

Получена: 10.10.2017 г.

Приета: 11.11.2017 г.

ФИЛТРАЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА НАСИПНА ЯЗОВИРНА СТЕНА С КОМПРОМЕТИРАНА ГЕОМЕМБРАНА КАТО ПРОТИВОФИЛТРАЦИОНЕН ЕЛЕМЕНТ

Т. Чолаков¹

Ключови думи: язовирни стени, филтрация, геомембрана

РЕЗЮМЕ

През последните десетилетия геосинтетичните материали намират все по-широко приложение в язовирното строителство. Различни фактори налагат изпълнението на язовирни стени от насипен тип с водоуплътнен елемент от геомембрана вместо с обичайните често срещани естествени материали в природата, каквато е глината. Понякога причини от различен характер, като недооценен конструктивен елемент, недобро уплътнение на основата под мембраната или некачественото ѝ съединяване, могат да доведат до нейното разкъсване и компрометиране.

В доклада са анализирани настъпващите промени във филтрационната картина на насипна стена, при поява на разкъсвания на геомембраната с определена големина и разположение на различни нива по височина на водния откос. Представени са изменения и връзки на различни параметри на филтрацията на базата на численото моделиране на язовирна стена „Монгу“ в Нигерия. Направени са изводи и препоръки, които биха могли да са от полза при проектирането, изграждането и експлоатацията на такъв тип хидротехнически съоръжения.

1. Въведение

Проектът “Dam & Access road” като част от “Mongu Regional Water Supply Project” в Нигерия, предвижда изграждане на язовирна стена в Щат Плато на река Mongu, в близост до селищата Gindiri и Mongu.

¹ Тоньо Чолаков, д-р инж., кат. „Хидротехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tonyomc_fhe@uacg.bg

Проектът за язовирна стена “Mongu”, разположена по поречието на едноименната река и като част от общия проект ”Dam & Access Road“, си поставя като основна цел с реализирането му да бъде решен въпросът с водоснабдяването на няколко по-големи селища като: Mangu, Mangu Hale, Gindirî и др., както и множество по-малки населени места в района.

От първоначалните огледи, а в последствие и от направените геоложки проучвания се установява, че в района на строителството няма естествени строителни материали с необходимите противифилтрационни свойства за изграждане на водоплътната част на стената, както е препоръчано в предпроектните проучвания. Като техническо решение е прието тялото на стената да се насипе от латерит, а водоплътността ѝ да се гарантира от полимерен екран върху водния откос, защитен с бетонова плоча.

2. Основни данни за хидровъзела

Компановката на хидровъзела е съобразена с топографските и геоложки условия в определения от предпроектните проучвания район. В нея се включват следните подобекти: язовирна стена, преливник, бързоток, енергогасител, преден отбивен яз с подходящ участък, водоземна кула, отбивна (експлоатационна) галерия, шибърна камера, заден предпазен яз и дренажна система.

Тялото на стената е еднородно и се изгражда от латерит. Почвените материали представляват едрозърнести и среднозърнести пясъци, с незначително съдържание на фини фракции главно „едър прах“. Те показват склонност към ефективно уплътняване при съответното оптимално водно съдържание (W_{opt}), но са много чувствителни дори при малки негови отклонения.

В петата на въздушния откос до кота 1020,50 се изгражда дренажна призма от скален насип. За осигуряване на суфозионната устойчивост на насипа от стената, в призмата, са интегрирани две преходни филтърни зони с широчина по 1,50 m всяка. Първата (до насипа от латерит) се изгражда от пясък, а втората – от фини фракции на скалния изкоп.

Основни технически параметри на язовира и в частност на язовирната стена са обединени в табл. 1. В нея са представени обемите, съответстващи на дадената кота.

Таблица 1

Наименование	Стойност [m]	Обем [$\times 10^6 \text{ m}^3$]
Кота дъно река	1013,50	0,0
Кота МО	1026,20	4,75
Кота ННРВН	1026,70	5,35
Кота НВРВН	1029,45	9,45
Кота корона	1032,00	15,25
Полезен обем	-	4,10
Ретензионен обем	-	4,65
Общ обем на водохранилището	-	14,10
Дължина на стената по короната	695,00	-
Височина на стената	18,50	-
Ширина на билото	6,00	-
Воден откос	1 : 3,00	-
Въздушен откос (дренажна призма)	1:2,50 (1:1,50)	-
Ширина на преливно съоръжение	72,60	-
Обем на масовия насип с опорната призма	-	0,425

От направените проучвания става ясно, че наличните почвени материали за изграждане тялото на язовирната стена (едрозърнести и среднозърнести пясъци) имат необходимите физико-механични свойства и могат да бъдат използвани за направа на основния насип, но не могат да осигурят необходимата водоплътност на стената. Липсата на подходящ водоплътен материал за изграждане на противофилтрационен елемент е довела до избора на екран от полимерни материали. Предвидено е той да се изпълни от двустранно грапаво HDPVC фолио с дебелина 2 mm, като се полага непосредствено върху подравнения насип от латерит по откоса. Отделните листове се заваряват помежду си с термична заварка на място.

Връзката между геомембраната и основата става посредством бетонен зъб по контура на екрана и специална PVC лента "Polylock" между тях. Пред зъба е предвидена бетонова плоча (плинт), от която в участъците с изветряла и водопрopusклива основа се изпълнява инжекционна завеса, осигуряваща необходимата водоплътност на скалата.

Върху екрана е предвидена бетонова плоча с дебелина 0,20 m изпълнявана със системата "Geoweb", която служи за защита на мембраната от атмосферни и механични въздействия.

3. Същност на проблема

В последните десетилетия се наблюдава все по-засилено използване на съвременни синтетични материали в язовирното строителство. Едни от основните причини за този факт са техните предимства пред естествените материали. Те притежават относително изотропни свойства, дължащи се на технологията им на изработка. Отличават се със сравнително ниското си тегло, лесен транспорт, полагане и монтаж. Не изискват тежка механизация, по-гъвкави са по отношение на атмосферните условия и позволяват сериозен дневен напредък, а оттам и кратки срокове за строителство.

Наред с предимствата си изкуствените материали имат и своите особености. От съществено значение за тяхната сигурност и дълговечност се явява основата, върху която се полагат и покриващите пластове за защитата им.

Както при всички подобни случаи, основата, върху която ще се положи геомембраната на язовирна стена Монгу, трябва да бъде добре уплътнена и подравнена, слабо деформируема, без едри и остри късове, които биха могли да я повредят. Необходим е и сериозен контрол по отношение на съединяването на отделните листове посредством заваръчни шевове.

Много често неспазването на някои от изброените по-горе условия по изпълнение на водоплътния елемент, могат да бъдат причина за неговото компрометиране. Повод за настоящата статия е да се даде отговор на въпроса: Какво влияние върху филтрационната картина на стената оказват повреди по водоплътния екран, разположени на различна височина по него?

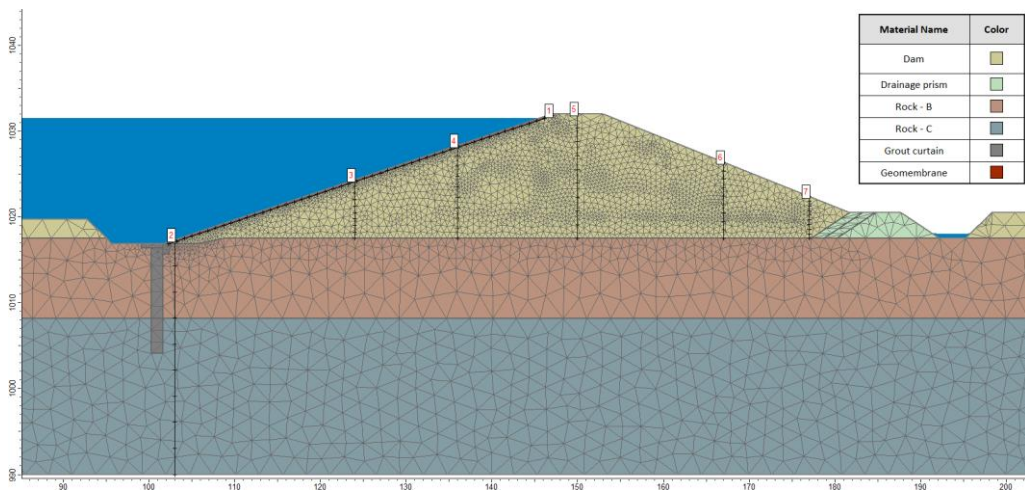
4. Методика на изследванията

Причините за компрометиране на водоплътните елементи и поява на отвори (разкъсвания) в тях могат да бъдат от различно естество, но повечето от тях са свързани предимно с начина на съединение на геомембраната с отделни конструктивни елементи и най-вече с уплътнението на основата, върху която се полагат. Такива причини могат да бъдат:

- поради недобра връзка между екран и бетонен зъб (или плинт);
- недобро уплътнение на насипа под екрана, което може да доведе до неравномерни деформации и разкъсване на геомембраната;
- от отваряне на заваръчен шев между две платна и др.

Вижда се, че отваряния (респективно разкъсвания) в геомембраната могат да настъпят на различни нива във височина на стената. По тази причина, за да се обхванат различни сценарии, са възприети следните стъпки на проведените филтрационни изследвания:

- Направа на числени модели от крайни елементи, включващи стената и пропускливата скална основа.
- Първи изчислителен случай – изследване на стационарна филтрация при пълен до най-високо работно водно ниво (НВРВН) язовир и здрав, некомпрометиран водоплътен елемент. Резултатите от този модел са базови и служат за съпоставка с резултатите от останалите разгледани изчислителни случаи.
- Девет изчислителни случая, включващи – стационарна филтрация при пълен язовир и „отваряне“ (пробив) в геомембраната на различна височина: в петата (контакта с бетоновия зъб), на кота, съпадаща с долното водно ниво (тъй като водната пета е под тази кота) и съответно на височини 20%, 40%, 60%, 80%, 87%, 90% и 100% от максималния напор (разликата между НВРВН и ДВН).
- За целите на изследването е разгледан най-високият напречен профил в десния скат, в чиято основа се намира мощен пласт от изветряла и по-пропусклива скала (фиг. 1). Той е с 4,7 m по-нисък от максималния профил, но водопрпускливата основа е фактор за по-голямото водонасищане в тялото на стената.



Фиг. 1. Мрежа от крайни елементи

Моделираният профил включва следните пластове с техните характеристики:

Таблица 2

Име на пласта	Описание	Макс. дебелина, m	Коеф. на филтрация, K_f , m/s
Rock – С	свежи здрави гранити	18,20	$2,894.10^{-7}$
Rock – В	изветрели скали	9,30	$2,315.10^{-6}$
Dam	насипна стена от латерит	14,50	$1,150.10^{-5}$
Grout curtain	инжекционна завеса	1,40 / 12,30	$1,157.10^{-7}$
Geomembrane	геомембрана (бетон)	2 mm (20 cm)	-

Дискретизацията на стената с основата включва мрежа от 8116 триъгълни крайни елемента, която е съгъстена в областта на геомембраната и позволява моделиране на отвори в нея с широчина до 0,20 m и дължина (в напречна посока) 1 m поради факта, че се разглежда равнинен модел. Всъщност такъв тип модел може да характеризира дълги цепнатини в геомембраната, които не са изключени при по-дълги стени. Разбира се, при къси пукнатини в мембраната следва да се разглежда тримерен модел, при който може да бъде отчетен пространственият ефект на явлението.

За по-точното интерпретиране на резултатите от изследванията са разгледани 7 профила, представени на фиг. 1:

- профил 1 – под геомембраната;
- профил 2 – зад инжекционната завеса;
- профили 3 и 4 – по воден откос;
- профил 5 – в оста на стената;
- профили 6 и 7 – съответно в средата и петата на въздушния откос.

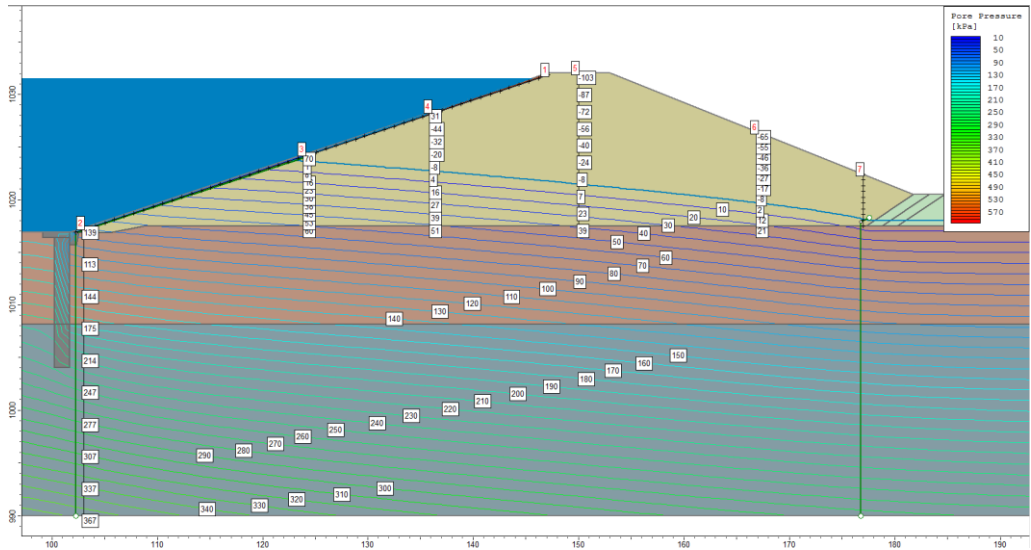
Визуализирани са резултатите в десет точки на всяко сечение през равни интервали. Направено е сравнение и на филтриралите водни количества, градиенти на напора и скорости на филтрационния поток за всички изчислителни случаи.

5. Резултати от изследванията

Противно на някои разбирания, че щом има непропусклива геомембрана следва да се очаква напълно сух насип след нея, в тялото на стената се получава частично водонасищане и се формира депресионна повърхност. Нейното положение зависи преди всичко от отношенията между коефициентите на филтрация на пластове в основата и инжекционната завеса, през които се формира филтрационен поток и материалите в тялото на стената.

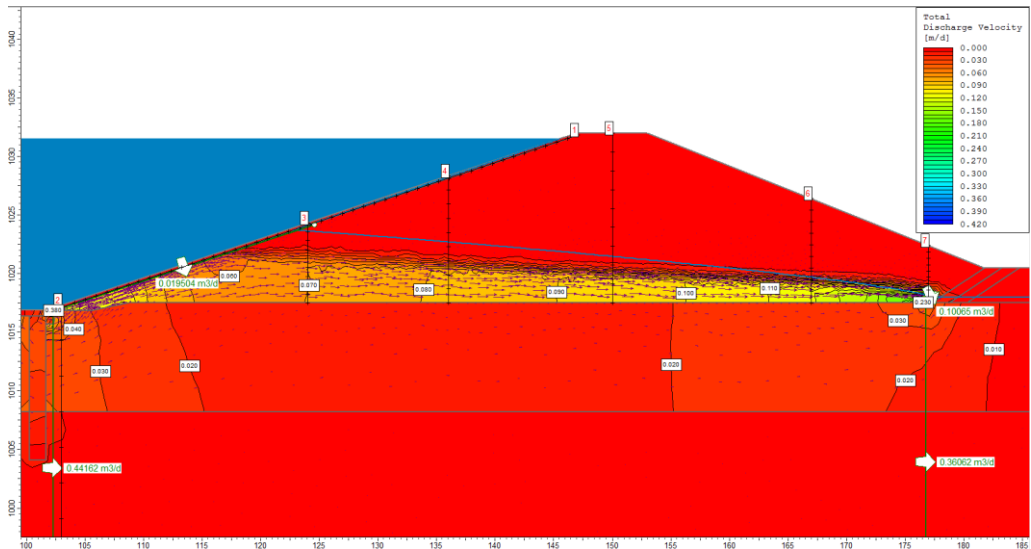
За установяване на максималната граница на водонасищане при изправна геомембрана служи първият изчислителен случай.

Изследването показва, че при нормална експлоатационна безаварийна работа на съоръженията и пълен язовир се очаква депресионна повърхност в тялото на стена до 6,20 m след екрана, което представлява редукция на максималния напор от 54%. Тя зауства параболично в дренажната призма, като дебелината на водонаситения пласт в тялото на стената в нейната ос (сечение 5) е 3,96 m, а в сечение 6 – 2,19 m. Налягането на водата след известна редукция от инжекционната завеса е равномерно разпределено в стената и основата (фиг. 2).

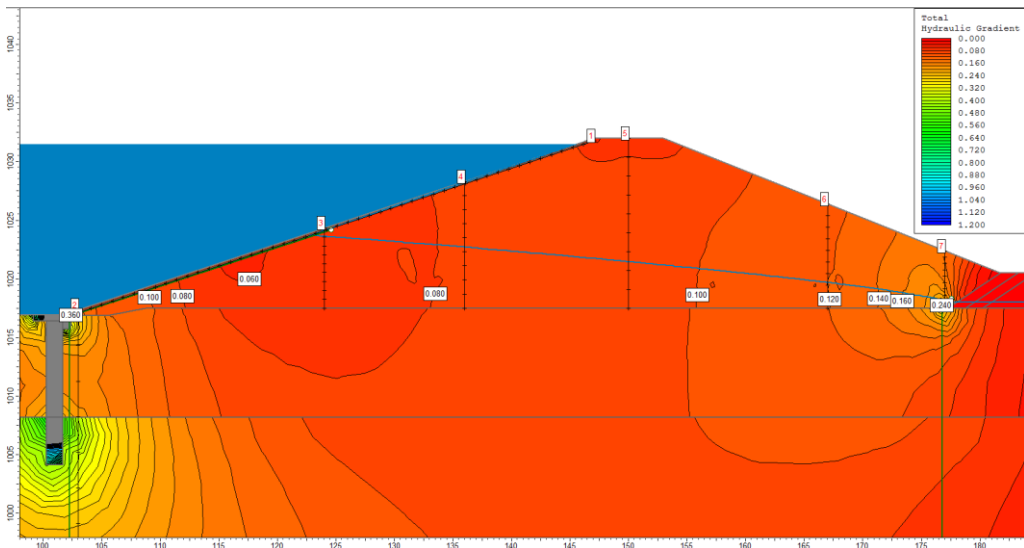


Фиг. 2. Разпределение на налягането при неповредена геомембрана

Филтриралото водно количество през изследваната област, включваща основата е $0,461 \text{ m}^3/\text{d}$, като през стената в дренажната призма втичат $0,101 \text{ m}^3/\text{d}$. Скоростите на филтрационния поток разбираемо са най-големи в по-пропускливия пласт на стената. Те имат максимална стойност $0,38 \text{ m/d}$ при навлизането на филтриралата вода в насипа след инжекционната завеса, а при заустването в дренажната призма стойността достига $0,23 \text{ m/d}$ (фиг. 3).



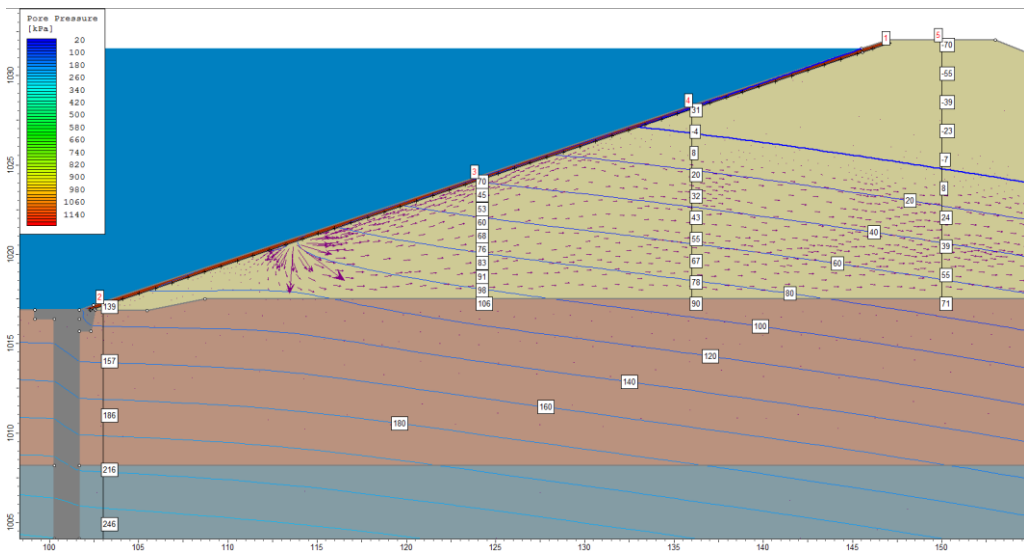
Фиг. 3. Разпределение на скоростите на филтрационния поток



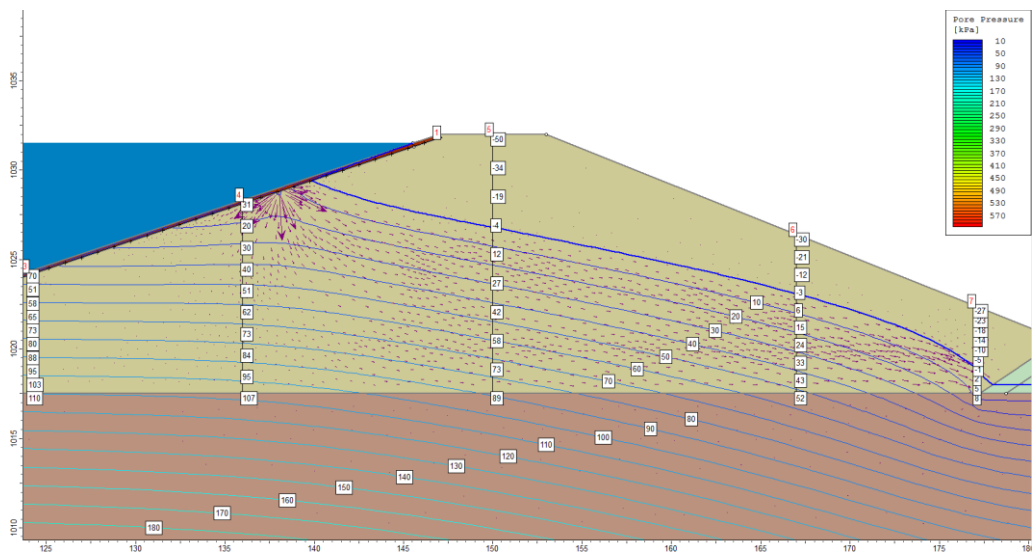
Фиг. 4. Изменение на хидравличните градиенти

Аналогични на филтрационните скорости са и хидравличните градиенти, като максималната им стойност в стената 0,36 отново се явява при водната пета на насипа след инжекционната завеса, а пред дренажната призма стойността достига 0,24 (фиг. 4).

Какво показват резултатите от изследванията при различни по височина местоположения на разкъсвания в геомембраната?

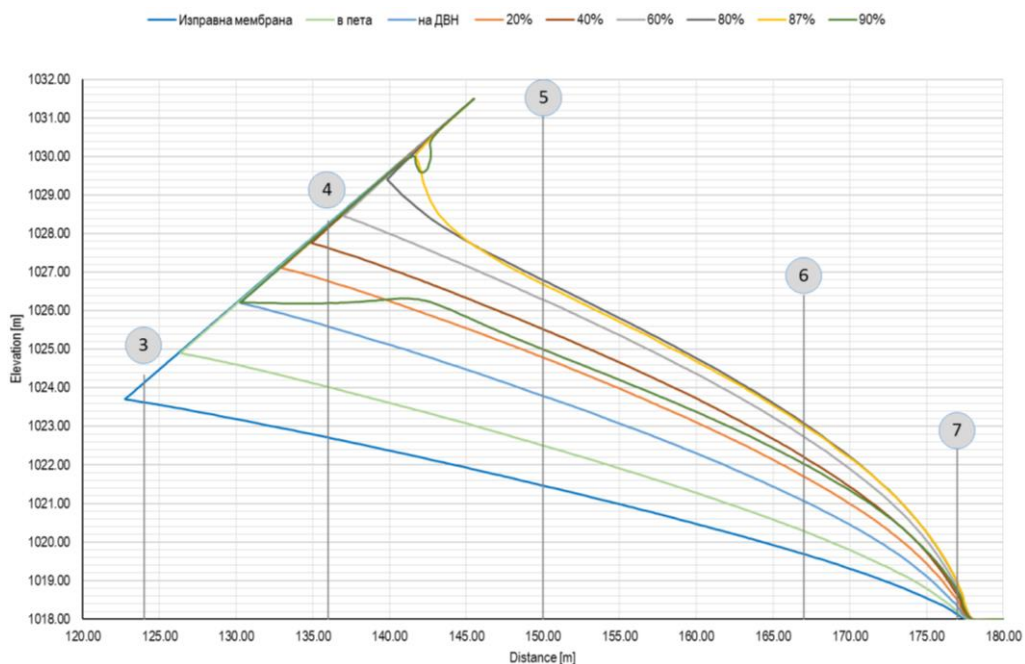


Фиг. 5. Разпределение на налягането и вектори на скоростите при повредена геомембрана на височина 20%Н



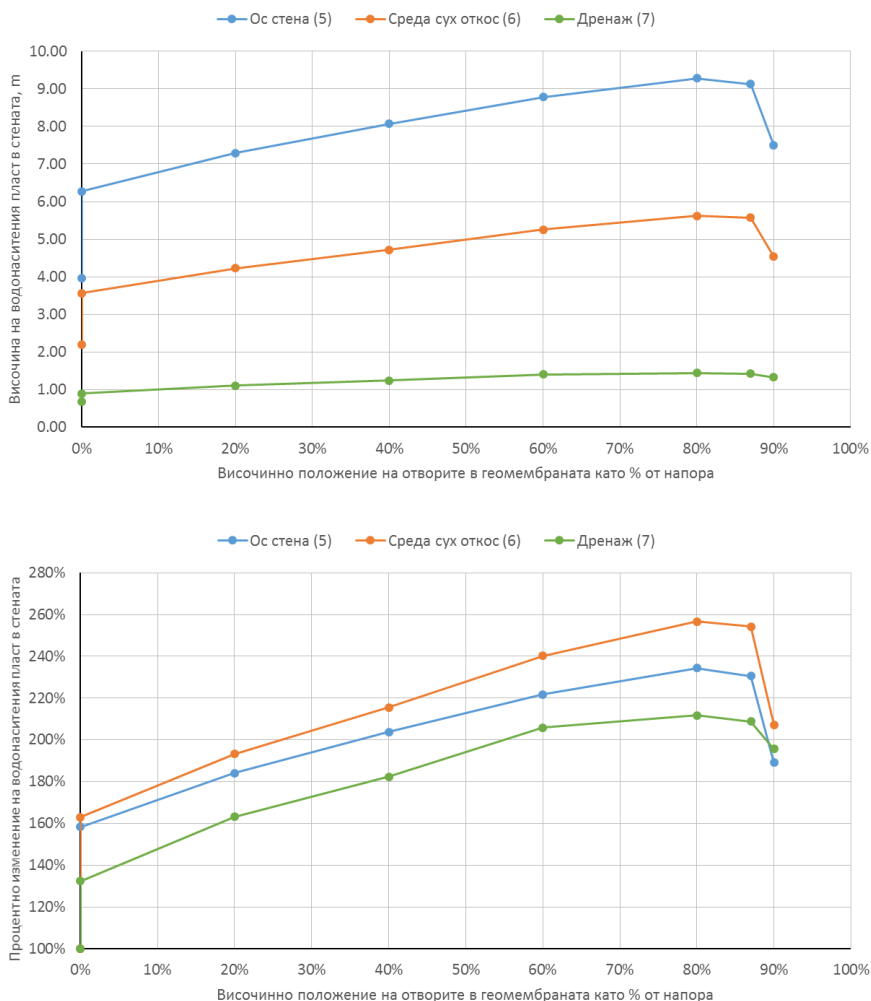
Фиг. 6. Разпределение на налягането и вектори на скоростите при повредена геомембрана на височина 80%Н

Поради по-пропускливата среда на насипа, в стената след прорезите на екрана се формира сериозен филтрационен поток. Той успява да водонасити по-голяма част от нея и да формира по-висока депресионна повърхност. На фиг. 7 са обединени депресионните криви, получени от всички разгледани случаи.



Фиг. 7. Изменение на депресионната повърхност в зависимост от местоположението на процепа в геомембраната

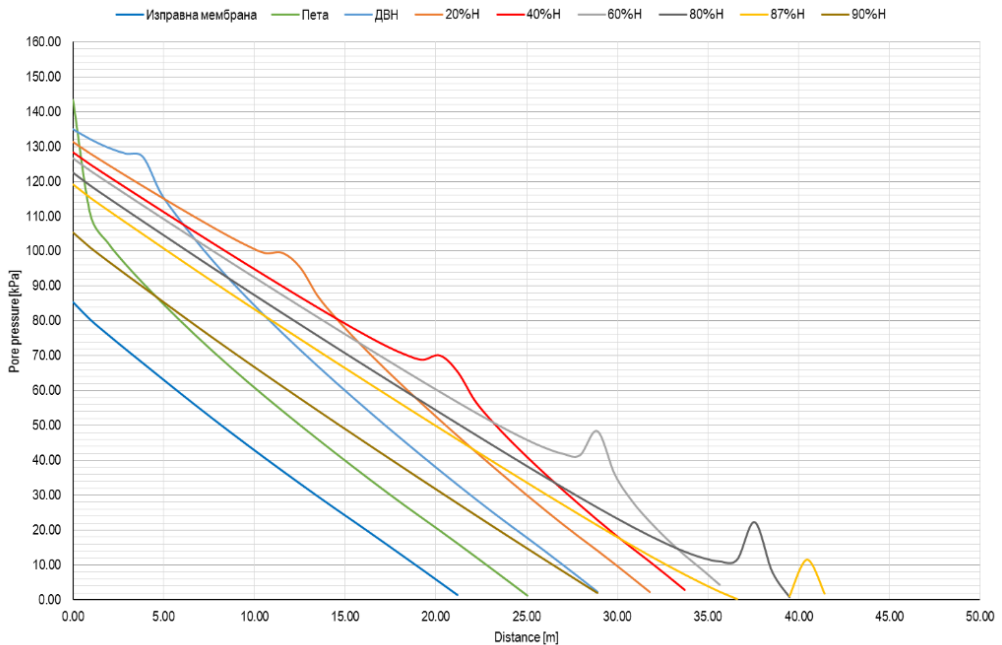
От графиката ясно се вижда, че колкото местоположението на процепа е на по-ниска кота, толкова и границата на водонасищане е по-ниска. С увеличаване на височинното положение на разкъсването расте и положението на депресионната повърхност. Едно от обяснения на този факт може да бъде това, че филтрационният поток през по-ниско разположен отвор среща по-голямото съпротивление на водонаситения пласт над него. В тези случаи определяща е хоризонталната проводимост на насипа, която „не позволява“ значително повдигане на депресионната повърхност. Когато отворът е разположен на по-висока кота (около и над депресионната крива при изправна мембрана), част от филтрационния поток се спуска гравитационно, като подхранва депресионната повърхност и поема към дренажната призма. Видно е също, че при конкретните отношения на коефициентите на филтрация и разкъсвания в екрана, намиращи се над 85%Н, количеството преминало през отвора, не може да водонасити напълно насипа и това води до по-ниска депресионна повърхност (90%Н).



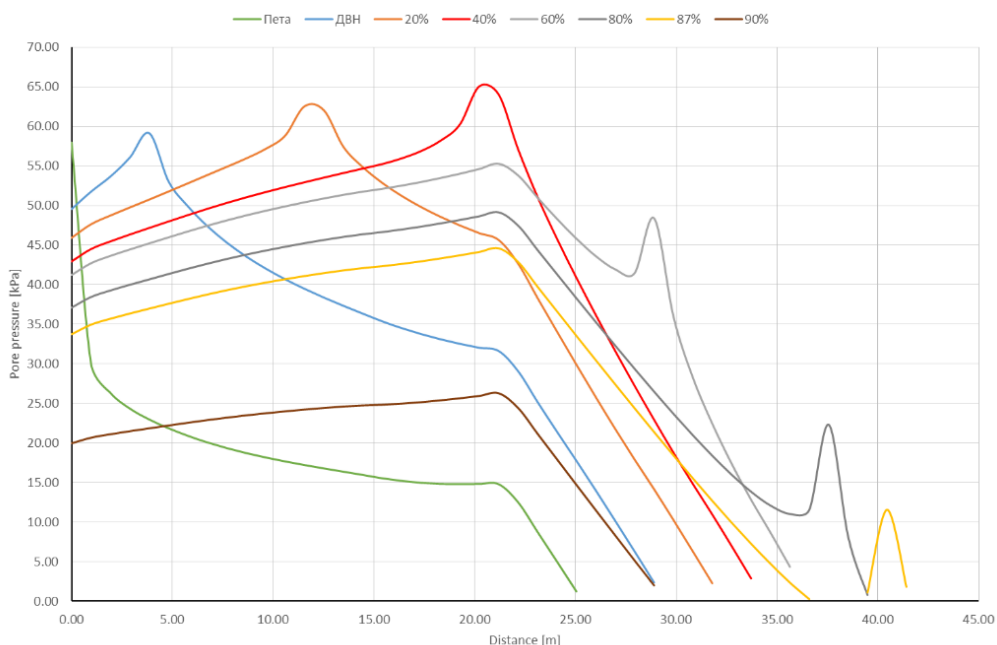
Фиг. 8. Изменение на височината на водонаситения пласт в стената за характерни сечения

Повишението на депресионната повърхност води до повишение съответно на напора и налягането под нея, което има пряко отношение върху стабилитета на стената. На фиг. 8 са представени абсолютните стойности и процентното изменение на височината на водонаситения пласт в стената в трите сечения (5, 6 и 7), в които налягането оказва сериозно влияние върху устойчивостта на въздушния откос. От тях по-ясно се вижда плавното увеличение на напора (налягането, депресионната повърхност) в зависимост от височинното положение на разкъсването и получените максимални стойности за 80 – 85% от напора. От втората графика ясно личи, че това увеличение може да достигне сериозните 2,6 пъти спрямо стойностите, получени при изправна геомембрана за средата на въздушния откос (сечение 6), където изпъкването на депресионната повърхност в случая е най-голямо. Това неминуемо от своя страна би довело до редуциране на коефициента на сигурност срещу хлъзгане на откоса, което в случая не е предмет на настоящия доклад.

Естествено, при повишаване на депресионната повърхност се наблюдава увеличение на налягането и в останалите части от стената и основата. В сечения 2, 3 и 4 те имат линейна функция. В сечение 1 под екрана от петата до билото, функциите на налягането имат криволинейно очертание, дължащо се на различните участъци на втичане на филтрационния поток (фиг. 9). Докато при изправна геомембрана налягането под нея се „разпростира“ на дължина 20 m, то с нарастване на депресионната повърхност се увеличава дължината, върху която то действа и стойностите на това налягане. Максимална разлика спрямо началните стойности се явява при положение на отвора на височина 40%, която приблизително съответства на началното положение на депресионната повърхност след екрана (фиг. 10). Това повишено налягане неминуемо ще окаже влияние върху устойчивостта на водния откос. Най-малкото ще има необходимост от по-дълъг период за изтакане на язовира при необходимост и дрениране на тялото на стената.



Фиг. 9. Диаграми на налягането под геомембраната в сечение 1



Фиг. 10. Разлики на налягането в сечение 1 спрямо началните при изправна геомембрана

В табл. 3 са представени измененията на филтриралите водни количества, градиенти на напора и скоростите на филтрационния поток в тялото на стената. Функциите им по вид следват тенденциите на изменение на налягането и напора, като отново се получават максимални стойности за положение на отворите на 80 – 85% от Н. Прави впечатление, че значително завишение се наблюдава във филтриралите водни количества. Докато сумарното през целия модел може да нарасне 4,5 пъти при 87%, то това през тялото на стената може да го надвиши приблизително 13 пъти, което в определени ситуации може да се окаже сериозна загуба на вода.

Що се отнася до градиентите на напора и скоростите на филтрационния поток, те също могат да нараснат до 7 – 8 пъти, но като абсолютни стойности са относително ниски.

Таблица 3

		Изправна мембрана	Пета	ДВН	20% Н	40% Н	60% Н	80% Н	87% Н	90% Н	100% Н
Филтр. кол-во q, m³/d	Общо	0.461	0.688	0.974	1.256	1.515	1.805	2.037	2.054	1.615	0.912
	През стена	0.101	0.171	0.271	0.376	0.891	1.100	1.280	1.302	1.005	0.560
Градиенти	Водна пета	0.36	3.00	2.00	1.90	3.00	2.60	3.00	2.70	3.20	5.90
	Др. призма	0.24	0.35	0.40	0.60	0.70	0.80	0.90	0.90	0.75	0.44
Скорости V, m/d	Водна пета	0.38	3.00	2.05	1.96	3.10	2.70	3.00	2.75	2.90	0.90
	Др. призма	0.23	0.35	0.45	0.60	0.70	0.80	0.90	0.90	0.75	0.42

6. Заключение

Направените изследвания показват, че повреди като дълги цепнатини в геомембраната могат да предизвикат сериозни промени върху филтрационната картина на

язовирна стена Монгу. Изведените зависимости дават основание да бъдат направени следните обобщени изводи:

- евентуална дълга пукнатина в геомембраната като водопълтен елемент може да промени значително филтрационната картина в една язовирна стена;
- положението на депресионната повърхност зависи както от отношението между коефициентите на филтрация в отделните пластове, така и от местоположението на повредата в мембраната;
- по-неблагоприятно въздействие имат цепнатини във водопълтния елемент, разположени около и над очакваното положение на депресионната повърхност в тялото на стената от тези, разположени в петата или по горния край на екрана;
- при определени обстоятелства са възможни повишения на депресионната повърхност и увеличаване на налягането в стената повече от 2,5 пъти спрямо тези при некомпрометирана геомембрана;
- загубите на вода вследствие филтрация през и под стената могат също да нараснат повече от 4 пъти при наличие на дълги цепнатини в геомембраната;
- при наличие на повреди по водопълтния елемент е препоръчително да се направят проверки относно необходимото време за пълно изтакане на язовира и на устойчивостта на откосите при актуализирана филтрационна картина.

Необходимо е да се изтъкне фактът, че представените в доклада зависимости са валидни при настоящите отношения между коефициентите на филтрация на стената, основата и завесата, и местоположението на дренажа.

Друга важна особеност представлява фактът, че с използваните равнинни задачи се моделират дълги цепнатини в мембраната. При наличие на къси отвори в нея е налице пространствен ефект. В този случай, поради движението на филтрационния поток и в напречна на сечението посока, следва да се очаква по-слабо изменение на филтрационната картина и то в по-къс участък от стената.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Материали* от Compact Commerce ltd. Mangu Regional Water Supply Project Dam & Access Road.
2. *Slide Documentation*. Rocscience Inc, Toronto, Ontario, Canada.
3. *Тошев, Д., Т. Чолаков*. Числени анализи за възстановяване на язовирна стена „Зейзун“ – Сирия. Трети Българо-Австрийски семинар „Насипни язовирни стени и диги“, София, 25 – 26 октомври 2007.

SEEPAGE ANALYSIS OF EARTHFILL DAM WITH TORN GEOMEMBRANE AS WATERTIGHT ELEMENT

T. Cholakov¹

Keywords: dams, seepage, geomembrane

ABSTRACT

In recent decades, geosynthetic materials have been increasingly used in dams. Various factors lead to the implementation of earthfill dams with a watertight element geomembrane instead of the usual common natural materials in nature, such as clay. Sometimes reasons of different nature, such as a substandard structural element, not well-compacted embankment under the geomembrane, or poor jointing, can lead to its tearing and compromise.

The paper analyzes the upcoming changes in the seepage on an embankment dam, in the case of geomembrane tearing of a certain size and location at different levels of the height of the dam. Variations and relations of different seepage parameters are presented based on numerical modeling of the Mongu dam in Niger. Conclusions and recommendations have been made, which could be useful in the design, construction and operation of similar type hydraulic structures.

¹ Tonyo Cholakov, Dr. Eng., Dept. "Hydraulic Engineering", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tonyomc_fhe@uacg.bg