükü), *porepressure*(boşluk suyu basıncı), *horizontaldischargevelocity* (yatay akım hızı)gibi birçok değişkenin dağılım çıktıları alınmış ve yorumlanmıştır

Uygun kil malzemeyle yapılan (1. Model) analizinden elde edilen bazı çıktılar (*porepressure* ve *total head*) Şekil 3.5'te gösterilmiştir (Daha fazla analiz çıktısı için **Bkz. EK-1**). Bu şekillerde verilen basınç dağılımları incelendiğinde bekleneceği gibi hidrostatik ve boşluk suyu basınçları nedeniyle baraj gövdesinin memba kısmında yüksek basınçlar gözlemlenirken mansap kısmında ise düşük basınçlar gözlenmiştir. Şekil 3.5a'da freatik hattın olduğu yer (sıfır basınç hatı) net olarak görülmektedir. Mansapta, freatik hattın yukarısında ise negatif basınçlar gözlemlenmiştir.



(a)

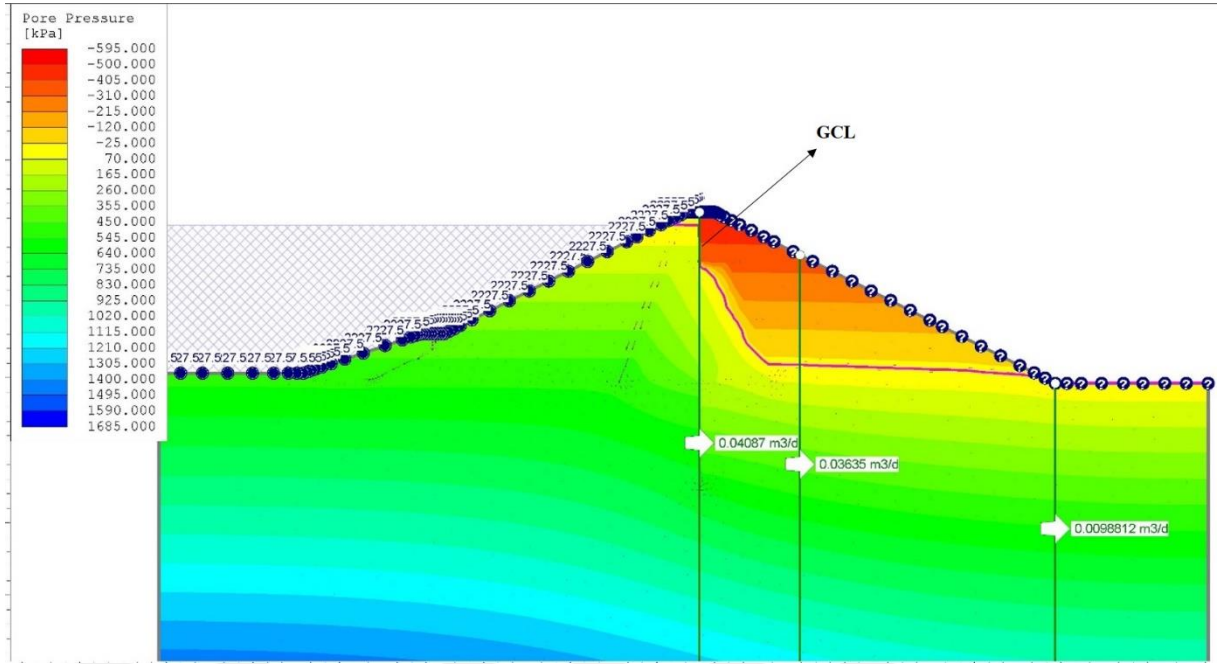


(b)

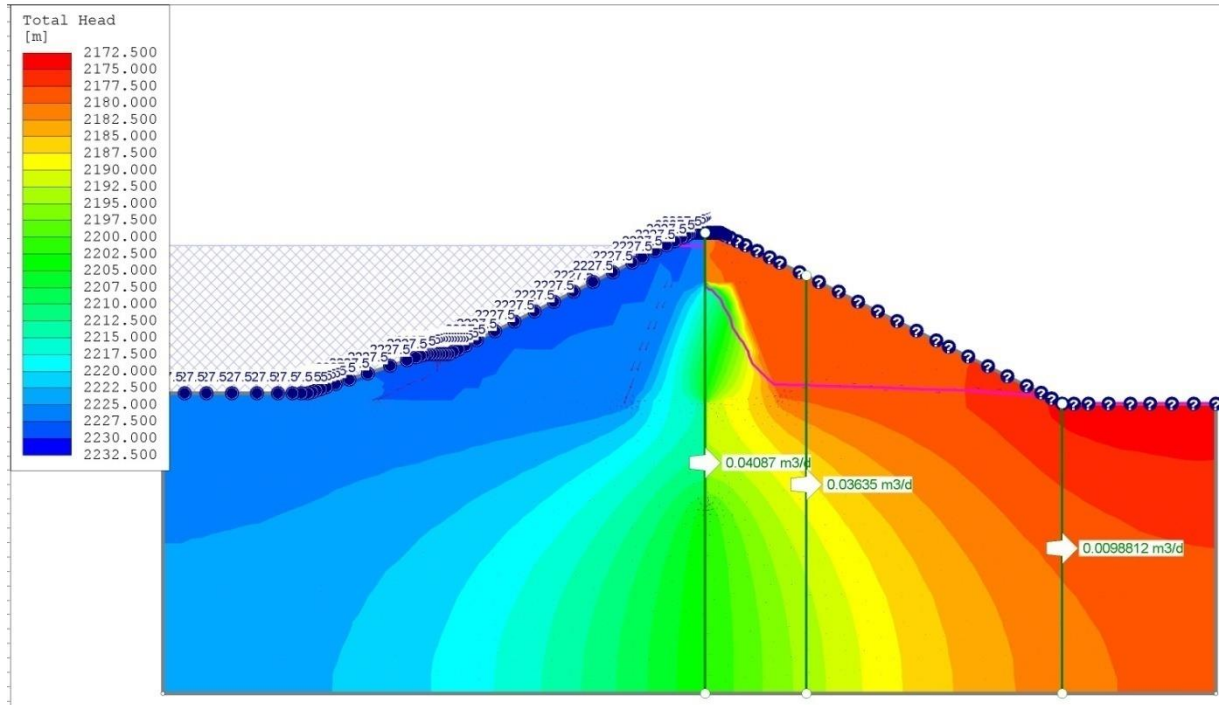
Şekil 3.5. Birinci Model analiz sonuçları: a) Boşluk suyu basıncı (*porepressure*), b) Toplam yük (*total head*)

3.2.2. İkinci Model İçin Yapılan Analizler (Kesafet Oranı Düşük Kilin, Geosentetik Kille Takviyesi)

Barajın kil çekirdeğinin mevcuttaki durumuyla analizi; yani 2215,00 m kotuna kadar kil malzeme, bu kottan sonra geosentetik kil malzemeye yapılan analizler (2. Model) Şekil 3.6'da gösterilmiştir(Daha fazla sonuç için **Bkz. EK-2**). Basınç durumları genel olarak 1. Modele benzemekle birlikte 2. Modelde kullanılan GCL'nin basınç dağılımı ve dolayısıyla sızma üzerine etkisi Şekil 3.6a'da açık bir şekilde görülebilmektedir. Gövde kesitinin üst kısmında uygulanan GCL tabakası sayesinde freatik hat düşeyde ani olarak (GCL ile birlikte) aşağı düşürülmüştür. Bu durum GCL tabakası boyunca sızmanın meydana gelmediğini göstermektedir. Freatik hattın aşağıya düşürülmesi, GCL'nin gövde kesiti boyunca sızma üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Her iki modelde de toplam basınç yüksekliğinin gösterildiği Şekil 3.5b ve 3.6b incelendiğinde memba bölgesindeki kil çekirdek yüzeyi boyunca akım çizgilerini (hız vektörlerinin) belirgin şekilde aşağıya yönlendiği görülmektedir. Bu durum kil çekirdeğin geçirimsizliği önemli ölçüde sağladığının göstergesidir.



(a)



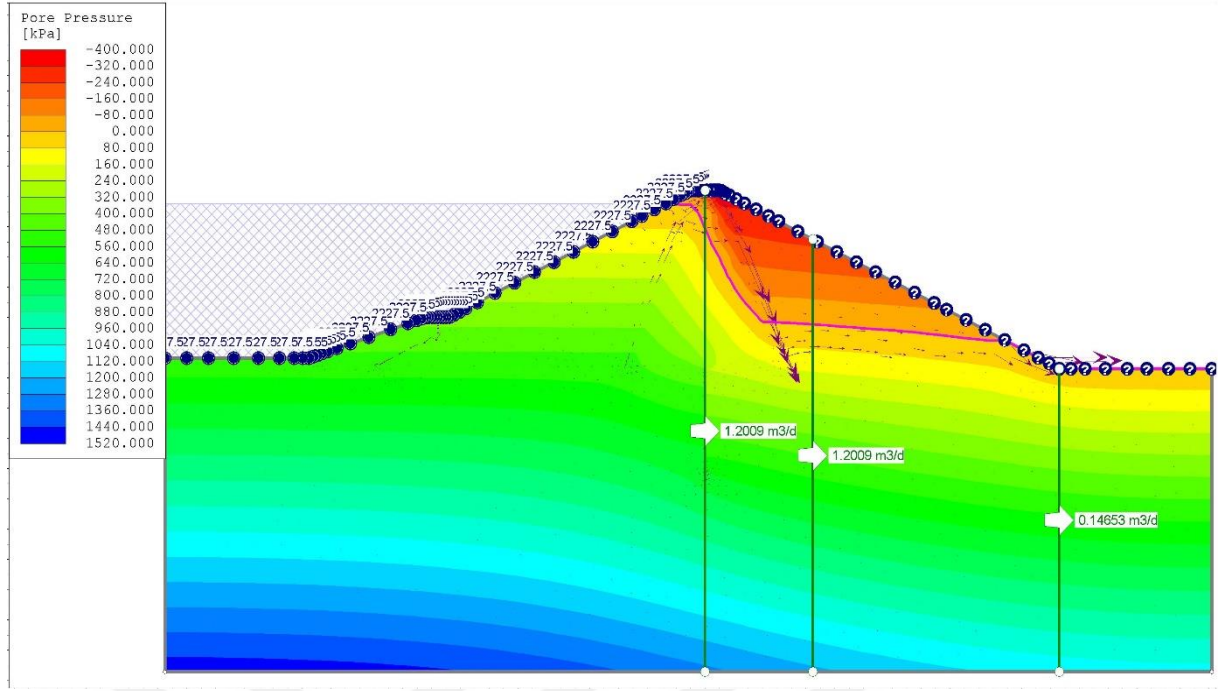
(b)

Şekil 3.6. İkinci Model analiz sonuçları: a) Boşluk suyu basıncı (*porepressure*), b) Toplam yük (*total head*)

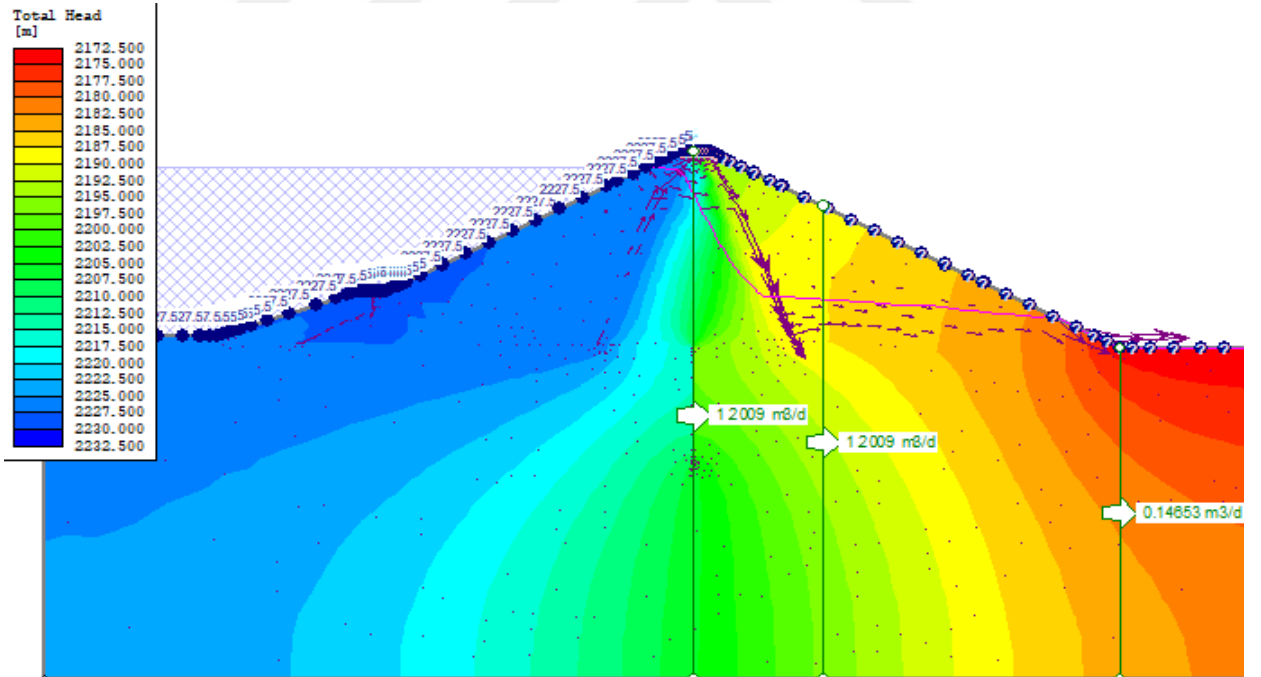
3.2.3. Üçüncü Model İçin Yapılan Analizler (Kesafet Oranı Düşük Kilin Kullanılması)

2215,00 m kotundan sonra baraj mevkisinde bulunan ama uygun görülmeyen(kesafet oranı düşük olan) kille devam edilmiş olsaydı barajın sızma durumlarını veren analizleri Şekil 3.7’de verilmiştir (Daha fazla analiz çıktısı için **Bkz. EK-3**). Bu model için verilen çıktılarından, verilen kottan sonra uygun olmayan (düşük kaliteli) kil kullanılması durumunda freatik hattın mansap bölgesinde daha yüksekte geçtiği görülmektedir. Ayrıca Şekillerde akım çizgilerinin (hız vektörlerinin) kil tabakası boyunca membada yukarı, mansapta ise aşağı doğru yönlendiği görülmektedir. Bu durum, muhtemelen filtre tabakası boyunca kapilarite ve uygun kil kullanılmayan üst kısımlardan (düşük basınç bölgesi) sifonlama etkisinden kaynaklanmaktadır. Tespit edilen bu durumlar gövdenin geçirimsizliğini olumsuz etkilemektedir.





(a)



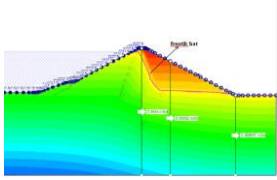
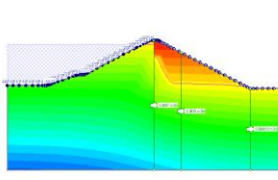
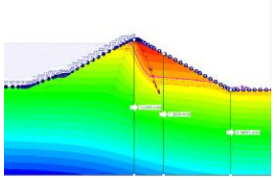
(b)

Şekil 3.7. Üçüncü Model analiz sonuçları: a) Boşluk suyu basıncı (*porepressure*), b) Toplam yük (*total head*)

3.2.4. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analizi yapılan her üç model için sızma durumları karakteristik özellikleriyle birlikte Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Morgedik Barajı sızma analizi sonuç tablosu

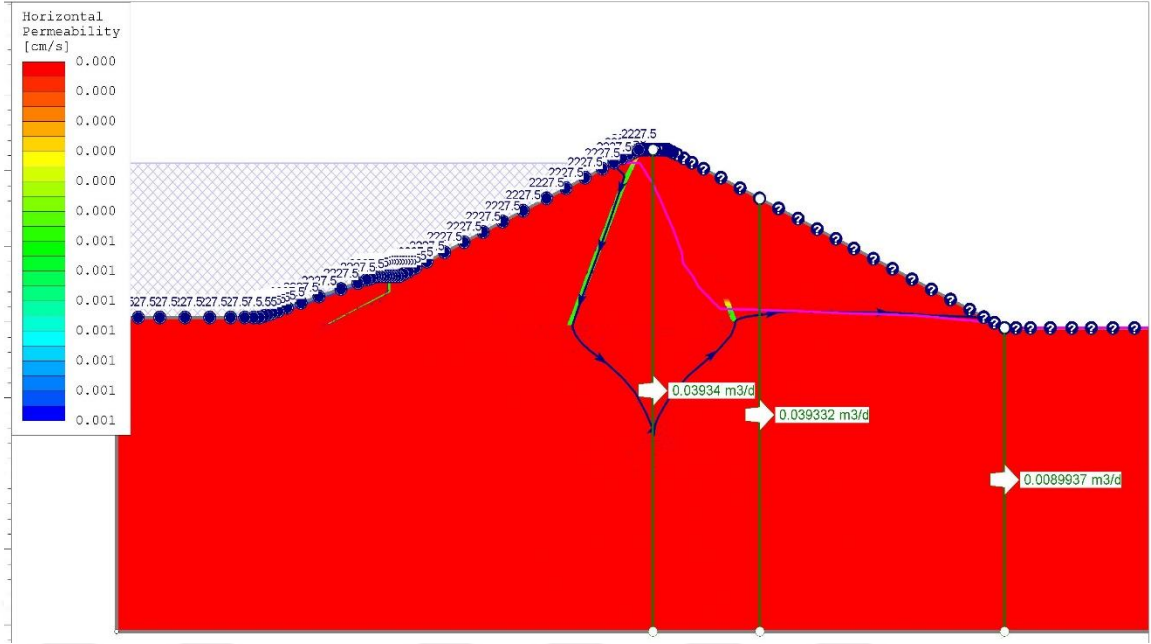
Karakteristikler	1. Model	2. Model	3. Model
Porepressure			
Cut-off	Kil (yüksek değerli)	Kil+GCL	Kil (düşük değerli)
Çekirdek bölgesi	Tamamı kil	43 m kil, 17 m GCL	Son 17 metresi
Permeabilite	$k=1.5 \times 10^{-9}$ cm/s	$k=1.0 \times 10^{-11}$ cm/s	$k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s
Aks Uzunluğu	280,4 m	280,4 m	280,4 m
Sızma Miktarı	0,089 m ³ /gün	0,098 m ³ /gün	0,146 m ³ /gün
Toplam sızma miktarı	21,36m ³ /gün (240,0*0,089)	23,52m ³ /gün (240,0*0,098)	35,04m ³ /gün (240,0*0,146)
Yıllık Sızma Miktarı	7.796,40 m ³ /yıl (21,36*365)	8.584,80 m ³ /yıl (23,52*365)	12.789,60 m ³ /yıl (35,04*365)

Analizlere bakıldığında birinci ve ikinci modeller için istenen durumlarla karşılaşıldığı görülmüştür. Çünkü bu analizlerde hidrolik basınç yükleri, boşluk suyu basınçları ve sızma değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Tabi burada rezervuardaki su miktarı önemli kriterdir. Birinci ve ikinci model için baraj gövdesinde herhangi bir borulanma veya sızma tehlikesi ön görülmemektedir. Ancak analizlerde dikkat edilecek önemli bir husus da freatik hattır. Dolgunun memba tarafından sızan suyun gövdeyi terk edene kadar izlediği yola freatik hat denir. Şekil 3.5'te verilen cut-off bölgesinde kesafet oranları yüksek çıkan kilin kullanımıyla yapılan analiz ve Şekil 3.6'da verilen cut-off un son 17 metresinin geosentetik kille (GCL) geçildiği analiz çıktılarına bakıldığında, freatik hattın istenildiği gibi mansap şevinin tam topuğundan geçtiği görülmüştür. Freatik hattın neden topuğa yakın bölgede geçmesini istiyoruz; çünkü freatik çizgi mansap şevini ne denli üst kotta keserse vereceği zarar o kadar büyük olur. Yani freatik hattın altındaki zemin, suya doymun olacak ve boşluk suyu basınçları artacaktır. Oluşan bu durumlar

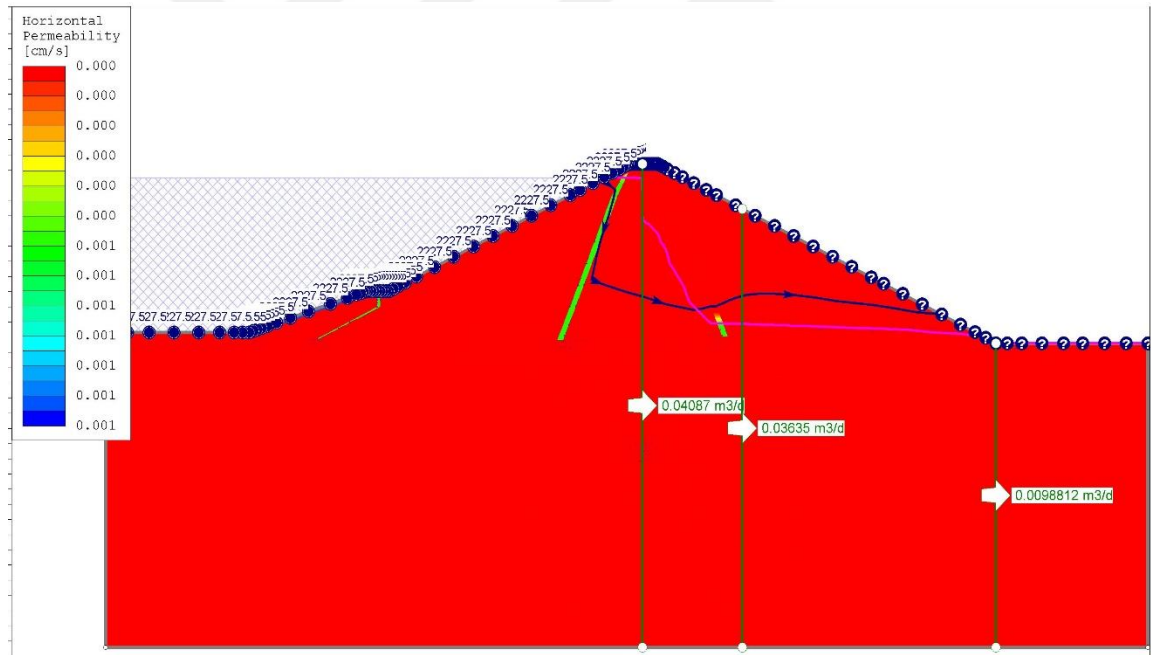
toprak kitlesinin kayma direncini azaltmakta ve gövde üzerindeki şevlerde göçme ihtimali arttırmaktadır.

İkinci model analizleri (ki bu alternatif barajın mevcuttaki hali hazır durumudur) Morgedik Barajın da çekirdeğin (cut-off) 2215,00 m kotuna kadar değerleri yüksek çıkan kille, bu kottan sonrası yani baraj kretine kadar olan kısım geosentetik kille geçildiği durum için yapılmıştır. Bu model için elde edilen analiz sonuçları barajın hali hazır durumunun sızma performansını görmemizi sağlamıştır. Aynı zamanda geosentetik kilin (GCL) kullanılabilirliğini ve değerlerini normal kile göre kıyaslamamızı olanak tanımıştır. Analiz sonuçlarından barajın mevcuttaki durumuyla elde edilen sonuçlar; birinci model için elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Nitekim ikinci modelde GCL için girilen permeabilite katsayısına bakıldığında aslında bu alternatif için en düşük sızma değeri beklenebilir. Ancak uygun görülmeyen kille takviye edilen GCL analizlerinde sızma boylarının, birinci model analiz sonuçlarına göre daha kısa olduğu görülmüştür. Analiz sonuçlarında *Horizontal permeability* (yatay geçirgenlik) göre alınan çıktılarda; aynı kot (NSS) seviyesinde girilen akım hatlarının nasıl yol izlediği görülmektedir (Şekil 3.8). Buna neden olarak kullanılan GCL'nin kesit genişliğinin uygun kile göre ince bir katmandan oluştuğu ve GCL'yi çevreleyen düşük kilin sızma boylarını azalttığı düşünülmektedir. Bu da ikinci modelin çok küçük bir miktarda olsa birinci modele göre sızma değerlerinin daha fazla oluşmasına neden olmaktadır.

Analizlerden hem sızma değerleri hemde freatik hattın güzergahı incelendiğinde çekirdek bölgesinde kullanılan geosentetik kilin (GCL) başarılı bir performans gösterdiği açıktır. Çekirdek bölgesinde geosentetik kilin (GCL) kullanımını ilk kez Morgedik Barajında uygulandığı için elde edilen analiz sonuçları bu malzemenin işlevselliği bakımından önem arz etmektedir. Çekirdek bölgesinde kullanılan farklı bir malzemenin sızma bakımından göstermiş olduğu performans, diğer dolgu barajlarda kullanılabilirliği açısından önemlidir. Morgedik Barajında 2015 yılında su tutulduğunu düşünürsek günümüze kadar geçen sürede barajda herhangi bir sızma problemiyle karşılaşılmamıştır. Bu doğrultuda kullanılan malzemenin (GCL) sızma yönünden başarılı olduğu ve bunun da yapılan analizlerde elde edilen sonuçlarla desteklendiği görülmüştür.



(a)

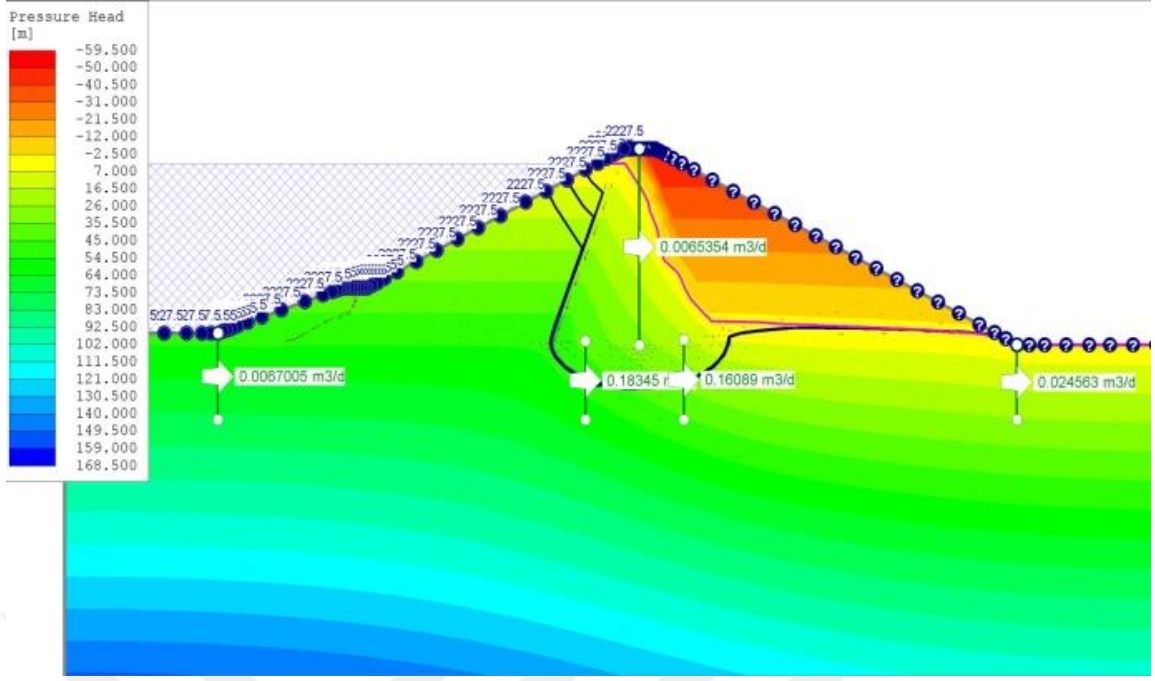


(b)

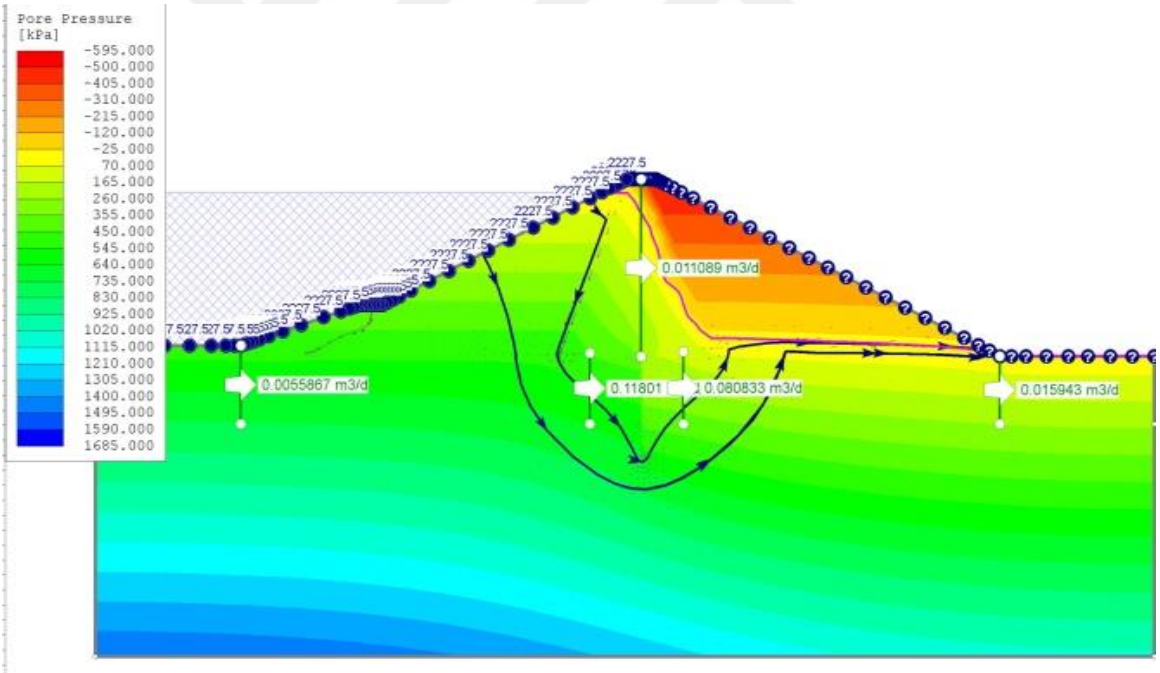
Şekil 3.8. Bir ve ikinci modelin yatay geçirgenliğe (*horizontal permeability*) göre analiz sonuçları: a) 1. Modelde sızma boyu, b) 2. Modelde sızma boyu

Analizlerde bir diğer elde ettiğimiz sonuç baraj temeline yapılan enjeksiyon perdesinin etkisidir. Hat boyunca oluşan sızmaları görebilmek için istenilen yerlere debi kesiti (*discharge section*) tanımlaması yapılmaktadır. Baraj ve göletlerde toplam sızan miktarı görmek

adına mansap tarafına, enjeksiyon perdesi etkisini görmek için de perdenin önüne ve arkasına ayrıca kil çekirdekten sızan miktarı görmek için çekirdek sonuna *discharge*section eklenmesi, analizlerde genel olan uygulamadır. Yukarıda yapılan analizlerde mansapta çıkan toplam sızma miktarı önemli olduğu için enjeksiyon perdesinin memba ve mansabına *discharge*section girilmemiştir. Ancak yazılım istersek bize bu imalatın sızmaya olan etkisini de göstereceği için baraj temelinde sızma bakımından önemli bir imalat olan enjeksiyon perdesinin işlevselliği de incelenmelidir. Morgedik Barajında enjeksiyon perdesinin uzunluğu yaklaşık 35 metredir. Baraj, enjeksiyon perdeli olduğu için yapılan tüm analizlerde perde düşünülmüştür. Ancak bu analizlerde yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı perdenin işlevselliği görülememiştir. Bu sebeple perdenin önüne ve arkasına *discharge*section girilerek yeni analizler yapılmıştır. Enjeksiyon perdesinin sızma analizlerinde nasıl çalıştığı ve akım çizgilerinin bu etkiyle nasıl yol izlediği Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



(a)



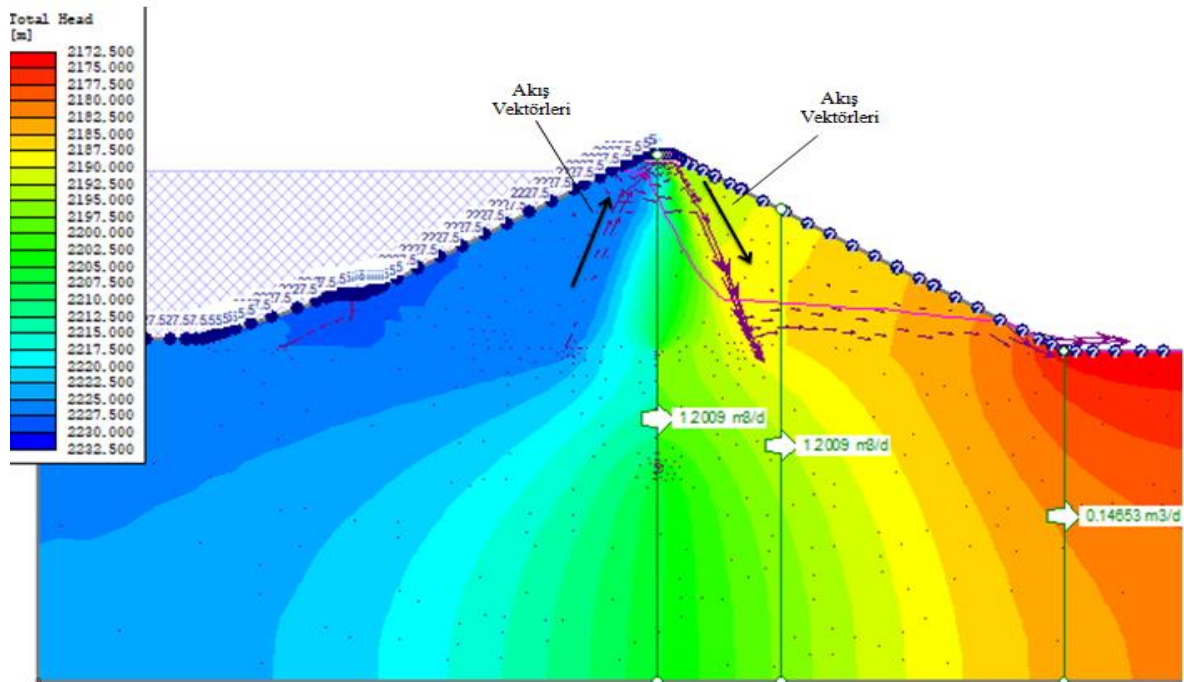
(b)

Şekil 3.9. Enjeksiyon perdesinin etkisi ve akım çizgilerinin gösterimi: a) Perdesiz (without grout-courtain), b) Perdeli (with grout-courtain)

Üçüncü alternatif için yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında ise (Şekil 3.9) hem sızma değerlerinin yüksek hem de freatik hattın mansap şevini yukarıda kestiği gözlemlenmiştir. Sızma değerleri her üç model içinde barajın aktif hacmi düşünüldüğünde riskli seviyelerde değildir.

Ancak ilk iki modele göre değerlendirdiğimizde; cut-off un son 17 metresinin değerleri düşük kille yapılması sızma değerlerini yaklaşık iki kat arttırmış ve freatik hattı istenilmeyen bir seviyeye yükseltmiştir (Şekil 3.7 ve Çizelge 3.4). Morgedik barajı gibi rezervuarı hacmi (100 hm³) yüksek olan barajlar için bu değerler (sızma değerleri) kabul edilebilir seviyelerdedir. Ancak freatik hattı her durumda mansap topuğundan geçmesi istenir. Cutt-off hendeğinin derinliğini de göz önünde bulundurursak yaklaşık 70 m olan kil çekirdek bölgesinin son 15~17 metresinin, değerleri çok da düşük olmayan kil ile yapılması ve bunun freatik hattı nasıl yukarı doğru çektiği açıkça görülmüştür. Çekirdeğin %20'sini bile doldurmayan miktarda kullanılan bu kilin özellikle sızma problemi için mansablama kriteri ile göz önüne alındığında vermiş olduğu sonuç, uygun kilin kullanımının ne denli önemli olduğunu bize göstermiş oluyor.

Söz konusu durum için analizlerde asıl dikkat çeken ve diğer sonuçlardan farklı olarak önümüze çıkan olay akım vektörlerinin yönüdür. Zeminde sızan su, enerjisini en çabuk kaybedecek şekilde hareket eder. Zemin içerisinde, sızan suların parçacıklar halinde hareket ettiği ve bu hareketin belli doğrultular boyunca olduğu kabul edilir. Zeminde sızan suyun hareket ettiği doğrultuya (akımın hız vektörlerine teğet olarak çizilen çizgiye) akım çizgisi denir.



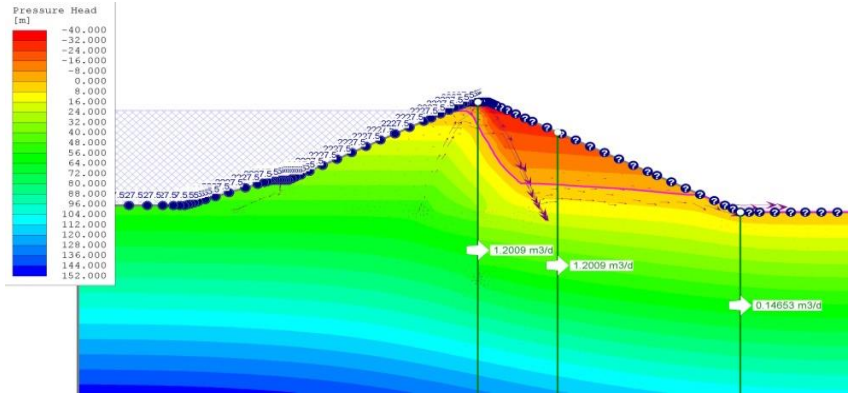
Şekil 3.10. Üçüncü model analizlerinde akış vektörlerinin (flow vectors) yönü

İlk iki model için bakıldığında bu akım vektörleri, barajın memba tarafından mevcut olan filtre zonlarında (fku, fç ve fk) drene edilerek baraj temelinde doğru akışları görülmektedir ki bu olması gereken durumdur. Ancak üçüncü model için yapılan analizlere bakıldığında akım

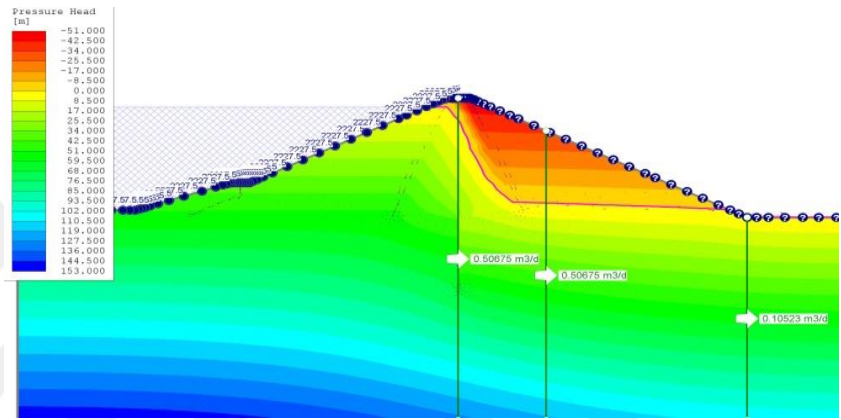
vektörlerinin çekirdek bölgesinin (cut-off) üst kısmına doğru hareket ettiği görülür(Şekil3.9). Çekirdekte, 2215 m kotu sonrası bırakılan kilin, mevcuttaki malzemeye göre daha yüksek permeabilite değerinin olması etkisiyle, bu akım vektörlerinin yönü yukarı yönlü değiştiği düşünülmektedir. Barajın memba şevinde yukarı doğru yön alan akımlar, krete yakın bir noktadan mansap tarafına yönelik hareketleri gözlemlenmekte olup bu baraj güvenliği için tehlike oluşturabilecek bir faktördür. Bu durum muhtemelen, cut-off'un memba ve mansap bölgelerindeki filtre tabakasında meydana gelen kapilarite ve geçirimsizliği yüksek malzemenin kullanıldığı krete yakın mansap bölgesindeki düşük basınçlar nedeniyle oluşan sifonlama etkisinden kaynaklanmaktadır. Kapilarite ve sifonlama etkisiyle yukarıya doğru hareket eden akım gövde içindeki geçirimsizliği yüksek olan üst bölgeden geçerek (rezervuar su seviyesinin de üstüne çıkarak) mansap tarafında kil çekirdek boyunca yerçekimi etkisiyle aşağıya yönlendirilmektedir. Bu durumun daha kapsamlı incelenmesi adına farklı yönlerden ele alınarak, mevcuttaki duruma sebebiyet veren kullanılan malzeme ve bununla birlikte hangi faktörlerinde etkili olduğu araştırılmıştır. Bu nedenle üçüncü model için farklı kil seviyeleri girilerek yeni analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizler ve analizde kullanılan farklı değişkenler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Düşük değerli kilin farklı kotlara göre elde edilmiş basınç yükseklikleri

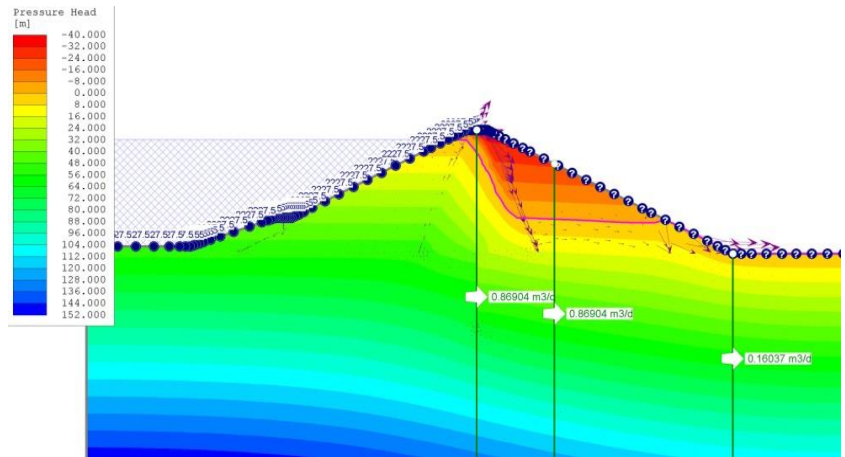
- Düşük değerli kilin başlangıç kotu 2215,00 m
- Rezervuar su kotu NSS seçilmiştir.
- $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s



- Düşük değerli kilin başlangıç kotu 2227,50 m
- Rezervuar su kotu NSS seçilmiştir.
- $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s



- Düşük değerli kilin başlangıç kotu 2228,00 m
- Rezervuar su kotu NSS seçilmiştir.
- $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s



Yukarıda Çizelge 3.5'te girilen verilere göre elde edilen sonuçlarda; öncelikle akım vektörlerinin yukarı yönde hareketinin en temel sebebi kullanılan değeri düşük ikinci kil malzeme olduğu açıkça görülmüştür. Bu analizlerde dikkat çeken bir durumla daha karşılaşılmaktadır. Düşük değerli kilin başlangıç kotu 2228,00 m olan analize baktığımızda en büyük sızma değerinin

oluşturduğunu görüyoruz. Oysaki Çizelge 3.5'te verilen analizlerde muhtemel beklenen durum; 2215,00 m kotuna göre yapılan analizde en yüksek, 2228,00 m kotuna göre yapılan analizde de en düşük sızma değerlerine ulaşılmasıydı. Çünkü kesafet oranı düşük yani geçirimsizliği az olan malzemenin kullanım miktarını ne kadar arttırsak, bu malzemedan geçecek sıvı miktarı da o derece fazla olması bekleniyordu. Ancak beklenen durumun nerdeyse tam tersi bir durumla karşılaşıldı. Oluşan bu beklenmeyen duruma sebebiyet vermiş olduğu düşünülen olay aşağıda açıklanmıştır.

Çalışmada üzerinde durulan üç temel alternatiften son durum (3. Model) için yapılan bu yeni analizler, baraj gövdesinde olağan dışı bir husus olduğunu daha net ortaya koymuştur. Baraj gövdesi içerisinde sızmadan dolayı oluşan akımların hareketinde olması gereken durumun tam tersi bir durum oluşmuştur. Akım vektörleri memba şevinin filtre zonlarında aşağı doğru bir hareket çizip mansablanması gerekiyorken; yukarı doğru bir hareket oluşturarak akışa geçmişlerdir. Bu akımların nerdeyse kret kotuna yakın bir seviyede, uygun olmayan kil tabakasından geçerek gövdenin mansap kısmına geçişleri olmuştur. Mansap şevinde yine filtre zonlarıyla kendilerine aşağı doğru bir akış yönü bularak freatik hatta yakın bölgelerde çıkışları gözlemlenmiştir. Bu akış vektörlerinin oluşturduğu bu hareket parabolü, yukarıda da bahsedildiği gibi sifonlama etkisini işaret etmektedir. Yani gövde içerisinde memba tarafından sızma suyu uygun olmayan kilin üstü tabakasından sifon etkisiyle mansap tarafına geçirmektedir. İşte bu sifon etkisi en fazla 2228,00 m kotuna göre yapılmış analizde görülmektedir. Bu etkiyle birlikte bu kota göre yapılan analizde kil çekirdekte oluşan sızmalar daha yüksek çıkmaktadır. Sifonlama ve kapilaritenin de etkisiyle artan sızma durumu, mansap şevinin nerdeyse tamamını suya doygun hale getirmektedir. Yani barajda freatik hat kavramını işlevsiz bırakmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, freatik hat gövdedeki kritik sızma hattıdır ve freatik hattı mansabın ne kadar dibine doğru çekersek baraj gövdesi o denli güvende olur. Çünkü hattın alt kısmı tamamen suya doygun ve boşluk suyu basınç miktarı yüksek kısımdır. Bu açıklamalara bakıldığında söz konusu durum için mansap şevi tamamen suya doygun ve boşluk suyu basıncına maruz kalmıştır. Suyu doygun ve boşluk suyu basıncı yüksek olan bir zeminde göçmeler kaçınılmazdır. Bu nedenle mansapta yani baraj gövdesinde ciddi tahribatlar oluşacaktır. Bu da demek oluyor ki eğer projedeki mevcut kaliteli kil tabakasından sonra uygun olmayan kil tabakası kullanılmış olsaydı önemli sızma problemleriyle karşılaşması muhtemel olacaktı.

4. SONUÇ

Ekonomik sebeplerle tercih edilen dolgu barajların geçirimsizlikleri genellikle kil çekirdekle sağlandığından Morgedik Barajı'nda da kil kullanılmıştır. Ancak baraj gövdesini tamamlayacak kadar kilin olmaması, barajın tamamlanması için tasarımcıları farklı arayışlara yönlendirmiştir. Baraj bölgesinde uygun evsafa kil bulunmadığı ve dışardan getirilecek uygun kilin de ekonomik olmadığı gözönünde bulundurularak çözüm aranmıştır. Sonuç olarak ilgili kuruluşlar tarafından çekirdek bölgesi için geosentetik kil (GCL) ile kil çekirdeğine takviye yapıp ve baraj inşaatı tamamlanmıştır. Bu tez çalışmasında ise, Morgedik Barajı çekirdek bölgesinde farklı malzemeler kullanılması senaryolarına göre hazırlanmış sayısal modeller yardımıyla sızma durumları analiz edilmiştir. Elde edilen dikkat çekici sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Birinci modelde uygun kilin girilen permeabilite değerine göre en iyi sonucu vermesi dolgu barajlarda genelde seçilen tipinde sızma yönünden haklılığını ortaya koymaktadır. Birinci modelde en iyi performansın elde edilmesi aslında uygun kilin inşaat sırasında doğru tekniklerle serilmesini ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Özellikle malzemenin seriminde istenilen sıkıştırma teknikleri itinalı ve standartında yapılırsa elimizdeki uygun değerli malzemenin vereceği performans birinci model için yapılan sonuçlarda açıkça görülmektedir.

Sızma analizleri ikinci model incelendiğinde yerinde yapılan mevcut uygulamanın başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Geosentetik kil kullanımı barajın geçirimsizliğini sağlamak için uygun ve ekonomik bir çözüm olduğu ve bu malzemenin de sızma yönünden başarılı bir performans gösterdiği bu çalışmada ki analizlerden görülmüştür. Ancak birinci modelde elde edilen analiz sonuçlarıyla kıyaslandığında küçüğe olsa performans bakımından daha zayıf gözükmektedir. Buna sebep olarak geosentetik kilin düşük değerli kille takviyesi, malzemenin kesiti ve mevcuttaki malzemeye parça olarak sonradan eklenmesi sızma boyunu azalttığı düşünülmektedir. Göl hacmi yüz milyon metreküp olan Morgedik Barajında geosentetik kilin, uygun kile göre çok yakın sonuçlar vermesi mevcuttaki uygulamanın başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca Morgedik Barajında yaklaşık beş yıldır su tutulduğu ve bu güne kadar barajda sızma yönünden herhangi bir problemin gözükmemesi imalatın başarısını ispatlamaktadır.

Analizler sadece barajın mevcut durumu için değil, uygulamada karşılaşılan yukarıdaki sorun karşısında çözüm olabilecek diğer durumlar için de yapıp, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Özellikle kil çekirdeğin yaklaşık son 17 metresi için baraj civarında bulunan ancak değerleri düşük çıkan kille imalatın tamamlanması durumu için yapılan analiz sonuçları beklenenden daha çarpıcı sonuçlar vermiştir. Analiz sonuçlarına göre her ne kadar geosentetik kil kullanılmasına gerek yokmuş gibi düşünülebile de, akım vektörlerinin olağan dışı ters yön alması

durumu değiştirmiştir. Boşluk oranı yüksek olan ve iyi derecede sıkıştırılmayan kilin bu duruma sebebiyet vermesi burda bizi sifonlama kavramıyla karşılaştırmıştır. Geçirgenlikleri yüksek filtre zonları ve düşük evsafly kil malzeme boyunca oluşabilecek kapilarite ve sifonlama etkisiyle artan sızma miktarı mansap şevini tamamen suya doygun hale getirip boşluk suyu basıncını arttırabilecektir. Boşluk suyu basıncı yüksek olan bir şevin sızma değerleri kabul edilebilir olsa dahi, ilerde yani baraj işletmeye alındığı süreçte problemlere yol aması olağandır. Maliyet göz önünde bulundurularak uygulanması muhtemel gözüken bu alternatifin kullanılmaması barajın işletme sürecinde daha ciddi maliyetlere sebep olmasının önüne de geçmiştir.

Barajların planlama, projelendirme ve yapım safhaları büyük dikkat ve zen gerektirmektedir. İyi planlanan bir barajın bile yapım aşamasında en ufak bir detayın kesinleştirilmeden yorumu yapılmamalı ve uygulamaya geçilmemelidir. Büyük maliyetlerle yapılan bir barajın herhangi bir aşamasında maliyet olarak küçük olan bir imalattan kaçış beklide tüm maliyetin boşa gitmesine sebep olacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Akdil H, 2005. Dolgu Baraj Gövdesinde Sızma Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Arshad I, Babar MM, 2014. Finite Element Analysis of Seepage through an Earthen Dam by Using Geo-Slope (SEEP/W) Software. International Journal of Research.
- Aydın MC, Gelberi G, 2019. Morgedik Barajı Geçirimsizlik Problemi ve Çözüm Uygulaması. Bitlis Eren Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bitlis.
- Basak P, 1976. Steady Non-Darcy Seepage Through Embankment. Journal Of The Irrigation And Drainage Division, ASCE.
- Boufadel MC, Suidan MT, Venosa AD, Rauch CH, and Biswas P, 1998. 2D Variably Saturated Flows: Physical Scaling And Bayesian Estimation. J. Hydrologic Engrg, ASCE.
- Casagrande A, 1937. Seepage Through Dams, J. N. Engl. Water Works Assoc.
- Çakır EN, Ünsever YS, 2019. Büyükkumla Barajı'nda Bulamaç Hendeği Yöntemi ile Geçirimsizlik Perdesi Uygulaması ve Sızma Analizi. Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa.
- Çalamak M, Yanmaz A, 2014. Dolgu Barajlarda Filtre Tane Dağılımı Belirsizliğinin Sızmaya Olan Etkisi Üzerine Bir Çalışma. Dördüncü Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, Elazığ.
- Çelik B, 2014. Aydın İkizdere Barajı Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sızma Analizi. Yüksek Lisans Dönem Projesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çilingir H, 2007. Toprak Dolgu Barajların Gövdelerindeki Sızmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi: Büyükçekmece Barajı Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Darcy H, 1856. Les Fontaines Publiques De La Ville De Dijon. Paris.
- Demir MF, 2011. Durağan Yer Altı Suyu Akım Şartlarında Beslenme Kuyularının Hidrolik Hesaplama Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- DSİ, 2010. Morgedik Barajı Etüt Raporu. DSİ 17. Bölge Müdürlüğü, Van.
- DSİ, 2014. Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi.
- DSİ, 2016. DSİ 17. Bölge Müdürlüğü, Van.
- Forchheimer PH, 1901. Wasserbewegung Durch Boden, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure.

- Foster M, Fell R ve Spannagle M, (2000). The Statistics Of Embankment Dam Failures And Accidents. Canadian Geotechnical Journal.
- GEOPLAS, 2014. Morgedik Barajı Mevcut Kil Dolgusunun GCL İle Takviye Edilmesi, Ankara.
- Güngör M, 1995. Toprak Dolgu Barajlardaki Sızma Olayının Sonlu Elemanlar Modeli. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli.
- Hacısüleyman H, 2007. Sızma Modellerinin Karşılaştırılması ve Parametre Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- ICOLD, 1994. Use of granular Filters and Drains in Embankment Dams, International Commission on Large Dams, Bulletin 95.
- Karabulut B, 2019. Yağış ile Sızmanın Dolgu Şevlerinin Stabilitesine Etkisi.
- Leblebicioğlu E, 2019. Akış Çeşitleri Nelerdir? Akışların Sınıflandırılması.
- Lee KK, and Leap DI, 1997. Simulation Of Afree-Surface And Seepage Face Using Boundary Fitted Coordinate System Method. J. Of Hydrology.
- Leontiev A, Huacasi W, 2001. Mathematical Programming Approach For Unconfined Seepage Flow Problem. Engineering Analysis With Boundary Elements, Rio De Janeiro.
- Mesci SB, 2006. Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların ve Freatik Hattın İncelenmesi: Seferihisar Barajı Uygulaması Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mohamed HG, Ağralıoğlu N, 2005. Eğimli Palplanş Ve Temel Zemini Özelliklerinin Hidrolik Yapı Altındaki Sızmaya Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Pavlovsky NN, 1931. Seepage Through Earth Dams, Instit. Gidrotekhnikii Melioratsii, Leningrad, Translated By U.S. Corps Of Engineers.
- Peker, 2015. Baraj Emniyeti ve Deformasyon Ölçümleri.
- Polubarinova-Kochina PY, 1962. Theory of Ground Water Movement. Translated From Russian by J. M. R. De Wiest, Princeton University Press Princeton, NJ.
- Richardson LF, 1911. The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences with an Application to Stresses in Masonry Dams, Phil. Trans. Roy. Soc., 210.
- Sachpazis C, 2014. Experimental Conceptualisation of the Flow Net System Construction inside the Body of Homogeneous Earth Embankment Dams, Kozani.
- Sağlıca O, 2013. Dolgu Baraj Gövdelerinde Sızma Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Samani HMV, Samani JMV, Shaiannejad M, 2003. Reservoir Routing Using Steady And Unsteady Flow Through Rockfill Dams, J. Of Hydraulic Engineering.

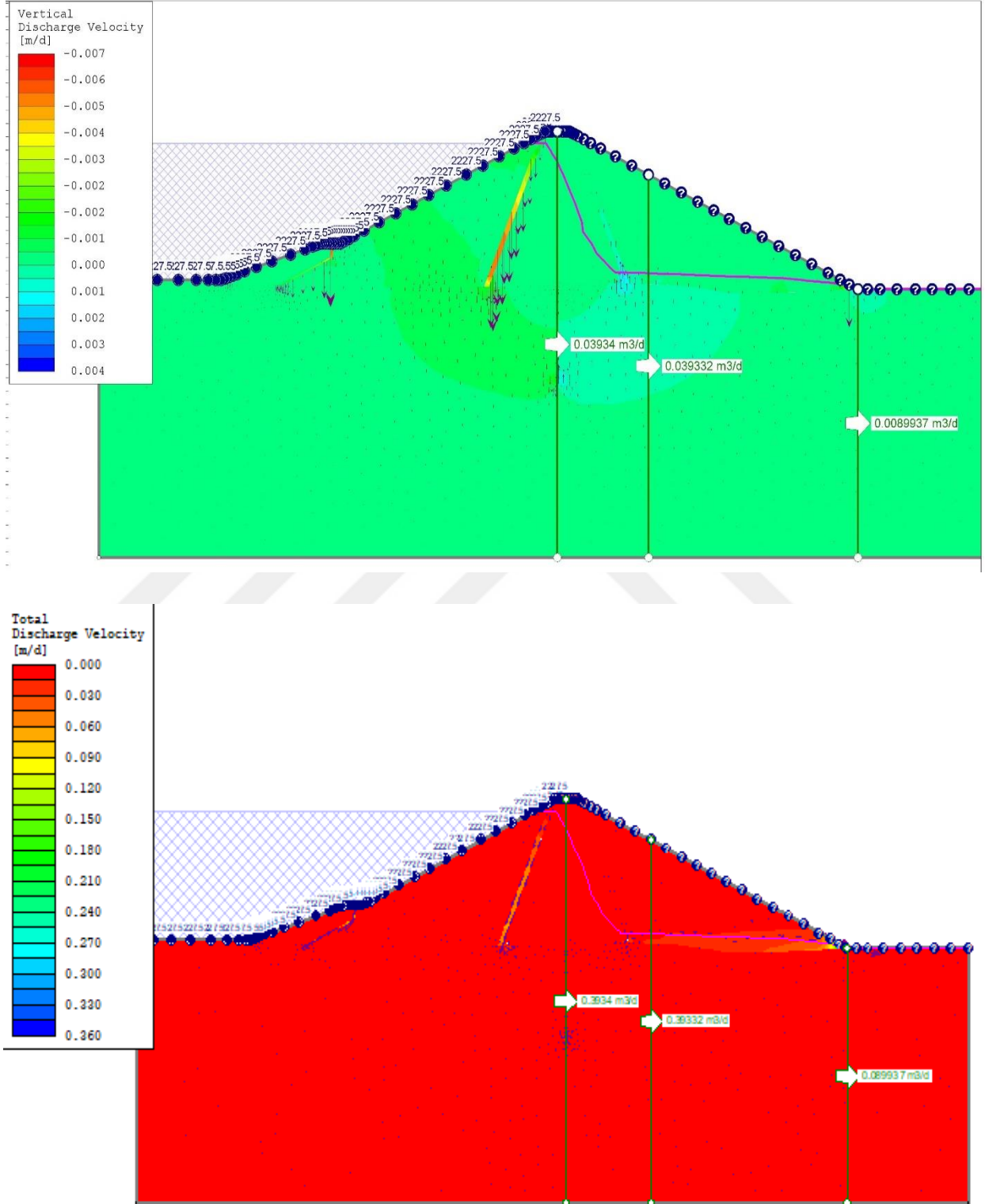
Shamsai A and Narasimhan TN, 1991. A Numerical Investigation Of Free Surface Seepage Face Relationship Under Steady State Flow Conditions. Water Resources

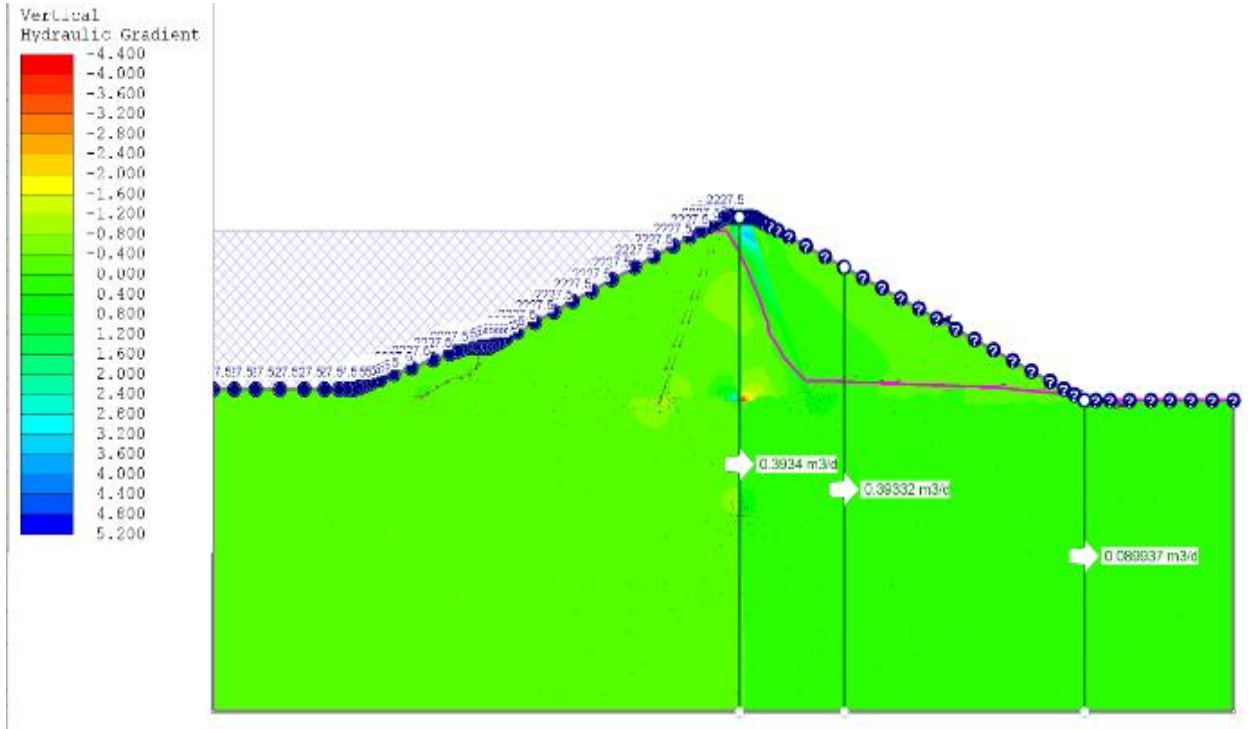
Ziaie MR, Rashidian V, Izadi E, 2012. Evaluation Of Phreatic Line In Homogeneous Earth Dams With Different Drainage Systems, Qazvin.



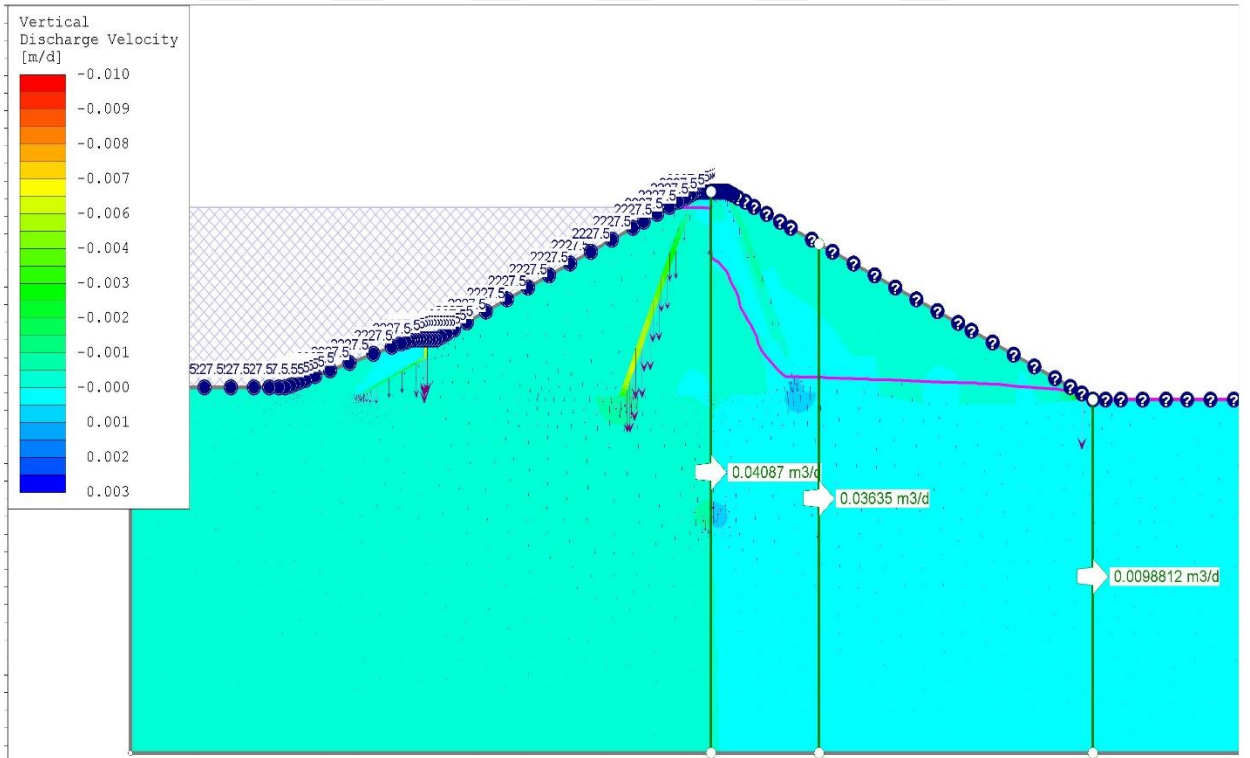
6. EKLER

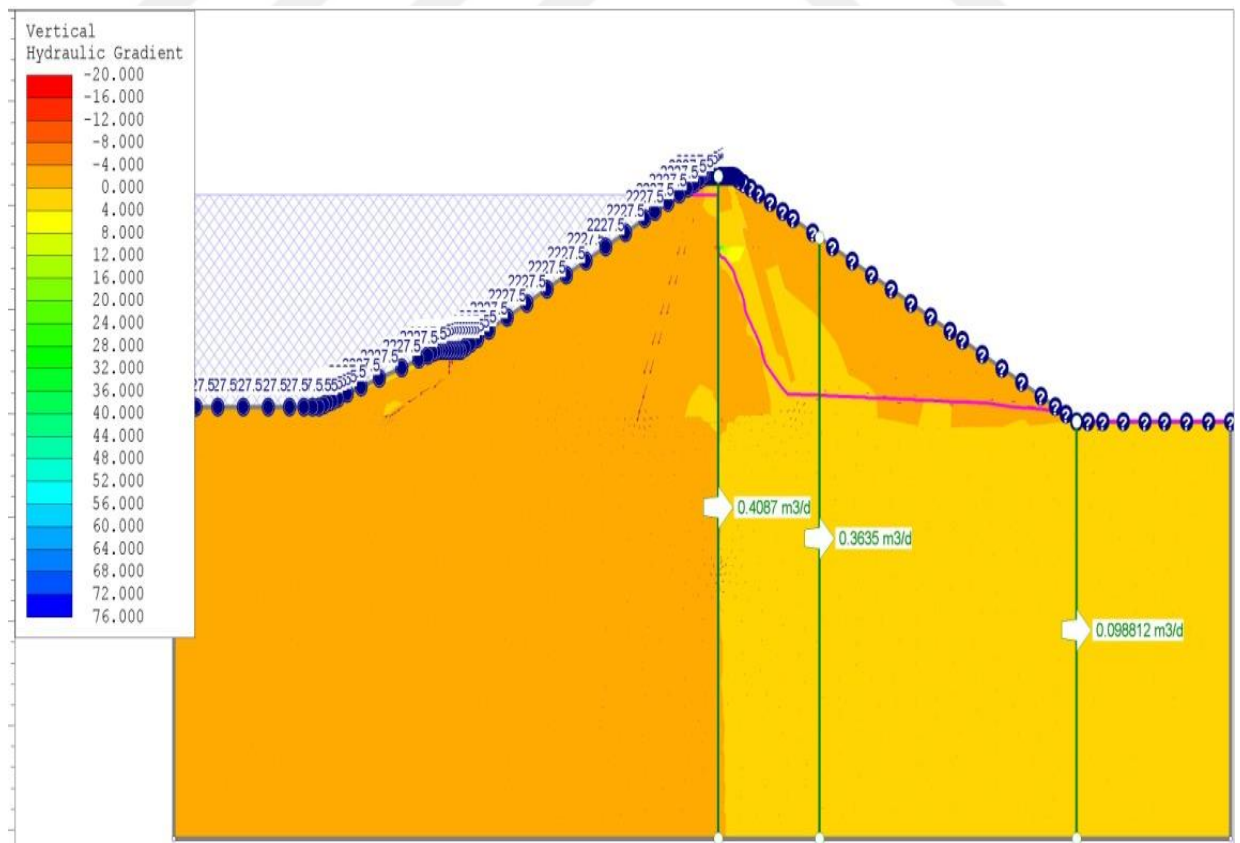
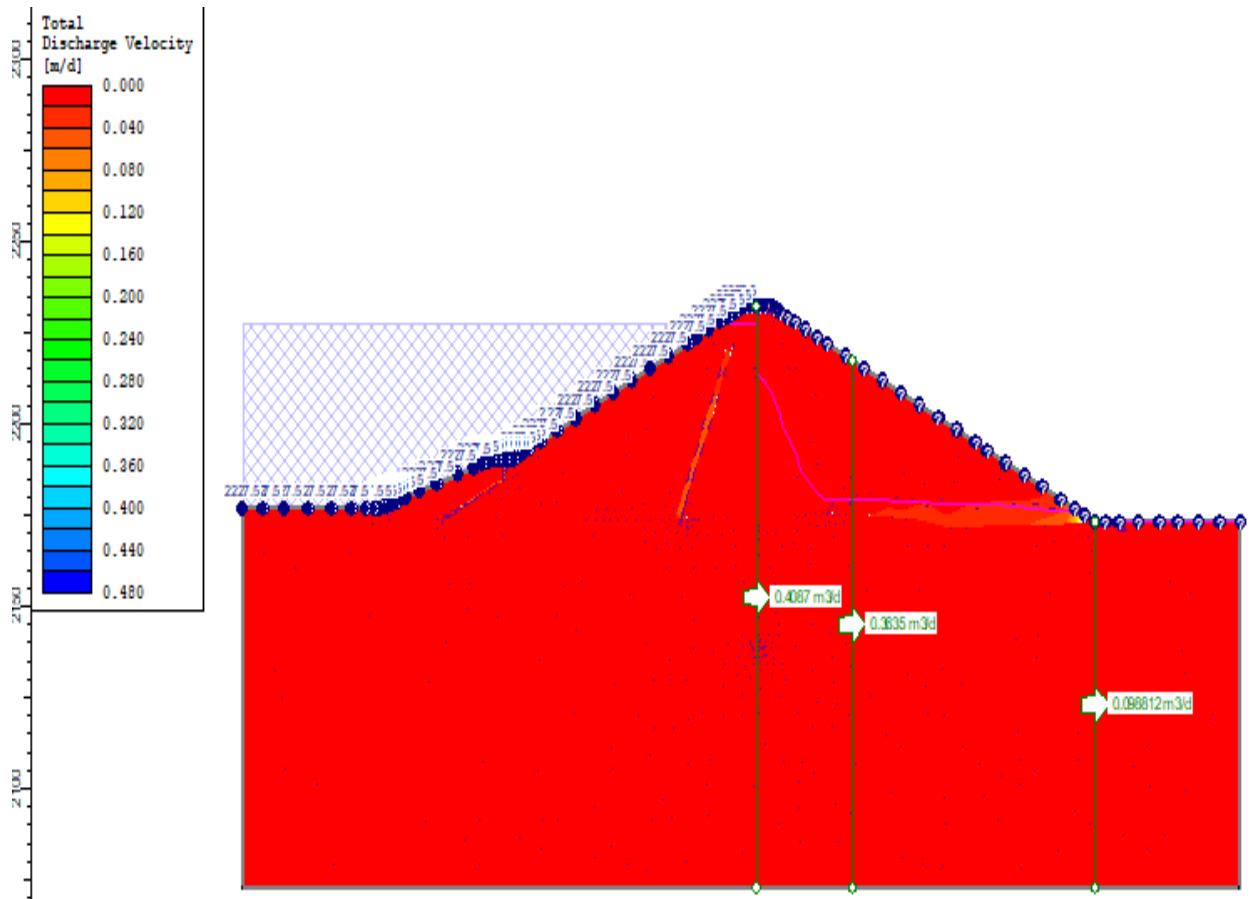
EK 1. Birinci model için yapılan diğer analizlerin çıktıları.



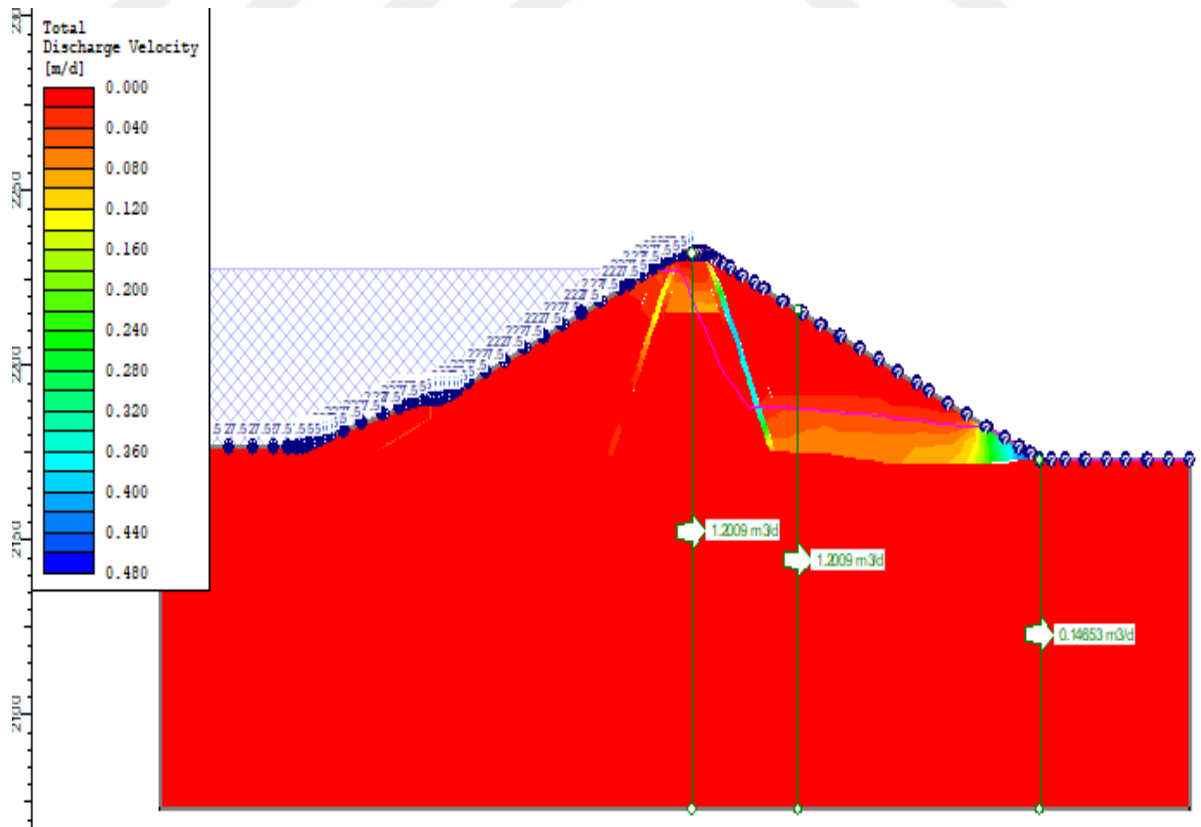
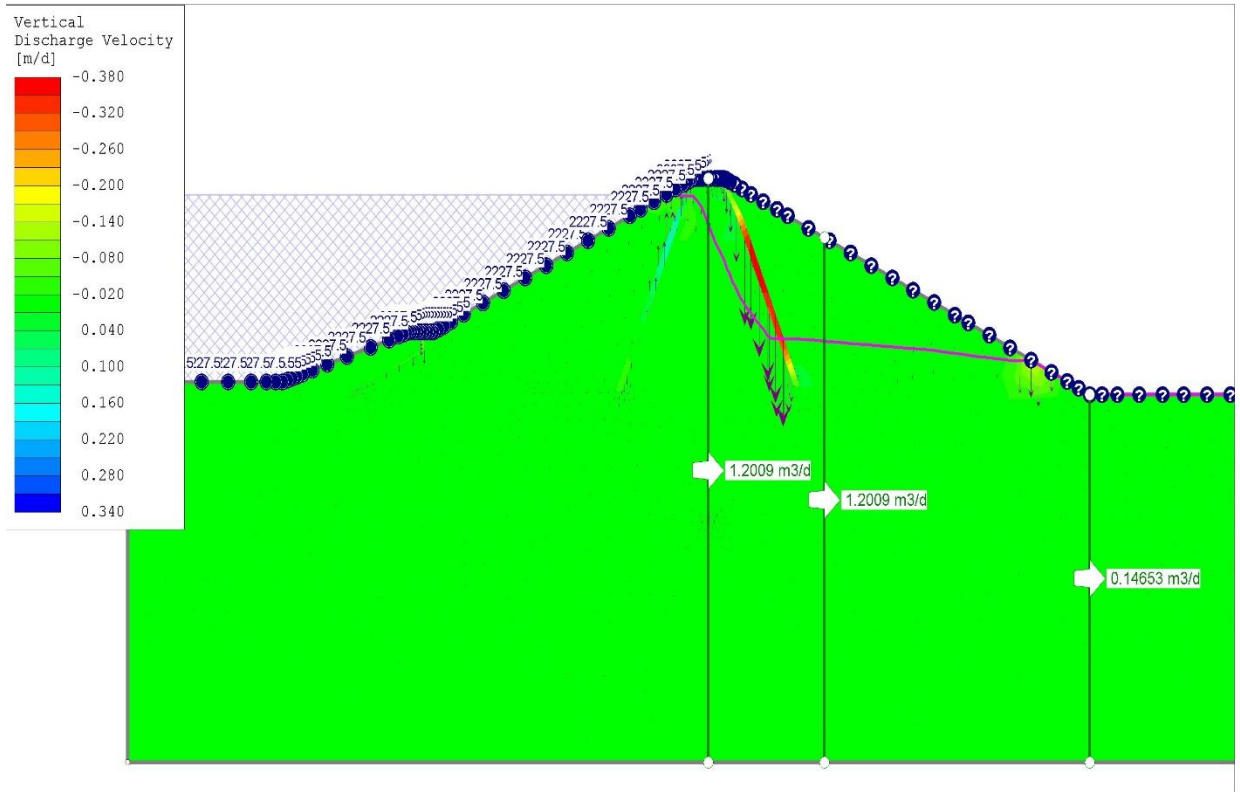


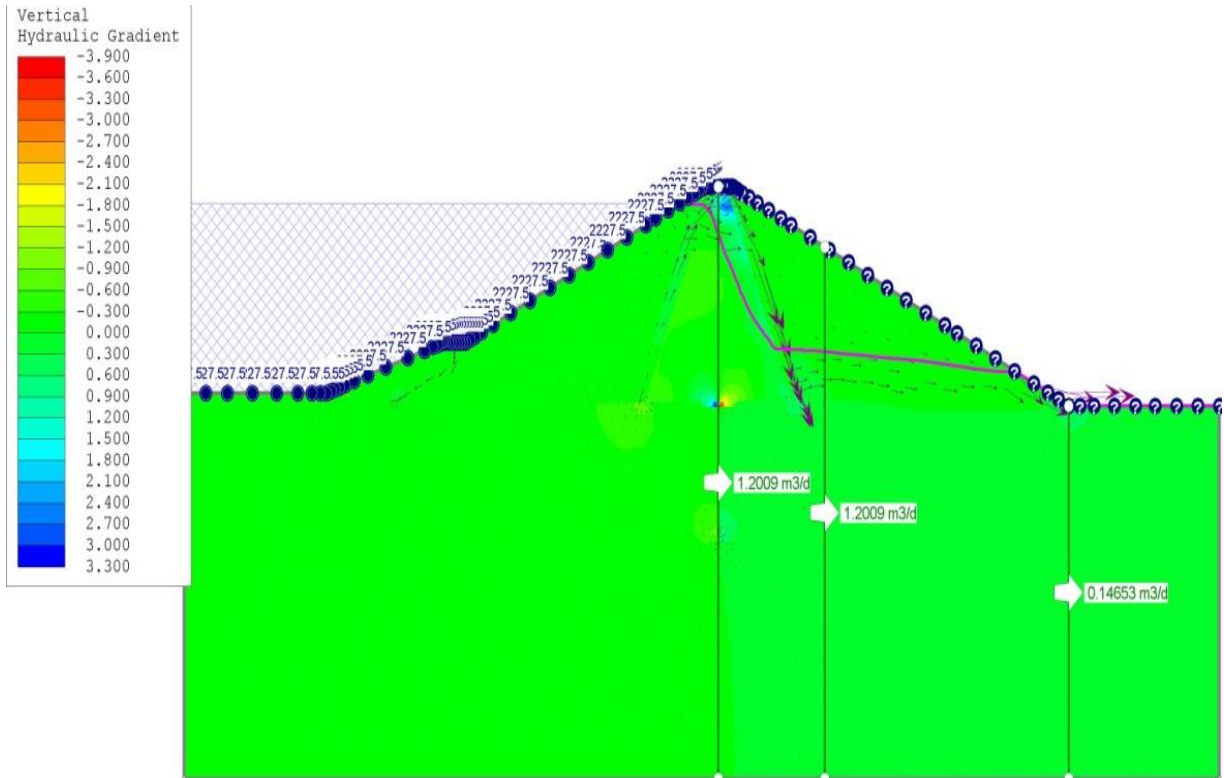
EK 2. İkinci model için yapılan diğer analizlerin çıktıları.





EK 3. Üçüncü durum için yapılan diğer analizlerin çıktıları.





ÖZGEÇMİŞ

Ömer POLATER, 1989 yılında Van'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Van Gazi İlköğretim Okulu ve Cumhuriyet Lisesinde tamamladı. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümünden 2013 yılında mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Ocak 2021'de tamamladı. Yabancı dili İngilizcedir.

